



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE - ARCHITETTURA

TESI DI LAUREA

TITOLO
AUTOMAZIONE AI NEL PROCESSO SCAN-TO-BIM PER GLI EDIFICI STORICI
DALLA NUVOLA DI PUNTI ALL'ARRICCHIMENTO INFORMATIVO
DEL MODELLO

Candidato: Marco Dell'Orto

Relatore: Prof.ssa Francesca Picchio
Correlatore: Dr. Hangjun Fu

A.A.2025/2026

Indice

1	<i>Introduzione</i>	3
2	<i>Scan-to-BIM e HBIM per il patrimonio costruito: stato dell'arte</i>	8
2.1	Il <i>workflow</i> tradizionale e le sue criticità nel settore AEC	9
2.2	HBIM per il patrimonio costruito: specificità, sfide e opportunità	10
2.3	L'arricchimento semantico dei modelli informativi: stato dell'arte	12
3	<i>Il quadro normativo e informativo</i>	14
3.1	Il quadro legislativo: il Codice dei contratti pubblici	15
3.2	Le norme tecniche: UNI 11337 e UNI EN ISO 19650	15
3.3	Dal LOD al LOIN: la UNI EN 17412-1 e il patrimonio storico	16
4	<i>Intelligenza artificiale per nuvole di punti, immagini e documenti</i>	19
4.1	Dalle regole ai dati: l'automazione dello Scan-to-BIM	20
4.2	Reti neurali per nuvole di punti	22
4.3	Il dataset ArCH e le indicazioni per la sperimentazione	23
4.4	Modelli linguistici come agenti e modelli fondazionali per le immagini	24
5	<i>Il caso studio: l'ex chiesa di Santa Maria in Brera</i>	26
5.1	Inquadramento storico e caratteri architettonici dell'edificio	27
5.2	Campagna di rilievo: strumentazione, metodologia e acquisizione laser scanner	32
5.3	Articolazione della sperimentazione e ambiti di applicazione	37
5.4	Raccolta della documentazione multimodale: archivi storici, fotografie, ortofoto	39
6	<i>Metodologia proposta</i>	42
6.1	Il <i>workflow</i> in tre fasi	43
6.2	Strumenti software e ambienti di sviluppo	47
7	<i>Prima fase: la segmentazione semantica della nuvola di punti</i>	50
7.1	Pulizia, registrazione e strutturazione delle nuvole di punti	51
7.1.1	Il sottocampionamento spaziale e la sua necessità	51
7.1.2	Calcolo delle normali e traslazione all'origine	53
7.1.3	Strutturazione del <i>ground truth</i> e annotazione delle classi semantiche	54
7.2	Architettura di rete per l'elaborazione 3D: l'impiego della Dynamic Graph CNN (DGCNN)	55
7.3	Addestramento del modello e classificazione automatica sulle classi semantiche	57
7.3.1	Curve di apprendimento	58
7.4	Valutazione delle metriche (accuratezza e mIoU) e output della nuvola etichettata	60
7.4.1	Analisi per singola classe e matrice di confusione	61

7.4.2 Validazione visiva e output del processo.....	63
7.5 Analisi delle criticità e dei limiti della segmentazione semantica	67
7.5.1 Ambiguità geometrica e confusione di confine	67
7.5.2 Forte sbilanciamento delle classi	67
7.5.3 Eterogeneità morfologica e limiti strumentali	68
7.5.4 Variazioni di densità e ridondanza del dato.....	68
7.6 Raffinamento dei bordi con l'ortoimmagine sul fronte ovest.....	68
7.7 Considerazioni conclusive	72
8 Seconda fase: l'automazione della modellazione geometrica	73
8.1 Isolamento degli elementi dalla nuvola segmentata.....	74
8.2 Estrazione delle geometrie	75
8.2.1 Pilastri.....	79
8.2.2 Archi	83
8.2.3 Volte	85
8.2.4 Finestre	86
8.2.5 Porte.....	89
8.2.6 Muri	91
8.2.7 Pavimento	94
8.3 Generazione degli elementi parametrici.....	95
8.4 Confronto con la modellazione manuale.....	99
9 Terza fase: l'arricchimento informativo del modello	102
9.1 Definizione della porzione di test	103
9.2 Estrazione automatica degli attributi.....	106
9.2.1 Modulo SE-1: classificazione dei materiali	107
9.2.2 Modulo SE-2: estrazione della conoscenza storica.....	110
9.3 Popolamento del modello informativo.....	113
9.4 Confronto con l'arricchimento manuale	120
10 Discussione critica dei risultati e protocollo operativo	123
10.1 Vantaggi dell'automazione nelle tre fasi	124
10.2 Limiti, criticità e condizioni di applicabilità	127
10.3 Proposta di protocollo operativo	128
11 Conclusioni e sviluppi futuri.....	131
11.1 Sintesi dei contributi della tesi	132
11.2 Prospettive di sviluppo	133
Bibliografia	136
Normativa	140
Sitografia.....	141
Elenco delle figure	143
Elenco delle tabelle	147

1 Introduzione

Conoscere un edificio esistente significa poterne descrivere la geometria, i materiali e la storia con una precisione adeguata alle decisioni da prendere, e per il patrimonio storico questa conoscenza è la premessa di ogni intervento. La metodologia BIM (*Building Information Modeling*) che dà a questa conoscenza una forma operativa, si è imposta come paradigma di riferimento per la gestione informativa dell'intero ciclo di vita dell'opera, evolvendo da semplice strumento di modellazione tridimensionale a infrastruttura di gestione del dato. Quando l'oggetto della digitalizzazione non è un edificio di nuova costruzione, ma un manufatto esistente (e a maggior ragione un bene di interesse storico-architettonico), il processo prende una connotazione specifica, identificata in letteratura con l'acronimo HBIM (*Historic Building Information Modeling*). In questo contesto il punto di partenza non è il progetto, ma la realtà costruita, rilevata di norma con tecnologie di acquisizione massiva come il *laser scanning* terrestre e la fotogrammetria digitale (o *Structure from Motion*), in grado di generare nuvole di punti molto dense. Il passaggio dalla nuvola di punti al modello parametrico rappresenta il collo di bottiglia dell'intero flusso: la modellazione manuale degli elementi a partire dal dato grezzo richiede tempi considerevoli e introduce una forte componente di soggettività interpretativa. La Figura 1.1 mostra, sul fronte dell'edificio studiato in questa tesi, i tre stati che il dato attraversa: la nuvola di punti del rilievo, la geometria ricostruita e il modello informato, in cui di ogni elemento si dichiarano i materiali e la storia, con una prima indicazione sullo stato di conservazione.

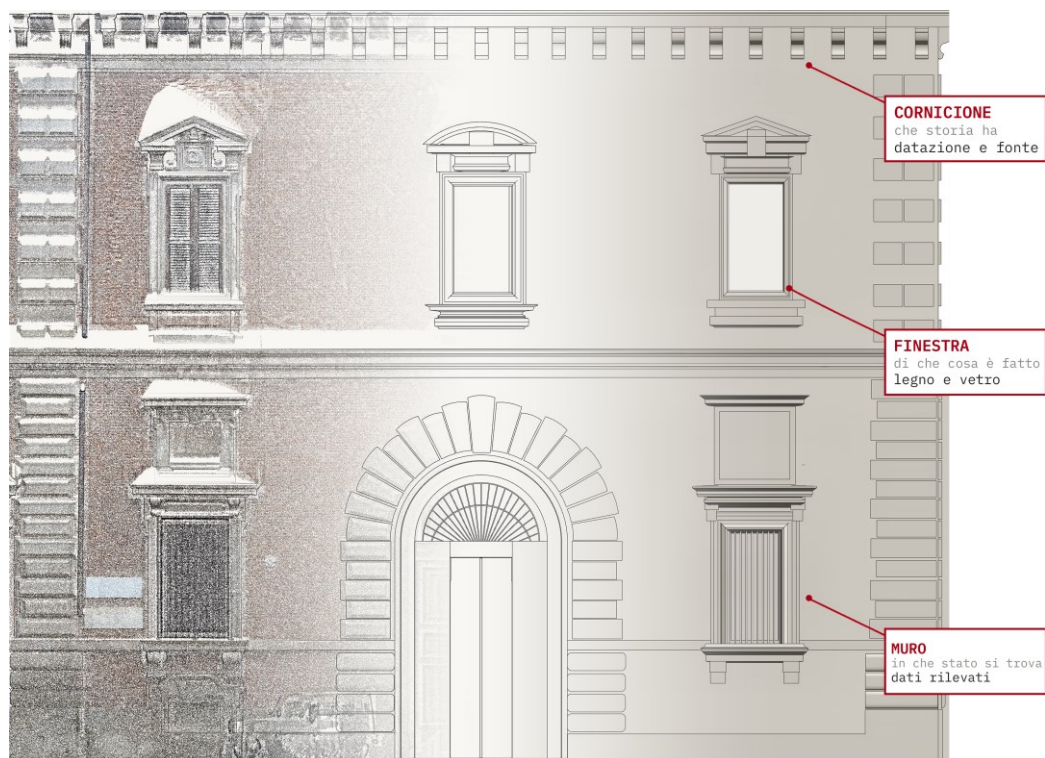


Figura 1.1. I tre stati del dato sul fronte ovest dell'ex chiesa di Santa Maria in Brera: la nuvola di punti del rilievo, la geometria ricostruita e il modello informato.

I progressi dell'intelligenza artificiale nell'elaborazione dei dati tridimensionali aprono oggi la possibilità di automatizzare porzioni rilevanti di questo processo. Reti neurali capaci di operare direttamente su nuvole di punti permettono di riconoscere automaticamente la natura semantica degli elementi rilevati, trasformando un insieme indistinto di coordinate in un dato strutturato e interrogabile; modelli linguistici di grandi dimensioni, usati come agenti collegati a software di modellazione, possono ideare, scrivere ed eseguire procedure di misura e di costruzione degli oggetti parametrici; classificatori supervisionati e modelli di segmentazione delle immagini pre-addestrati su larga scala, utilizzabili senza un addestramento dedicato, possono leggere i materiali e i confini degli elementi su un'ortofotografia metrica. È in questo spazio di innovazione che si colloca la sperimentazione di questa tesi.

La tesi nasce da una domanda centrale: in che misura l'integrazione di algoritmi di intelligenza artificiale nel flusso Scan-to-BIM consente di ridurre i tempi di produzione del modello e di arricchirne il contenuto informativo, mantenendo un livello di affidabilità compatibile con gli usi previsti per il patrimonio costruito?

Da questa domanda discendono gli obiettivi specifici, che strutturano il lavoro:

- definire e sperimentare una *pipeline* di segmentazione semantica automatica della nuvola di punti, basata su una rete neurale *Dynamic Graph Convolutional Neural Network* (DGCNN), e valutarne quantitativamente le prestazioni con metriche standard (OA – accuratezza globale e mIoU – *Mean Intersection Over Union*), verificando inoltre se un vincolo bidimensionale ricavato da un'ortoimmagine possa correggere gli errori di bordo della rete;
- automatizzare la modellazione geometrica dell'involucro architettonico a partire dalle classi riconosciute, affidando ad un agente basato su un modello linguistico la scrittura e l'esecuzione delle procedure di misura e di generazione delle famiglie parametriche in Autodesk Revit, con verifica numerica di ogni elemento con la nuvola di punti;
- arricchire il livello informativo del modello su una porzione rappresentativa dell'edificio, associando agli elementi materiali e conoscenza storica ricavati da classificatori, da immagini e da documentazione, insieme allo stato di conservazione osservato a vista (non un'analisi del degrado), e scrivendoli come parametri con provenienza dichiarata;
- verificare l'applicabilità del Livello di Fabbisogno Informativo (LOIN) agli interventi sul patrimonio storico, svincolando la complessità geometrica del modello dalla sua effettiva utilità informativa;
- quantificare, attraverso indicatori di prestazione, il dispendio temporale e la qualità dell'approccio automatizzato rispetto alla procedura manuale di riferimento;
- delineare un protocollo operativo replicabile su casi analoghi di patrimonio architettonico, in cui sia dichiarato per ogni passaggio quale tecnica di intelligenza artificiale interviene e quale compito resta all'operatore.

Il testo è organizzato in undici capitoli. Il Capitolo 2 ricostruisce lo stato dell'arte del processo Scan-to-BIM, dell'HBIM e dell'arricchimento semantico dei modelli; il Capitolo 3 presenta il quadro normativo e informativo, con attenzione al passaggio dal Livello di Sviluppo (LOD) al Livello di Fabbisogno Informativo

(LOIN); il Capitolo 4 presenta le tecniche di intelligenza artificiale impiegate, dalle reti neurali per dati tridimensionali ai modelli linguistici usati come agenti, con il dataset di riferimento del patrimonio. Il Capitolo 5 introduce l'ex chiesa di Santa Maria in Brera, la campagna di rilievo laser scanner, l'articolazione della sperimentazione e la documentazione multimodale raccolta; il Capitolo 6 espone la metodologia, gli strumenti e gli indicatori di prestazione. I Capitoli 7, 8 e 9 documentano le tre fasi sperimentali: la segmentazione semantica della nuvola con rete DGCNN e il successivo affinamento dei bordi in facciata, la modellazione geometrica automatica delle sette classi architettoniche e l'arricchimento informativo del fronte ovest e di un pilastro campione. Il Capitolo 10 discute i risultati, ne indica i vantaggi e i limiti e propone il protocollo operativo; il Capitolo 11 raccoglie le conclusioni e gli sviluppi futuri.

2 Scan-to-BIM e HBIM per il patrimonio costruito: stato dell'arte

2.1 Il *workflow* tradizionale e le sue criticità nel settore AEC

Il processo Scan-to-BIM costituisce la catena di operazioni che, a partire dall'acquisizione tridimensionale di un edificio esistente (di solito con *laser scanning* terrestre o fotogrammetria) conduce alla costruzione di un modello informativo parametrico (BIM) rappresentativo dello stato di fatto (*as-built o as-is*). Il dato di rilievo, restituito sotto forma di nuvola di punti densa e metricamente accurata, è insieme il punto di partenza del flusso e il riferimento di verità con cui valutarne la fedeltà.

Nonostante la diffusione di strumenti di acquisizione sempre più rapidi e accurati, la conversione della nuvola in modello rimane in gran parte manuale, lenta e soggetta a errori.¹ Il modellatore opera per ricalco: interpreta visivamente la nuvola, riconosce gli elementi costruttivi e ne replica la geometria con gli oggetti parametrici disponibili nel software di modellazione. La procedura introduce una forte soggettività interpretativa e rende il risultato poco ripetibile, perché la qualità del modello dipende dall'esperienza dell'operatore e dalle scelte compiute caso per caso. La Figura 2.1 riassume la sequenza tradizionale e colloca il collo di bottiglia nella modellazione manuale, l'unico passaggio della catena che si misura in settimane di lavoro anziché in ore.

Le difficoltà si accentuano quando l'oggetto della digitalizzazione è un edificio esistente. Una rassegna sistematica condotta su oltre 180 contributi mostra che il BIM applicato al costruito è ancora poco diffuso e che i problemi principali stanno nella creazione automatizzata del modello, nel suo aggiornamento e nella gestione dell'incertezza di dati di partenza spesso incompleti o non aggiornati.² A ciò si aggiunge la difficoltà di tradurre il dato geometrico grezzo in informazione semantica strutturata: la nuvola di punti, di per sé, è un insieme non organizzato di

¹ Hélène Macher, Tania Landes e Pierre Grussenmeyer, «From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings», *Applied Sciences* 7, n. 10 (2017): 1030, pp. 1-2; Pingbo Tang et al., «Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques», *Automation in Construction* 19, n. 7 (2010): 829-843, pp. 829 e 831.

² Rebekka Volk, Julian Stengel e Frank Schultmann, «Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs», *Automation in Construction* 38 (2014): 109-127, p. 109.

coordinate privo di significato architettonico, e attribuire a ciascun elemento la propria natura (muro, volta, colonna) resta un compito quasi tutto umano.³

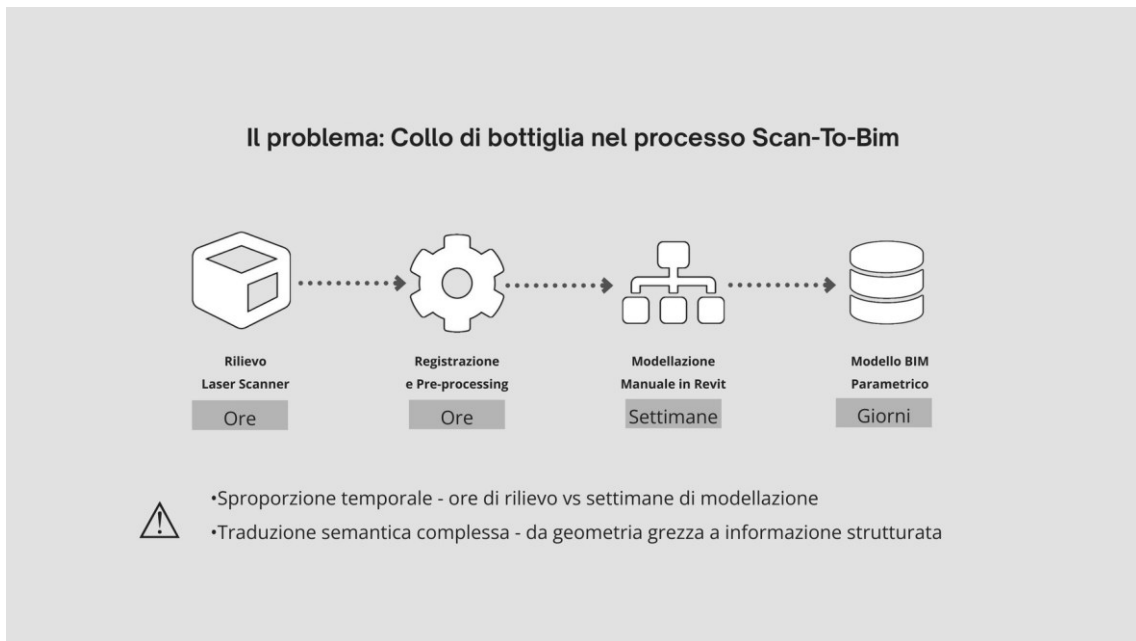


Figura 2.1. Il flusso di lavoro tradizionale Scan-to-BIM e il collo di bottiglia rappresentato dalla modellazione manuale per ricalco.

Il peso della modellazione manuale sui tempi e sui costi complessivi è, in definitiva, il principale freno alla scalabilità dello Scan-to-BIM, e motiva la ricerca di metodi che automatizzino, almeno in parte, il riconoscimento degli elementi e la loro restituzione.⁴

2.2 HBIM per il patrimonio costruito: specificità, sfide e opportunità

L'estensione dell'approccio BIM al patrimonio architettonico storico ha dato origine al settore dell'*Historic Building Information Modeling* (HBIM).⁵

Rispetto al BIM per la nuova costruzione, l'HBIM si confronta con una condizione concettualmente diversa: l'edificio non è progettato a partire dal modello, ma al contrario il modello deve essere ricostruito a partire dall'edificio esistente, con tutte le sue irregolarità.

³ Macher, Landes e Grussenmeyer, «From Point Clouds to Building Information Models», p. 2.

⁴ Tang et al., «Automatic reconstruction», p. 831; Volk, Stengel e Schultmann, «Building Information Modeling (BIM) for existing buildings», p. 109.

⁵ Maurice Murphy, Eugene McGovern e Sara Pavia, «Historic Building Information Modelling. Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 76 (2013): 89-102, p. 89.

Da queste specificità deriva la difficoltà principale dell'HBIM. Il costruito storico è caratterizzato da geometrie irregolari, fuori piombo, deformazioni, stratificazioni e stati di degrado che si conciliano male con le procedure standardizzate e con le librerie di oggetti regolari tipiche del BIM.⁶ La complessità delle forme e la disomogeneità degli elementi rendono difficoltosa la replica geometrica fedele e obbligano a chiedersi quale livello di dettaglio serva davvero.

Un'altra specificità riguarda il tempo, l'edificio storico è il risultato di trasformazioni successive, e documentarlo richiede una modellazione per fasi che dia a ogni elemento la sua collocazione cronologica.

In questo contesto, l'automazione basata su intelligenza artificiale apre prospettive concrete. L'intelligenza artificiale non serve soltanto a velocizzare la replica della geometria, il suo contributo maggiore sta nell'organizzazione delle informazioni. Riconoscere automaticamente la natura degli elementi permette di popolare il modello con attributi qualitativi e di trasformarlo da semplice rappresentazione tridimensionale a base di conoscenza interrogabile. È stato dimostrato come un approccio semi-automatico allo Scan-to-HBIM sia praticabile, la classificazione della nuvola con il *Machine Learning* riduce il carico della modellazione manuale e rende il risultato più coerente.⁷ In uno studio condotto sulla Certosa di Pisa a Calci, si osserva che la segmentazione semantica è la fase più lunga e meno automatizzata dell'intero processo di documentazione, che il *Machine Learning* supervisionato su *feature* geometriche scelte ad hoc si è dimostrato applicabile ai beni culturali e che le applicazioni del *Deep Learning* restano limitate dalla difficoltà di generalizzare fra edifici diversi e dalla scarsità di dati annotati per l'addestramento.⁸ Nello stesso lavoro la ricostruzione delle famiglie parametriche procede classe per classe, definendo per ciascuna una geometria concettuale di riferimento e propagandola agli elementi ripetitivi con

⁶ Danae Phaedra Pocobelli et al., «BIM for heritage science: a review», *Heritage Science* 6 (2018): 30, pp. 1-2.

⁷ Valeria Croce et al., «From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning», *Remote Sensing* 13, n. 3 (2021): 461, pp. 1-2.

⁸ Valeria Croce et al., «Tra Intelligenza Artificiale e H-BIM per la descrizione semantica dei beni culturali: la Certosa di Pisa», in *Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Linguaggi Distanze Tecnologie. Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione* (Milano, FrancoAngeli, 2021), 608-625, p. 610.

linguaggi di programmazione visuale.⁹ In questa direzione, l'intelligenza artificiale come strumento di supporto alla strutturazione semantica del modello del patrimonio, si colloca il contributo metodologico di questa tesi.

2.3 L'arricchimento semantico dei modelli informativi: stato dell'arte

L'espressione *semantic enrichment* nasce nel BIM generalista per indicare l'aggiunta automatica a un modello di informazioni implicite o mancanti, uno studio sulla classificazione degli ambienti di un modello ha confrontato un sistema a regole e un classificatore di *Machine Learning*, inquadrando l'arricchimento come alternativa automatica alla preparazione manuale del dato.¹⁰ Nel patrimonio la questione prende una forma diversa, perché le informazioni da aggiungere non si deducono dalla sola geometria ma riguardano i materiali, le forme di alterazione, le fasi costruttive e le fonti documentarie, e provengono da supporti quali la nuvola di punti, le immagini e i testi. Uno studio propone di usare il modello HBIM come archivio di tutto ciò che si sa dell'edificio, e pone il problema di trasformare la geometria in informazioni ordinate e consultabili.¹¹ Il medesimo problema è richiamato come motivazione della segmentazione automatica: i processi scan-to-BIM condotti a mano sono affidabili ma lenti, e si fondano su una quantità di dati molto superiore a quella necessaria a descrivere un oggetto parametrico.¹²

Per la classificazione dei materiali e delle superfici la letteratura offre due strade. La prima opera sulla nuvola di punti con classificatori supervisionati alimentati da *feature* geometriche di covarianza (planarità, linearità, verticalità, curvatura, rugosità) e da *feature* radiometriche (RGB, HSV, intensità): l'efficacia di questa impostazione per la classificazione di modelli 3D di interesse storico è

⁹ Croce et al., «Tra Intelligenza Artificiale e H-BIM», pp. 613-614.

¹⁰ Tanya Bloch e Rafael Sacks, «Comparing machine learning and rule-based inferencing for semantic enrichment of BIM models», *Automation in Construction* 91 (2018): 256-272, p. 256.

¹¹ Ramona Quattrini, Roberto Pierdicca e Christian Morbidoni, «Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web», *Journal of Cultural Heritage* 28 (2017): 129-139, pp. 1-3 del file.

¹² Roberto Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti utilizzando tecniche di apprendimento profondo per il patrimonio culturale», *Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia*, n. 1 (2020): 1-9, p. 2.

stata mostrata adottando il *Random Forest* come classificatore di riferimento,¹³ e un'applicazione recente, intitolata proprio all'arricchimento semantico delle nuvole di punti del patrimonio, riprende lo stesso classificatore con l'analisi dell'importanza delle variabili.¹⁴ La seconda strada opera su immagini: uno studio ha combinato rilievo laser e fotografie da drone per produrre ortofoto ad alta risoluzione della facciata di una casa storica di Gedda (Arabia Saudita), su cui una rete di rilevamento dei bordi individua le forme di alterazione, poi riportate sulla geometria HBIM con parametri statistici di area e perimetro.¹⁵

La frontiera più recente riguarda l'impiego dei modelli linguistici di grandi dimensioni per estrarre informazione da documenti e scriverla in strutture dati: un contributo del 2025 descrive agenti basati su modelli linguistici che leggono file PDF e interfacce applicative e arricchiscono modelli urbani semantici, secondo uno schema di estrazione e scrittura strutturata che è concettualmente identico a quello richiesto da un modello HBIM.¹⁶ Nessuno dei lavori esaminati chiude però l'intero cerchio: il riconoscimento automatico, la strutturazione degli attributi, la scrittura automatica nel modello parametrico nativo e la tracciabilità della fonte di ogni valore restano, nei casi documentati, passaggi separati o risolti ad hoc, e il confronto quantitativo con la procedura manuale è raro. È in questo spazio, la saldatura fra gli esiti dell'intelligenza artificiale e il modello informativo, che si colloca la terza fase della sperimentazione.

¹³ Il *Random Forest* è un classificatore formato da molti alberi decisionali, ciascuno addestrato su una parte dei dati scelta a caso: ogni albero vota una classe e vince la più votata. Leo Breiman, «Random Forests», *Machine Learning* 45, n. 1 (2001): 5-32, pp. 5-6. L'applicazione ai modelli del patrimonio è in Eleonora Grilli e Fabio Remondino, «Classification of 3D Digital Heritage», *Remote Sensing* 11, n. 7 (2019): 847, pp. 2, 7 e 13.

¹⁴ Michele Buldo, Luis Agustín-Hernández e Cesare Verdoscia, «Semantic Enrichment of Architectural Heritage Point Clouds Using Artificial Intelligence: The Palacio de Sástago in Zaragoza, Spain», *Heritage* 7, n. 12 (2024): 6938-6965, pp. 6947-6949.

¹⁵ Yehia Miky, Yahya Alshawabkeh e Ahmad Baik, «Using deep learning for enrichment of heritage BIM», *npj Heritage Science* 12 (2024): 255, pp. 1-2 e 16-20.

¹⁶ Khaoula Kanna e Thomas H. Kolbe, «Automatic Enrichment of Semantic 3D City Models using LLM», *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* X-4/W6-2025 (2025): 105-112, pp. 105-107.

3 Il quadro normativo e informativo

3.1 Il quadro legislativo: il Codice dei contratti pubblici

In Italia la gestione informativa digitale delle costruzioni è regolata dal Codice dei contratti pubblici (D.Lgs. 31 marzo 2023, n. 36). L'articolo 43 e l'allegato I.9 rendono obbligatori i metodi e gli strumenti di gestione informativa digitale: dal 1° gennaio 2025 le stazioni appaltanti li adottano per le opere di nuova costruzione e per gli interventi su costruzioni esistenti con stima del costo presunto dei lavori superiore a due milioni di euro; per gli interventi sugli edifici tutelati ai sensi dell'articolo 10 del codice dei beni culturali (D.Lgs. 42/2004) la soglia è invece quella europea per i lavori richiamata all'articolo 14, comma 1, lettera a), più alta, ed è questa la condizione in cui ricade il caso studio. Restano esclusi gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, salvo che riguardino opere già eseguite con questi metodi.¹⁷

3.2 Le norme tecniche: UNI 11337 e UNI EN ISO 19650

Sul piano tecnico la standardizzazione del processo informativo è nata in Italia con la norma UNI 11337, che ha fissato la terminologia di base, distinguendo gli elaborati informativi, i documenti che rappresentano l'opera in forma tradizionale, dai modelli informativi, rappresentazioni digitali organizzate in oggetti dai quali gli elaborati si possono sempre estrarre, e ha formalizzato l'Ambiente di Condivisione Dati (ACDat) e i ruoli professionali della filiera.¹⁸ Il quadro si è poi allineato allo standard internazionale con il recepimento della UNI EN ISO 19650: la Parte 1 fissa concetti e principi della gestione informativa, la Parte 2 la fase di consegna e la Parte 3 la fase operativa, quella in cui si trova un edificio esistente, dove l'informazione va aggiornata a ogni evento che lo modifica, dalla manutenzione al restauro.¹⁹

¹⁷ Decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36, Codice dei contratti pubblici, testo vigente al 5 settembre 2026 (con le modifiche del decreto legislativo 31 dicembre 2024, n. 209), art. 43, comma 1.

¹⁸ UNI 11337-1:2017, Edilizia e opere di ingegneria civile. Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi; Alberto Pavan, *Digitalizzazione del settore costruzioni: UNI 11337:2017. Dal BIM alla piattaforma di filiera*, presentazione, Politecnico di Milano, s.d., diapositive 14-17.

¹⁹ BS EN ISO 19650-1:2018, Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 1: Concepts and principles, punti 3.2.13, 5.1 e 6.2.

La UNI 11337-4 descrive l'evoluzione dei contenuti informativi degli oggetti con una scala di Livelli di Sviluppo (LOD) dalla lettera A alla G. Ogni livello combina un Livello di Sviluppo Geometrico (LOG), forma e ingombro dell'oggetto, e un Livello di Sviluppo Informativo (LOI), i suoi attributi non geometrici. Per il costruito esistente contano i due livelli finali: il LOD F, l'oggetto rilevato sul luogo nello stato di fatto (*as-built*), e il LOD G, l'oggetto aggiornato nel tempo con gli interventi di gestione e manutenzione; per gli interventi di restauro, i livelli da A a E hanno poco significato, se non per qualche semplificazione di natura specialistica.²⁰ La scala è disegnata su un pilastro nella Figura 3.1.

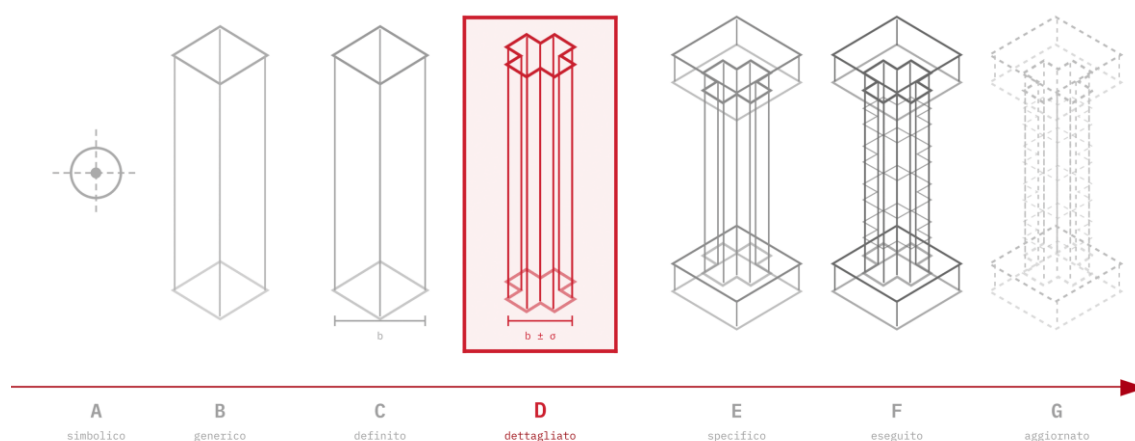


Figura 3.1. La scala dei Livelli di Sviluppo da A a G della UNI 11337-4 disegnata su un pilastro, dall'oggetto simbolico all'oggetto eseguito e aggiornato; in evidenza il livello D, quello che la seconda fase assume come obiettivo per la geometria.

3.3 Dal LOD al LOIN: la UNI EN 17412-1 e il patrimonio storico

La classificazione per LOD lega l'accuratezza geometrica alla quantità di informazioni, e questo vincolo diventa un limite quando lo Scan-to-BIM è applicato al patrimonio storico, la nuvola di punti di un edificio esistente documenta irregolarità, fuori piombo e degradi di notevole complessità morfologica, e un livello di sviluppo alto richiederebbe una modellazione manuale che replichi ogni anomalia, incompatibile con l'automazione e di scarso valore per il restauro.

²⁰ UNI 11337-4:2017, Edilizia e opere di ingegneria civile. Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti; Pavan, *UNI 11337:2017. Dal BIM alla piattaforma di filiera*, diapositive 34 e 45.

A questi limiti risponde la UNI EN 17412-1 con il Livello di Fabbisogno Informativo (*Level of Information Need* – LOIN), che scompone il fabbisogno in tre componenti indipendenti: l'informazione geometrica, l'informazione alfanumerica e la documentazione (Figura 3.2). Dal 2024 la norma è sostituita dalla UNI EN ISO 7817-1, che definisce il livello di fabbisogno informativo in sede internazionale.²¹ L'informazione geometrica è definita a sua volta da dettaglio, dimensionalità, localizzazione, aspetto e comportamento parametrico.²² Diventa così legittimo, e normato, chiedere per un elemento una geometria essenziale e associargli informazioni alfanumeriche e documentali ricche. Le specifiche delle stazioni appaltanti vanno nella stessa direzione, quella dell'Agenzia del Demanio per il rilievo dello stato di fatto chiede agli elementi principali dei modelli *as-is* la forma «definita», non quella complessa, con posizione effettiva, e prescrive invece il fabbisogno alfanumerico con una tabella di set di proprietà.²³

Il flusso di lavoro della tesi segue questa impostazione, con gli algoritmi di intelligenza artificiale applicati alla nuvola di punti, l'obiettivo si sposta dalla replica puntuale della geometria deformata alla costruzione di una base di informazioni strutturate, scritte direttamente nei parametri condivisi di Revit senza uscire dall'ambiente di modellazione.

²¹ UNI EN ISO 7817-1:2024, Building Information Modelling. Livello di fabbisogno informativo. Parte 1: Concetti e principi, premessa CEN e introduzione, pp. 1 e 3.

²² BS EN 17412-1:2020, Building Information Modelling. *Level of Information Need*. Part 1: Concepts and principles, punti 6.1 e 6.2.1, pp. 10-11.

²³ Agenzia del Demanio, *BIMSM. Specifica metodologica rilievo (as-is), documento ADM2023-ADM-SPECIFRIL-XX-SM-Z-C00001, procedura aperta per il servizio di verifica della vulnerabilità sismica, diagnosi energetica e rilievo da restituire in modalità BIM per beni dello Stato in Toscana*, Agenzia del Demanio, 2023, punto 5.3, pp. 24-41.

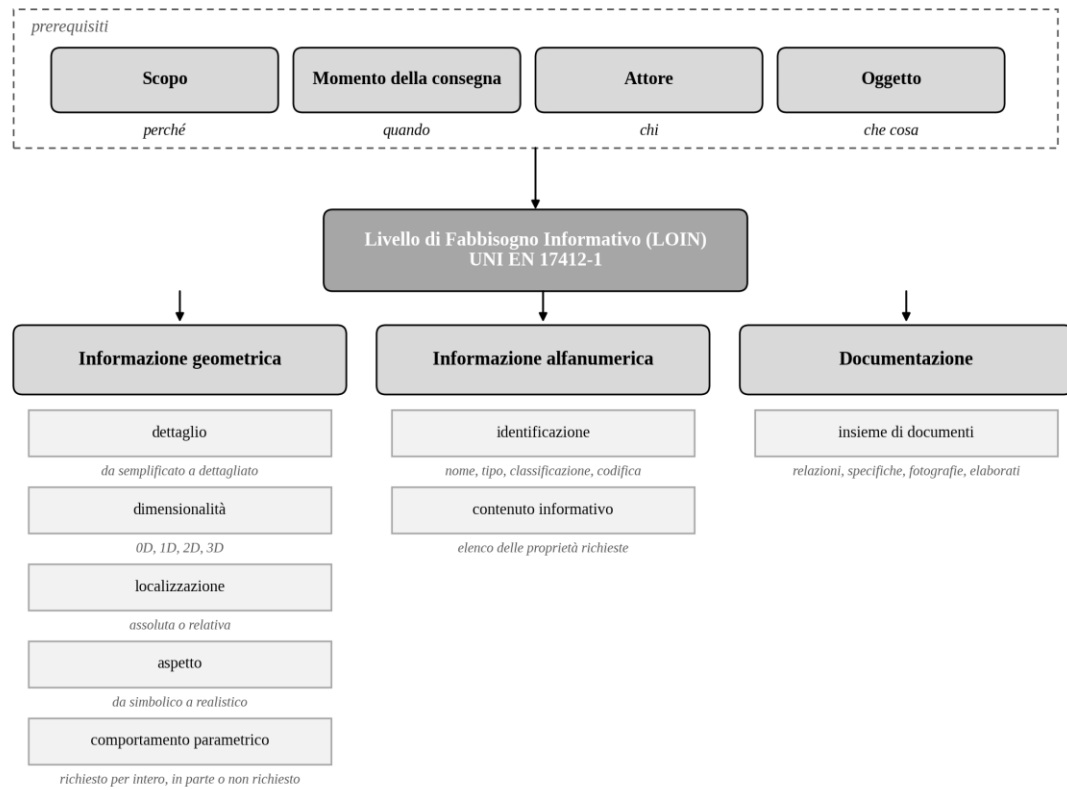


Figura 3.2. Le tre componenti del Livello di Fabbisogno Informativo (LOIN), con i loro aspetti, e i prerequisiti che lo definiscono. Elaborazione dallo schema della UNI EN 17412-1.²⁴

²⁴ BS EN 17412-1:2020, punto 6.5, figura 8, p. 18.

4 Intelligenza artificiale per nuvole di punti, immagini e documenti

4.1 Dalle regole ai dati: l'automazione dello Scan-to-BIM

I tentativi di automazione del processo Scan-to-BIM si collocano lungo uno spettro che va dagli approcci basati su regole agli approcci *data-driven*. I primi riconoscono gli elementi costruttivi attraverso il *fitting* di primitive geometriche (piani, cilindri, superfici di rivoluzione) con algoritmi come RANSAC (*Random Sample Consensus*) e *region growing*, sfruttando assunzioni a priori sulla regolarità delle forme.²⁵ Questi metodi funzionano bene su geometrie regolari e ortogonali, ma perdono affidabilità in presenza di irregolarità, deformazioni e morfologie complesse, condizioni tipiche del costruito storico; studi riportano che il *region growing* applicato direttamente alla nuvola segmenta correttamente le strutture piane e ben definite, mentre le geometrie curve e le parti lacunose non vengono segmentate e i tempi di calcolo crescono.²⁶

Gli approcci *data-driven*, basati su tecniche di *Machine Learning* e, più recentemente, di *Deep Learning*, apprendono invece direttamente dai dati i *pattern* che distinguono le diverse categorie di elementi, senza richiedere una formalizzazione esplicita delle regole geometriche. La svolta è arrivata con le architetture neurali capaci di operare direttamente su nuvole di punti non strutturate: PointNet è stata la prima rete a elaborare i punti grezzi rispettandone l'invarianza rispetto alle permutazioni, e da essa è derivata una famiglia di modelli per la classificazione e la segmentazione semantica tridimensionale.²⁷ Fra le evoluzioni successive conta soprattutto la *Dynamic Graph CNN* (DGCNN), che introduce l'operatore EdgeConv e costruisce, a ogni strato della rete, un grafo dinamico dei k punti più prossimi nello spazio delle *feature*, così la rete cattura relazioni locali e non locali fra i punti, e si presta a descrivere la sintassi compositiva dell'architettura.²⁸ A questa architettura, fa riferimento la fase di segmentazione della tesi.

²⁵ Macher, Landes e Grussenmeyer, «From Point Clouds to Building Information Models», pp. 3-4.

²⁶ Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», p. 3.

²⁷ Charles R. Qi et al., «PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation», in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2017), 652-660, pp. 652-653.

²⁸ Yue Wang et al., «Dynamic Graph CNN for Learning on Point Clouds», *ACM Transactions on Graphics* 38, n. 5 (2019): 146:1-146:12, pp. 146:1-146:2.

Nel patrimonio costruito queste tecniche si sono diffuse rapidamente. Altri studi hanno mostrato l'efficacia di metodi di *Machine Learning* supervisionato che combinano *feature* geometriche e radiometriche per la classificazione di modelli 3D di interesse storico.²⁹ La disponibilità di dataset annotati di riferimento, come il *benchmark* ArCH (*Architectural Cultural Heritage*), ha permesso il confronto sistematico tra approcci di Machine e *Deep Learning* su scenari architettonici reali.³⁰ Studi successivi hanno proposto una versione modificata della DGCNN, arricchita con le normali e l'informazione di colore, ottenendo prestazioni allo stato dell'arte sulla segmentazione semantica di nuvole di punti di edifici storici.³¹ Questa impostazione è il riferimento metodologico diretto della sperimentazione. La Figura 4.1 ordina le famiglie di approcci lungo l'asse che va dalle regole esplicite all'apprendimento dai dati.

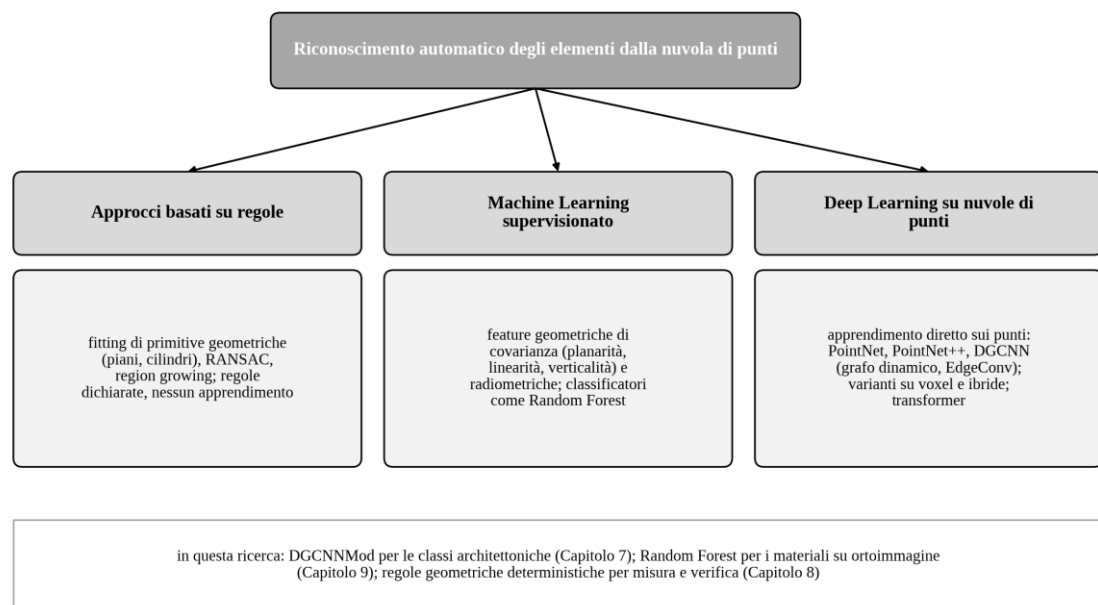


Figura 4.1. Famiglie di approcci per il riconoscimento automatico degli elementi: dal fitting di primitive geometriche alle reti neurali su nuvole di punti.

La segmentazione semantica è, in questo quadro, l'operazione che abilita tutto il resto: riconoscere la natura di ciascun punto è il presupposto tanto della

²⁹ Grilli e Remondino, «Classification of 3D Digital Heritage», pp. 2, 7 e 13.

³⁰ Francesca Matrone et al., «A Benchmark for Large-Scale Heritage Point Cloud Semantic Segmentation», *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLIII-B2-2020 (2020): 1419-1426, pp. 1419-1420.

³¹ Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», pp. 5-7; Roberto Pierdicca et al., «Point Cloud Semantic Segmentation Using a Deep Learning Framework for Cultural Heritage», *Remote Sensing* 12, n. 6 (2020): 1005, pp. 1-2.

modellazione geometrica quanto dell'arricchimento informativo. Accanto al dato tridimensionale, le tecniche di *Computer Vision* e di elaborazione del linguaggio naturale permettono di estrarre attributi (materiali, datazioni) da immagini e documenti, e alimentano il *semantic enrichment* del modello informativo.

4.2 Reti neurali per nuvole di punti

Una nuvola di punti è un insieme non ordinato di coordinate, privo di griglia, con densità variabile e senza una relazione di vicinanza esplicita fra gli elementi. Le reti convoluzionali classiche presuppongono invece una struttura regolare, come quella dei pixel di un'immagine, e questo ha orientato i primi tentativi verso rappresentazioni intermedie: la voxelizzazione, che discretizza lo spazio in celle cubiche e applica convoluzioni tridimensionali, e gli approcci multi-vista, che proiettano la nuvola in un insieme di immagini elaborate da reti bidimensionali. Entrambe le strade pagano un prezzo, la voxelizzazione cresce in memoria con il cubo della risoluzione e cancella il dettaglio sotto la dimensione della cella, la proiezione perde l'informazione di profondità e le relazioni spaziali fra viste. Le reti profonde più recenti sono state progettate proprio per affrontare l'irregolarità delle nuvole gestendo direttamente i dati grezzi, senza rappresentazioni regolari intermedie.³²

Le architetture *point-based* nascono con PointNet, che tratta ciascun punto in modo indipendente e ottiene l'invarianza rispetto all'ordine dei punti aggregando le *feature* con una funzione simmetrica, la rete riconosce l'oggetto nel suo insieme ma non descrive il vicinato di ciascun punto.³³ PointNet++ recupera il contesto locale con una gerarchia di raggruppamenti a scala crescente.³⁴ Le architetture *graph-based* rendono esplicite le relazioni fra punti vicini: la DGCNN rappresenta la nuvola come un grafo i cui vertici sono i punti e i cui archi collegano ciascun punto ai suoi k vicini più prossimi, e ricostruisce il grafo a ogni strato nello spazio delle *feature* apprese, così che i vicini non siano soltanto quelli geometricamente

³² Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», p. 5.

³³ Qi et al., «PointNet», pp. 652 e 654-655.

³⁴ Charles R. Qi et al., «PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space», in *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)* (2017), 5099-5108, pp. 1-3.

prossimi ma quelli semanticamente affini.³⁵ Nella variante adottata per il patrimonio culturale la ricerca dei vicini del primo strato può usare anche il colore e le normali, e le *feature* di ingresso comprendono le coordinate, i canali HSV e le normali.³⁶ È questa la ragione per cui il grafo dinamico si presta al dato architettonico: un punto di imposta, geometricamente contiguo tanto al pilastro quanto all'arco, viene descritto in relazione ai punti che condividono la sua curvatura e il suo orientamento, non solo a quelli che gli stanno accanto.

Una condizione comune a tutte queste architetture è il numero fisso di punti in ingresso. La nuvola va suddivisa in blocchi e da ciascun blocco va campionato un numero costante di punti, perché la rete richiede un input di dimensione costante e non potrebbe comunque elaborare l'intera scena in una sola volta.³⁷

4.3 Il dataset ArCH e le indicazioni per la sperimentazione

Il dato che condiziona ogni esperienza di *Deep Learning* sul patrimonio è la scarsità di nuvole annotate. I dataset di riferimento della visione tridimensionale (ModelNet, KITTI, Semantic3D, S3DIS) raccolgono oggetti, scene urbane o uffici, e nessuno di essi, fino al 2020, riguardava beni culturali immobili con un adeguato livello di dettaglio.³⁸ Il dataset ArCH nasce per colmare questa lacuna: diciassette nuvole di punti annotate manualmente da esperti di dominio, derivate da scansioni laser e da rilievi fotogrammetrici integrati, di chiese, cappelle, chiostri, portici e logge di periodi e lessici architettonici diversi, con nove classi architettoniche più una residuale nella versione pubblicata del *benchmark*.³⁹ Su queste scene sono state confrontate le reti *point-based* e *graph-based* e la variante della DGCNN con normali e colore ha ottenuto i risultati migliori.

Due indicazioni ricavate da queste esperienze orientano la sperimentazione. La prima riguarda la definizione delle classi, che va decisa in funzione della modellazione successiva e delle classificazioni degli standard esistenti, e non della

³⁵ Wang et al., «Dynamic Graph CNN», pp. 146:3-146:5.

³⁶ Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», pp. 5-6.

³⁷ Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», p. 6.

³⁸ Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», p. 3.

³⁹ Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», pp. 2 e 4-5; Matrone et al., «A Benchmark for Large-Scale Heritage Point Cloud Semantic Segmentation», pp. 1420-1422.

sola separabilità geometrica.⁴⁰ La seconda riguarda la validazione, la valutazione su una parte della stessa scena usata per l'addestramento misura la capacità di completare un'annotazione parziale, mentre la valutazione su una scena mai vista misura la generalizzazione, e i due assetti danno prestazioni diverse.⁴¹ In questa sperimentazione il *ground truth* appartiene allo stesso edificio della nuvola classificata, e la valutazione va quindi letta nel primo senso. Le confusioni fra classi che gli stessi esperimenti documentano, archi con volte, colonne con muri, aperture con la muratura circostante, sono le stesse che si ritrovano negli errori osservati a Brera (§7.5.1).⁴²

4.4 Modelli linguistici come agenti e modelli fondazionali per le immagini

Le tecniche descritte nei paragrafi precedenti apprendono da esempi annotati un compito specifico. Due ulteriori famiglie di modelli intervengono nella seconda e nella terza fase della sperimentazione e hanno una natura diversa, perché non richiedono addestramento sul caso studio.

La prima è quella dei modelli linguistici di grandi dimensioni (*Large Language Model*, LLM), reti addestrate su grandi quantità di testo, incluso il codice sorgente, capaci di comprendere e produrre linguaggio naturale e linguaggi di programmazione; le versioni multimodali ricevono anche immagini e possono ragionare su un prospetto, una sezione o una mappa di scarti. Usato in modalità conversazionale, un modello linguistico risponde a una domanda; usato in modalità agentica riceve un incarico e opera in un ciclo in cui legge il dato e gli esiti delle operazioni, sceglie il passo successivo, scrive i programmi e li esegue, finché l'obiettivo non è raggiunto o un controllo non impone di fermarsi. Perché l'agente possa agire su un software occorre un canale di comunicazione: il *Model Context Protocol* (MCP) standardizza il collegamento fra un modello linguistico e strumenti esterni, e in questo lavoro è stato impiegato un ponte MCP montato su Revit tramite pyRevit, attraverso il quale l'agente invia al software istruzioni scritte

⁴⁰ Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», p. 2.

⁴¹ Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», pp. 6-7.

⁴² Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», pp. 7-8.

e ne legge gli esiti.⁴³ Ciò che viaggia sul canale non sono clic irripetibili ma istruzioni depositate e rieseguibili, ogni azione compiuta sul modello lascia il proprio testo.

L'impiego di un componente probabilistico in un processo di misura richiede una separazione di ruoli, assunta qui come regola: la parte neurale svolge i compiti che richiedono comprensione e giudizio (leggere il rilievo, ideare la strategia, diagnosticare un errore, dirigere l'esecuzione), le procedure deterministiche che l'agente stesso scrive svolgono i compiti che richiedono esattezza (misurare, costruire, verificare con soglie fissate in anticipo). Questa architettura, detta neuro-simbolica, ha una conseguenza verificabile, nessun numero del modello nasce dalla componente probabilistica, e ogni numero può essere ricalcolato rieseguendo la procedura. Lo stesso principio vale per l'estrazione della conoscenza storica del Capitolo 9, dove il modello linguistico ricava da testi entità strutturate (date, fasi, materiali, fonti) e non genera contenuto, e dove la revisione umana precede la scrittura nel modello.

La seconda famiglia è quella dei modelli fondazionali per la segmentazione di immagini. *Segment Anything* (SAM) è un modello addestrato su una quantità molto ampia di maschere che, ricevuta un'immagine e un *prompt* (un punto, un riquadro o una griglia di punti), restituisce le maschere degli oggetti visivamente coerenti, senza alcun addestramento sul dominio di applicazione; MobileSAM ne è una versione con un codificatore d'immagine distillato, di dimensioni ridotte ed eseguibile su processore senza scheda grafica.⁴⁴ Un modello di questo tipo decide dove passa il bordo di un oggetto sull'immagine, ma non sa che cosa l'oggetto sia né quanto valga metricamente il bordo: nel Capitolo 7 è impiegato per scontornare finestre e portali sull'ortoimmagine del fronte ovest, mentre la selezione degli elementi, il loro completamento geometrico e la verifica dei contorni sul *layer* di profondità restano affidati a procedure deterministiche.

⁴³ Anthropic, «Model Context Protocol: introduction», *modelcontextprotocol.io*, 2024, <https://modelcontextprotocol.io/> (consultato il 30 agosto 2026); «revit-mcp-plugin (repository del ponte pyRevit-MCP impiegato)», *GitHub*, <https://github.com/revit-mcp/revit-mcp-plugin> (consultato il 30 agosto 2026).

⁴⁴ Alexander Kirillov et al., *Segment Anything*, arXiv preprint 2304.02643, 2023, pp. 1-2; Chaoning Zhang et al., *Faster Segment Anything: Towards Lightweight SAM for Mobile Applications*, arXiv preprint 2306.14289, 2023, pp. 1-3.

5 Il caso studio: l'ex chiesa di Santa Maria in Brera

5.1 Inquadramento storico e caratteri architettonici dell'edificio

La chiesa di Santa Maria di Brera nasce con l'insediamento milanese degli Umiliati, documentato poco prima del 1178 e confermato dalla bolla di Innocenzo III del 1201; la scheda del catalogo regionale colloca dal 1229 la costruzione dell'edificio «in forme assai semplici», arricchito nel 1347 da una facciata in marmo e da un portale gotico scolpito da Giovanni di Balduccio.⁴⁵ La data del 1347 discende da un'iscrizione latina già posta sull'architrave del portale maggiore, che attribuisce l'opera allo scultore pisano.⁴⁶ Le tre datazioni, insediamento, bolla e cantiere, sono fatti distinti che la letteratura divulgativa tende a sovrapporre; nel testo sono mantenute separate.

L'edificio trecentesco aveva pianta rettangolare priva di transetto, conclusa da tre vani absidali quadrati, e interno a tre navate separate da pilastri cilindrici in serizzo con basi ad anelli e capitelli a decorazione zoomorfa riferibili alla scultura lombarda tardoduecentesca (le colonne originarie, oggi inglobate nei pilastri squadrati del piano terra di cui tratta il §9.2.2); le navate laterali contavano undici campate ciascuna, coperte da volte a crociera a profilo archiacuto con costoloni a toro in laterizio ricadenti su peducci in pietra chiara.⁴⁷ La facciata, a profilo di capanna, era rivestita da lastre marmoree a fasce orizzontali alternate e aperta da un grande portale a tutto sesto con profonde strombature, coronato da una ghimberga con rosoncino cieco; le aperture erano ordinate su tre registri, con bifore in basso e al centro e trifore in alto.⁴⁸ Sul colore delle fasce le fonti divergono: la descrizione della scheda catalografica parla di bande bianche e grigie, mentre le notizie storiche della stessa scheda, il documento della Commissione d'Ornato del

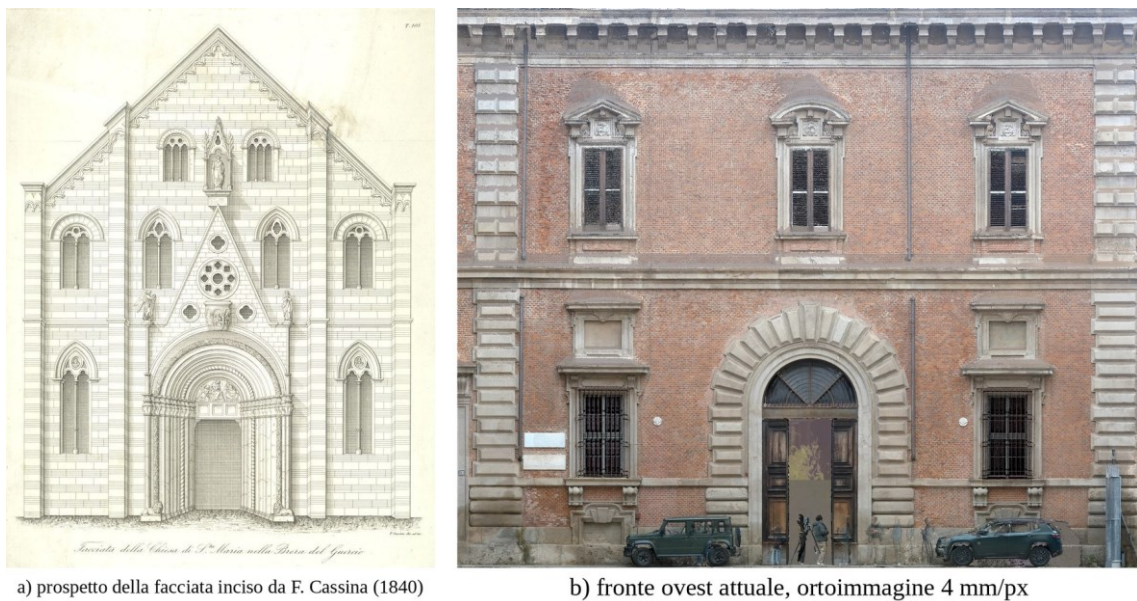
⁴⁵ Anna Paola Arisi Rota, Stefania Buganza e Edoardo Rossetti, «Novità su Gualtiero Bascapè committente d'arte e il cantiere di Santa Maria di Brera alla fine del Quattrocento», *Archivio Storico Lombardo* CXXXIV (2008): 47-92, p. 48, nota 3; Regione Lombardia, Lombardia Beni Culturali, *Palazzo di Brera, Milano (MI). Scheda SIRBeC ARL LMD80-00089, con scheda collegata VAL LMD80-00279, Chiesa di S. Maria di Brera (demolita)*, 2009, <https://www.lombardiabeniculturali.it/architetture/schede/LMD80-00089/>, scheda ARL, Notizie storiche, notizia 2.

⁴⁶ Nicolò Ghilardelli e Roberto Micella, «“Brera in Brera”. Restauro e creazione di nuovi spazi funzionali a servizio della città e del complesso monumentale di Brera, Milano», tesi di laurea, Facoltà di Architettura e Società, sede di Piacenza, relatore Marco Albini, Politecnico di Milano, 2011, p. 44.

⁴⁷ Regione Lombardia, Lombardia Beni Culturali, *Palazzo di Brera, scheda SIRBeC ARL LMD80-00089, scheda VAL LMD80-00279, Descrizione*.

⁴⁸ Regione Lombardia, Lombardia Beni Culturali, *Palazzo di Brera, scheda SIRBeC ARL LMD80-00089, scheda VAL LMD80-00279, Descrizione*.

1808 e l'itinerario petrografico del CNR parlano di bianco e nero; nel testo si adotta la seconda formulazione, sostenuta da un documento coevo e da fonti indipendenti.⁴⁹ Della facciata scomparsa restano due raffigurazioni: la veduta settecentesca pubblicata da Giulini, che si conosce dalla riproduzione nella tesi Ghilardelli-Micella, e il prospetto in proiezione ortogonale inciso da Ferdinando Cassina nel 1840 per *Le fabbriche più cospicue di Milano*.⁵⁰ Quest'ultimo è riprodotto nella Figura 5.1 accanto all'ortoimmagine del fronte attuale, prodotta nella terza fase della sperimentazione: il confronto rende evidente che il prospetto rilevato non è la facciata gotica ma un fronte diverso.



a) prospetto della facciata inciso da F. Cassina (1840)

b) fronte ovest attuale, ortoimmagine 4 mm/px

Figura 5.1. La facciata trecentesca di Santa Maria di Brera nel prospetto inciso da Ferdinando Cassina (*Le fabbriche più cospicue di Milano*, Milano 1840, tav. 105; acquaforte, Biblioteca comunale dell'Archiginnasio di Bologna, riproduzione digitale Imago IMA00144745) e il fronte ovest attuale nell'ortoimmagine a 4 mm/px generata dalla nuvola di punti (Capitolo 5.4).

⁴⁹ CNR-ICVBC, «La chiesa di Santa Maria di Brera e la chiesa di San Carpofoforo», *Itinerari petrografici nell'architettura romana e medievale di Milano*, http://www.icvbc.cnr.it/Itinerari_petrografici/index.php/la-citta-al-di-fuori-della-cinta-muraria-romana/il-settore-settentrionale/la-chiesa-di-santa-maria-di-brera-e-la-chiesa-di-san-carpoforo/ (consultato il 14 agosto 2026); Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», p. 84.

⁵⁰ Giorgio Giulini, *Memorie spettanti alla storia, al governo ed alla descrizione della città e della campagna di Milano ne' secoli bassi* (Milano, 1760), riprodotta in Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», fig. 28, p. 51; Ferdinando Cassina, «Facciata della Chiesa di S.ta Maria nella Brera del Guercio, acquaforte (334 × 268 mm), tav. 105 de *Le fabbriche più cospicue di Milano* pubblicate per cura di Ferdinando Cassina (Milano, Cassina e Pedrinelli, 1840)», *Imago, biblioteca digitale della Regione Emilia-Romagna, esemplare della Biblioteca comunale dell'Archiginnasio di Bologna, scheda IMA00144745*, <https://imago.regione.emilia-romagna.it/opac/resource/facciata-della-chiesa-di-sta-maria-nella-brera-del-guercio/IMA00144745> (consultato il 5 settembre 2026).

Con la soppressione degli Umiliati (1571) il complesso passò ai Gesuiti, che vi impiantarono il collegio. Il progetto definitivo di Francesco Maria Richini per il palazzo, approvato nel 1651, prevedeva per l'esterno «un paramento in mattoni rosso scuro, rinforzato agli angoli e scandito da robuste paraste a bugnato in ceppo grigio, sporgenti cornici marcapiano e finestre con frontoni alterni, sempre in pietra».⁵¹ Questa descrizione è il codice formale che il fronte rilevato imita, come si vedrà, con un secolo e mezzo di ritardo. Alla soppressione della Compagnia di Gesù (1773) la chiesa non fu chiusa, uscì trasformata in parrocchiale, conservando quasi per intero la dotazione di arredi documentata dagli inventari del 1768, 1773 e 1800.⁵²

Il passaggio decisivo per la configurazione attuale avviene in età napoleonica. Nel 1806 la chiesa fu sconsacrata e l'architetto Pietro Gilardoni ne progettò la trasformazione con la suddivisione orizzontale dello spazio interno: nella parte inferiore un Museo di Antichità Lombarde, al piano superiore, «sfruttando ed elevando i muri delle navate, quattro ampie sale con 12 finestre per l'esposizione dei quadri».⁵³ Il solaio fu posto all'altezza delle navate laterali.⁵⁴ Il 22 maggio 1807 Gilardoni segnalava incrinature nella facciata e la necessità di sottomurazioni, di sostituzione di chiavi rotte e di «riformazione in vivo dei peduzzi degli archi», al movente museografico della demolizione si aggiunse dunque un movente statico.⁵⁵ Il piano del 1808 prevedeva «la distruzione della facciata della chiesa di S. Maria di Brera con nuova sostituzione, in seguito a un avanzamento di 7 braccia (circa 4 metri) dalla esistente, da eseguirsi a linea del Portone del Collegio»; la Commissione d'Ornato vi si oppose, giudicando la spesa rilevante a fronte del solo allargamento di una sala e definendo la facciata, con un errore di un secolo, «una fabbrica del secolo XV».⁵⁶ La demolizione fu decisa definitivamente il 4 aprile 1809 e nell'agosto dello stesso anno «si fornirono i vivi per la nuova parete»,

⁵¹ Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», p. 48.

⁵² Arisi Rota, Buganza e Rossetti, «Novità su Gualtiero Bascapè», p. 47, nota 1.

⁵³ Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», p. 82.

⁵⁴ Roberto Arsuffi, «Milano | Brera. La chiesa scomparsa (o quasi) di Santa Maria in Brera», *Urbanfile*, 21 giugno 2026, <https://blog.urbanfile.org/2026/06/21/milano-brera-la-chiesa-scomparsa-o-quasi-di-santa-maria-in-brera/> (consultato il 14 agosto 2026).

⁵⁵ Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», p. 82.

⁵⁶ Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», pp. 83-84.

mentre parte dei marmi bianchi e neri andò alla pavimentazione del futuro museo, alcune sculture alla cascina San Fedele nel parco di Monza, altri frammenti alle raccolte del Castello Sforzesco.⁵⁷ Il completamento slittò al 1810, perché fu necessario «allungare di una campata l'edificio verso la piazza, ricostruendo, nonostante l'opposizione della Commissione d'ornato, un nuovo prospetto della facciata della chiesa»; al posto del sagrato fu configurata una nuova piazza pubblica, e al piano superiore furono innalzati nuovi muri con volte a padiglione aperte da lucernari su tre grandi arconi trasversali.⁵⁸ Le sezioni rilevate da Ambrogio Annoni nel 1939, riprodotte nella Figura 5.2, mostrano in una sola tavola lo stato attuale, con la fascia del solaio che taglia l'edificio, e la ricostruzione dell'assetto medievale.⁵⁹

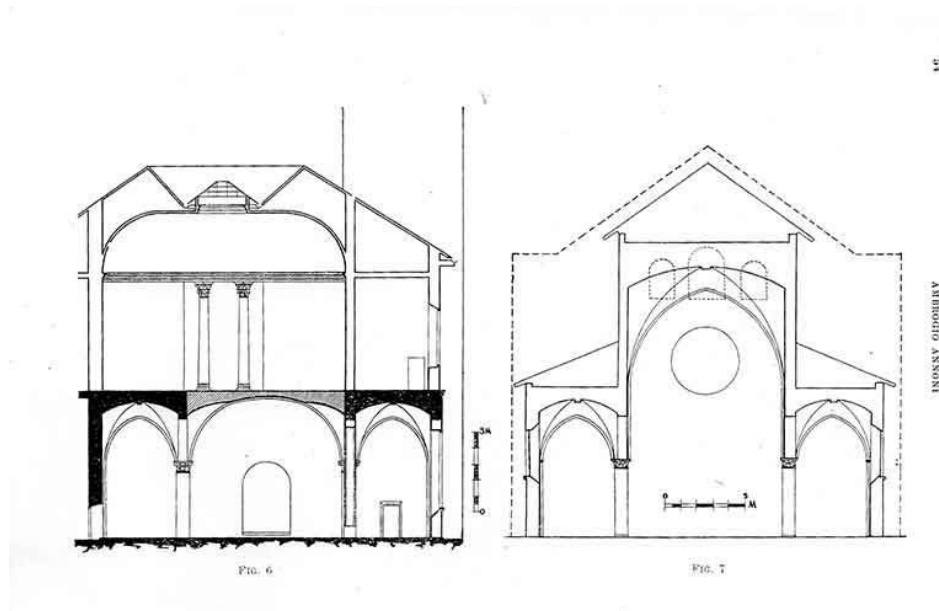


Figura 5.2. Sezioni trasversali dell'ex chiesa: a sinistra lo stato attuale, con il solaio del 1808-1809 che separa il piano terra voltato dalla sala della Pinacoteca, a destra la ricostruzione dell'assetto medievale. Tavole di Ambrogio Annoni (1939), riprodotte da BreraPlus.

La parete costruita nel 1809-1810 è il fronte ovest rilevato in questa tesi. Essa serve due edifici diversi: il registro inferiore, con il portale e due finestre inferriate, appartiene allo spazio ricavato nella ex chiesa, il registro superiore, con tre finestre

⁵⁷ Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», p. 84; Arisi Rota, Buganza e Rossetti, «Novità su Gualtiero Bascapè», pp. 47-48, nota 1.

⁵⁸ Pinacoteca di Brera, «Santa Maria in Brera», *BreraPlus*, 2023, <https://breraplus.org/story/santa-maria-in-brera/> (consultato il 14 agosto 2026).

⁵⁹ Ambrogio Annoni, «Sulle tracce di S. Maria di Brera», in *Atti del II Convegno Nazionale di Storia dell'Architettura (Assisi, 1-4 ottobre 1937)* (Roma, C. Colombo, 1939), 51-70, figg. 6-7, p. 54, riprodotte in *Santa Maria in Brera*, BreraPlus; Pinacoteca di Brera, «Santa Maria in Brera».

a frontone, alle sale napoleoniche della Pinacoteca, che condividono con la stanza modellata soltanto il muro. Il Museo di Antichità non fu inaugurato; lo spazio inferiore servì in parte da deposito di frammenti e in parte da oratorio del ginnasio braidense, finché dopo l'Unità vi trovò sede il Museo Patrio di Archeologia, «nelle sale al piano terra ricavate dall'antica chiesa», e «fu sistemato nel 1865 il nuovo portale a bugne».⁶⁰ L'allestimento del museo comportò, secondo la fonte istituzionale della Pinacoteca, una nuova volta di copertura sulla ex navata centrale e l'irrobustimento delle colonne cilindriche originarie, trasformate nei pilastri a sezione rettangolare con lesene che un'incisione del 1867 mostra in opera.⁶¹ Il portale a bugne è dunque posteriore di oltre mezzo secolo alla parete che lo ospita; la datazione, che dipende da una sola fonte con rimando all'Archivio Storico Civico, è una delle informazioni versate nel modello nella terza fase della sperimentazione.

Nel Novecento la chiesa fu oggetto dello studio di Annoni del 1939, il primo esame storico-artistico dell'edificio condotto attraverso il rilievo delle tracce leggibili;⁶² i bombardamenti dell'8 agosto 1943 distrussero le coperture e provocarono «la parziale caduta delle pareti di tutta l'ala meridionale, e in particolare delle sale napoleoniche»; Piero Portaluppi redasse fra il 1946 e il 1949 tre progetti di ricostruzione di queste sale e il palazzo fu risistemato fra il 1947 e il 1950, con il riallestimento curato da Portaluppi e Franco Albini.⁶³ Nessuna delle fonti consultate registra interventi sul fronte ovest e sulle sue tre finestre superiori: la loro eventuale ricostruzione postbellica resta quindi una possibilità non documentata, e come tale è stata registrata nel modello. Negli anni Settanta la Soprintendenza ai Monumenti restaurò le parti superstiti «riportando a vista alcune tra quelle che erano state inglobate nelle trasformazioni ottocentesche».⁶⁴ Oggi il piano terra ospita le aule della Scuola di Scenografia dell'Accademia di Belle Arti;

⁶⁰ Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», p. 84; Dario Trento, «Il distacco della Pinacoteca di Brera dall'Accademia», in *Per Brera sito UNESCO. Atti del convegno internazionale (Milano, Accademia di Belle Arti di Brera, 29 novembre - 1 dicembre 2012)*, a cura di Sandro Scarrocchia (Bergamo, Sestante Edizioni, 2013), 37-44, p. 37.

⁶¹ Pinacoteca di Brera, «Santa Maria in Brera».

⁶² Pinacoteca di Brera, «Santa Maria in Brera».

⁶³ Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», p. 94; Regione Lombardia, Lombardia Beni Culturali, *Palazzo di Brera, scheda SIRBeC ARL LMD80-00089*, scheda ARL LMD80-00089, Notizie storiche, notizia 11.

⁶⁴ Pinacoteca di Brera, «Santa Maria in Brera».

nella penultima campata settentrionale sopravvivono affreschi trecenteschi attribuiti a Giusto de' Menabuoi e al cosiddetto Maestro del 1349, e nel fianco meridionale in cotto, con cornice a beccatelli e nove contrafforti, resta l'unico tratto di perimetro medievale leggibile dall'esterno.⁶⁵

Questa sequenza di trasformazioni ha implicazioni dirette sul rilievo oggetto della tesi. L'aula 38 e le adiacenti aule di scenografia occupano la navata terrena della ex chiesa, modificata con tramezzi, palchi, gradinate, impianti, tiranti strutturali e arredi fissi; i sostegni rilevati non sono le colonne medievali ma i pilastri ottocenteschi che le inglobano, entro i quali il fusto in serizzo affiora in alcuni punti; il fronte ovest rivela la stratificazione di tre distinte intenzioni costruttive, la parete del 1809-1810 che imita il partito richiniano, il portale del 1865 e le aperture del piano superiore, per le quali la ricostruzione postbellica non è documentata. Per un progetto di documentazione HBIM è dunque necessario distinguere, elemento per elemento, la fase storica di appartenenza, così da restituire, insieme alla geometria attuale, il processo di trasformazione che ha condotto alla configurazione rilevata: è esattamente il tipo di informazione che nessuna analisi geometrica o materica può produrre da sola, e che la terza fase ricava dalla documentazione.

5.2 Campagna di rilievo: strumentazione, metodologia e acquisizione laser scanner

L'acquisizione metrica dell'edificio è stata condotta con il rilievo *laser scanning* terrestre (TLS, *Terrestrial Laser Scanning*), che restituisce in tempi contenuti una nuvola di punti densa e coerente dell'intero organismo edilizio. La scelta è motivata dalla complessità delle forme del manufatto e dalla necessità di documentare ad alta risoluzione sia gli elementi architettonici principali sia i dettagli della stratificazione storica.

Lo strumento impiegato è un Riegl VZ-600i, scanner laser terrestre ad alte prestazioni basato sul principio della misura a tempo di volo (*time-of-flight*) con

⁶⁵ Sandrina Bandera, «La Pinacoteca di Brera», in *Per Brera sito UNESCO. Atti del convegno internazionale (Milano, Accademia di Belle Arti di Brera, 29 novembre - 1 dicembre 2012)*, a cura di Sandro Scarrocchia (Bergamo, Sestante Edizioni, 2013), 87-90, p. 87; Regione Lombardia, Lombardia Beni Culturali, *Palazzo di Brera*, scheda SIRBeC ARL LMD80-00089, scheda VAL LMD80-00279, Descrizione.

digitalizzazione e processamento online della forma d'onda (*online waveform processing*). Questa architettura di misura, rende possibili acquisizioni rapide su un campo operativo compreso indicativamente tra 0,5 e 1000 m, con un'accuratezza di posizione dichiarata di 3 mm a 50 m. Il sistema integra tre camere interne per la colorazione della nuvola, un ricevitore GNSS e i sensori inerziali di orientamento che ne abilitano la caratteristica distintiva, la registrazione automatica in tempo reale (*real-time on-board registration*).⁶⁶ A differenza di uno scanner terrestre convenzionale, che richiede l'uso di target artificiali e un allineamento manuale delle singole scansioni in fase di post-elaborazione, il VZ-600i stima automaticamente la propria posizione e orientamento a ogni stazione, allineando le scansioni progressivamente già durante l'acquisizione in campo. Lo strumento è mostrato nella Figura 5.3.



Figura 5.3. Lo scanner laser terrestre Riegl VZ-600i impiegato per il rilievo. Immagine tratta dalla scheda tecnica del produttore.⁶⁷

⁶⁶ RIEGL Laser Measurement Systems, *RIEGL VZ-600i. Data Sheet*, RIEGL Laser Measurement Systems, 28 gennaio 2026, pp. 2 e 7-8.

⁶⁷ RIEGL Laser Measurement Systems, *RIEGL VZ-600i. Data Sheet*, p. 1.

La campagna si è svolta in due giornate: il 31 gennaio 2026 sono state acquisite 96 stazioni e il 16 febbraio 2026 ulteriori 23 stazioni di integrazione, per un totale di 119, tutte con campo di vista orizzontale di 360° e 57 immagini delle camere interne per stazione. Le finestre di acquisizione registrate nel progetto RiSCAN coprono 4 ore e 13 minuti nella prima giornata (dalle 9:39 alle 13:52) e 56 minuti nella seconda (dalle 10:32 alle 11:28); la durata effettiva di ogni scansione a questa risoluzione è di 1,32 minuti.

Le 119 scansioni hanno registrato complessivamente 2.854.754.333 punti (2.318.433.264 nella prima giornata e 536.321.069 nella seconda); la nuvola esportata dal progetto ne conta 2.311.220.731 (1.863.234.506 e 447.986.225 per le due giornate). Il numero elevato di stazioni è servito a coprire integralmente gli spazi e a ridurre le occlusioni, particolarmente critiche in un ambiente articolato come quello dell'ex chiesa, fitto di pilastri, archi, volte, gradinate e attrezzature sceniche. La registrazione automatica in tempo reale ha tenuto alta la produttività in campo, le scansioni si sono allineate senza bisogno di posizionare e rilevare target fisici. I parametri della campagna sono riassunti nella Tabella 5.1.

Tabella 5.1. Sintesi dei parametri della campagna di rilievo laser scanner.

Parametro	Valore
Strumento	Riegl VZ-600i (TLS, <i>online waveform processing</i>), matricola H2228885
Numero di stazioni	119: 96 il 31 gennaio e 23 il 16 febbraio 2026
Impostazioni di scansione	campo di vista orizzontale 360°, risoluzione angolare 34 mdeg, 57 immagini per stazione
Durata della singola scansione	1,32 min (lettura sullo strumento)
Finestre di acquisizione	4 h 13 min (9:39-13:52) e 56 min (10:32-11:28); 2,6 min in media fra stazioni consecutive
Punti	2.854.754.333 acquisiti; 2.311.220.731 nella nuvola esportata (circa 64 GB)
Registrazione	automatica in tempo reale (on-board), perfezionata con aggiustamento multi-stazione piano-piano (482.075 <i>patch</i> planari; deviazione standard dei residui per stazione 1,1-5,0 mm, mediana 1,9 mm)
Software di registrazione ed elaborazione	RiSCAN PRO 2.21.3 (modulo MSA 2.13.5)
Software di restituzione 2D (piante, prospetti, sezioni)	RiPANO

L'elaborazione delle scansioni è stata condotta nel software proprietario RiSCAN PRO (versione 2.21.3), ambiente nativo dell'ecosistema Riegl.

Per la restituzione degli elaborati bidimensionali (piante, prospetti e sezioni) è stato usato il software dedicato RiPANO, che genera viste ortografiche e sezioni del dato scansionato, esportabili in formato CAD per le successive elaborazioni grafiche.

La nuvola esportata dal progetto per l'intero complesso conta 2.311.220.731 punti, per circa 64 GB di memoria. Dentro questo insieme, la sperimentazione di segmentazione semantica si è concentrata sull'area principale dell'ex chiesa, la cui nuvola grezza conta 860.906.948 punti, circa 24 GB. Questa porzione, come illustrato al §7.1, è stata sottocampionata per riportarne la densità a valori gestibili dalla *pipeline* di *Deep Learning*. La distribuzione delle stazioni di scansione in pianta è riportata nella Figura 5.4 e la nuvola dell'intero complesso nella Figura 5.5.

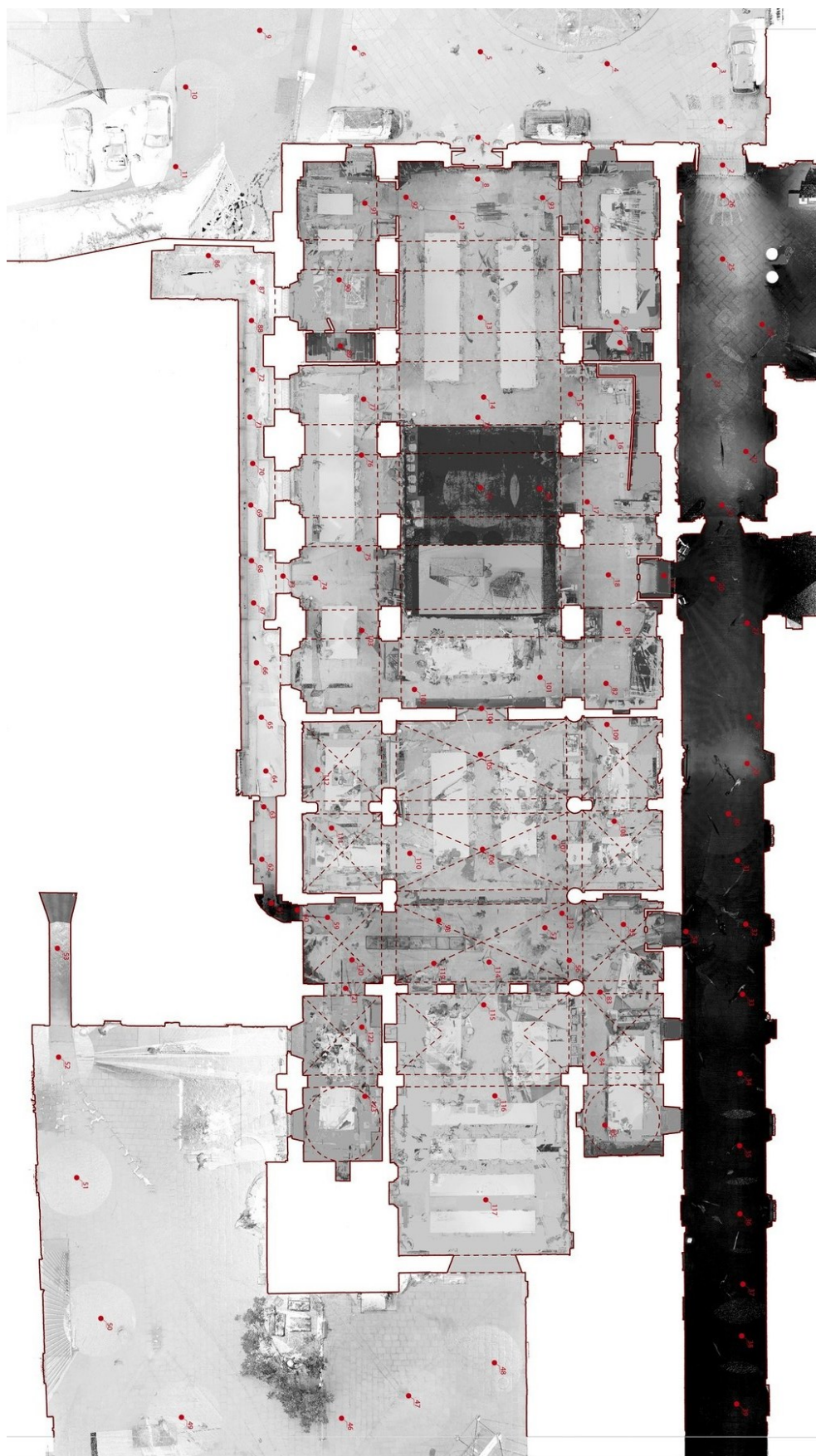


Figura 5.4. Pianta del complesso rilevato con le posizioni delle stazioni di scansione, in rosso; la numerazione è quella di progetto RiSCAN, non continua perché comprende posizioni poi eliminate. Restituzione RiPANO su nuvola di punti, DAda-LAB, 18 febbraio 2026.

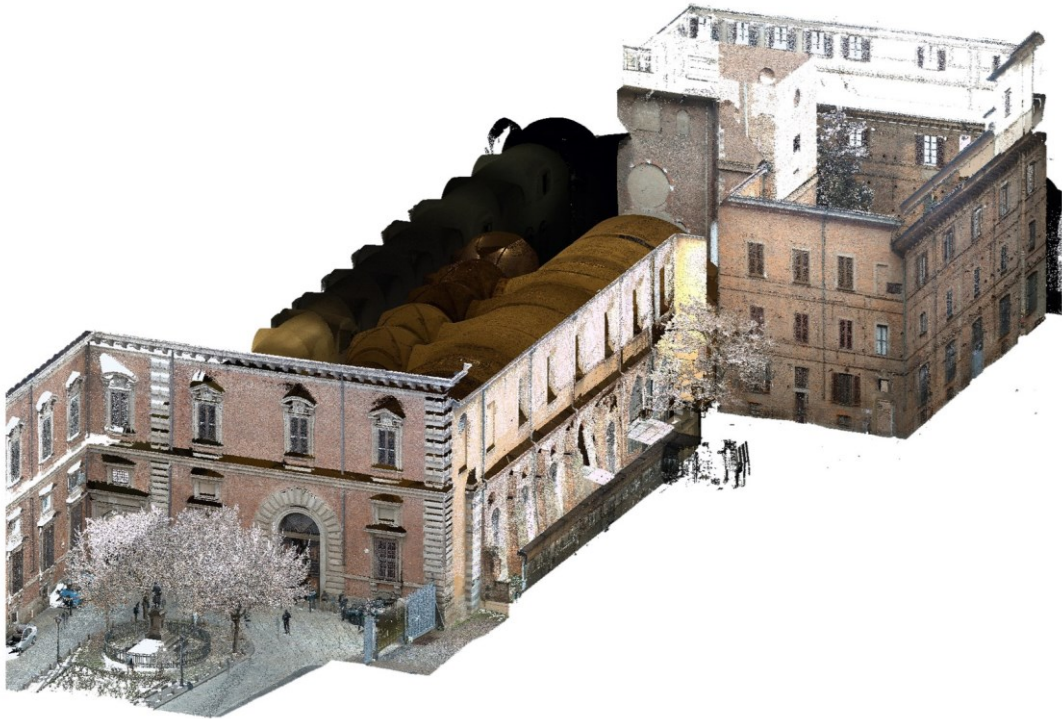


Figura 5.5. La nuvola di punti dell'intero complesso di Brera registrata dalle 119 stazioni, in vista assonometrica.

5.3 Articolazione della sperimentazione e ambiti di applicazione

La sperimentazione è articolata in tre fasi successive, definite a partire dal dato di rilievo e collegate dal principio che l'esito di ciascuna è l'ingresso della seguente. La prima fase, la segmentazione semantica della nuvola di punti, è condotta sull'intera area principale dell'ex chiesa e ha per esito il riconoscimento automatico della natura degli elementi architettonici su otto classi (non classificato, pavimento, muro, volta, arco, pilastro, finestra, porta). Alla segmentazione si aggiunge, nella stessa fase, un modulo di post-elaborazione limitato al fronte ovest, in cui l'ortoimmagine prodotta per la terza fase è riusata come vincolo bidimensionale per correggere gli errori di bordo della rete.

La seconda fase, estesa anch'essa a tutta l'area principale dell'ex chiesa, è dedicata all'automazione della modellazione geometrica: dalle classi riconosciute si isolano le singole istanze, se ne misurano le geometrie e si generano in Revit famiglie parametriche posate alle coordinate del rilievo, per ognuna delle sette classi architettoniche.

Su di essa si valutano l'accuratezza geometrica rispetto alla nuvola e la riduzione dei tempi di produzione rispetto alla modellazione manuale.

La terza fase è circoscritta a una porzione ridotta e rappresentativa dell'edificio, il fronte ovest sulla piazzetta di Brera, con il muro perimetrale, il portale, le cinque finestre e l'apparato lapideo, e un pilastro campione del piano terra in cui la colonna medievale affiora entro l'involucro ottocentesco. Su questi elementi si sperimenta l'arricchimento del livello informativo del modello: materiali ricavati da un classificatore sull'ortoimmagine del fronte, stato di conservazione osservato a vista, conoscenza storica estratta dalla documentazione con un modello linguistico e revisionata, scrittura dei valori come parametri condivisi con provenienza dichiarata. La scelta del fronte ovest risponde a due criteri, è la porzione dell'edificio per cui esistono insieme un rilievo esterno ad alta densità, fotografie da drone e una documentazione storica specifica; ed è una sezione in cui il dato materico e quello documentale dicono cose diverse, condizione che rende verificabile l'utilità dell'arricchimento.

Lo schema della Figura 5.6 riassume le tre fasi con i rispettivi ambiti spaziali, i dati in ingresso e in uscita e i capitoli che le documentano. Il riconoscimento automatico della natura degli elementi è la condizione che abilita tanto l'automazione geometrica quanto l'arricchimento informativo: senza classi non esistono istanze da misurare, e senza istanze modellate non esistono oggetti a cui associare gli attributi.

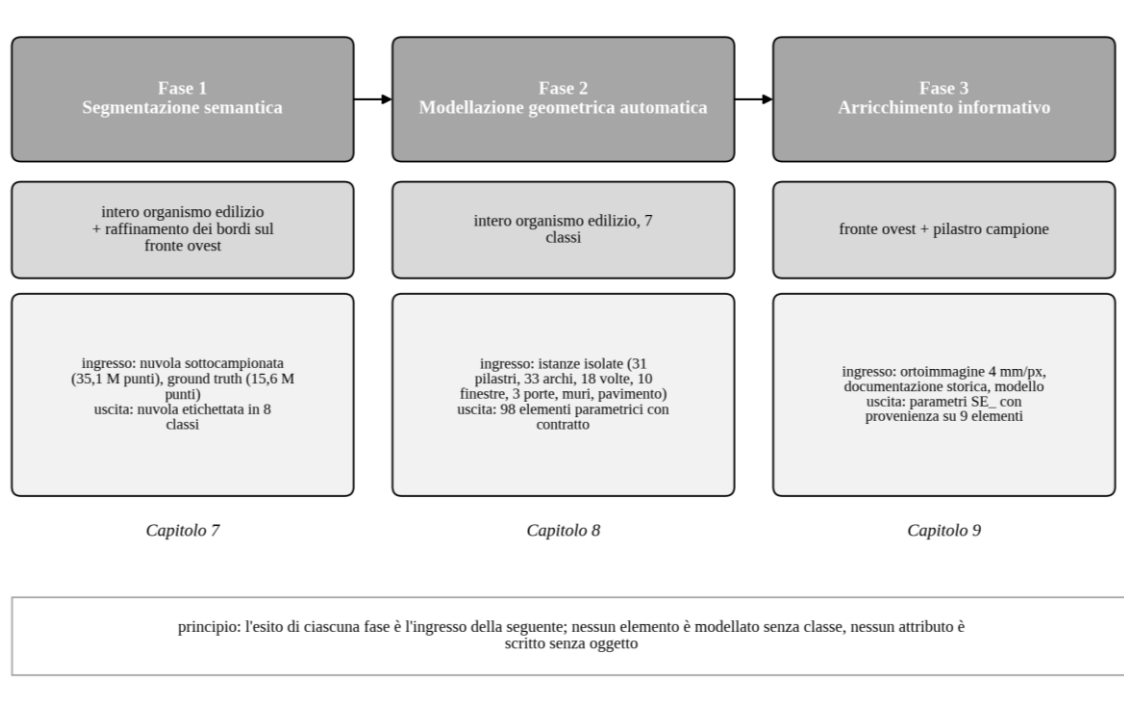


Figura 5.6. Schema dell'articolazione della sperimentazione nelle tre fasi: segmentazione semantica, modellazione geometrica automatica, arricchimento informativo, con gli ambiti spaziali e i prodotti di ciascuna.

5.4 Raccolta della documentazione multimodale: archivi storici, fotografie, ortofoto

Accanto al dato metrico, la terza fase richiede un quadro documentale e fotografico dal quale ricavare le informazioni che la nuvola non contiene. Il dato storico raccolto comprende sei documenti in formato PDF, per 622 pagine complessive: la tesi di laurea di Ghilardelli e Micella sul complesso di Brera, fonte principale per i rimandi d'archivio; la scheda del catalogo regionale SIRBeC del Palazzo di Brera, con la scheda collegata sulla chiesa demolita; il saggio di Arisi Rota, Buganza e Rossetti sul cantiere quattrocentesco; l'introduzione di Arrigoni alla Pinacoteca, acquisita da scansione senza testo e letta con il riconoscimento ottico dei caratteri; gli atti del convegno per la candidatura di Brera a sito UNESCO; il volume sull'ampliamento dell'Accademia, risultato privo di dati pertinenti al fronte ovest e registrato per completezza. A questi si aggiungono le fonti in rete: la pagina dedicata alla chiesa dal sito istituzionale della Pinacoteca, un articolo divulgativo con fotografie dello stato attuale degli interni e l'itinerario petrografico del CNR, unica identificazione strumentale dei litotipi reperita, riferita però ai frammenti del

portale trecentesco conservati al Castello Sforzesco.⁶⁸ Le trentacinque immagini raccolte, fra incisioni, disegni d'archivio, fotografie storiche e contemporanee, sono state catalogate distinguendo i documenti originali, le fotografie dello stato di fatto e le elaborazioni editoriali moderne.

La documentazione fotografica del fronte ovest è costituita da 16 fotografie. Le riprese da drone, con un DJI Mini 2 (camera FC7203), sono state elaborate con Agisoft Metashape 2.3.2. L'orientamento delle fotografie è stato riportato sulla nuvola laser con sei coppie di punti omologhi a scala libera e con una successiva registrazione fine ICP (*Iterative Closest Point*).

Il prodotto centrale della documentazione è l'ortoimmagine del fronte ovest. La nuvola originale del rilievo, in coordinate proprie, è stata prima riallineata sul sistema della nuvola di lavoro, dalla quale deriva il modello geometrico, con sei coppie di punti omologhi a scala fissa e con una registrazione ICP. La risoluzione di 4 mm/px è stata scelta perché conserva la lettura dei giunti di malta, larghi 8-12 mm; a questa risoluzione l'immagine misura 5809×4745 pixel per $23,24 \times 18,98$ m reali, con una spaziatura media di 2,4 mm e 2,75 punti per pixel, e la copertura dopo il riempimento raggiunge il 90,5%: le lacune residue sono occlusioni reali degli oggetti, non carenza di densità, come dimostra il fatto che la copertura satura all'89% anche a 16 mm/px.

L'ortoimmagine è multistrato: al colore reale dal laser si affiancano una versione a contrasto accentuato per la lettura visiva, la riflettanza laser, indipendente dall'illuminazione e quindi capace di distinguere materiali che in RGB appaiono simili, la profondità dal piano medio di facciata, che separa gli elementi aggettanti da quelli a filo, e la provenienza del dato per ogni pixel. Le lacune del 9,5% sopra gli oggetti, invisibili a uno scanner posto a terra, sono state colmate proiettando all'inverso le 16 fotografie da drone sulla superficie laser.

I quattro strati sono mostrati nella Figura 5.7.

⁶⁸ CNR-ICVBC, «La chiesa di Santa Maria di Brera e la chiesa di San Carpoforo».

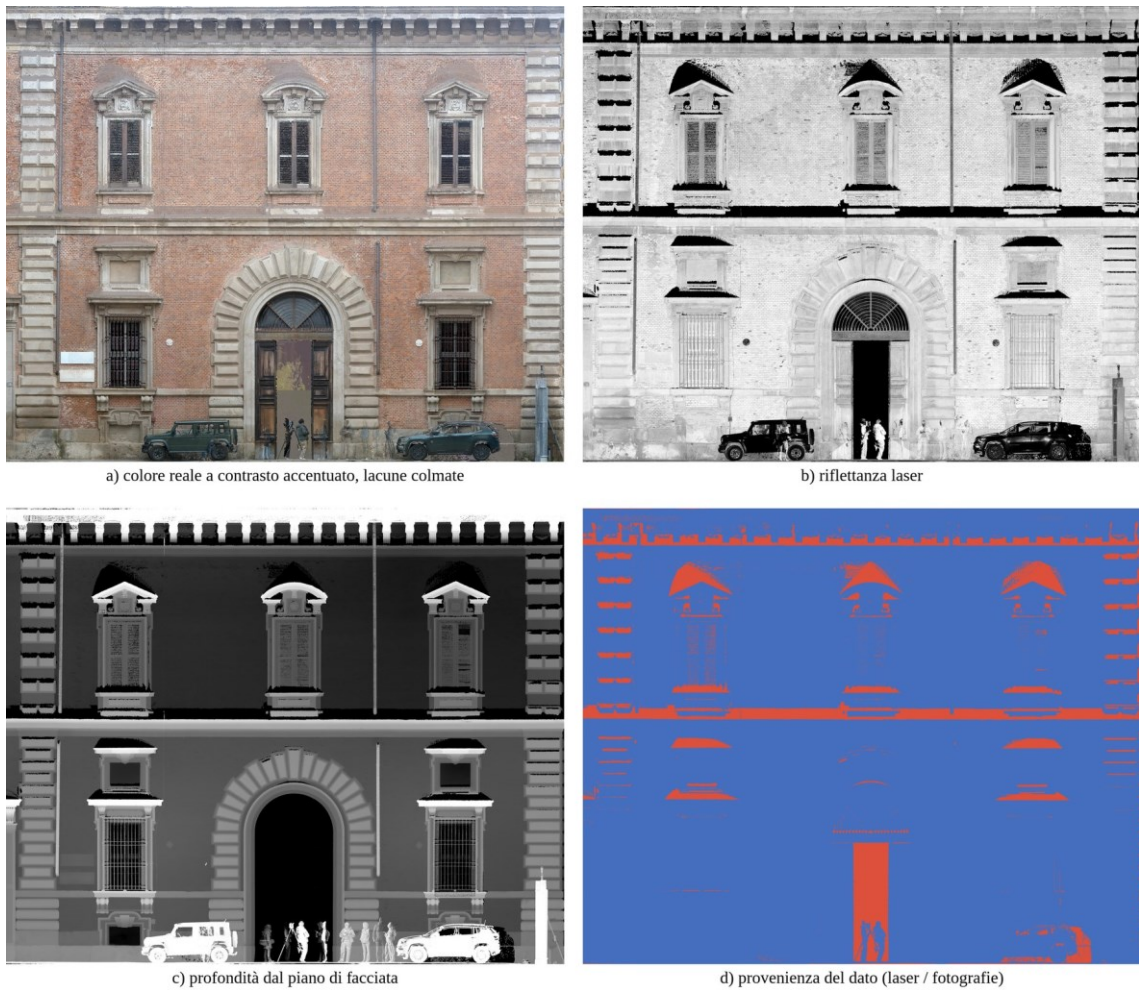


Figura 5.7. L'ortoimmagine multistrato del fronte ovest a 4 mm/px (5809 × 4745 pixel, 23,24 × 18,98 m): colore reale a contrasto accentuato con le lacune colmate dalle fotografie da drone, riflettanza laser, profondità dal piano medio di facciata (da -15 cm in nero a +45 cm in bianco) e provenienza del dato (laser in blu, fotografie in arancio).

Gli elaborati ortografici bidimensionali (piante, prospetti e sezioni) prodotti con RiPANO a partire dal dato scansionato completano il quadro e sono il riferimento per la restituzione grafica.

6 Metodologia proposta

6.1 Il *workflow* in tre fasi

Il flusso di lavoro trasforma la nuvola di punti in un modello informativo in tre fasi collegate, dove l'esito di ciascuna è l'ingresso della seguente. La segmentazione semantica produce la nuvola etichettata; da questa la modellazione geometrica isola e misura le istanze; alle famiglie posate nel modello l'arricchimento informativo associa infine gli attributi. La Figura 6.1 rappresenta la catena completa e distingue, passaggio per passaggio, quale dei tre operatori interviene, un algoritmo di intelligenza artificiale, una procedura deterministica oppure l'operatore umano. La distinzione non è un dettaglio grafico ma il criterio con cui il metodo va letto e valutato, perché in ciascuna fase l'intelligenza artificiale occupa una posizione diversa e i passaggi che la circondano sono calcolo o scrittura automatica, non apprendimento.

Nella prima fase l'intelligenza artificiale è una rete neurale profonda addestrata in modo supervisionato, la DGCNNMod apprende dai blocchi annotati e assegna a ogni punto una delle otto classi. Attorno alla rete stanno operazioni deterministiche (sottocampionamento, calcolo delle normali, costruzione dei blocchi, voto sulle finestre sovrapposte, propagazione ai punti non votati) e un passaggio umano che condiziona tutto il resto, l'annotazione del *ground truth*. Alla rete è stato aggiunto, sul solo fronte ovest, un modulo di post-elaborazione che riusa l'ortoimmagine della terza fase, un modello fondazionale per la segmentazione delle immagini, MobileSAM, propone i contorni degli elementi senza alcun addestramento, e regole geometriche deterministiche completano i contorni, decidono dove il dato manca e correggono le etichette della nuvola entro una fascia di profondità.

Nella seconda fase l'intelligenza artificiale è un modello linguistico multimodale usato come agente e collegato a Revit attraverso il protocollo MCP: il modello legge le tavole diagnostiche delle nuvole isolate, progetta e scrive le procedure di misura e di generazione, le esegue nel software e ne verifica gli esiti rispetto a soglie fissate prima dell'esecuzione. Il vincolo architettuale della fase è che nessuna misura del modello proviene dal modello linguistico, le geometrie sono calcolate da procedure deterministiche depositate come codice, i loro esiti

sono raccolti in un contratto per elemento (valore, incertezza e provenienza di ogni grandezza) e ogni famiglia generata è collaudata e riletta dal modello prima di essere accettata. La combinazione di una componente neurale, che interpreta e dirige, e di una componente simbolica, che misura e costruisce, è quella che i report di progetto denominano architettura neuro-simbolica. Al posto di blocco interviene la revisione manuale: il modello sovrapposto alla nuvola viene controllato a vista, gli elementi segnalati sono promossi o esclusi e ogni correzione rientra nel contratto e viene rigenerata, mai apportata a mano sulla geometria.

Nella terza fase intervengono due tecniche distinte: un classificatore *Random Forest*, addestrato sui riquadri annotati a mano, assegna a ogni pixel dell'ortoimmagine del fronte una classe di materiale; un modello linguistico estrae dalla documentazione storica affermazioni strutturate, che una revisione manuale conferma o corregge prima della scrittura.

I passaggi che collegano queste due componenti al modello sono deterministici: la maschera di validità, il *post-processing* a vincolo fisico, l'attribuzione di ogni pixel all'elemento che lo occupa con la riproiezione delle geometrie del modello, la scrittura dei parametri condivisi con la provenienza di ogni valore. La Tabella 6.1 riassume per ciascun passaggio l'operatore, la tecnica, i dati in ingresso e in uscita e la metrica con cui l'esito è misurato.

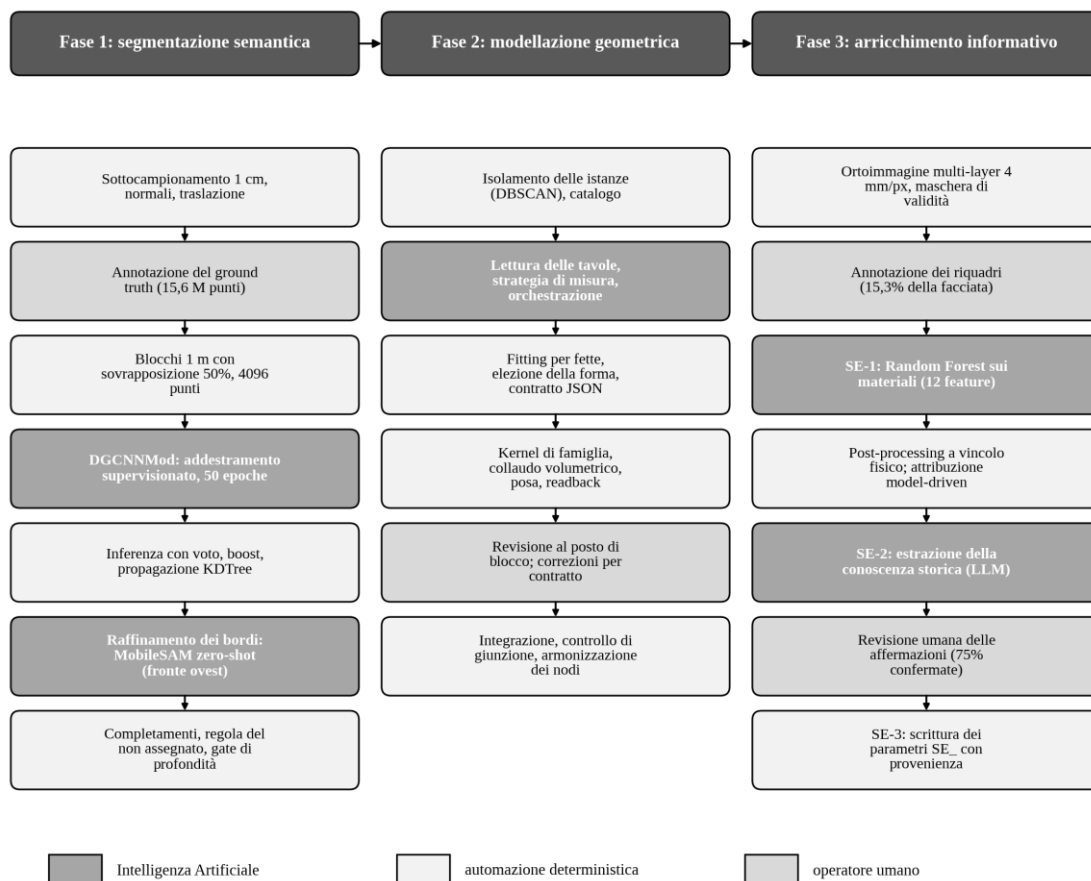


Figura 6.1. Schema del flusso di lavoro nelle tre fasi, con l'indicazione dell'operatore di ciascun passaggio: intelligenza artificiale, automazione deterministica, operatore umano.

Tabella 6.1. Passaggi del flusso di lavoro con operatore, tecnica, dati e metrica di valutazione.

Passaggio	Fase	Operatore	Tecnica	Ingresso → uscita	Metrica
Annotazione del <i>ground truth</i>	1	umano	selezione manuale in CloudCompare	nuvola sottocampionata → 15,6 M punti etichettati	tempo impiegato
Segmentazione semantica	1	AI	DGCNNMod, apprendimento supervisionato	blocchi di 4096 punti → classe per punto	OA, mIoU, <i>Precision</i> , <i>Recall</i> , F1, matrice di confusione
Raffinamento dei bordi (fronte ovest)	1	AI + deterministico	MobileSAM <i>zero-shot</i> ; completamenti e gate di profondità	ortoimmagine + nuvola etichettata → etichette corrette	OA prima/dopo, IoU dei contorni, bilancio punti risanati/peggiorati
Isolamento delle istanze	2	deterministico	DBSCAN su nuvola voxelizzata	nuvola etichettata → un file per elemento	numero di istanze per classe
Misura e contratto	2	AI (agente) + deterministico	<i>fitting</i> robusto per fette, elezione della forma (BIC)	istanza → contratto JSON	mediana e p95 <i>cloud-to-model</i> , σ
Generazione e posa in Revit	2	AI (agente) + deterministico	<i>kernel</i> di famiglia, collaudo volumetrico, <i>readback</i>	contratto → famiglia posata	<i>flex</i> test, scarto di <i>readback</i>
Revisione al posto di blocco	2	umano	confronto a vista modello/nuvola	elementi segnalati → promossi o esclusi	numero di elementi promossi/esclusi
Classificazione dei materiali (SE-1)	3	AI	<i>Random Forest</i> per pixel	12 <i>feature</i> per pixel → classe di materiale	OA, F1, importanza delle <i>feature</i>
Attribuzione <i>model-driven</i>	3	deterministico	riproiezione con <i>z-buffer</i> delle famiglie	mappa dei materiali + geometrie → percentuali per elemento	copertura per elemento
Estrazione della conoscenza storica (SE-2)	3	AI	LLM come estrazione di informazione	documenti → affermazioni con fonte	% di affermazioni confermate
Revisione umana	3	umano	scheda di revisione	affermazioni → confermate/corrette	tempo di supervisione
Scrittura nel modello (SE-3)	3	deterministico	script pyRevit, parametri condivisi	valori validati → parametri con provenienza	n. parametri, errori, tempo

Due regole valgono in tutte le fasi. La prima è che ogni valore scritto nel modello porta con sé la propria provenienza: nella seconda fase la provenienza distingue le grandezze misurate da quelle inferite per simmetria o dichiarate convenzionali, nella terza il parametro SE_Provenienza registra metodo, accuratezza e data di ogni attributo. La seconda è che l'esito di ogni passaggio automatico è sottoposto a una verifica indipendente dal passaggio stesso: il

confronto con il *ground truth* per la rete, il confronto con la nuvola e la rilettura dal modello per le famiglie, la revisione umana per le affermazioni storiche. Dove un dato non è osservabile, il metodo lo dichiara anziché stimarlo; dove il rilievo non sostiene una misura difendibile, l'elemento resta al posto di blocco con il motivo.

6.2 Strumenti software e ambienti di sviluppo

L'ambiente di lavoro è composto da strumenti commerciali, librerie a codice aperto e procedure scritte nel corso del lavoro, e la Tabella 6.2 li elenca per fase con il ruolo svolto. L'acquisizione è stata condotta con il laser scanner Riegl VZ-600i e con il software proprietario del costruttore: RiSCAN PRO (versione 2.21.3) per la registrazione delle scansioni. CloudCompare (versione 2.13.2) è stato impiegato in tre momenti: per il sottocampionamento, il calcolo delle normali e l'annotazione manuale del *ground truth* della prima fase; per il riallineamento della nuvola originale sul sistema del modello, con punti omologhi e ICP, che precede la costruzione dell'ortoimmagine; per le verifiche visive delle mappe degli errori.

La prima fase è interamente scritta in Python 3. La rete DGCNNMod è implementata in PyTorch ed eseguita su GPU con CUDA; la lettura e la scrittura dei file LAS avvengono con la libreria laspy, la conversione del colore da RGB a HSV con scikit-image, la propagazione delle etichette ai punti non votati con il KDTree di scikit-learn, l'accoppiamento fra predizione e *ground truth* in fase di valutazione con il cKDTree di SciPy; le metriche e la matrice di confusione sono calcolate con scikit-learn e rappresentate con Matplotlib e seaborn. Il modulo di affinamento dei bordi usa NumPy e OpenCV per la ricostruzione della griglia dell'ortoimmagine e per la proiezione delle etichette, e MobileSAM, distribuito come modello PyTorch ed eseguito su CPU, per la proposta dei contorni.⁶⁹ L'addestramento e l'inferenza sono stati eseguiti su una workstation con processore Intel Core i9-14900K, 64 GB di memoria e scheda grafica NVIDIA GeForce RTX 4080 SUPER con 16 GB di memoria dedicata, con sistema operativo Windows 10,

⁶⁹ Zhang et al., *Faster Segment Anything*.

Python 3.10 e PyTorch 2.5.1 su CUDA 12.1; le versioni delle librerie sono riportate nella Tabella 6.2.

L'isolamento delle istanze all'inizio della seconda fase è affidato a Open3D, per il sottocampionamento a voxel, il *clustering* DBSCAN e la ricerca dei vicini con KDTreeFlann, e a pandas e openpyxl per la generazione del catalogo in Excel con le anteprime. Le procedure di misura della seconda fase girano fuori da Revit, in Python 3 con NumPy, SciPy, Matplotlib e laspy: *fitting* per fette, elezione della forma, contratti JSON e tavole diagnostiche. La generazione delle famiglie e la posa delle istanze avvengono dentro Autodesk Revit 2026, attraverso pyRevit (versione 6.5.3), che esegue codice IronPython 2.7.12 nel contesto dell'applicazione. Il ponte fra l'agente e Revit è un server MCP, il progetto revit-mcp-plugin, che traduce le richieste del modello linguistico in chiamate al servizio pyRevit; il comando impiegato in tutte le campagne è l'esecuzione di codice depositato in file (`execute_revit_code` con `execfile`).⁷⁰ L'agente è il modello linguistico Claude di Anthropic, nelle campagne della seconda fase prima Claude Opus 4.8, poi Claude Opus 5.

Nella terza fase la fotogrammetria da drone impiegata per colmare le lacune dell'ortoimmagine è stata elaborata con Agisoft Metashape 2.3.2; l'ortoimmagine *multi-layer*, la maschera di validità, le *feature* per pixel, il classificatore *Random Forest* e l'attribuzione *model-driven* sono procedure Python con NumPy, scikit-learn e librerie di elaborazione delle immagini; la correzione della pre-annotazione è stata eseguita manualmente in Adobe Photoshop; la scrittura dei parametri condivisi è uno script pyRevit eseguito sul ponte MCP, con verifica dello stato di ogni transazione registrata su file.

⁷⁰ Anthropic, «Model Context Protocol»; «revit-mcp-plugin».

Tabella 6.2. Strumenti software impiegati nelle tre fasi e ruolo di ciascuno nel flusso di lavoro.

Fase	Strumento	Ruolo
Rilievo	Riegl VZ-600i, RiSCAN PRO 2.21.3, RiPANO 1.1.1	acquisizione, registrazione, esportazione E57
Pre-elaborazione	CloudCompare 2.13.2	sottocampionamento, normali, annotazione, riallineamento ICP, verifiche visive
1	Python 3.10, PyTorch 2.5.1 (CUDA 12.1), NumPy 2.2.6, laspy 2.7.0, scikit-image 0.25.2, scikit-learn 1.7.2, SciPy 1.15.3, Matplotlib 3.10.6, seaborn 0.13.2	pre-elaborazione a blocchi, DGCNNMod, inferenza con voto, valutazione
1 (raffinamento)	NumPy 2.2.6, OpenCV 4.13.0, MobileSAM (PyTorch 2.5.1, CPU)	griglia dell'ortoimmagine, proposta dei contorni, correzione delle etichette
2	Open3D 0.19.0, pandas 2.3.3, openpyxl 3.1.5	isolamento delle istanze (DBSCAN), catalogo Excel
2	Python 3.10, NumPy 2.2.6, SciPy 1.15.3, Matplotlib 3.10.6, laspy 2.7.0	<i>fitting</i> per fette, elezione della forma, contratti JSON, tavole diagnostiche
2	Revit 2026, pyRevit 6.5.3 (IronPython 2.7.12, Routes), revit-mcp-plugin, Claude (Claude Opus 4.8, poi Claude Opus 5)	<i>kernel</i> di famiglia, collaudo, posa, <i>readback</i> , orchestrazione via MCP
2 (sviluppo)	Dynamo	banco di prova del primo <i>kernel</i> ; esportazione delle geometrie nella fase 3
3	Agisoft Metashape 2.3.2, Python (NumPy 2.2.6, scikit-learn 1.7.2, elaborazione immagini), Adobe Photoshop	ortoimmagine <i>multi-layer</i> , maschera, <i>Random Forest</i> , attribuzione <i>model-driven</i> , correzione dell'annotazione
3	Claude (Claude Opus 5), pyRevit sul ponte MCP	estrazione della conoscenza storica, scrittura dei parametri SE_

Tutte le procedure scritte per questo lavoro sono depositate nelle cartelle di progetto come file di codice e di configurazione, e le catene della seconda fase sono rieseguibili anche senza l'agente, da pulsanti pyRevit che lanciano le stesse fasi con lo stesso verbale di esito. La rieseguibilità è parte del metodo: l'esito di ogni campagna deve poter essere ricostruito dal codice e dai contratti, non dalla cronologia delle interazioni con il modello linguistico.

7 Prima fase: la segmentazione semantica della nuvola di punti

7.1 Pulizia, registrazione e strutturazione delle nuvole di punti

La nuvola di punti acquisita, pur già registrata in fase di rilievo grazie alla procedura automatica dello scanner, non è direttamente utilizzabile come input di una rete neurale, la sua densità, la presenza di rumore e ridondanza e l'entità delle coordinate richiedono una serie di operazioni di pre-elaborazione. Queste operazioni sono state condotte in CloudCompare, software open source di riferimento per la manipolazione di nuvole di punti, secondo la sequenza adottata in letteratura per le scene del dataset ArCH: sottocampionamento spaziale a 0,01 m e calcolo delle normali, entrambi in CloudCompare, con orientamento per albero di copertura minimo.⁷¹

7.1.1 Il sottocampionamento spaziale e la sua necessità

L'operazione fondamentale della pre-elaborazione è il sottocampionamento spaziale (*spatial subsampling*), un filtraggio della densità che impone una distanza minima tra punti contigui. Per la nuvola dell'area principale dell'ex chiesa è stata adottata una distanza minima di 0,01 m: l'algoritmo scorre l'intero dataset e, per ogni coppia di punti a distanza inferiore alla soglia, ne conserva uno solo, restituendo una nuvola a densità massima controllata e distribuzione spaziale più uniforme. Il confronto della Figura 7.1 fra la nuvola grezza e quella regolarizzata rende visibile l'effetto del filtro, la ridondanza in prossimità delle stazioni scompare e la spaziatura fra i punti diviene uniforme sull'intera superficie.

Il sottocampionamento è necessario per tre ordini di ragioni, tutte particolarmente rilevanti nel caso di una rete neurale che opera per blocchi locali. L'acquisizione LiDAR terrestre genera una marcata ridondanza geometrica, a distanza ravvicinata lo scanner acquisisce decine di punti nello stesso centimetro quadrato di superficie. Le scansioni presentano inoltre un forte squilibrio di densità, con zone iper-dense in prossimità dello strumento e zone rarefatte a distanza, che confonde la rete, la quale lavora campionando un numero fisso di punti su volumi costanti e si aspetta una densità uniforme. La dimensione computazionale del dato grezzo è infine incompatibile con i limiti di memoria e di

⁷¹ Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», p. 4.

calcolo della *pipeline*, la rete elabora blocchi locali di poche migliaia di punti, e un campionamento casuale operato su zone iper-dense risulterebbe statisticamente poco rappresentativo della geometria locale.

La soglia di 0,01 m conserva i dettagli architettonici fini (cornici, modanature, spessori murari) ed elimina la ridondanza tipica delle scansioni terrestri ad alta risoluzione. Questa risoluzione non penalizza la successiva modellazione geometrica: il riconoscimento di forme macroscopiche (piani, cilindri, archi, volte) si fonda su decine o centinaia di punti, e una superficie muraria campionata a 1 cm conserva una densità sufficiente per il *fitting* di primitive. Anzi, la regolarizzazione della densità rende più stabile e rapido il *fitting*, evitando il rumore statistico indotto dalle zone iper-dense.



Figura 7.1. Effetto del sottocampionamento spaziale a 0,01 m su un dettaglio del fronte: a sinistra la nuvola grezza con il colore del rilievo, a destra la nuvola regolarizzata.

La nuvola grezza dell'area principale dell'ex chiesa, composta da 860.906.948 punti per circa 24 GB, è stata ricondotta a 35.142.819 punti, corrispondenti a circa 1 GB, la Tabella 7.1 mette a confronto le consistenze prima e dopo il filtro, insieme a quella del rilievo complessivo, e mostra una riduzione di oltre un ordine di grandezza nel numero di punti e nell'occupazione di memoria, ottenuta

preservando integralmente il contenuto geometrico utile alle fasi successive. È su questa nuvola regolarizzata che si innestano tutte le elaborazioni successive.

Tabella 7.1. Riduzione della consistenza della nuvola dell'area principale a seguito del sottocampionamento spaziale (distanza minima 0,01 m).

Stato del dato	Numero di punti	Memoria
Nuvola grezza (area ex chiesa)	860.906.948 pt	≈ 24 GB
Nuvola sottocampionata (0,01 m)	35.142.819 pt	≈ 1 GB
Rilievo complessivo (intero complesso)	2.311.220.731 pt	≈ 64 GB

7.1.2 Calcolo delle normali e traslazione all'origine

Completato il sottocampionamento, sono state calcolate le normali ai punti, *feature* di input obbligatoria per la rete, per ogni punto si stima il piano locale interpolante i vicini entro un raggio di ricerca opportuno (impostato a 0,05 m, coerente con la spaziatura di 0,01 m), ottenendo la direzione normale alla superficie. L'orientamento delle normali è stato reso globalmente coerente sfruttando la posizione nota del sensore e propagando l'orientamento con un albero di copertura minimo (*Minimum Spanning Tree*) costruito su dieci vicini, il valore indicato nel riferimento,⁷² così da garantire che le normali puntino sistematicamente verso l'esterno delle superfici.

Si è infine resa necessaria una traslazione delle coordinate verso l'origine. Le coordinate del rilievo, dell'ordine del centinaio di metri sull'asse verticale per via della quota assoluta, sono valori troppo elevati per essere trattati stabilmente da una rete neurale, che opera su geometria locale relativa, coordinate assolute di grande entità introducono instabilità numerica durante l'addestramento. La nuvola è stata pertanto traslata in modo da ricondurre il punto di minimo del *bounding box* all'origine del sistema di riferimento; la stessa traslazione è ripetuta, in modo automatico, dalla procedura di costruzione dei blocchi e dalla procedura di inferenza, che sottraggono a ciascuna coordinata il proprio minimo prima di qualunque calcolo.

⁷² Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», p. 4.

7.1.3 Strutturazione del *ground truth* e annotazione delle classi semantiche

L'addestramento di una rete di segmentazione semantica in modalità supervisionata richiede un insieme di dati etichettati (*ground truth*) in cui a ogni punto sia associata la classe architettonica di appartenenza. La costruzione del *ground truth* è stata condotta con annotazione manuale in CloudCompare: a ciascun punto è stato attribuito un campo scalare denominato *Label*, contenente il valore numerico corrispondente alla classe. L'annotazione procede per selezioni successive, poligonali o rettangolari eseguite da molteplici angolazioni, assegnando a ogni gruppo di punti il valore della classe pertinente, come mostra la Figura 7.2.

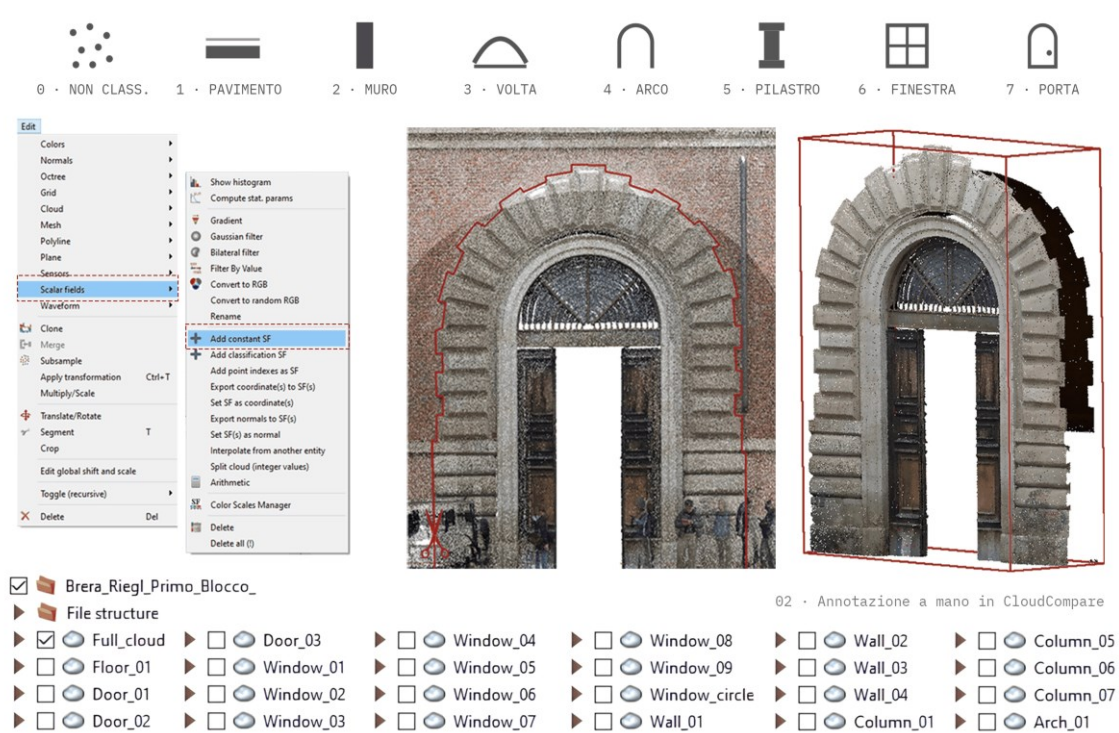


Figura 7.2. Annotazione manuale del *ground truth* in CloudCompare 2.13.2: in alto le otto classi con la loro etichetta numerica; al centro il ritaglio del portale sulla nuvola e la porzione estratta; a sinistra il comando con cui si aggiunge il campo scalare in cui è scritto il valore della classe; in basso l'albero degli oggetti con le selezioni segmentate elemento per elemento.

La qualità dell'annotazione è determinante per le prestazioni del modello. Per ciascuna classe si è perseguita una distribuzione spaziale ampia, una varietà di esemplari e una quantità sufficiente di punti, evitando di concentrare i campioni in un'unica zona dell'edificio. In sede di annotazione di elementi compositi, ad esempio una porzione muraria contenente aperture, si è avuto cura di assegnare a ciascuna classe esclusivamente i punti geometricamente pertinenti, escludendo

telai, davanzali e modanature, che vengono annotati nelle rispettive classi, l'inclusione di punti spuri in una classe insegnerebbe infatti alla rete *pattern* geometrici ambigui, degradandone la capacità predittiva. La porzione annotata conta 15.639.790 punti; il tempo impiegato per l'annotazione è di circa 10 ore. Le otto classi assegnate ai punti, con un ritaglio della nuvola per ciascuna, sono presentate nella Figura 7.3.

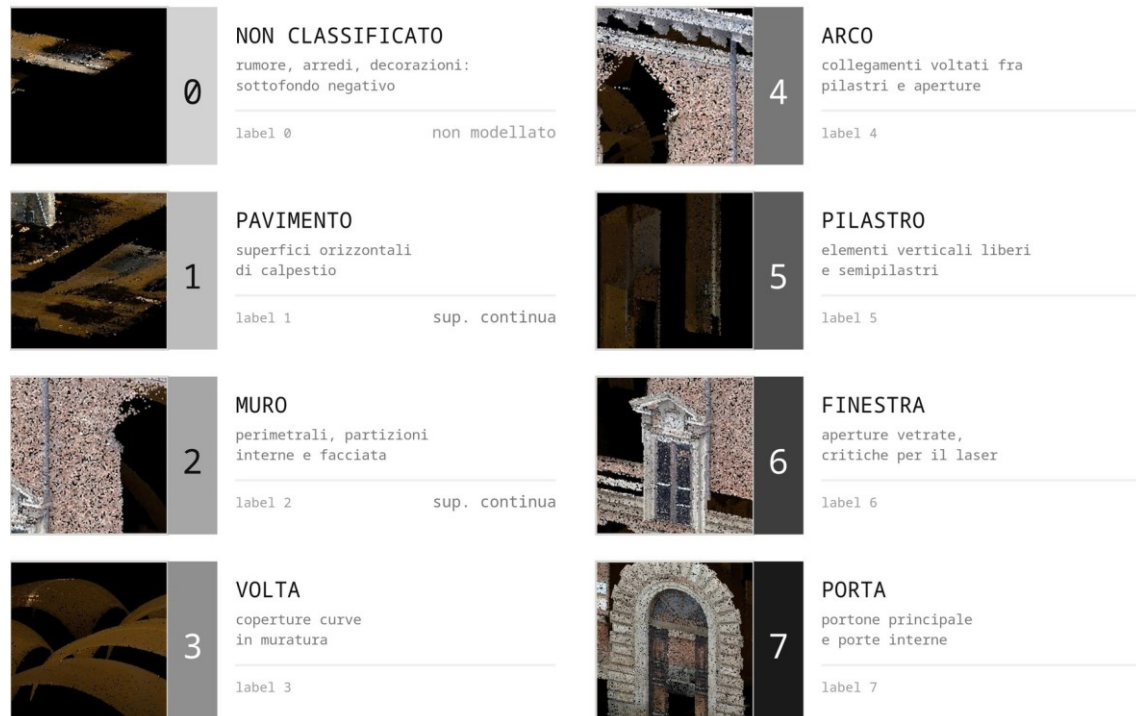


Figura 7.3. Le otto classi semantiche dell'annotazione, con un ritaglio della nuvola di punti per ciascuna e l'etichetta numerica assegnata in fase di annotazione.

7.2 Architettura di rete per l'elaborazione 3D: l'impiego della Dynamic Graph CNN (DGCNN)

La segmentazione semantica della nuvola di punti è stata affrontata mediante una rete neurale di tipo *Dynamic Graph Convolutional Neural Network* (DGCNN), architettura introdotta specificamente per l'apprendimento diretto su nuvole di punti.⁷³ La scelta di operare direttamente sul dato tridimensionale non strutturato, senza voxelizzazioni o proiezioni intermedie, è motivata dalla volontà di preservare integralmente la geometria fine del manufatto storico. La rete impiegata è una variante adattata per la segmentazione semantica di edifici storici (DGCNNMod).

⁷³ Wang et al., «Dynamic Graph CNN», pp. 146:1-146:2.

Il funzionamento della DGCNN si fonda su tre elementi. Il primo è la costruzione di un grafo dei k vicini più prossimi (*k-Nearest Neighbors*, *kNN*): per ciascun punto la rete individua i venti vicini più prossimi nello spazio delle *feature*. La caratteristica distintiva dell'architettura è la natura dinamica di tale grafo, che viene ricostruito a ogni strato della rete, i vicini non sono quindi soltanto quelli geometricamente prossimi nello spazio originario, ma quelli prossimi nello spazio delle *feature* apprese, permettendo di catturare relazioni sia locali sia non-locali tra i punti.

Il secondo concetto è l'operatore di convoluzione sui bordi del grafo, denominato *EdgeConv*. Per ciascun punto, l'operatore calcola la differenza tra le *feature* del punto e quelle di ognuno dei suoi vicini, concatenandola con le *feature* del punto stesso; il vettore risultante descrive la relazione locale tra il punto e il suo intorno. In termini architettonici, è come descrivere un elemento non solo per le sue proprietà intrinseche, ma in relazione agli elementi che lo circondano, principio particolarmente adatto a riconoscere la sintassi compositiva dell'architettura. Il terzo concetto è l'organizzazione gerarchica a strati: una successione di blocchi *EdgeConv* estrae *feature* di complessità crescente, che vengono poi aggregate a livello globale e concatenate in una rappresentazione multi-scala, infine ricondotta, attraverso strati convolutivi e meccanismi di *dropout*, alla distribuzione di probabilità sulle classi. La Figura 7.4 riassume questa sequenza.⁷⁴

⁷⁴ EdgeConv è il blocco base della rete: per ogni punto confronta le sue caratteristiche con quelle dei 20 punti più vicini, e da un blocco all'altro i vicini vengono ricalcolati. Wang et al., «Dynamic Graph CNN», pp. 146:4-146:5.

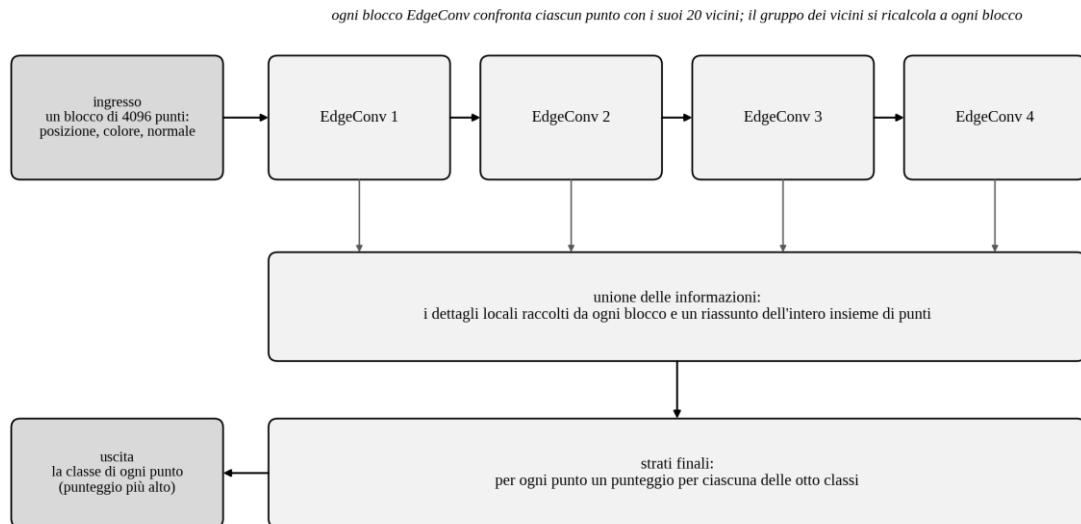


Figura 7.4. Schema della rete DGCNNMod: i quattro blocchi EdgeConv confrontano ogni punto con i suoi vicini, le informazioni raccolte vengono unite e gli strati finali assegnano a ogni punto una delle otto classi.

In ingresso, ciascun punto è descritto da nove *feature*: le tre coordinate spaziali, le tre componenti del colore (convertite nello spazio HSV) e le tre componenti della normale. La rete elabora i punti attraverso quattro blocchi EdgeConv, fino a restituire, per ogni punto, un punteggio per ciascuna delle otto classi semantiche.

7.3 Addestramento del modello e classificazione automatica sulle classi semantiche

L'addestramento della rete richiede la trasformazione della nuvola annotata in un insieme di blocchi locali omogenei, operazione svolta da una procedura di pre-elaborazione dedicata. La nuvola viene suddivisa, sul piano orizzontale, in celle quadrate di 1 m di lato, da ciascuna delle quali vengono campionati casualmente 4096 punti, il numero richiesto in ingresso dalla rete; le celle con meno di 512 punti vengono scartate in quanto poco informative, mentre in quelle con un numero di punti compreso fra 512 e 4096 il campionamento avviene con reinserimento. Ogni blocco valido è salvato come matrice a dieci colonne (le tre coordinate, le tre componenti HSV del colore, le tre componenti della normale e l'etichetta di classe). La struttura del blocco è quella adottata per la versione modificata della DGCNN nello studio di riferimento sul dataset ArCH.⁷⁵

⁷⁵ Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», pp. 4-5.

Rispetto alla versione originale della procedura, costruita su quella *pipeline* e che avanzava sulla griglia con passo pari al lato della cella, la costruzione dei blocchi è stata modificata su tre aspetti. L'adozione di una finestra mobile (*sliding window*) con sovrapposizione del 50%, ottenuta con un passo di avanzamento della griglia di 0,5 m su celle di 1 m, assicura che ogni elemento architettonico e i suoi bordi siano inquadrati per intero e da più angolazioni, evitando che colonne sottili o spigoli di aperture vengano spaccati a metà dalle linee di taglio. La conversione del colore dallo spazio RGB allo spazio HSV separa la componente cromatica dalla luminosità, rendendo la rete meno sensibile alle variazioni di illuminazione con cui la stessa pietra può apparire più chiara o più scura. Una normalizzazione adattiva del colore riconosce infine automaticamente la profondità di bit della codifica RGB, prevenendo l'errore, altrimenti difficile da individuare, per cui scansioni a 16 bit lette come 8 bit apparirebbero alla rete uniformemente bianche.

L'insieme dei blocchi così generati conta 1.759 blocchi, pari a 7.204.864 punti campionati dalla nuvola annotata di 15.639.790 punti, ed è stato suddiviso destinando l'80% all'addestramento e il 20% alla validazione: 1.407 blocchi di addestramento e 352 di validazione, assegnati dopo una permutazione casuale dell'elenco dei file. L'addestramento si è protratto per cinquanta epoche,⁷⁶ con blocchi processati a gruppi di otto (*batch*), ottimizzatore Adam con tasso di apprendimento iniziale 0,001, dimezzato ogni venti epoche. Il modello salvato è quello dell'epoca con la migliore accuratezza di validazione. Sul piano dei tempi di calcolo, la fase di pre-elaborazione dei blocchi ha richiesto circa cinque minuti, mentre l'addestramento del modello si è completato in circa un'ora su GPU.

7.3.1 Curve di apprendimento

L'andamento dell'addestramento è documentato dalle curve di apprendimento della Figura 7.5, che riportano in funzione delle epoche l'errore di addestramento (*train loss*), l'accuratezza sul set di validazione e la mIoU di validazione,⁷⁷ calcolate a

⁷⁶ Un'epoca è un passaggio completo della rete su tutti i blocchi di addestramento. Il tasso di apprendimento indica di quanto la rete corregge i propri parametri a ogni passo.

⁷⁷ L'accuratezza è la quota di punti correttamente classificati sul totale dei punti valutati (nelle tabelle *Overall Accuracy*, OA); qui è calcolata a ogni epoca sui punti dei blocchi di validazione. L'*Intersection*

ogni epoca sui 352 blocchi non usati per l'apprendimento. L'errore di addestramento è misurato da una funzione di costo detta entropia incrociata (*cross-entropy loss*), che penalizza la rete quando assegna una probabilità bassa alla classe corretta.⁷⁸ La curva di costo scende da 0,9893 alla prima epoca a 0,1269 alla cinquantesima, con una discesa rapida nelle prime venti epoche e un assestamento dopo il primo dimezzamento del tasso di apprendimento; l'accuratezza sui blocchi di addestramento passa nello stesso intervallo dal 69,20% al 95,32%.

La curva di accuratezza sul set di validazione mostra una crescita rapida nelle prime epoche (dal 79,05% della prima), un andamento irregolare con due cadute isolate (64,26% all'epoca 7 e 87,33% all'epoca 36) e una convergenza compresa fra il 93% e il 94,5% nelle ultime dieci epoche. Il valore massimo, 94,50% con mIoU di validazione dell'86,55%, è raggiunto all'epoca 46, e il modello di quell'epoca è quello salvato e impiegato nell'inferenza; l'ultima epoca chiude al 94,10% con mIoU dell'85,42%. L'accuratezza di validazione resta stabile mentre l'errore di addestramento continua a calare: l'andamento non mostra sovradattamento (*overfitting*) e suggerisce il raggiungimento del limite informativo del dataset, oltre il quale proseguire l'addestramento conterebbe poco.

over Union (IoU) di una classe è il rapporto fra l'intersezione e l'unione dell'insieme predetto e dell'insieme reale, ossia i veri positivi divisi per la somma di veri positivi, falsi positivi e falsi negativi: vale 1 in caso di sovrapposizione perfetta e decresce in presenza sia di falsi positivi sia di falsi negativi. La *mean Intersection over Union* (mIoU) è la media aritmetica delle IoU delle classi e, a differenza dell'accuratezza, pesa ogni classe allo stesso modo indipendentemente dal numero dei suoi punti; è la metrica di riferimento della letteratura sulla segmentazione semantica, e i lavori di confronto sul dataset ArCH la riportano accanto ad accuratezza, *Precision*, *Recall* e *F1-score*. Pierdicca et al., «Segmentazione semantica delle nuvole di punti», pp. 6-7.

⁷⁸ La funzione di costo misura quanto le risposte della rete si allontanano dal *ground truth*, e l'addestramento cerca di ridurla. Nella versione pesata, usata qui, gli errori sulle classi con pochi punti, come porte e finestre, contano di più.

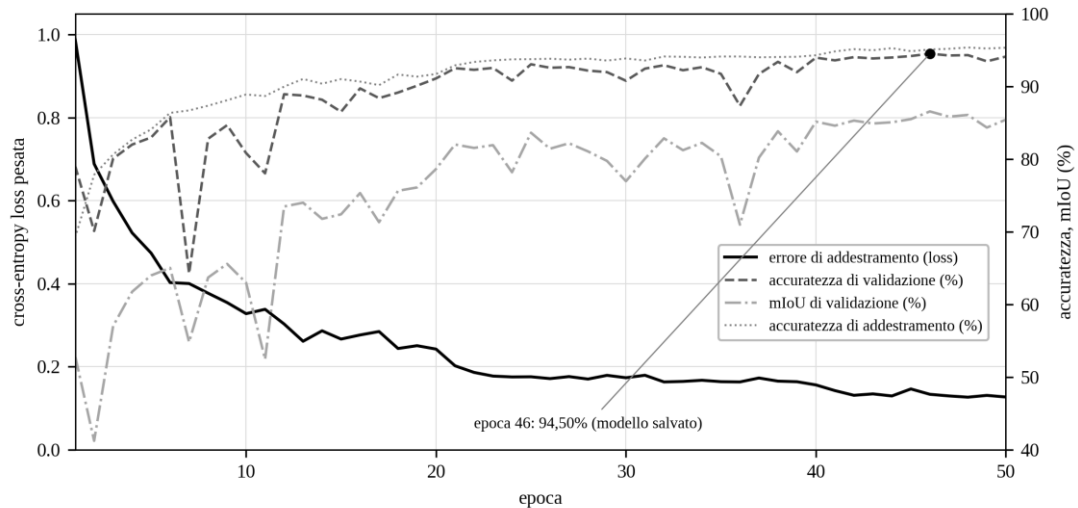


Figura 7.5. Curve di apprendimento del modello DGCNNMod: errore di addestramento (cross-entropy loss pesata), accuratezza di addestramento, accuratezza e mIoU di validazione in funzione delle epoche, dal registro di addestramento.

7.4 Valutazione delle metriche (accuratezza e mIoU) e output della nuvola etichettata

La valutazione quantitativa è condotta confrontando la nuvola predetta con il *ground truth* annotato: per ogni punto del *ground truth* la procedura di valutazione cerca il punto predetto più vicino e accetta l'accoppiamento se la distanza è inferiore a 5 cm; sui 15.639.738 punti così accoppiati viene calcolata la matrice di confusione,⁷⁹ da cui discendono le metriche riportate di seguito. L'accuratezza globale risulta del 90,91%. La mIoU vale l'80,99% sulle otto classi e il 79,75% sulle sette classi architettoniche, escludendo la classe non classificato. Il valore va letto per ciò che misura: la porzione su cui è calcolata la matrice è l'intera nuvola annotata, che comprende l'area dei 1.407 blocchi di addestramento, e il confronto quantifica quindi la capacità della rete di completare l'annotazione della stessa scena, non la sua generalizzazione a dati mai visti. L'accuratezza di validazione per epoca (94,50% con mIoU dell'86,55%, §7.3.1) dice soltanto quanto la rete riconosce altre porzioni della stessa chiesa, non come si comporterebbe su un altro edificio. L'accuratezza globale è una metrica ottimistica in presenza di forte

⁷⁹ La matrice di confusione è la tabella che incrocia, per ogni elemento valutato (qui un punto della nuvola), la classe reale del *ground truth*, sulle righe, con la classe predetta, sulle colonne. I valori sulla diagonale sono le predizioni corrette e la loro somma divisa per il totale è l'accuratezza globale; ogni valore fuori diagonale conta gli scambi fra una coppia di classi ed è leggibile come diagnosi, perché dice che cosa la rete confonde con che cosa.

sbilanciamento tra le classi: poiché le murature e i punti non classificati dominano per numero (rispettivamente il 28,35% e il 25,86% dei punti valutati), una loro corretta classificazione può mascherare carenze sulle classi minoritarie, ed è per questa ragione che la metrica di riferimento è la mIoU, che pesa allo stesso modo ogni classe.

7.4.1 Analisi per singola classe e matrice di confusione

La scomposizione delle prestazioni per singola classe, riportata nella Tabella 7.2 con *Precision*, *Recall*, *F1-score* e IoU,⁸⁰ restituisce un quadro dettagliato del comportamento dell'algoritmo. Le superfici planari e i volumi macroscopici registrano i valori più alti: il pavimento raggiunge un *F1-score* del 96,83% e una IoU del 93,86%, la copertura voltata un *Recall* del 98,95%, le murature un *F1-score* del 91,84%. Le metriche calano sugli elementi di transizione: gli archi hanno il *Recall* più basso (74,35%) e la IoU più bassa (68,91%), i pilastri la *Precision* più bassa (75,38%) a fronte di un *Recall* del 94,76%, le finestre un *Recall* del 78,93% con una *Precision* del 92,79%. Le porte, la classe meno rappresentata nel *ground truth* (646.935 punti, il 4,14% del totale), raggiungono un *F1-score* dell'86,01%.

⁸⁰ La *Precision* di una classe è la quota di elementi realmente appartenenti alla classe fra quelli che il classificatore le ha assegnato, e misura l'affidabilità della predizione; il *Recall* è la quota di elementi della classe che il classificatore ha individuato, e ne misura la copertura; l'*F1-score* è la media armonica delle due e sintetizza l'equilibrio fra falsi positivi e falsi negativi. Tutte e tre si calcolano dalla matrice di confusione.

Tabella 7.2. Metriche di classificazione per singola classe calcolate sulla matrice di confusione (accoppiamento entro 5 cm, 15.639.738 punti).

Classe	Punti nel <i>ground truth</i>	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>F1-score</i>	IoU
Unclassified	4.044.318	96,96%	92,28%	94,56%	89,68%
Floor	1.301.740	96,61%	97,06%	96,83%	93,86%
Wall	4.434.146	92,53%	91,16%	91,84%	84,92%
Vault	1.480.834	89,20%	98,95%	93,82%	88,36%
Arch	1.180.957	90,41%	74,35%	81,60%	68,91%
Column	1.611.447	75,38%	94,76%	83,97%	72,37%
Window	939.361	92,79%	78,93%	85,30%	74,37%
Door	646.935	84,18%	87,92%	86,01%	75,45%
<i>Overall Accuracy</i>	15.639.738			90,91%	
mIoU (8 classi / 7 classi)					80,99% / 79,75%

La matrice di confusione (Figura 7.6), che pone a confronto le classi reali (*ground truth*) con le previsioni del modello, mostra che gli errori non sono distribuiti in modo uniforme ma si concentrano su poche coppie di classi. Lo scambio più consistente in valore assoluto riguarda i punti di muratura predetti come pilastro (200.261 punti, il 4,52% della classe Wall), in corrispondenza di paraste e pilastri incassati, configurazione tipica degli edifici storici; la stessa classe assorbe 154.605 punti non classificati e 114.992 punti di arco (il 9,74% degli archi). Gli archi sono inoltre confusi con le volte, che ne condividono la curvatura (144.448 punti, il 12,23% della classe Arch), ed è questo scambio, sommato al precedente, a spiegare il *Recall* degli archi. Le finestre perdono verso la muratura circostante 143.836 punti (il 15,31% della classe Window), per la planarità condivisa di mazzette e cornici; le porte, in modo analogo, ne perdono 56.648 (l'8,76%), mentre 87.001 punti di muro sono attribuiti alle porte. Questi scambi coinvolgono coppie di classi geometricamente contigue o simili.

classe reale (ground truth)	Unclassified	Floor	Wall	Vault	Arch	Column	Window	Door
	3.731.948 92.3%	31.763 0.8%	44.305 1.1%	29.389 0.7%	42.299 1.0%	154.605 3.8%	2.087 0.1%	7.922 0.2%
	21.114 1.6%	1.263.438 97.1%	10.359 0.8%	0 0.0%	25 0.0%	5.986 0.5%	0 0.0%	818 0.1%
	34.680 0.8%	5.646 0.1%	4.042.236 91.2%	864 0.0%	13.838 0.3%	200.261 4.5%	49.620 1.1%	87.001 2.0%
	5.763 0.4%	3.647 0.2%	957 0.1%	1.465.227 98.9%	4.234 0.3%	998 0.1%	0 0.0%	8 0.0%
	14.918 1.3%	1.245 0.1%	25.204 2.1%	144.448 12.2%	878.037 74.3%	114.992 9.7%	1.324 0.1%	789 0.1%
	10.814 0.7%	857 0.1%	44.787 2.8%	277 0.0%	24.903 1.5%	1.527.071 94.8%	1.851 0.1%	887 0.1%
	18.784 2.0%	1.074 0.1%	143.836 15.3%	2.453 0.3%	6.189 0.7%	16.091 1.7%	741.454 78.9%	9.480 1.0%
	11.093 1.7%	160 0.0%	56.648 8.8%	37 0.0%	1.687 0.3%	5.804 0.9%	2.729 0.4%	568.777 87.9%
classe predetta								
Unclassified Floor Wall Vault Arch Column Window Door								

Figura 7.6. Matrice di confusione della segmentazione semantica sui 15.639.738 punti accoppiati: sulle righe la classe reale, sulle colonne la classe predetta; in ogni cella il numero di punti e, in corsivo, la quota sulla riga; la diagonale principale rappresenta le classificazioni corrette, i valori esterni gli scambi tra classi. Elaborazione dai risultati di *evaluate.py*.

7.4.2 Validazione visiva e output del processo

Accanto alla validazione numerica, la mappa degli errori tridimensionale della Figura 7.7 restituisce spazialmente l'accuratezza della classificazione, i punti correttamente etichettati sono rappresentati in verde, quelli errati in rosso. La distribuzione cromatica mostra una netta predominanza del verde sulle superfici principali, sulle quali la massa volumetrica e l'impianto strutturale risultano correttamente riconosciuti; i punti rossi non si presentano come rumore diffuso, bensì risultano nettamente localizzati lungo i bordi, gli spigoli e le linee di imposta. Questa concentrazione sostiene l'interpretazione dell'errore come effetto di bordo, limite intrinseco ai metodi di campionamento a finestra mobile, in cui la compresenza di geometrie differenti nello stesso blocco genera incertezza predittiva; sul fronte ovest la mappa mostra inoltre due strisce verticali di errore in

corrispondenza delle discese pluviali, classificate dalla rete come pilastri, un errore di oggetto intero e non di bordo.

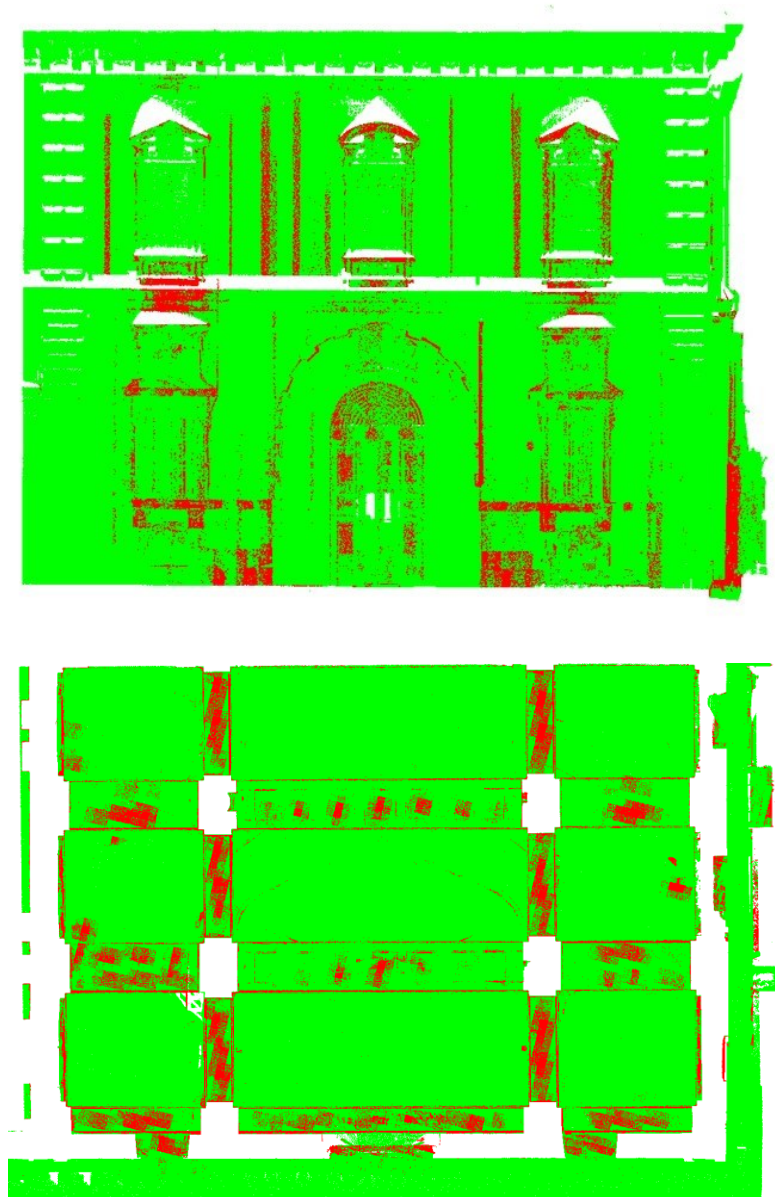


Figura 7.7. Mappa degli errori tridimensionale: sopra il fronte ovest, sotto la vista dall'alto con il fronte ovest in basso (verde: classificazione corretta; rosso: errore). Gli errori si concentrano lungo bordi, spigoli e linee di imposta.

La classificazione dell'intera nuvola, distinta dalla validazione, è affidata a una procedura di inferenza che applica il modello addestrato al dato non etichettato. La nuvola viene perlustrata da una finestra mobile di 0,5 m di lato con passo di 0,25 m, con la stessa sovrapposizione del 50% usata in addestramento ma su una griglia due volte più fine, per aumentare la precisione sui bordi; da ogni cella con almeno 128 punti vengono campionati 4096 punti e la rete restituisce per ciascuno una

distribuzione di probabilità sulle otto classi. Poiché ogni punto ricade in più blocchi, le distribuzioni vengono sommate secondo un meccanismo di voto (*voting*) che stabilizza la stima. Un moltiplicatore di probabilità (*boost*) pari a 2,0 applicato ai voti delle classi finestra e porta, contrasta l'assorbimento dei loro contorni da parte delle classi murarie dominanti, restituendo bordi più netti e facilitando la successiva estrazione delle misure. Non tutti i punti ricevono un voto, ogni finestra sottopone alla rete un campione di 4096 punti, e nelle zone dense, dove una colonna di $0,5 \times 0,5$ m che attraversa un muro o un pilastro contiene decine di migliaia di punti, la maggior parte dei punti resta fuori dal campione di tutte e quattro le finestre che la contengono; lo stesso accade, per la ragione opposta, ai punti delle celle rade escluse dalla soglia dei 128 punti. Questi punti sono etichettati per propagazione spaziale: per ciascuno si individuano i 9 vicini già classificati con una struttura ad albero (KDTree) e si assegna la classe prevalente, purché almeno 7 dei 9 vicini concordino; con la spaziatura di 1 cm della nuvola regolarizzata i vicini giacciono sulla stessa superficie del punto, e la propagazione estende il voto della rete senza introdurre una seconda decisione. I punti che non raggiungono la soglia di concordanza sono scartati e non compaiono nel file di uscita.

L'output del processo è una nuvola di punti integralmente etichettata, in cui a ogni punto è associata la classe semantica di appartenenza, esportata in formato LAS 1.4 con la classe codificata nel campo di classificazione standard e il colore originario conservato; la porzione di predizione ritagliata sull'area del *ground truth* conta 16.877.465 punti. La Figura 7.8 mostra la nuvola dell'area principale dell'ex chiesa con un colore per classe, e la Figura 7.9 la stessa nuvola in esploso assonometrico, con il colore reale e le classi separate nello spazio. Questo prodotto è il presupposto operativo delle due fasi successive: la nuvola segmentata abilita la modellazione geometrica automatica dell'involucro architettonico e l'arricchimento informativo della porzione di dettaglio. La nuvola classificata completa conta 33.746.399 punti a fronte dei 35.142.819 della nuvola regolarizzata data in ingresso all'inferenza: 1.396.420 punti, il 3,97%, non hanno raggiunto la soglia di concordanza e sono stati scartati.

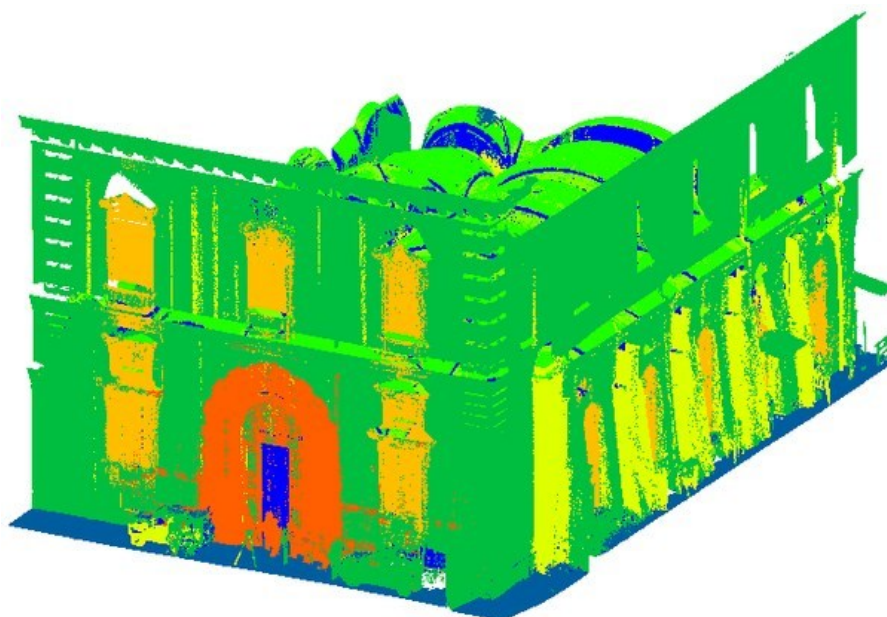


Figura 7.8. Output del processo: nuvola di punti dell'area principale dell'ex chiesa integralmente etichettata per classe semantica.



Figura 7.9. La nuvola classificata dell'ex chiesa in esploso assonometrico, con il colore reale del rilievo: il fronte ovest con le sue aperture, il sistema delle volte e il pavimento, separati per classe.

7.5 Analisi delle criticità e dei limiti della segmentazione semantica

Nonostante i risultati conseguiti, l'applicazione di algoritmi di *Deep Learning* al dominio del patrimonio culturale ha fatto emergere problemi metodologici specifici. A differenza dei dataset urbani moderni, caratterizzati da forme regolari, i beni culturali presentano geometrie complesse e una forte variabilità morfologica, che rendono più difficile la segmentazione. Si analizzano di seguito i problemi riscontrati, le loro cause e le strategie correttive adottate.

7.5.1 Ambiguità geometrica e confusione di confine

La difficoltà maggiore per la rete risiede nella classificazione dei punti situati nelle zone di transizione tra elementi contigui, come l'innesto tra volta e muro o tra pilastro e arco. La causa è duplice: la costruzione di grafi locali rende la continuità spaziale dei punti di congiunzione ingannevole, ed elementi diversi possono condividere le medesime proprietà geometriche (gli archi e le volte condividono la curvatura; le lesene e i muri la planarità). I due scambi più frequenti della matrice di confusione, arco-volta e muro-pilastro, sono di questa natura. Per mitigare il fenomeno si è ricorsi alla *sliding window* a forte sovrapposizione, che consente di analizzare i confini da molteplici angolazioni, in addestramento (passo di 0,5 m su celle di 1 m) e, con celle dimezzate, in inferenza (passo di 0,25 m su celle di 0,5 m), e al voto sulle predizioni sovrapposte. Sul fronte ovest il problema è stato affrontato anche a valle della rete, con il vincolo bidimensionale.

7.5.2 Forte sbilanciamento delle classi

Nei rilievi di architettura il numero di punti cambia molto da una classe all'altra. Muri e pavimenti contano milioni di punti, porte e finestre molti meno. Nei blocchi di addestramento le porte hanno 140.249 punti e le finestre 188.864, contro 1.396.642 dei muri. Per compensare, l'addestramento usa la funzione di costo pesata (§7.3.1), e in fase di classificazione un moltiplicatore favorisce le classi delle aperture. Il *Recall* delle porte (87,92%) e delle finestre (78,93%) va letto alla luce di questa scelta. Il moltiplicatore allarga infatti le aperture a spese della

muratura vicina, e gli 87.001 punti di muro attribuiti alle porte ne sono l'effetto misurabile.

7.5.3 Eterogeneità morfologica e limiti strumentali

Alcuni limiti discendono dalla natura stessa del rilievo. La classe delle finestre è risultata critica non solo per l'eterogeneità delle forme, ma soprattutto per i limiti fisici del sensore: le superfici vetrate vengono attraversate o riflesse dal raggio laser, restituendo zone di vuoto prive di punti e una geometria frammentaria. Analogamente, le porte presentano spesso occlusioni o risultano aperte durante il rilievo, riducendo il conteggio di punti utili, mentre gli elementi sottili come i tiranti generano *pattern* di difficile elaborazione: per questi ultimi si è scelta l'esclusione dall'addestramento, accompagnata dalla valorizzazione della classe Unclassified come campione negativo. Gli elementi esterni alla tassonomia ma geometricamente simili a una classe restano un errore atteso: le discese pluviali, verticali e continue come un pilastro sottile, ne sono l'esempio documentato.

7.5.4 Variazioni di densità e ridondanza del dato

Il forte squilibrio di densità proprio dell'acquisizione LiDAR terrestre, con zone iper-dense in prossimità dello scanner e zone rarefatte a distanza, confonde la rete, che si aspetta una densità ragionevolmente uniforme. Il problema è stato risolto a monte con il sottocampionamento spaziale, che ha regolarizzato la densità in ingresso preservando i dettagli fini; in inferenza la soglia minima di 128 punti per finestra esclude le celle quasi vuote, e la propagazione per vicinanza attribuisce la classe ai punti che non hanno ricevuto voti, nelle zone rade come in quelle dense.

7.6 Raffinamento dei bordi con l'ortoimmagine sul fronte ovest

L'effetto di bordo documentato dalla mappa degli errori ha suggerito una verifica: se l'ortoimmagine ad alta risoluzione del fronte ovest, prodotta per la terza fase, possa essere riusata come vincolo geometrico per correggere le sbavature della rete nella nuvola classificata. La domanda a cui il modulo risponde è se l'integrazione di un dato immagine metricamente corretto migliori in modo misurabile una segmentazione tridimensionale già eseguita. Il modulo riguarda il solo fronte

ovest, dove sono presenti tre delle otto classi (Wall, Window, Door); ciascuna classe comprende l'elemento architettonico intero, cornice lapidea compresa, in coerenza con l'annotazione manuale e con le famiglie del modello della seconda fase. I dati di partenza sono l'ortoimmagine a 4 mm per pixel (5809×4745 pixel), la predizione della rete ritagliata sull'area del *ground truth* e il *ground truth* stesso.

Il primo passaggio ha richiesto la ricostruzione della corrispondenza fra pixel e punto tridimensionale. La griglia è stata rigenerata dalla nuvola del fronte e registrata per correlazione sull'ortoimmagine originale.

Il secondo passaggio è la segmentazione degli elementi sull'ortoimmagine con MobileSAM, un modello fondazionale *promptable* per la segmentazione delle immagini, usato in modalità *zero-shot*: nessun addestramento, nessun dato di esempio, nessuna etichetta fornita.⁸¹ Il generatore automatico di maschere è stato eseguito con una griglia di 32×32 , pari a 1.024 *prompt* puntuali sull'ortoimmagine ridotta di quattro volte, in circa 8 minuti su CPU ha proposto 115 maschere, fra le quali i sei elementi del fronte (tre finestre superiori, due inferiori, portale) sono stati individuati senza alcun *prompt* scritto a mano e selezionati per area e forma. Le maschere selezionate sono state raffinate a piena risoluzione con un secondo passaggio guidato dal riquadro della proposta; la maschera fine coincide con la proposta automatica per IoU compresa fra 0,93 e 0,97 su tutte e cinque le finestre, il che indica che il raffinamento precisa il bordo senza cambiare l'oggetto. Ciò che l'intelligenza artificiale decide, in questo modulo, è dove passa il bordo di ciascun elemento sull'immagine; la selezione degli elementi, i completamenti geometrici, la regola del non assegnato e la correzione della nuvola sono automazione deterministica.

Lo scontorno della Figura 7.10 deriva soltanto dall'ortoimmagine.

⁸¹ Kirillov et al., *Segment Anything*; Zhang et al., *Faster Segment Anything*.



Figura 7.10. Scontorno degli elementi del fronte ovest sulla griglia dell'ortoimmagine a 4 mm per pixel: maschere proposte da MobileSAM, completate con i vincoli geometrici; in nero le aree non assegnate (occlusioni riempite da fotografia e oggetti estranei).

La regola del non assegnato discende da una proprietà dell'ortoimmagine su cui il modello ha lavorato, che è quella riempita: il 9,46% dei suoi pixel ha il colore ricostruito per proiezione inversa dalle fotografie da drone, dove il laser non vedeva. Per il modello di segmentazione quella è superficie continua e viene inclusa negli elementi, ma sotto non c'è alcun punto rilevato: dove il dato manca non si assegna nessuna classe e il punto conserva l'etichetta della rete. La regola è applicata con il *layer* di provenienza dell'ortoimmagine e con la maschera di facciata, e lascia non assegnato il 16,36% della griglia (9,46% di occlusioni riempite da fotografia, 6,90% di automobili, persone e cartelli). La conseguenza è che la correzione può agire soltanto sull'83,6% del fronte, e il resto rimane come la rete lo ha lasciato, perché una superficie occlusa al laser non è correggibile con un dato che il laser non ha.

La correzione della nuvola proietta ogni punto della predizione sulla griglia e lo modifica solo se supera tre filtri in cascata: il punto cade dentro l'estensione dell'ortoimmagine; sta sulla superficie visibile del fronte, cioè entro ± 20 cm dalla profondità che l'ortoimmagine misura in quel pixel; cade in un pixel a cui lo scontorno assegna una classe. Il secondo filtro è indispensabile, perché l'interno della chiesa occupa la stessa finestra di proiezione del fronte: senza di esso volte,

archi e pilastri interni verrebbero riclassificati come facciata. I punti sulla superficie del fronte sono 2.763.991; i punti corretti sono 172.818, il 6,3% dei punti di facciata e l'1,02% della predizione ritagliata sull'area del *ground truth* (16.877.465 punti).

L'effetto della correzione sulla classificazione è stato valutato con lo stesso criterio di *evaluate.py*, accoppiando i 2.862.914 punti di *ground truth* del fronte ovest alla predizione entro 5 cm (100% accoppiati). La Tabella 7.3 riporta i valori prima e dopo: l'accuratezza globale del fronte passa dal 92,22% al 98,08%, gli errori scendono da 222.841 (7,78%) a 55.014 (1,92%), con una riduzione del 75,3%; l'*F1-score* delle finestre sale da 0,877 a 0,958, quello della porta da 0,896 a 0,985, quello del muro da 0,949 a 0,986. Il guadagno maggiore è sul *Recall* delle finestre, da 0,846 a 0,950, che è la misura diretta della sbavatura, ossia della finestra che il muro erodeva ai bordi. Il bilancio del metodo è di 197.390 punti risanati contro 29.563 peggiorati, un rapporto di 6,7 a 1: su circa un punto ogni sette che tocca, la correzione sbaglia, e il saldo, nettamente positivo, va dichiarato in questi termini. La Figura 7.11 mostra la mappa degli errori del fronte prima e dopo la correzione.

Tabella 7.3. Metriche per classe sul fronte ovest prima e dopo il raffinamento dei bordi (2.862.914 punti di *ground truth* accoppiati entro 5 cm; Overall Accuracy dal 92,22% al 98,08%).

Classe (punti nel <i>ground truth</i>)	<i>Precision</i> prima → dopo	<i>Recall</i> prima → dopo	<i>F1-score</i> prima → dopo
Wall (1.959.579)	0,951 → 0,985	0,946 → 0,987	0,949 → 0,986
Window (526.410)	0,910 → 0,967	0,846 → 0,950	0,877 → 0,958
Door (375.613)	0,888 → 0,979	0,904 → 0,990	0,896 → 0,985
Floor (1.312)	0,668 → 0,976	0,951 → 0,889	0,785 → 0,930

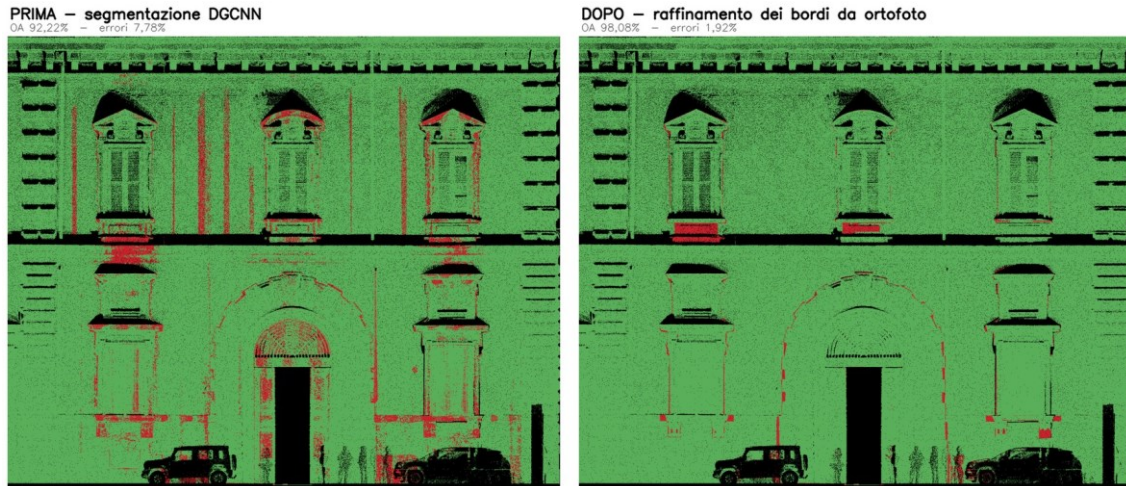


Figura 7.11. Mappa degli errori sul fronte ovest prima (a sinistra) e dopo (a destra) il raffinamento dei bordi: in rosso i punti in disaccordo con il ground truth. Le strisce verticali delle discese pluviali, classificate come pilastri dalla rete, scompaiono dopo la correzione.

7.7 Considerazioni conclusive

Il limite ultimo della metodologia risiede nella natura stessa della rete neurale: la DGCNN riconosce *pattern* geometrici locali, ma non possiede un'intelligenza topologica capace di codificare i vincoli strutturali dell'architettura: non sa che una colonna non può fluttuare nello spazio, né che una finestra deve necessariamente collocarsi all'interno di un muro, né che una discesa pluviale non è un pilastro. Il modulo del §7.6 mostra che una parte di questi errori è correggibile a valle con un vincolo esterno, geometrico e non appreso: sul fronte ovest la riduzione degli errori del 75,3% è ottenuta senza toccare la rete, riproiettando sulla nuvola un contorno letto sull'immagine e accettato solo dove il dato laser esiste. L'evoluzione di queste tecnologie nel campo dello Scan-to-BIM passerà probabilmente dall'integrazione dei modelli predittivi spaziali con sistemi basati su regole logico-strutturali, capaci di correggere le imperfezioni di confine sulla base della sintassi dell'architettura storica; il vincolo bidimensionale sperimentato ne è un caso particolare, limitato alle superfici per cui esiste una proiezione ortografica.

8 Seconda fase: l'automazione della modellazione geometrica

8.1 Isolamento degli elementi dalla nuvola segmentata

La nuvola etichettata prodotta dalla prima fase attribuisce a ogni punto una classe, ma non distingue le istanze, ad esempio tutti i punti dei pilastri portano la stessa etichetta, e per modellare un pilastro occorre prima sapere quali punti gli appartengono. Il passaggio dalla classe all'istanza è stato risolto con una procedura di *clustering* spaziale scritta in Python con la libreria Open3D, eseguita sulla nuvola classificata completa. La procedura separa le classi continue da quelle discrete: pavimento e muri sono esportati come blocco unico, mentre volte, archi, pilastri, finestre e porte sono scomposti in singoli file LAS con DBSCAN, con parametri calibrati per classe. La motivazione è anche operativa: l'importazione in Revit di un file massivo e disordinato satura la memoria, mentre il caricamento mirato del solo elemento su cui si lavora mantiene il software reattivo.

Il *clustering* opera su una copia della nuvola alleggerita con un sottocampionamento a voxel di 3 cm, e le etichette dei *cluster* trovati a bassa risoluzione sono riportate sulla nuvola nativa con la ricerca del vicino più prossimo su un KDTree, così che nessun punto originale vada perduto. Per ogni classe sono fissati un raggio di ricerca (eps) del primo livello, un raggio più stretto per il secondo livello, un numero minimo di punti sotto il quale il gruppo è scartato come rumore e un limite massimo oltre il quale il gruppo è considerato la fusione di più elementi e viene riprocessato localmente con il raggio stretto: per archi e volte il raggio è di 15 cm con soglia minima di 5.000 punti, per gli elementi di prospetto il raggio è allargato a 30 e 40 cm per scavalcare le lacune di scansione e le modanature articolate, come riportato nella Tabella 8.1.

Tabella 8.1. Parametri del clustering DBSCAN per classe (script Cluster_exporter.py) ed esito della catalogazione dopo il controllo di qualità manuale.

Classe	eps livello 1 [m]	eps livello 2 [m]	Punti minimi	Limite di fusione	Istanze catalogate	Punti totali
Volte	0,15	0,11	5.000	60.000	18	2.861.939
Archi	0,15	0,11	5.000	60.000	33	1.398.285
Pilastrì	0,30	0,10	4.000	200.000	31	3.347.536
Finestre	0,40	0,20	1.000	80.000	10	921.194
Porte	0,30	0,20	15.000	40.000	3	611.845
Muri	blocco unico				1	7.341.903
Pavimento	blocco unico				1	3.575.783

Fra l'estrazione e la catalogazione è previsto un controllo di qualità manuale: si eliminano i file errati e si validano gli elementi estratti, e un secondo script rinumerà in sequenza i file superstiti, genera per ciascuno un'anteprima a colori reali (resa su CPU con Matplotlib da un punto di vista fisso, con proporzioni rettificate sull'ingombro reale) e compila un catalogo in Excel con un foglio per classe e, per ogni elemento, l'identificativo, la categoria Revit di destinazione, il numero di punti, lo stato di modellazione e l'anteprima nella cella. Il catalogo definitivo conta 31 pilastri, 33 archi, 18 volte, 10 finestre e 3 porte, più i due blocchi continui; l'identificativo di ciascun file (BRERA_PIL_01, BRERA_ARC_01 e così via) è conservato lungo tutta la catena successiva, fino al contrassegno dell'istanza nel modello.

8.2 Estrazione delle geometrie

Le sette classi sono state affrontate nell'ordine in cui è cresciuta la complessità del dato. Si è cominciato dai pilastri, la classe pilota su cui il metodo è nato. Sono seguiti gli archi e le volte, in cui la forma stessa dell'elemento è riconosciuta automaticamente, poi le finestre e le porte, aperture con il loro apparato decorativo, e infine i muri, misurati sull'intera nuvola del complesso, e il pavimento, derivato dal modello. Per ogni classe il percorso attraversa tre momenti comuni. Nel primo la nuvola dell'istanza è letta e misurata. Prima di qualunque misura vengono prodotte tavole di lettura (prospetti, sezioni, piante, viste in profondità), che il modello linguistico interpreta per stabilire dove la superficie è affidabile e dove è

occlusa. La misura procede poi per fette: l'elemento è sezionato a intervalli regolari e a ogni sezione si adatta la forma candidata con un *fitting* statisticamente robusto, in cui i punti estranei alla superficie cercata perdono peso. Il valore finale di ogni dimensione è la mediana delle fette promosse, e la loro dispersione fornisce l'incertezza σ . Nel secondo momento i risultati confluiscono nel contratto geometrico, un file JSON per elemento in cui ogni grandezza viaggia con valore, σ e provenienza (misurata, inferita per simmetria, convenzionale), insieme alle zone escluse con la prova numerica dell'esclusione, alla posizione e rotazione nel sistema del rilievo e agli esiti delle verifiche. Nel terzo momento un generatore legge il contratto e costruisce la famiglia in Revit, la collauda, la posa e la rilegge. La misura non sa nulla di Revit e il generatore non misura nulla. Questa separazione è la garanzia architettuale del processo, perché ciascuno dei due mondi può essere verificato o sostituito senza toccare l'altro. Per la geometria la seconda fase assume come obiettivo il LOD D della UNI 11337-4, l'oggetto dettagliato rappresentato da un solido con le dimensioni reali.⁸² La strategia seguita per ciascuna classe, con le forme candidate e quella eletta, è riassunta nelle Figure 8.1 e 8.2.

⁸² UNI 11337-4:2017; Pavan, *UNI 11337:2017. Dal BIM alla piattaforma di filiera*, diapositiva 36.

BRERA PIL 10 - nuvola RGB

PILASTRI

31 catalogati · 29 modellati · 2 da rivedere

La sezione si misura dove il laser vede il fusto per intero e poi vale per tutta l'altezza. Le paraste addossate al muro restano parte del muro.

FORME IN GARA

parasta · 11
 cruciforme · 13
 a L · 4

LOD OBIETTIVO

A B C **D** E F G

oggetto dettagliato · misure reali

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA larghezza e profondità della sezione, altezza del fusto
 POSA quota di base e rotazione in pianta
 TRACCIA provenienza e incertezza di ogni misura

BRERA VOL 07 - nuvola RGB

VOLTE

18 catalogate · 18 modellate

Dodici forme si contendono ogni volta: vince sempre la vela a sesto variabile, 18 su 18. Lo spessore del guscio si deduce, perché l'estradosso non si vede.

FORME IN GARA · VINCE LA VELA, 18 SU 18

botte · 0
 crociera · 0
 vela · 18/18

LOD OBIETTIVO

A B C **D** E F G

oggetto dettagliato · misure reali

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA dimensioni di pianta, quota d'imposta, spessore del guscio
 FORMA la legge della curvatura sta nel contratto, non in Revit
 TRACCIA incertezze, esito del collaudo, spessore dedotto

BRERA ARC 12 - nuvola RGB

ARCHI

33 catalogati · 33 modellati

Non ci sono due archi uguali: ognuno ha il suo tipo. Di ciascuno si misurano luce, freccia e profondità; lo spessore si deduce, perché l'estradosso non si vede.

FORME IN GARA · UNA VINCE PER ARCO

cerchio · 2
 ellisse · 31
 tre centri · 0

LOD OBIETTIVO

A B C **D** E F G

oggetto dettagliato · misure reali

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA luce, freccia, spessore della ghiera, profondità
 POSA quota d'imposta; la profondità cambia da arco ad arco
 TRACCIA forma eletta, incertezze, spessore dichiarato dedotto

BRERA FIN 06 - nuvola RGB

FINESTRE

10 catalogate · 10 modellate

L'apertura taglia il muro da sé: bastano larghezza e altezza. Cinque sono ad arco e cinque a testa retta; tre si riconoscono dal colore, dove il laser non arriva.

DUE ORDINI · DUE MODI DI MISURARLE

ad arco · 5
 testa retta · 5
 dal colore · 3

LOD OBIETTIVO

A B C **D** E F G

oggetto dettagliato · misure reali

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA larghezza e altezza: il foro segue lo spessore del muro
 CONTORNO quote di soglia e di testa, testa retta o ad arco
 CORREDO mostre, grate, davanzi, timpani: sagome rilevate

Figura 8.1. La strategia di modellazione per le sette classi, prima parte: pilastri, archi, volte e finestre. Per ciascuna classe la nuvola di un'istanza, le forme messe in gara e quella eletta, il livello di sviluppo obiettivo e i parametri della classe. Elaborazione ricomposta dalla tavola 05.

7

BRERA_POR_01 · nuvola RGB

PORTE

3 catalogate · 3 modellate

Due porte interne e il portale, che ha due aperture una dentro l'altra: la nicchia ad arco sul filo della facciata e, dietro, il vano vero più stretto.

OGNI PEZZO MISURATO A SÉ

portale

lunetta · 21 razze

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA	larghezza e altezza del vano; nicchia e arco del portale
POSA	quota della soglia, spessore del muro, piano di facciata
CORREDO	bugnato, ghiera di conci, lunetta a raggiera, stipiti

LOD OBIETTIVO

oggetto dettagliato · misure reali

1

BRERA_PAV · nuvola RGB

PAVIMENTO

Nuvola unica → 1 elemento

L'unico elemento che non nasce dalla nuvola ma dal modello: la quota viene dal rilievo, il contorno dalle facce interne dei muri già misurati.

UNA PIASTRA SUL PERIMETRO COSTRUITO

piastra

+0,650 m

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA	contorno dalle facce interne dei muri misurati
POSA	quota 0,650 m: è il livello di tutto il modello
TRACCIA	spessore 15 cm, dichiarato convenzionale

LOD OBIETTIVO

oggetto dettagliato · misure reali

2

BRERA_MUR · nuvola RGB

MURI

Nuvola unica → 4 muri · 7 corpi

Qui non c'è un file per elemento: si lavora sull'intera nuvola. Ogni lato ha il suo spessore misurato e si spezza nei corpi che l'edificio ha davvero.

UN TIPO DI MURO PER OGNI SPESSORE

pianta · spessore

sguanci

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA	un tipo di muro per ogni spessore misurato
POSA	assi del perimetro, quote di base e di sommità
TRACCIA	da quali punti e con quale criterio, muro per muro

LOD OBIETTIVO

oggetto dettagliato · misure reali

IL COLLAUDO CHE DECIDE

ogni elemento passa gli stessi controlli; l'esito è scritto nel suo contratto

I CONTROLLI

- ☒ COPERTURA
ogni faccia è stata vista dal laser
- ☒ ADERENZA
i punti stanno sul profilo eletto
- ☒ SIMMETRIA
le imposte cadono alla stessa quota
- ☒ SCOSTAMENTO
nessuna zona oltre la soglia

GLI ESITI

- MODELLATO**
tutti i controlli passati
- DA RIVEDERE**
modellato, con il motivo scritto
- ESCLUSO**
il rilievo non lo difende: esce con motivo

MAI RITOCCHI A MANO: SI CORREGGE IL CONTRATTO E SI RIGENERA

95 istanze catalogate → 98 elementi del modello

Figura 8.2. La strategia di modellazione per le sette classi, seconda parte: porte, muri e pavimento e, nell'ultimo riquadro, i controlli comuni del collaudo con i tre esiti possibili. Elaborazione ricompresa dalla tavola 05.

8.2.1 Pilastri

La classe pilota è stata sviluppata sul pilastro BRERA_PIL_01, una nuvola di 161.762 punti a sezione cruciforme (un rettangolo esterno con quattro risalti angolari rientranti). La lettura preliminare conta i punti a ogni quota e disegna otto sezioni orizzontali campione dalla base alla sommità del fusto. In basso il contorno è affollato di elementi estranei, i pannelli espositivi addossati al pilastro, mentre nella fascia centrale il contorno cruciforme è nitido e completo. In alto, dove il fusto lascia il posto agli archi e alle volte che vi si innestano e che appartengono alle rispettive classi, la forma cambia e i punti si diradano. Da questa lettura discende la scelta, documentata nel contratto, della banda affidabile fra 3,05 e 4,90 m di quota in cui apprendere la forma.

La misura procede per fette di 4 cm (147 sezioni) in due passate. Nella prima, condotta nella banda affidabile, il sistema apprende la forma: ogni fetta riceve due voti, l'aderenza dei punti al bordo e la frazione di perimetro realmente osservata, e solo le fette promosse (con copertura superiore al 55% e RMSE inferiore a 6 mm, 86 su 147) concorrono al risultato. Nella seconda la forma è bloccata e su tutte le sezioni, anche le più occluse, si cerca soltanto la posizione del centro (136 fette posizionate): una fetta nascosta per due terzi sa dire dove sta il pilastro purché mostri almeno due facce. La Figura 8.3 mostra la sagoma adattata a sei quote. Dove il rilievo è pulito la sagoma segue i punti, e nelle sezioni disturbate i punti estranei restano fuori dal bordo senza deformarlo. Una mappa di copertura, la superficie laterale del fusto srotolata in piano, quantifica la porzione di superficie effettivamente vista dal laser (69,3%) e governa la seconda passata, perché una sezione contribuisce alla posizione solo nelle direzioni in cui mostra facce osservate. Dalla sequenza dei centri lungo l'altezza, riportata nella Figura 8.4 insieme alle dimensioni fetta per fetta, il sistema ricava un fuori piombo reale di 24×15 mm sull'intera altezza e una rastremazione trascurabile.

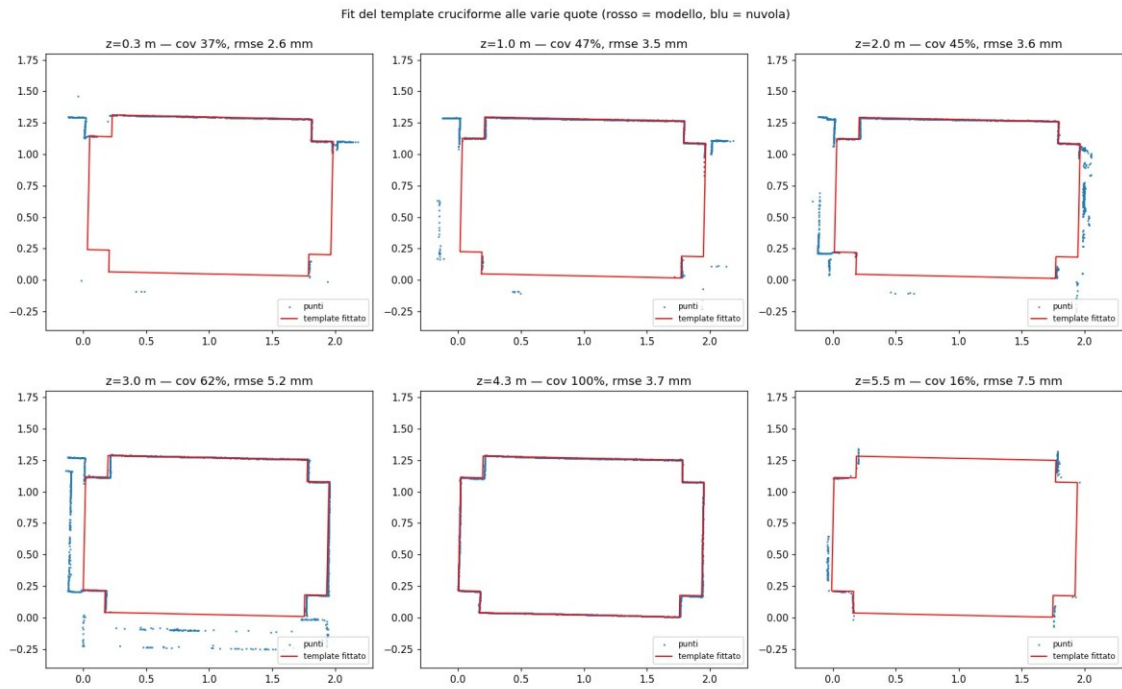


Figura 8.3. Pilastro BRERA_PIL_01: sagoma cruciforme adattata ai punti a sei quote, con la copertura del perimetro e lo scarto medio dei punti dal bordo indicati sopra ogni riquadro.

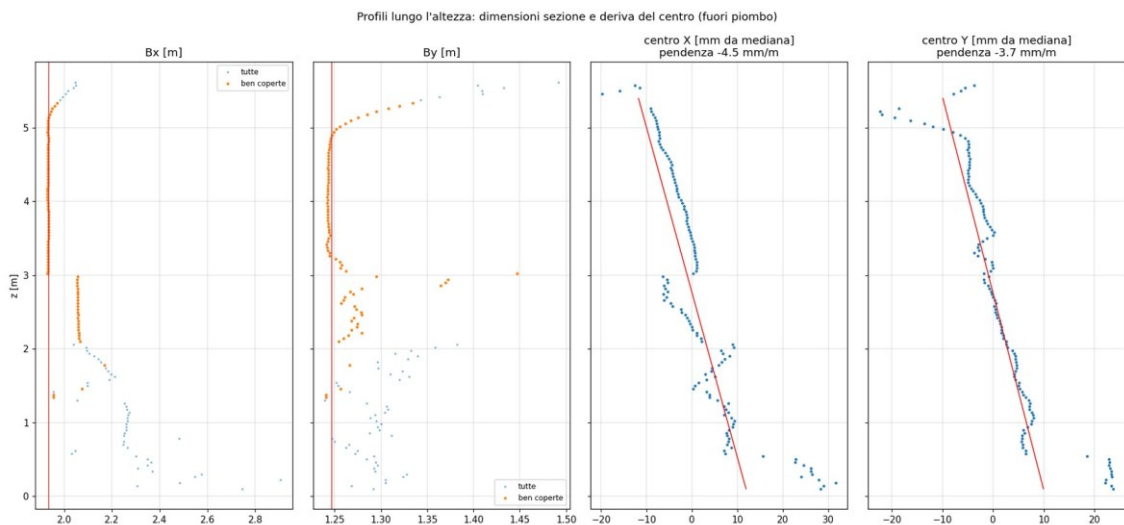


Figura 8.4. Pilastro BRERA_PIL_01: larghezza e profondità della sezione e scostamento del centro in funzione della quota, una misura per ciascuna delle 147 fette; le fette promosse formano una colonna stabile al millimetro nella banda affidabile, la deriva del centro è il fuori piombo.

I parametri del contratto del pilastro pilota sono riportati nella Tabella 8.2.

L'altezza del fusto è di 5.060 m, con la sommità individuata dove la sezione comincia ad allargarsi per l'innesto degli archi e delle volte, e la base a quota 0,653 m nel sistema del rilievo. Il fuori piombo è documentato nei parametri della famiglia ma non geometrizzato, e l'istanza è modellata verticale nel punto medio.

Tabella 8.2. Contratto geometrico del pilastro BRERA_PIL_01: parametri, incertezze e provenienza.

Parametro	Valore [mm]	σ [mm]	Provenienza
B_x (larghezza)	1932,6	1,0	misurata
B_y (profondità)	1243,1	0,9	misurata
A_x (interno risega)	1584,7	1,1	misurata
A_y (interno risega)	900,9	1,4	misurata
risega_x	174,0		derivata (B_x - A_x)/2
risega_y	171,1		derivata (B_y - A_y)/2
H fusto	5060,0		misurata (base a z 0,653 m)
Rotazione in pianta	13,92°		rettangolo di area minima, raffinato
Fuori piombo su H	-24 / -15 (x / y)		misurato sulla banda 3,05-4,90 m
Rastremazione	-0,49 / +0,06 mm/m		trascurabile entro le incertezze

La validazione del pilastro pilota è verificata con tre catene di prova indipendenti. La prima è il confronto *cloud-to-model*,⁸³ la distanza laterale di ogni punto del fusto dal solido parametrico, riportata nella Tabella 8.3 per il fusto intero e per la banda pulita. La seconda è una controprova di registrazione: il solido è lasciato libero di spostarsi e ruotare sulla nuvola, e se la posizione calcolata è corretta non deve muoversi. La terza è il collaudo della famiglia.

Tabella 8.3. Validazione cloud-to-model del pilastro BRERA_PIL_01: distanza laterale dei punti dal solido parametrico.

Metrica	Fusto intero	Banda pulita (3,05-4,90 m)
Punti	151.477	70.211
RMSE [mm]	51,4	17,5
Mediana [mm]	5,5	2,7
p95 [mm]	130,0	10,8
entro 5 mm	46,4%	74,7%
entro 10 mm	71,5%	94,1%
entro 15 mm	80,5%	97,8%
entro 25 mm	83,7%	98,6%
entro 50 mm	88,3%	98,8%

⁸³ Il confronto nuvola-modello (*cloud-to-model*) misura, per ogni punto del rilievo appartenente all'elemento, la distanza dalla superficie modellata; la distribuzione delle distanze è riassunta dalla mediana, dal 95° percentile e dalla quota di punti entro una soglia fissa, qui 10 mm. È la misura di qualità comune a tutte le classi di questo capitolo, perché non richiede un riferimento diverso dal rilievo stesso.

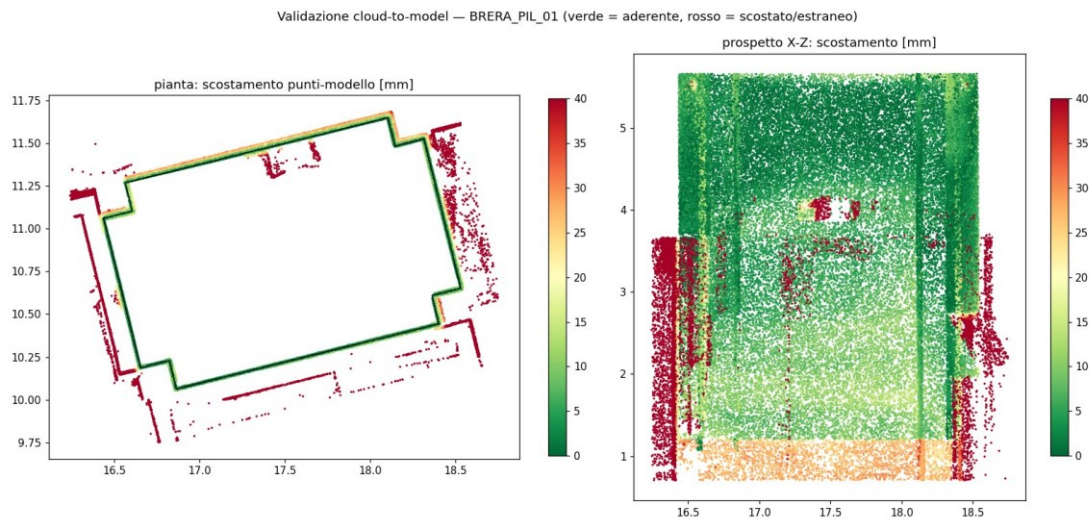


Figura 8.5. Pilastro BRERA_PIL_01: confronto nuvola-modello in pianta e in prospettiva, con ogni punto del rilievo colorato in base alla distanza dal solido costruito; le distanze maggiori si concentrano sui pannelli addossati esclusi dal contratto.

Estesa ai 31 pilastri del catalogo, la catena si è arricchita del riconoscimento automatico della sagoma. Su ogni nuvola il sistema mette in gara tre forme candidate, rettangolo, cruciforme e L angolare, e ne elegge una con il criterio BIC,⁸⁴ che premia l'aderenza ai punti e penalizza la complessità della forma. Il margine fra le candidate entra nel contratto, e sotto una soglia l'elemento è segnalato.

Il *batch* produce un posto di blocco umano, un file di revisione con una riga per elemento (stato, sagoma eletta, dimensioni con σ , validazione, motivi). In Revit passano i contratti approvati, 28 su 31, ai quali si aggiunge, in fase di integrazione, un pilastro modellato e contrassegnato «da rivedere» per possibili risalti reali del fusto che il *kernel* non riproduce ancora, per un totale di 29 pilastri nel modello. I due mancanti sono falliti per assenza di fette ben coperte. La Tabella 8.4 riassume le tipologie riconosciute, e le mediane *cloud-to-model* dei 28 contratti approvati vanno da 1,2 mm (PIL_26) a 13,4 mm (PIL_27, parasta).

⁸⁴ Il BIC (*Bayesian Information Criterion*) è un punteggio che confronta forme diverse sugli stessi punti: premia quella che li segue meglio, ma penalizza quella con più parametri. Vince la forma con il punteggio più basso.

Tabella 8.4. Campagna dei 31 pilastri: tipologie riconosciute automaticamente, elementi e collaudo.

Tipologia	Elementi	Kernel	Collaudo
Cruciforme costante	01, 06, 12, 13, 14, 15, 16, 21, 31 (9)	estrusione parametrica, 12/12 allineamenti	<i>flex</i> volumetrico 6/6
Cruciforme rastremato	02, 07, 17, 26 (4; il 17 contrassegnato da rivedere)	<i>loft</i> FreeForm	volume contro prismatoide, esatto
L angolare costante	05, 30 (2)	estrusione parametrica, 6/6 allineamenti	<i>flex</i> volumetrico 6/6
L angolare rastremato	11, 23 (2)	<i>loft</i> FreeForm	volume contro prismatoide, esatto
Rettangolo rastremato (contrafforte)	08 (1)	<i>loft</i> FreeForm	volume contro prismatoide, esatto
Parasta a gradoni	03, 04, 09, 10, 18, 19, 20, 24, 25, 27, 29 (11)	estrusione statica del profilo a scalini	volume contro area del profilo
Esclusi al posto di blocco	22 e 28 (falliti per assenza di fette ben coperte)		

8.2.2 Archi

Per gli archi sono presenti 33 nuvole degli intradossi rilevati al piano terra. Su ogni nuvola vengono adattati in parallelo tre profili, arco di cerchio, ellisse e arco a tre centri, ciascuno misurato per fette in due passate con selezione automatica della banda pulita. I tre profili sono poi messi in classifica con il criterio BIC. A parità sostanziale vince il più semplice, e la classifica completa entra nel contratto. La Figura 8.6 è la tavola di analisi di un arco. Il primo riquadro mostra i punti dell'intradosso con il profilo eletto e la quota d'imposta, gli altri la dimensione caratteristica ristimata lungo la profondità, la mappa di copertura del bordo e lo scarto mediano per settore angolare con le soglie di accettazione, che localizza gli scostamenti sistematici.

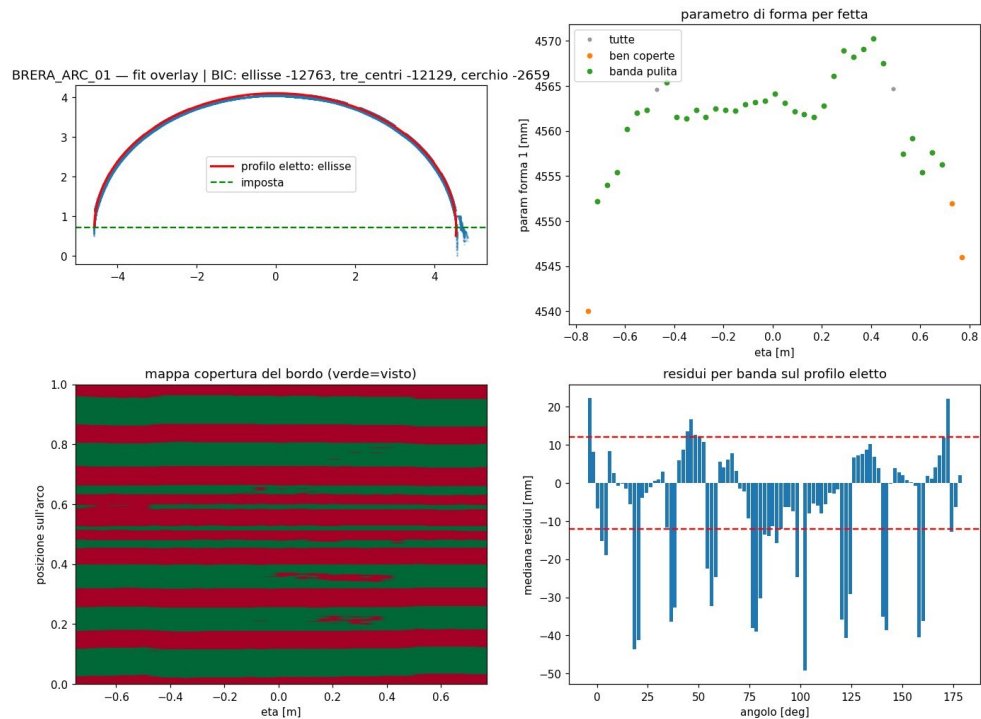


Figura 8.6. Arco BRERA_ARC_01: tavola di analisi del fitting. In alto a sinistra i punti dell'intradosso con il profilo eletto e la quota d'imposta; in alto a destra la dimensione caratteristica per fetta lungo la profondità; in basso la mappa di copertura del bordo e lo scarto mediano per settore angolare.

Due errori sistematici sui grandi archi centrali sono emersi dalla verifica a vista, poi confermata a misura, e sono stati corretti con guardie automatiche ora permanenti. Nel profilo a tre centri la freccia veniva misurata dalla base interna del profilo, che il *fit* colloca sotto l'imposta reale, e il colmo ricostruito saliva fino a 62 cm oltre quello vero. Ora gli archi il cui profilo ricostruisce male il colmo sono rielaborati come ellisse, e una guardia confronta il colmo ricostruito con quello della nuvola fermando l'arco al posto di blocco se lo scarto supera 60 mm. La profondità, misurata dai soli punti entro 15 mm dal profilo, risultava troncata di 30-60 cm sui grandi archi il cui asse deriva fuori piano, e ora è misurata sull'intera superficie dell'intradosso. L'esito è di 33 contratti, 28 pienamente conformi e 5 segnalati ma modellati comunque. Il confronto *cloud-to-model* radiale dà, sugli archi conformi, mediane tipiche fra 3 e 8 mm nella banda pulita.

Per la costruzione è stata presa una decisione di razionalità: tutti gli archi sono generati da un'unica famiglia parametrica ellittica, BRERA_ARC, e ogni arco è un tipo a sé, nominato con il proprio identificativo. I parametri di tipo sono la luce L , la freccia f e lo spessore t della ghiera. La profondità d è invece un parametro di istanza, così che due archi con lo stesso fronte ma muri di spessore diverso si

regolino senza un tipo nuovo. Il collaudo di ogni tipo confronta il volume con la formula d'area esatta dell'ellisse entro 10^{-3} , tolleranza dichiarata perché Revit tassella i profili curvi nel calcolo del volume.

8.2.3 Volte

Per le 18 nuvole degli intradossi delle volte, con campate ordinarie di circa $4,4 \times 3,6$ m e grandi campate di $9,4 \times 3,6$ m, la gara fra superfici candidate, dodici in libreria (sfere, ellissoidi, botti, crociere e padiglioni di cilindri, superfici di traslazione e una famiglia a sesto variabile), è stata giudicata con lo stesso criterio delle altre classi, e su tutte e 18 le volte ha vinto la vela a sesto variabile: una superficie le cui sezioni trasversali sono archi di cerchio con colmo sulla direttrice centrale e raggio che si serra verso i bordi. L'ipotesi iniziale della vela sferica è stata scartata dai numeri (mediana degli scarti 26 mm con residui disposti a X, contro pochi millimetri del sesto variabile), come le altre candidate (ellissoidi 16 mm, crociere e padiglioni 65-250 mm, superficie di traslazione 30 mm).

Ogni volta è misurata nel proprio sistema locale, con l'orientamento di pianta ricavato dal rettangolo di area minima sul bordo. La quota d'imposta viene dai minimi robusti nelle quattro zone d'angolo, che conservano le asimmetrie reali fra gli angoli. Lo spessore del guscio non è osservabile dall'intradosso ed è quindi dichiarato convenzionale (150 ± 100 mm).

Le deformazioni plastiche della superficie sono misurate e documentate nel blocco dedicato del contratto senza essere geometrizzate. La volta è quindi rappresentata dalla superficie ideale di costruzione, e lo scostamento reale resta consultabile. La regola di blocco è dichiarata: una volta è trattenuta se la deformazione supera 40 mm su più del 10% delle celle, e in quel caso viene modellata comunque ma lasciata da rivedere.

La Figura 8.7 è il verbale dell'elezione della superficie su una campata, con gli scarti in pianta dalla superficie eletta, le zone escluse con evidenza, due sezioni centrali nelle due direzioni e la classifica. Ogni volta è stata poi esaminata e approvata manualmente su un confronto per sezioni, in cui si vede il raggio serrarsi avvicinandosi al bordo.

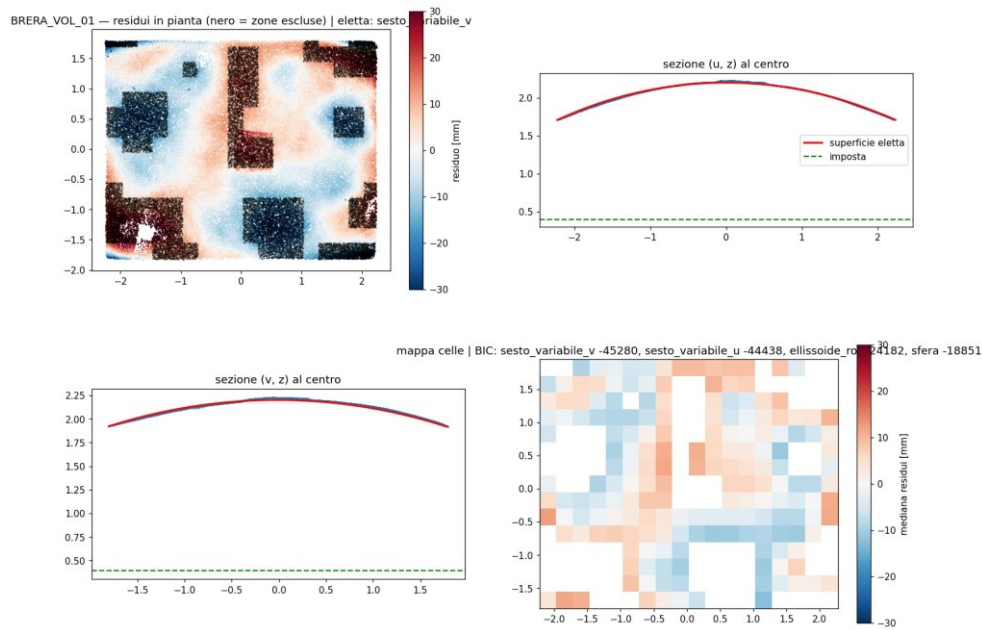


Figura 8.7. Volta BRERA_VOL_01: elezione della superficie. In alto a sinistra la campata in pianta con gli scarti in millimetri dalla superficie eletta e le tessere delle zone escluse; le due sezioni centrali con i punti e la superficie; in basso a destra la mediana degli scarti per cella e la classifica delle superfici candidate.

La validazione sull'intera superficie dà mediane *cloud-to-model* fra 5,6 e 17,2 mm sulle sedici volte conformi e di 21-23 mm sulle due segnalate, che è il valore ad averle trattenute.

8.2.4 Finestre

Le 10 nuvole delle finestre hanno introdotto due novità nel processo: l'elemento è un'apertura, un vuoto parametrico che deve tagliare il muro ospite, e porta con sé un apparato decorativo (mostre, davanzali, lesene, timpani, grate, raggiere) da riconoscere e costruire.

Il flusso su ogni finestra parte dall'isolamento del corpo dalla nuvola segmentata, che porta con sé frammenti estranei (fasce marcapiano, pezzi di elementi vicini). La giacitura del muro è trovata cercando l'angolo che rende il piano di facciata più nitido, mentre il verso dell'esterno è orientato con il baricentro dell'edificio.

La lettura su una tavola di otto viste (prospetti da fuori e da dentro, sezioni, pianta, assonometria, larghezza del vano in funzione della profondità e sporgenza delle modanature per quota) ha stabilito i fatti che hanno orientato la classe. Sette finestre sono riprese frontalmente, con una profondità osservata di 0,5-1,3 m. Le

altre tre, comprese quelle al piano rialzato, sono viste di striscio, con appena 10 cm di profondità osservata, e il loro vano non è misurabile in geometria. L'imbotte è dritta, dunque l'apertura è un prisma e non un tronco di piramide.

La misura del contorno si fonda su un principio fisico: il bordo del foro non si stima per assenza di punti, ma sull'imbotte, cioè sulle facce laterali, sulla soglia e sul cielo del vano, uniche superfici che vivono dentro lo spessore del muro. I montanti veri si distinguono dalle sbarre delle grate per estensione in profondità, non per densità. La misura è in due passate, con la forma stimata su tutti i punti d'imbotte e il bordo riletto fetta per fetta. La testa si trova dove finiscono i montanti, un criterio che da solo ha escluso la lunetta interna delle finestre del fronte laterale. L'arco a tutto sesto, infine, è un esito verificato e non un parametro, perché si adatta un cerchio al cielo dell'imbotte e si controlla se la freccia coincide con la semi-luce. La Figura 8.8 mostra il contorno misurato di FIN_01 sui punti, i fianchi letti su quindici sezioni e la batteria dei controlli di coerenza superati, fra cui la copertura dell'impronta osservata. Per le tre finestre a vista radente la *pipeline* rifiuta di misurare in geometria (gradino muro-vano inferiore a 25 cm) e passa alla via del colore, illustrata nella Figura 8.9. Le persiane scure staccano dalla pietra chiara, e il contorno è ricavato con una soglia di Otsu⁸⁵ sulla mappa di luminanza lisciata a 10 cm. Il contratto è marcato come misura dal colore e la profondità del vano è dichiarata convenzionale.

⁸⁵ La soglia di Otsu è un metodo che separa automaticamente le zone chiare da quelle scure di un'immagine, scegliendo da solo il valore di separazione.

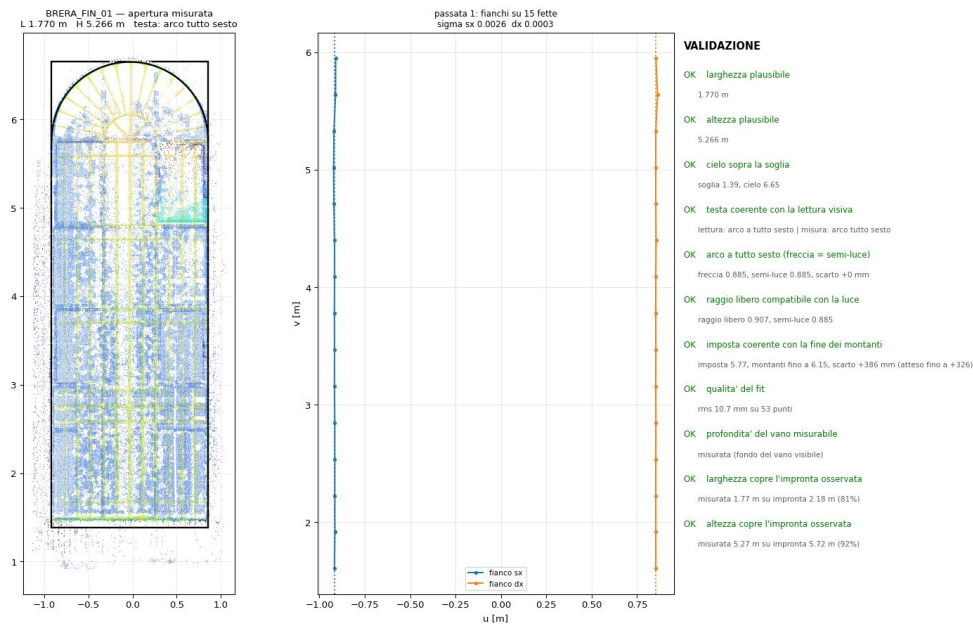


Figura 8.8. Finestra BRERA_FIN_01: misura del contorno sull'imbotte. A sinistra il contorno misurato sovrapposto ai punti; al centro i fianchi letti su quindici sezioni indipendenti; a destra i controlli di coerenza (arco a tutto sesto con scarto nullo, sommità alla fine dei montanti, copertura dell'impronta osservata).

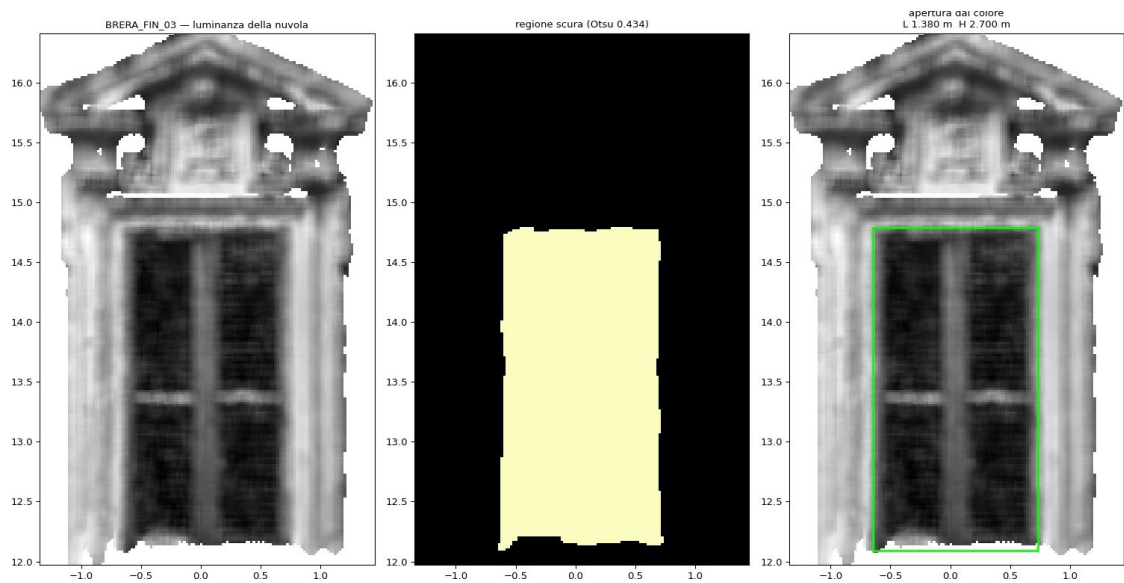


Figura 8.9. Finestra BRERA_FIN_03: misura dal colore per le finestre a vista radente. Mappa di luminanza della nuvola proiettata sul piano di facciata, regione scura individuata dalla soglia automatica e contorno estratto (1.380×2.700 mm).

Le validazioni incrociate sono l'argomento di accuratezza più forte della classe: cinque finestre ad arco dello stesso ordine, misurate separatamente sull'imbotte, danno larghezze di 1.770, 1.769, 1.772, 1.774 e 1.779 mm, entro 10 mm. Le tre finestre del piano alto, misurate dal colore, danno 1.380, 1.360 e 1.360 mm, entro 20 mm. Il confronto *cloud-to-model*, calcolato come scarto dei punti d'imbotte dal contorno modellato, dà mediane di 4,0 mm (FIN_10), 5,9 (FIN_01), 8,6 (FIN_09)

e 10,7 mm (FIN_04). Per i decori vale la regola che il tipo viene dagli occhi e le dimensioni dalla nuvola: le soglie automatiche non decidono mai che cosa esiste, e per le finestre ricche la geometria è stata letta su tavole numeriche quota per quota. Un raccordo costruttivo porta gli elementi contigui a condividere il bordo, con soglia e testa dell'apertura come ancore fisse, e ogni spostamento è registrato nel contratto come imposizione di coerenza, distinta dalle misure. La Tabella 8.5 riporta l'esito per finestra.

Tabella 8.5. Esito della campagna finestre: apertura misurata, soglia, forma della testa, sorgente della misura ed elementi del corredo modellati.

ID	Apertura [mm]	Soglia [m]	Testa	Sorgente	Elementi modellati
01	1770 × 5266	1,39	arco a tutto sesto	imbotte	grata 13 sbarre, raggiera 15 razze, vetro ad arco
02	1630 × 3010	3,62	retta	lettura manuale	mostra, davanzale, mensole, lesene, grata 12, fregio, cornicione, specchiatura
03	1380 × 2700	12,09	retta	colore	paraste, architrave, fregio, cornicione, timpano triangolare, davanzale e fascia
04	1769 × 5279	1,42	arco a tutto sesto	imbotte	davanzale, grata 13, raggiera (passo 12°), vetro ad arco
05	1360 × 2680	12,06	retta	colore	come 03, con timpano curvo
06	1772 × 4675	1,50	arco a tutto sesto	imbotte	davanzale, grata 16, raggiera (passo 11°), vetro ad arco
07	1700 × 2860	3,52	retta	lettura manuale	come 02, con cornice sommitale
08	1360 × 2720	12,04	retta	colore	come 03
09	1779 × 4420	1,51	arco a tutto sesto	imbotte	grata 13 (passo assunto 131 mm, dichiarato), raggiera
10	1774 × 4777	0,61	retta	imbotte	mostra, grata 12 su vano tamponato

Le interpretazioni dichiarate nei contratti riguardano le larghezze delle fasce dei timpani, la chiusura del davanzale sulla soglia attraverso l'ombra di scansione, le razze d'imposta e il completamento del ventaglio delle raggieri. Le semplificazioni dichiarate sono le volute dei timpani e le traverse orizzontali delle grate, non modellate, e la mostra omessa sulle finestre ad arco, quasi a filo.

8.2.5 Porte

Le 3 nuvole delle porte sono la prova più diretta della trasferibilità del metodo. La *pipeline* delle finestre, clonata e adattata, ha portato tre elementi molto diversi dalla

nuvola al modello verificato in un'unica sessione di lavoro. La lettura ha separato subito due tipi. POR_02 e POR_03 sono porte interne gemelle, con mostra, anta doppia e soglia a pavimento, e poiché la mostra copre l'imbotte murario ciò che si misura è la luce netta, letta sul gradino fra mostra e anta. POR_01 è invece il portale monumentale, con un'apertura doppia annidata: una nicchia arcuata strombata sul filo della facciata e, al suo interno, un fronte arretrato che incornicia il vano vero, sormontato da una lunetta. Per il portale la misura è dedicata. La nicchia è letta sul gradino fra facciata e nicchia, l'arco con un *fit* robusto sull'intradosso della ghiera, che risulta a tutto sesto, e il vano nel punto più stretto della strombatura, dove la luce è di 1.533 mm. La Figura 8.10 mostra i due contorni annidati misurati sui punti, i fianchi letti su quindici sezioni e il profilo della strombatura.

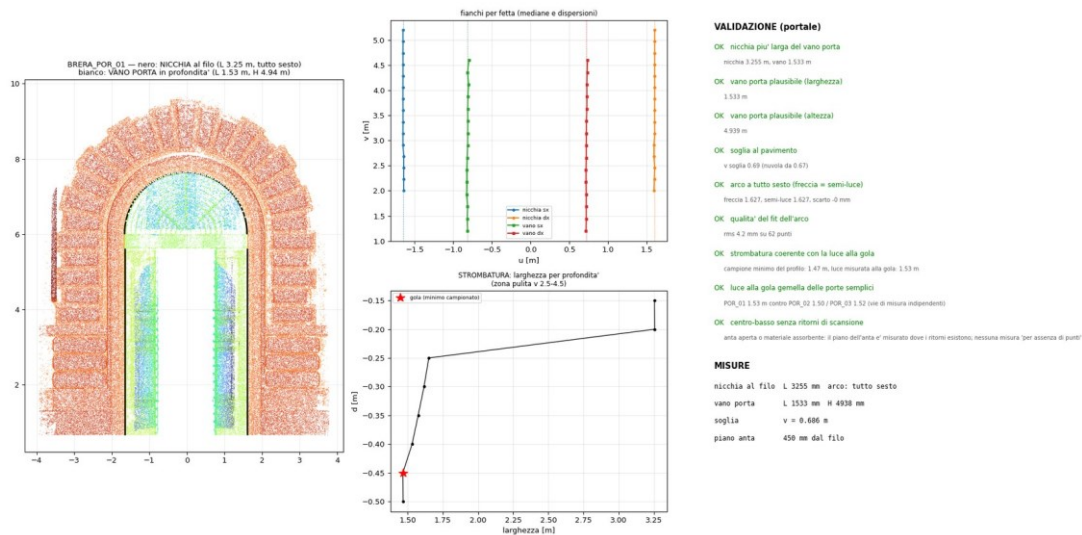


Figura 8.10. Portale BRERA_POR_01: misura del doppio contorno. A sinistra la nicchia al filo (arco a tutto sesto) e il vano in profondità sovrapposti ai punti; al centro i fianchi delle due aperture su quindici sezioni e il profilo di strombatura con la gola; a destra i controlli superati.

I decori del portale sono misurati elemento per elemento, ciascuno con la provenienza delle proprie grandezze: il bugnato per corsi, la ghiera per conci con la chiave sporgente, il fronte interno con stipiti e archivolto e la lunetta vetrata con la raggiera in ferro. Il portone, aperto durante il rilievo e quindi privo di ritorni laser, è modellato come pannello convenzionale dichiarato. Le tre larghezze di passaggio, misurate per vie indipendenti (1.545 e 1.573 mm sulle gemelle, 1.533 mm sul portale), coincidono entro circa 40 mm. Il confronto *cloud-to-model* dà mediane fra 6,9 e 11,7 mm sulle luci delle gemelle e sulla nicchia del portale. Sul

vano del portale lo scarto sale a 29,8 mm, perché i punti cadono sulle facce oblique della strombatura, che il modello semplifica a gradoni. La Tabella 8.6 riporta l'esito per porta.

Tabella 8.6. Esito della campagna porte: apertura misurata, soglia, forma della testa ed elementi del corredo modellati.

ID	Apertura [mm]	Soglia [m]	Testa	Elementi modellati
01	nicchia 3255; vano 1533 × 4930	0,69	arco a tutto sesto (nicchia); retta (vano)	fronte interno con stipiti e architrave, archivoltò, lunetta vetrata con 21 razze e anello, ghiera a 17 conci con chiave, bugnato a 11 corsi per fianco con zoccolo, portone convenzionale dichiarato
02	1545 × 2043	0,68	retta	mostra su tre lati, traversa a profilo reale, anta con due specchiature in rilievo e battente, su entrambe le facce
03	1573 × 1993	0,75	retta	come 02, su entrambe le facce

La revisione manuale, condotta sul modello sovrapposto alla nuvola, ha rilevato tre problematiche. Tutte corrette a monte, nella lettura, nella misura o nel contratto, e non a mano sul modello. Le gemelle erano dettagliate da un lato solo, e ora la faccia interna, non osservata, è specchiata da quella esterna e dichiarata. Sul portale i conci della ghiera erano generati solo fra 10° e 170° e il bugnato si fermava a 4,3 m, mentre i corsi misurati proseguono fino all'imposta. La lunetta, infine, era un campo cieco anziché una vetrata con raggiera. I tre errori erano invisibili ai controlli numerici interni, che dichiaravano tutte le famiglie generate senza errori, e sono emersi solo dal confronto visivo con il dato grezzo.

8.2.6 Muri

La classe dei muri è strutturalmente diversa dalle precedenti, perché non esiste una nuvola per elemento e si lavora sull'intera scena. Il formato ReCap della nuvola completa (33.746.399 punti), inoltre, non è leggibile fuori da Revit. L'agente ha quindi operato dall'interno di Revit, interrogando la nuvola attraverso l'API (*PointCloudInstance.GetPoints* con filtri multipiano) fascia di quota per fascia di quota, riquadro per riquadro, ed estraendo 5,3 milioni di punti nella fascia di lavoro. La Figura 8.11 è la sezione orizzontale di lavoro, una fetta di 30 cm poco sopra il metro di quota con 1,19 milioni di punti. Vi compaiono i quattro fronti, le file di sezioni cruciformi dei colonnati e i disturbi del mondo reale, cioè

vegetazione, corpi addossati, arredi e veicoli. Una lettura per quote, con sette sezioni da mezzo metro a diciannove metri e l'istogramma dei punti per quota, ha guidato la scelta delle fasce di misura e ha fornito le quote di base e di sommità dei corpi.

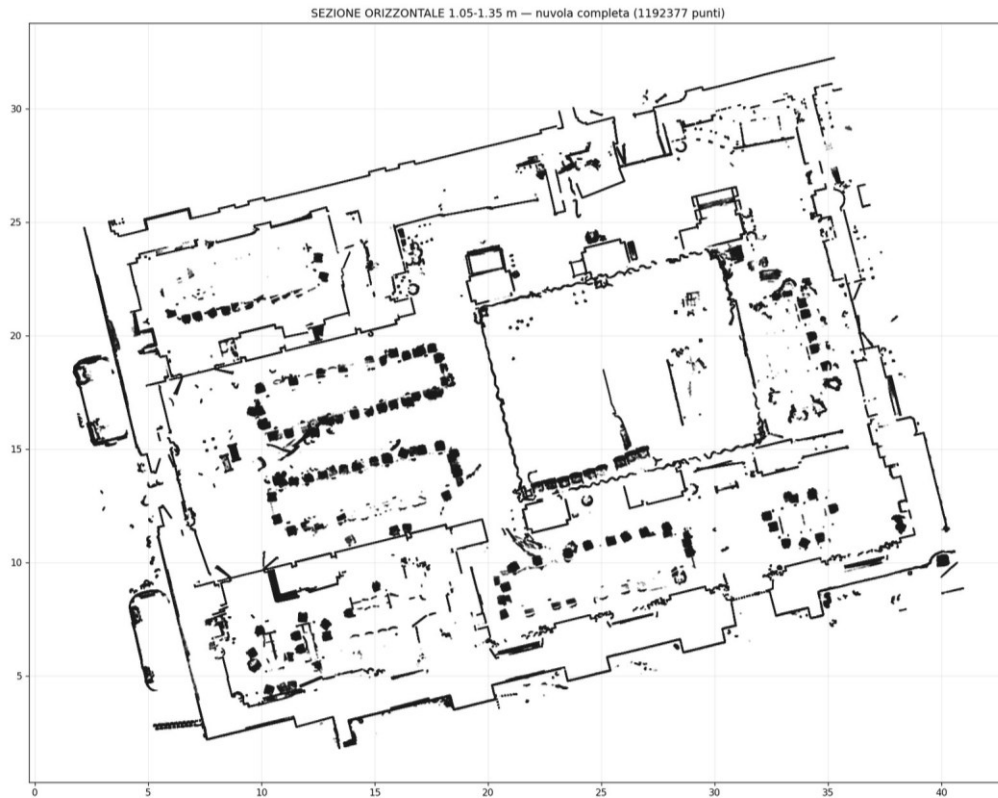


Figura 8.11. Sezione orizzontale di lavoro della nuvola completa (fetta di 30 cm, 1,19 milioni di punti, vista dall'alto): i quattro fronti del complesso, le sezioni cruciformi dei colonnati e i disturbi (vegetazione, corpi addossati, arredi).

Il riconoscimento del perimetro procede per passi concatenati, ciascuno con un criterio esplicito. La giacitura dell'edificio non è stimata dall'ingombro, che alberi e corpi esterni falserebbero, ma dalla nitidezza degli allineamenti: la pianta viene ruotata di $0,1^\circ$ alla volta e si tiene l'angolo che concentra di più i punti sugli assi, $13,90^\circ$, in accordo con i $13,92^\circ$ trovati indipendentemente sul pilastro pilota. Per ogni lato l'istogramma trasversale fornisce i piani candidati, misurati per sostegno (metri lineari) e continuità. La faccia esterna è la più esterna con sostegno serio, purché abbia un retro entro 2 m, regola che da sola esclude una recinzione. La faccia interna è la prima valida procedendo verso l'interno, non la più marcata, così che le paraste, che sporgono oltre la faccia, restino fuori per costruzione. Uno

spessore inferiore a 40 cm non è considerato muratura perimetrale. L'asse di ogni muro nasce da un *fit* robusto sulle due facce, e il perimetro è chiuso per costruzione intersecando gli assi a coppie. La Figura 8.12 mostra gli assi riconosciuti sui quattro lati con le facce misurate, intersecati agli angoli.

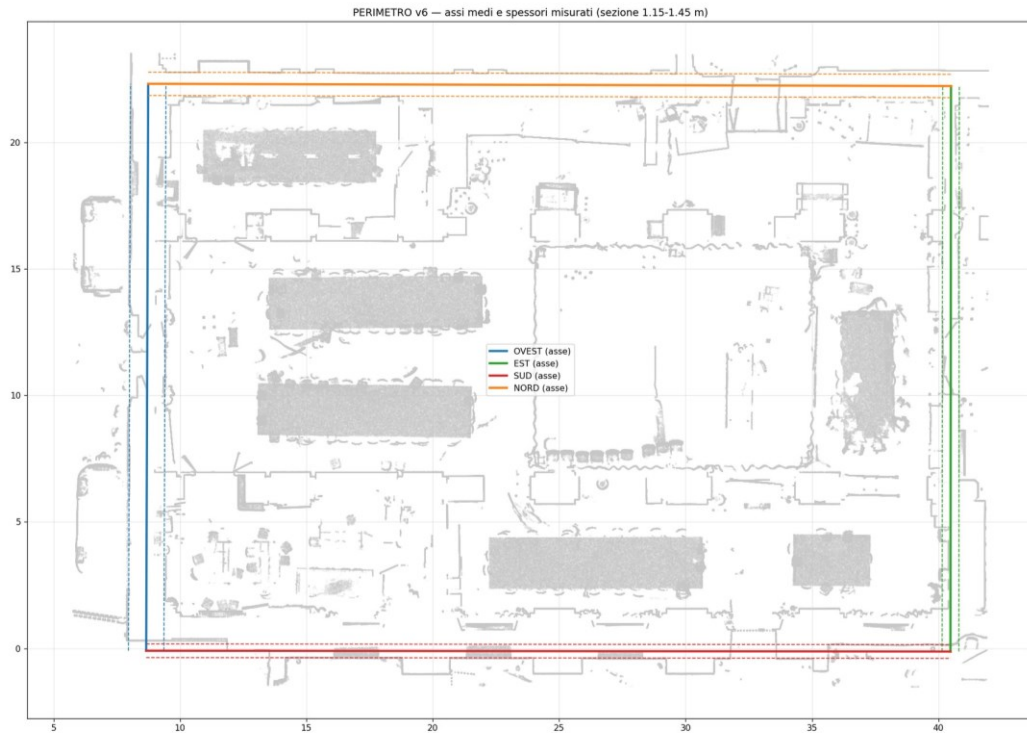


Figura 8.12. Perimetro riconosciuto sulla sezione di lavoro: i quattro assi dei muri con le facce misurate in tratteggio, intersecati agli angoli; è la geometria posata in Revit come muri di sistema.

Viene segnalato che inaspettatamente la classe dei muri è stata la più difficile da automatizzare. Vari errori rilevati a vista, confrontando il modello con la nuvola, hanno rivelato la vera architettura. Da allora le sezioni verticali sono parte del metodo della classe. La Tabella 8.7 riporta i corpi del perimetro definitivo.

Tabella 8.7. Perimetro murario definitivo: corpi, quote, spessori e criterio di misura.

Corpo	Quote [m]	Spessore [m]	Come è stato misurato
Ovest, piano terra	0,64-10,40	1,00	faccia esterna su celle lisce; spessore nel varco del portale
Ovest, piano primo	10,40-18,88	0,85	risega di circa 15 cm misurata alla quota del marcapiano; faccia interna assunta continua (sottotetto non rilevato, dichiarato)
Sud, navatella	0,54-9,40	1,14	faccia esterna al filo del coronamento (scarpa dichiarata); spessore da quattro sguanci concordi
Sud, cleristorio	9,40-16,68	0,66	faccia esterna dalle sezioni verticali; spessore per analogia con l'est, dichiarato
Nord	0,64-8,89	~0,95	facce misurate a tratti (corpi addossati sul cortile), mediana dichiarata
Est	0,64-9,26	0,655	facce esterna e interna misurate (l'interna confermata sopra le volte)

La validazione della classe si basa prima di tutto sulla rilettura completa dal modello di ogni corpo (tipo, spessore, asse, quote e inserti ospitati), che è risultata tutta conforme: sul fronte ovest il sistema ritrova le cinque finestre e il portale, sul fronte sud le cinque finestre. A questa si aggiungono i residui di misura delle facce, dell'ordine del centimetro sulle celle lisce, e la coerenza della giacitura con quella ricavata dalla classe dei pilastri. Il limite è dichiarato: il muro modellato ha lo spessore medio della parete, e i paramenti locali restano rappresentati dalle classi di dettaglio.

8.2.7 Pavimento

Il pavimento chiude l'involucro ed è stato realizzato, per scelta, a valle delle altre classi e sulla base del modello, senza una campagna di misura dedicata sulla nuvola. I suoi due dati costitutivi hanno ciascuno una provenienza precisa. La quota viene dal rilievo: è il picco dell'istogramma delle quote dei punti interni dell'edificio, la superficie orizzontale più rappresentata della scena, fissata a 0,65 m e promossa a livello di riferimento del modello (PAVIMENTO_RILIEVO), il piano su cui poggiano anche le basi dei pilastri. Il contorno è il poligono delle facce interne dei muri perimetrali misurati, calcolato arretrando gli assi di mezzo spessore e intersecando i lati. Su questi due dati il sistema genera un pavimento nativo di Revit con spessore nominale di 15 cm, dichiarato convenzionale perché lo spessore reale del solaio non è osservabile dal rilievo, faccia superiore alla quota

di calpestio e provenienza scritta nelle proprietà. A ogni revisione dei muri il pavimento è stato rigenerato automaticamente sul nuovo contorno, e la rilettura ne ha confermato ogni volta quota e area esatte. L'elemento è stato accettato su una vista di verifica: il modello sezionato poco sopra il calpestio, con la nuvola accesa che vi appoggia sopra e le compenetrazioni residue dei muri dedicati delle porte gemelle, note e dichiarate.

8.3 Generazione degli elementi parametrici

La generazione in Revit è comune a tutte le classi e si fonda sull'architettura schematizzata nella Figura 8.13. L'agente, il modello linguistico nell'applicazione desktop, comunica attraverso il protocollo MCP con un server locale che traduce le richieste in chiamate HTTP al servizio Routes di pyRevit, un server in ascolto dentro Revit che esegue il codice IronPython ricevuto nel contesto dell'applicazione e ne restituisce l'esito.⁸⁶ Ciò che viaggia sul ponte non sono clic irripetibili ma istruzioni scritte, depositate in file e rieseguibili, e ogni azione compiuta sul modello ha lasciato il proprio testo. Ciò che l'agente non fa è altrettanto definito: non calcola misure, non disegna e non decide soglie, che sono scritte negli script.

⁸⁶ Anthropic, «Model Context Protocol»; «revit-mcp-plugin».

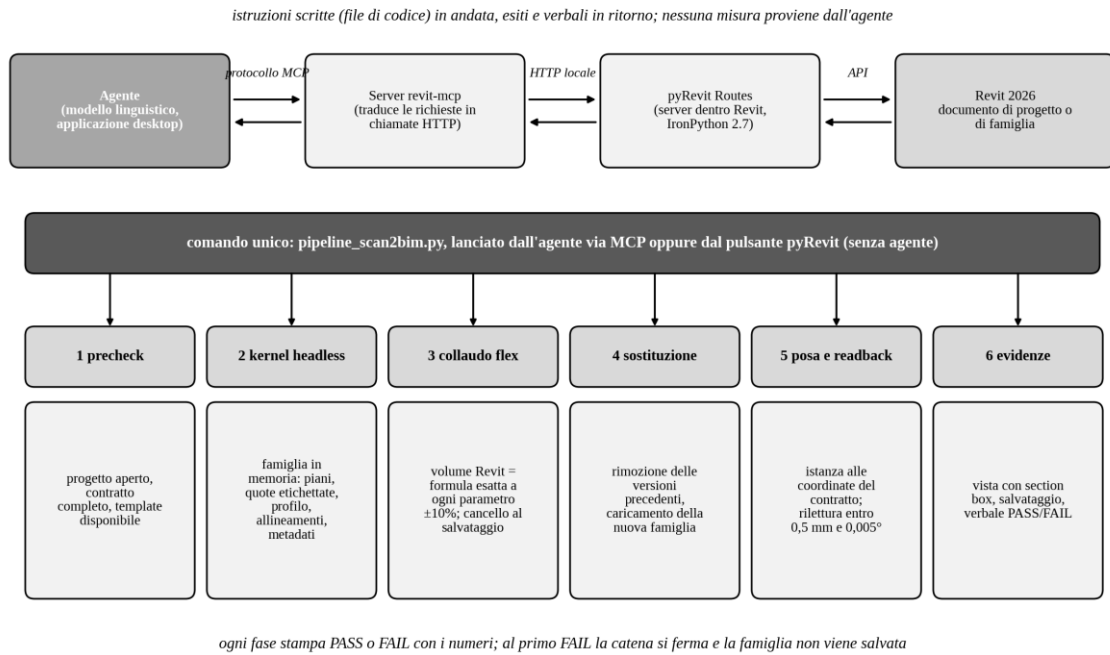


Figura 8.13. Architettura del ponte fra l'agente e Revit (protocollo MCP, server revit-mcp, pyRevit Routes, API di Revit) e le sei fasi della catena di generazione eseguita con un comando unico.

La catena di generazione è eseguita da un comando unico in sei fasi, ciascuna delle quali stampa una riga di verbale con esito PASS o FAIL e i numeri, e si arresta al primo fallimento.

La prima fase (*precheck*) verifica che il documento aperto sia un progetto, che il contratto esista e sia completo e che il *template* di famiglia sia disponibile.

La seconda esegue il *kernel* di famiglia in un documento creato in memoria attraverso l'API (NewFamilyDocument), senza aprire l'editor: crea i piani di riferimento, li vincola con quote etichettate associate ai parametri, disegna il profilo con gli stessi vertici della sagoma usata in misura, lo estrude, applica gli allineamenti e scrive i metadati HBIM (provenienza delle misure, incertezza di sezione, zone inferite, fonte del dato). Gli allineamenti sono accoppiati per posizione geometrica e non per indice, perché l'ordine delle curve del profilo differisce fra versioni di Revit.

La terza fase è il collaudo volumetrico, che fa da cancello al salvataggio: ogni parametro è variato del 10% e il volume del solido, riletto dall'API, deve coincidere con la formula geometrica esatta della sezione entro una tolleranza relativa di 10^{-6} . Una famiglia che non supera il collaudo non viene salvata.

La quarta fase rimuove dal progetto le versioni precedenti della famiglia e carica la nuova, così che ogni esecuzione produca lo stesso stato finale senza duplicati.

La quinta posa l'istanza alle coordinate del contratto, con la nuvola inserita in Revit da origine a origine interna così che le coordinate del contratto valgano anche nel modello, e la rilegge dall'API: lo scarto di *readback* è di 0,000 mm e 0,0000° su tutti i 98 elementi del modello integrato, con tolleranze di accettazione di 0,5 mm e 0,005°.

La sesta prepara la vista con la *section box* centrata sull'elemento e salva il progetto. La stessa catena è lanciabile da un pulsante pyRevit senza alcun agente, con lo stesso verbale: il metodo sta negli script, e l'agente è un'interfaccia verificabile per eseguirli.

Il collaudo volumetrico si è rivelato il controllo più importante dell'intera fase, perché intercetta errori invisibili a occhio e al *bounding box*.

Il modello integrato comprende anche l'apparato decorativo del fronte ovest (gronda a mensole, marcapiano, cantonali bugnati e basamento, con risvolto sull'angolo sud-ovest) e la gronda del fronte sud, misurati dalla nuvola con gli stessi principi ma fuori dalle sette classi della segmentazione.

La parametricità che ne risulta è dichiarata per gradi, verificati con un test empirico via API. Gli elementi a sezione costante, cioè i pilastri cruciformi e a L e le aperture di finestre e porte, hanno parametri che muovono la geometria in tempo reale. I cinque archi rimasti nella famiglia di classe si regolano per tipo. Gli elementi a geometria complessa (le volte costruite per sezioni, le paraste a gradoni, i rastremati e i 28 archi armonizzati) sono statici e si modificano per rigenerazione, correggendo il contratto e rieseguendo la catena, ma espongono comunque tutti i parametri geometrici in forma documentale. La leva è in ogni caso la stessa, il contratto, e in questo sta il senso della parametricità in ambito storico: non una maniglia da trascinare, ma la possibilità, collaudata, di rigenerare ogni elemento dai suoi dati di misura. La gradazione è riassunta nella Tabella 8.8. Il modello integrato della Figura 8.14 conta 98 elementi generati dalla nuvola: i quattro muri

perimetrali, contati per lato e articolati nei corpi della Tabella 8.7, il pavimento, 29 pilastri, 33 archi, 18 volte, 10 finestre e 3 porte.

Tabella 8.8. Gradi di parametricità dichiarati nel modello integrato (verifica empirica via API).

Classe	Parametri che muovono la geometria	Parametri documentali
Pilastri cruciformi, a L e a rettangolo a profilo costante	B_x, B_y, A_x, A_y (o n_x, n_y), H_fusto: quote etichettate, aggiornamento in tempo reale	σ , provenienze
Paraste a gradoni e pilastri rastremati	nessuno (<i>kernel</i> statico, per rigenerazione)	tutti
Archi della famiglia di classe BRERA_ARC (5)	L, f, t (tipo) e d (istanza), in tempo reale	resto
Archi armonizzati _RIT (28)	nessuno (statici, per rigenerazione)	L_corda, f_residua, t_ghiera, d_profondità, ritaglio, semiassi dell'ellisse misurata, quota d'imposta del nodo
Volte	nessuno (<i>loft</i> senza schizzo, per rigenerazione)	Lx, Ly, s, z_imposta, σ
Finestre e porte	Larghezza e Altezza dell'apertura (tagliano il muro ospite)	decori alle quote misurate, statici per costruzione
Muri	tipo per spessore misurato, assi e quote di posa	fascia di provenienza e criterio di misura nel commento
Pavimento	contorno derivato dai muri, rigenerato in cascata	provenienza della quota e dello spessore convenzionale



Figura 8.14. Il modello integrato con la nuvola: il complesso visto da sud-ovest, con i muri perimetrali misurati e le aperture che li tagliano, le diciotto vele a sesto variabile e la nuvola accesa che riempie le parti non modellate.

Il ruolo dell'intelligenza artificiale in questa fase si articola su tre livelli. In fase di sviluppo l'agente è stato usato come progettista del metodo e autore del codice. Ha ideato la strategia che misura un elemento per due terzi nascosto (apprendere la forma dove si vede, cercare la posizione ovunque), ha proposto l'accoppiamento geometrico degli allineamenti dopo un errore dell'API e ha progettato il collaudo volumetrico. Ogni proposta è diventata codice depositato, letto e collaudato, e i collaudi non dipendono da chi ha scritto la riga. Durante l'esecuzione l'agente coordina il lavoro: avvia le fasi nell'ordine giusto, confronta gli esiti con le soglie, si ferma al primo fallimento e compila il verbale. Come lettore del dato interpreta le tavole diagnostiche, distinguendo il pilastro dai pannelli che lo nascondono, una siepe da una muratura, una grata da un montante, una lunetta vetrata da un campo cieco. In nessuna fase un numero del modello proviene dal modello linguistico, ma sempre dal *fitting*, con la sua σ , o dal contratto che del *fitting* è il riassunto. Il punto di partenza di tutto il lavoro è stato una richiesta in linguaggio naturale, come modellare automaticamente le classi architettoniche a partire dalla nuvola di punti. Nella fase manuale sono stati posti gli obiettivi, fissate le regole non negoziabili, validate le letture e giudicati i risultati sovrapposti alla nuvola. Le osservazioni fatte in revisione, in tutte le classi, non hanno mai prodotto ritocchi manuali della geometria.

8.4 Confronto con la modellazione manuale

La Tabella 8.9 riassume, classe per classe, gli elementi portati nel modello, lo scarto fra nuvola e modello e i tempi. Le mediane dello scarto vanno da 2,7 mm sul pilastro pilota a 17,2 mm sulle volte più deformate, e gli elementi gemelli misurati in modo indipendente coincidono entro 1-2 cm. Lo scarto è misurato rispetto alla stessa nuvola da cui le geometrie sono state ricavate: certifica quindi la fedeltà del modello al rilievo, non l'accuratezza assoluta del rilievo, per la quale servirebbe un riferimento topografico esterno.

Tabella 8.9. Quadro riassuntivo della seconda fase per classe: elementi nel modello, scarto fra nuvola e modello, tempo macchina (misurato su due elementi per classe) e tempo della modellazione manuale (primo elemento di ogni tipo cronometrato, istanze ripetute stimate).

Classe	Elementi nel modello	Scarto nuvola-modello (mediana)	Tempo macchina per elemento	Tempo macchina per la classe	Modellazione manuale
Pilastrì	29 (2 esclusi con motivo)	2,7 mm sul pilota; da 1,2 a 13,4 mm	12 s	5,8 min	140 min
Archi	33 (5 segnalati)	3-8 mm	5 s	2,8 min	90 min
Volte	18 (2 trattenute per deformazione)	5,6-17,2 mm	18 s	5,4 min	190 min
Finestre	10	4,0-10,7 mm	36 s, di cui 26 di lettura visiva	6,0 min	130 min
Porte	3	6,9-11,7 mm	39 s, di cui 23 di lettura visiva	2,0 min	90 min
Muri	4 corpi	residui di faccia dell'ordine di 1 cm	25 s per l'intera classe	0,4 min	21 min
Pavimento	1	quota e area esatte	< 1 s	< 0,1 min	2 min
Totale	98			22 min	663 min (11 h 03)

Il tempo macchina è il tempo che il sistema impiega, senza intervento umano, a portare un elemento nuovo dalla nuvola segmentata all'istanza posata e verificata in Revit. Il termine di paragone è la modellazione manuale in Revit delle stesse classi, eseguita in un modello separato, cronometrando il primo elemento di ogni tipo e stimando le istanze ripetute come copia e adattamento dei parametri. La parità vale per la geometria e non per i metadati: la geometria è misurata sulla nuvola in entrambe le corsie, ma gli elementi manuali non portano provenienza, incertezza né verifiche scritte.

Il confronto va letto su due piani. Come tempo di esecuzione, i 98 elementi della catena richiedono 22 minuti, lettura visiva compresa, contro le 11 ore della modellazione manuale, cioè trenta volte meno. Il tempo dell'operatore, che è il costo reale per chi lavora, comprende invece anche la revisione dei contratti al posto di blocco, per la quale si assume un valore di 2 minuti a elemento. Con questa aggiunta il tempo dell'operatore sale a 218 minuti, 3 ore e 38, sempre contro le 11 ore della corsia manuale, e il vantaggio si riduce a tre volte. Il primo rapporto misura la scalabilità del metodo, il secondo il tempo risparmiato davvero, e i due vanno tenuti distinti.

Due considerazioni qualitative restano indipendenti dai tempi.

La prima è la tracciabilità. Nella modellazione manuale ogni scelta resta implicita nella mano di chi modella, mentre qui ogni scelta è un criterio scritto, ogni numero risale ai punti che lo hanno generato e la qualità è misurata da verifiche con soglie fissate in anticipo. Anche una modellazione manuale che riproducesse le stesse quote, le formule e i metadati non lascerebbe una traccia di validazione ripercorribile.

La seconda è la rieseguibilità, perché la catena riparte da un comando e ricostruisce lo stesso stato finale, cosa che nessuna sequenza di operazioni manuali garantisce. Restano fuori dall'ambito, dichiaratamente, i cassettoni dei grandi arconi, i pennacchi fra archi e volte, i muri interni, i paramenti locali dei muri e il fuori piombo, misurato ma non geometrizzato. Gli elementi occlusi o deformati trattenuti al posto di blocco sono elencati con il motivo nei file di revisione.

9 Terza fase: l'arricchimento informativo del modello

9.1 Definizione della porzione di test

La porzione su cui è stato sperimentato l'arricchimento informativo è il fronte ovest dell'ex chiesa sulla Piazzetta di Brera, con gli elementi del modello che lo compongono (il muro, il portale, le cinque finestre, l'apparato lapideo), e un solo elemento interno, il pilastro BRERA_PIL_02 del piano terra, in cui il fusto cilindrico medievale affiora entro l'involucro squadrato ottocentesco. Il fronte rilevato è alto due piani e serve due porzioni diverse dell'edificio. Il piano terra, con il portale e le due finestre con inferriate, appartiene allo spazio inferiore dell'ex chiesa, oggi aule dell'Accademia. Il piano primo, con le tre finestre a frontone, appartiene alle sale napoleoniche della Pinacoteca, che con lo spazio modellato condividono soltanto il muro. La distinzione è dichiarata elemento per elemento nei valori scritti.

Il modello ricevuto dalla seconda fase è chiuso e collaudato e la terza fase vi aggiunge soltanto informazione, operando su una copia e senza rigenerare né riposare alcuna geometria. Una base semantica è già presente: ogni famiglia generata dalla *pipeline* porta tre parametri di testo (classe, provenienza, parametricità), i commenti di istanza dichiarano provenienza e livello di dettaglio delle aperture, delle nicchie, della parasta e della gronda, e i contratti JSON conservano per ogni quota valore, σ e provenienza. L'arricchimento estende questa base senza duplicarla, con un gruppo di parametri condivisi di istanza, identificati dal prefisso SE_, che sono il contenitore di tutto ciò che la terza fase produce.

Le decisioni metodologiche assunte fissano il metodo. Per i materiali si adotta un approccio ibrido fra nuvola e immagine, subordinato a una verifica preliminare della qualità dell'ortoimmagine. Per il degrado, poiché l'ispezione della nuvola e delle fotografie non mostra fenomeni gravi, si usano un parametro di stato di conservazione e un registro delle anomalie osservate, e il peso del lavoro si sposta su materiali, stratigrafia e conoscenza storica. La documentazione storica è letta con un modello linguistico, che ne estrae le informazioni in modo automatico, e il risultato passa per una revisione umana prima della scrittura. Gli attributi sono riferiti all'elemento intero, con le percentuali per materiale e il collegamento alla

mappa tematica, e i parametri sono condivisi di istanza, scritti in modo automatico, con provenienza e confidenza accanto a ogni valore.

La base raster comune alle due corsie, manuale e automatica, è l'ortoimmagine *multi-layer* a 4 mm per pixel descritta nel §5.4. Si tratta di una proiezione ortografica calcolata dalla sola nuvola, con i *layer* RGB, riflettanza laser, profondità dal piano di facciata e provenienza del dato, in cui le lacune del laser (9,46% dei pixel) sono colmate dalle fotografie da drone e dichiarate nel *layer* di provenienza. Il modello non partecipa alla costruzione dell'ortoimmagine ed entra nel flusso soltanto al passaggio di attribuzione del dato.

Lo spazio di uscita del classificatore è l'insieme chiuso delle classi di materiale riportato nella Tabella 9.1. Le classi non sono state scelte a tavolino ma derivate dall'osservazione di dieci zone campione estratte dall'ortoimmagine, riprodotte nella Figura 9.1, che coprono basamento, campiture murarie, apparato lapideo, serramenti, opere metalliche, lapidi e vetri. La pietra è una classe unica per l'apparato decorativo e per il basamento, perché la distinzione litologica non è determinabile dalla sola immagine, e verrà dalla documentazione storica come attributo per elemento (SE_Litotipo) con provenienza documentale, mantenendo separato il dato osservato da quello interpretato. Le classi sono categorie visive, non attribuzioni materiche certe. La classe finitura o velatura residua è provvisoria e ha un nome volutamente neutro: registra l'estensione delle velature chiare e lisce sul laterizio, sopra l'arco del portale e presso i conci, la cui origine (residui di scialbatura o rasatura, stilatura di malta debordante, dilavamento) è rinviata all'indagine documentale e a una verifica ravvicinata. I giunti di malta, larghi 8-12 mm reali e 2-3 pixel, restano parte della tessitura del laterizio. Il vetro è classificato solo dove è visibile, e il vano aperto del portone viene letto come mascherato.

Tabella 9.1. Classi di materiale del fronte ovest, condivise fra corsia manuale e corsia automatica.

Classe	Definizione e note
Laterizio a vista	campiture murarie dei due livelli; i giunti di malta restano nella tessitura della classe
Pietra	classe unica per apparato decorativo (bugnato, cornici, timpani, portale, cornicione) e basamento; il litotipo è un attributo documentale per elemento
Finitura/velatura residua	classe provvisoria: velature chiare e lisce sul laterizio, origine da accertare
Legno	portone, serramenti, persiane
Metallo	pluviali, inferriate, ferramenta, telaio della lunetta
Marmo/lapidi	targhe e lapidi
Vetro	solo dove effettivamente visibile (lunetta del portale, specchiature riconoscibili)
Non classificato/mascherato	oggetti estranei, vano aperto del portone, occlusioni residue

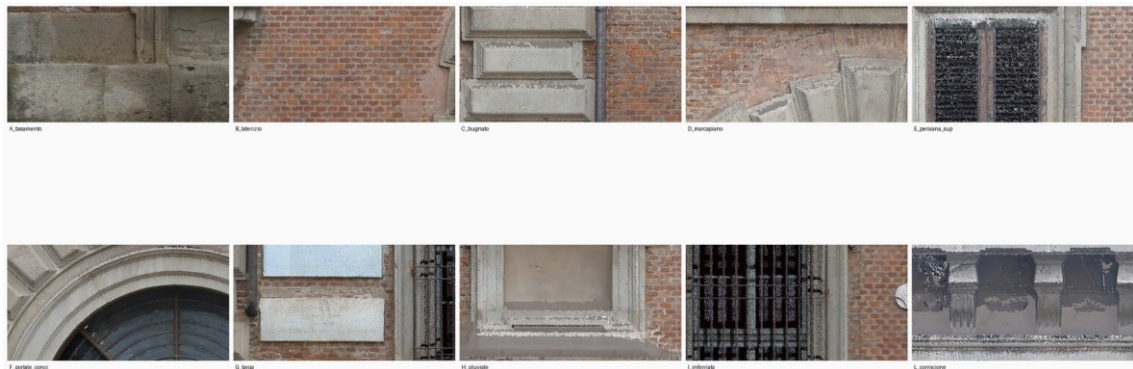


Figura 9.1. Dieci zone campione estratte dall'ortoimmagine a 4 mm per pixel, da cui sono state derivate le classi di materiale: basamento, laterizio, bugnato, marcapiano, persiana, conci del portale, targa, pluviale, inferriata, cornicione.

Prima della classificazione una maschera di validità esclude dall'analisi tutto ciò che non è superficie di facciata, e ogni statistica successiva è calcolata sui soli pixel validi, con la quota esclusa dichiarata insieme ai risultati. La maschera non impiega intelligenza artificiale ma sfrutta il fatto fisico che gli oggetti estranei non giacciono sul piano della facciata, e una soglia sulla distanza dal piano è verificabile e riproducibile. Sul *layer* di profondità, che riporta gli scostamenti dal piano medio di facciata, si applicano tre criteri. Una soglia esterna a 0,65 m verso l'osservatore toglie automobili, passanti, transenne, sede stradale e falde di copertura oltre il cornicione. Una soglia interna a 0,55 m oltre il piano di facciata toglie l'interno visibile attraverso il varco, ed è applicata solo sotto la linea d'imposta dell'arco, perché sopra l'imposta il laser attraversa la vetrata della lunetta e misura l'interno, mentre la superficie da classificare è il vetro stesso, che appartiene alla facciata. Infine, il varco del portone è mascherato per intero (una

fascia di circa 1,4 m fra le ante, compresi i pixel ricostruiti da fotografia). La superficie esclusa è l'8,27% dell'area utile, e la Figura 9.2 ne mostra la distribuzione.

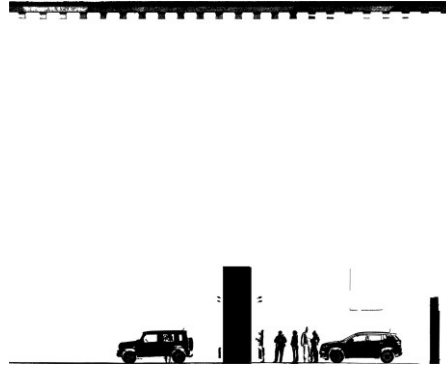


Figura 9.2. Maschera di validità del fronte ovest (nero: escluso; bianco: facciata valida): copertura oltre il cornicione, automobili, passanti, transenna, varco del portone e sede stradale, per un totale dell'8,27% dell'area utile.

9.2 Estrazione automatica degli attributi

La catena della terza fase, schematizzata nella Figura 9.3, si compone di otto passaggi in cui si alternano tre operatori. Soltanto il quarto (classificazione dei materiali, modulo SE-1) e il settimo (estrazione della conoscenza storica, modulo SE-2) sono intelligenza artificiale. Il secondo, il quinto, il sesto e l'ottavo sono automazione deterministica, mentre il terzo e la revisione del settimo sono lavoro dell'operatore.

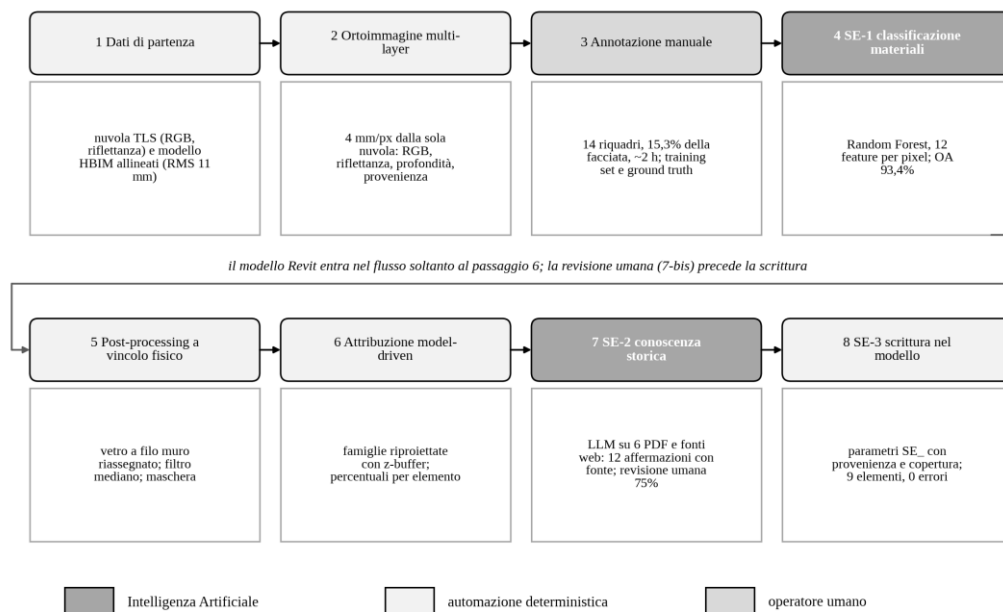


Figura 9.3. La catena dell'arricchimento informativo in otto passaggi, con l'operatore di ciascuno: intelligenza artificiale (SE-1 e SE-2), automazione deterministica, operatore esperto.

9.2.1 Modulo SE-1: classificazione dei materiali

Il classificatore non sa che cosa sia un mattone, lo apprende da esempi annotati a mano, e l'annotazione è il passaggio senza il quale il modulo non esiste. Quattordici riquadri dell'ortoimmagine, pari al 15,3% della superficie della facciata, sono stati pre-annotati automaticamente da un classificatore-seme a regole (circa 35 minuti di preparazione) e corretti a mano in Adobe Photoshop in circa due ore, come mostra la Figura 9.4 per il riquadro della lunetta del portale. L'annotazione conta 4,04 milioni di pixel validi e svolge due funzioni distinte. Come insieme di addestramento insegna al classificatore che cosa sia ciascun materiale, mentre come *ground truth* misura quanto ha imparato. Dai riquadri sono stati estratti 698.637 pixel di addestramento, bilanciati fra le classi e provenienti dal 70% dei blocchi annotati, e 500.000 pixel di validazione presi da blocchi spazialmente separati su una griglia di 100 pixel, mai visti in addestramento.

Il criterio di partizione misura quindi la generalizzazione locale, all'interno della stessa facciata, e non il trasferimento a un edificio diverso.



Figura 9.4. Annotazione manuale di un riquadro di addestramento (lunetta del portale): a sinistra l'ortoimmagine, a destra l'annotazione corretta a mano, con i colori della legenda condivisa (pietra, metallo, vetro, legno).

Il classificatore è un *Random Forest* di 120 alberi decisionali, che assegna una classe a ogni pixel.⁸⁷ Rispetto a una rete neurale profonda è stato scelto per ragioni di metodo. I dati di addestramento sono pochi, non serve una scheda grafica, il risultato è riproducibile e soprattutto il modello è leggibile, perché dichiara quanto

⁸⁷ Ognuno dei 120 alberi vota una classe per il pixel, e vince la più votata. Breiman, «Random Forests», pp. 5-7.

pesa ciascuna variabile nella decisione.⁸⁸ Ogni pixel è descritto da dodici *feature*: il colore in diverse forme (componenti, saturazione, luminosità e tinta), la riflettanza laser con la sua tessitura, la profondità dal piano di facciata con il rilievo locale, e due misure di tessitura e di luminosità nell'intorno. I dati del laser non servono a confermare a posteriori il risultato dell'immagine, ma entrano nel classificatore alla pari del colore. Per ciascuno dei 27,56 milioni di pixel della griglia l'uscita è una delle sette classi di materiale, oppure l'esclusione.

L'accuratezza globale sui 500.000 pixel indipendenti è del 93,4%, e corrisponde letteralmente alla percentuale di pixel su cui la macchina concorda con l'annotazione manuale. In altre parole, con il 15% della superficie annotata a mano il classificatore classifica il restante 85% con questa accuratezza. Le misure per classe della Tabella 9.2 mostrano *F1-score* compresi fra il 94,2% e il 96,5% per laterizio, pietra, legno e marmo e valori inferiori per metallo (86,3%) e vetro (83,9%), la cui confusione reciproca ha una ragione fisica (grate scure con vetri retrostanti). La velatura ha una *Precision* del 55,9%, perché è una classe piccola e frammentata che deborda sul laterizio dilavato, con una transizione graduale che è nella definizione stessa della classe. La Tabella 9.3 riporta l'importanza delle *feature*, ossia la quota del potere decisionale attribuibile a ciascuna variabile.⁸⁹ Il 39,2% del potere decisionale viene quindi dal dato laser, geometria e radiometria attiva, e non dal colore. Il riconoscimento dei materiali non è un problema di sola fotografia, e l'integrazione fra nuvola e immagine risulta giustificata dai numeri.

⁸⁸ Il confronto fra apprendimento automatico su *feature* e reti profonde sul dataset ArCH segnala per le reti profonde una richiesta elevata di potenza di calcolo e di tempi di addestramento, e per le *feature* geometriche un vantaggio sulle classi con pochi punti; Francesca Matrone et al., «Comparing Machine and Deep Learning Methods for Large 3D Heritage Semantic Segmentation», *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9, n. 9 (2020): 535, pp. 14-15. Il *Random Forest* su *feature* geometriche e radiometriche è il classificatore documentato nel patrimonio da più lavori. E. Grilli, E. Özdemir e F. Remondino, «Application of machine and deep learning strategies for the classification of heritage point clouds», *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W18* (2019): 447-454, pp. 448-449.

⁸⁹ Nel *Random Forest* l'importanza di una *feature* è stimata dalla riduzione media dell'impurità che la variabile produce nei nodi degli alberi in cui è usata per separare i campioni, normalizzata in modo che le importanze sommino a uno; è il dato che rende interpretabile la decisione e che permette di quantificare il contributo del dato laser rispetto al colore.

Tabella 9.2. Metriche per classe del classificatore Random Forest sui 500.000 pixel di validazione (Overall Accuracy 93,4%).

Classe	Precision	Recall	F1-score
Laterizio	95,9%	92,6%	94,2%
Pietra	97,8%	95,3%	96,5%
Velatura	55,9%	90,1%	69,0%
Legno	93,7%	97,0%	95,3%
Metallo	83,7%	89,1%	86,3%
Marmo	94,5%	96,8%	95,7%
Vetro	83,0%	84,8%	83,9%

Tabella 9.3. Importanza delle feature del classificatore (quota del potere decisionale) e origine del dato.

Feature	Importanza	Origine
Luminosità media di contesto	18,0%	immagine
Profondità dal piano di facciata	14,4%	nuvola TLS
Rilievo locale	10,6%	nuvola TLS
Tinta	9,6%	immagine
Riflettanza laser	7,2%	nuvola TLS
Tessitura della riflettanza	7,0%	nuvola TLS
Altre sei feature di colore e tessitura	33,2%	immagine
Totale dal dato laser	39,2%	

La mappa dei materiali della Figura 9.5 è l'esito finale. Sull'intera facciata valida la pietra copre il 47,23%, il laterizio il 39,68%, il legno il 5,98%, il metallo il 3,83%, il vetro l'1,52%, la velatura l'1,36% e il marmo lo 0,41%, mentre l'8,27% escluso dalla maschera è dichiarato a parte. I limiti dichiarati sono la classe velatura, la lettura mista metallo/vetro nella trama fitta delle grate del piano terra e la minore affidabilità delle zone ricostruite da fotografia, la cui radiometria differisce da quella del laser.



Figura 9.5. Mappa dei materiali del fronte ovest prodotta dal classificatore Random Forest dopo il post-processing a vincolo fisico e l'applicazione della maschera, con i colori della legenda condivisa.

9.2.2 Modulo SE-2: estrazione della conoscenza storica

Le informazioni che né la geometria né la fotografia possono produrre, cioè le date, le fasi costruttive, i materiali documentati e le fonti, sono state estratte dalla documentazione con un modello linguistico, usato come strumento di estrazione di informazione e non di generazione di testo storico. Il dato in input, letto integralmente in forma testuale, comprende i sei PDF storici raccolti nel §5.4 (622 pagine, circa 1,18 milioni di caratteri, uno dei documenti acquisito con riconoscimento ottico dei caratteri) e le fonti in rete elencate nello stesso paragrafo. Fra queste la più specifica e autorevole è la pagina della Pinacoteca di Brera dedicata a Santa Maria in Brera, segnalata dall'autore, a cui si aggiungono pagine consultate per controlli puntuali. Il modello è stato usato senza alcun addestramento né esempio annotato. A ogni passaggio letto è stata applicata una regola di filtro dichiarata, che tiene solo ciò che riguarda la chiesa, la sua facciata, medievale scomparsa e attuale, e lo spazio al piano terra ricavato nella chiesa. Tutto il resto dell'abbondante letteratura su Brera è scartato. L'uscita è una

cronologia datata, un'attribuzione per elemento del modello, una tabella di contraddizioni fra le fonti e dodici affermazioni verificabili, ciascuna con la fonte e un livello di confidenza a tre gradi (alta con almeno due fonti indipendenti concordi o un documento d'archivio citato, media con una fonte unica affidabile, bassa per inferenze o fonti divulgative).

Il contenuto informativo principale è lo scarto fra ciò che la facciata sembra e ciò che è: un fronte in laterizio con cantonali bugnati e portale a bugne in pietra, che sembra secentesco e richiniano, ma che è una parete costruita nel 1809-1810 al posto della facciata trecentesca demolita, con il portale a bugne aggiunto nel 1865 per l'apertura del Museo Patrio di Archeologia al piano terra.⁹⁰ Il modello ha inoltre individuato nove divergenze fra le fonti, risolvendole o lasciandole esplicitamente aperte. Alcune sono solo apparenti. Altre si sciolgono con i documenti. Il numero delle sale napoleoniche, tre o quattro, è chiarito dal documento del 1808 che motiva l'avanzamento del fronte con l'esigenza di uniformare la quarta sala alle tre già costruite, e i marmi della facciata scomparsa sono bianchi e neri secondo quattro fonti indipendenti e lo stesso documento, bianchi e grigi solo per una scheda e per il testo che ne deriva. Sul secolo della facciata demolita la Commissione d'Ornato del 1808 indicava il XV, mentre Bianconi nel 1787 e l'iscrizione la collocano a metà del XIV.

La metrica del modulo è la revisione umana, perché per un modello linguistico non esiste un *ground truth* con cui confrontarsi, e la revisione manuale svolge la funzione che l'annotazione svolge per gli altri classificatori. Le dodici affermazioni sono state revisionate manualmente prima della scrittura nel modello, con quattro esiti possibili (conferma, correzione, incertezza, rimozione). La revisione, cronometrata come tempo di supervisione, ha richiesto 30 minuti e si è chiusa con 9 affermazioni confermate e 3 corrette, nessuna dubbia e nessuna rifiutata, per una percentuale di conferma del 75%. Delle tre correzioni, due sono entrate nel modello e una no. La prima riguarda le tre finestre del piano alto, che secondo la revisione sono state ricostruite dopo i danni bellici. La fonte addotta, però, è una compilazione secondaria le cui citazioni si sono rivelate in parte errate, e la

⁹⁰ Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», pp. 83-84; Pinacoteca di Brera, «Santa Maria in Brera».

correzione è stata registrata come verifica aperta e non come dato, per la regola concordata secondo cui nel modello entrano solo evidenze citabili. La seconda estende la stessa richiesta di verifica agli elementi del registro superiore dell'apparato lapideo. La terza esclude dal modello l'ipotesi che la messa a vista del nucleo medievale del pilastro sia esito del restauro della Soprintendenza degli anni Settanta, perché è un'interpretazione non documentata da fonte citabile, che resta discussa nel report come ipotesi di lavoro. Il filtro funziona quindi in entrambe le direzioni, perché corregge il modello linguistico e anche la revisione manuale.

Il pilastro campione è l'elemento in cui la geometria rilevata, la classificazione e la conoscenza documentale convergono da tre strade diverse. La stratigrafia ricostruita ha cinque fasi. Alla prima appartengono le colonne cilindriche in serizzo della chiesa degli Umiliati (dal 1229), descritte dalla scheda catalogafica regionale.⁹¹ Segue il primo consolidamento documentato, del 22 maggio 1807, con sottomurazioni, sostituzione delle chiavi rotte e «riformazione in vivo dei peduzzi degli archi».⁹² Nel 1808-1809 il solaio inserito all'altezza delle navate laterali cambia il regime statico delle colonne.⁹³ Negli anni Sessanta dell'Ottocento le colonne vengono irrobustite per l'allestimento del «Museo di Antiquaria», cioè del Museo Patrio di Archeologia istituito nel 1862: ne nascono i pilastri squadrati attuali, un passaggio attestato da una sola fonte ma confermato dall'iconografia datata della Figura 9.6.⁹⁴

L'ultima fase è il restauro della Soprintendenza degli anni Settanta, che riportò a vista parti inglobate nelle trasformazioni ottocentesche.⁹⁵ La sezione orizzontale della nuvola della Figura 9.7, una fetta di 30 cm a 2,20 m dal pavimento, mostra il contorno rettangolare del pilastro ottocentesco (1,92 × 1,22 m dal modello) e l'arco del fusto medievale che affiora nella nicchia.

⁹¹ Regione Lombardia, Lombardia Beni Culturali, *Palazzo di Brera, scheda SIRBeC ARL LMD80-00089*, scheda VAL LMD80-00279, Descrizione.

⁹² Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», p. 82, nota 56.

⁹³ Arsuffi, «La chiesa scomparsa (o quasi) di Santa Maria in Brera»; Pinacoteca di Brera, «Santa Maria in Brera».

⁹⁴ Pinacoteca di Brera, «Santa Maria in Brera».

⁹⁵ Pinacoteca di Brera, «Santa Maria in Brera».

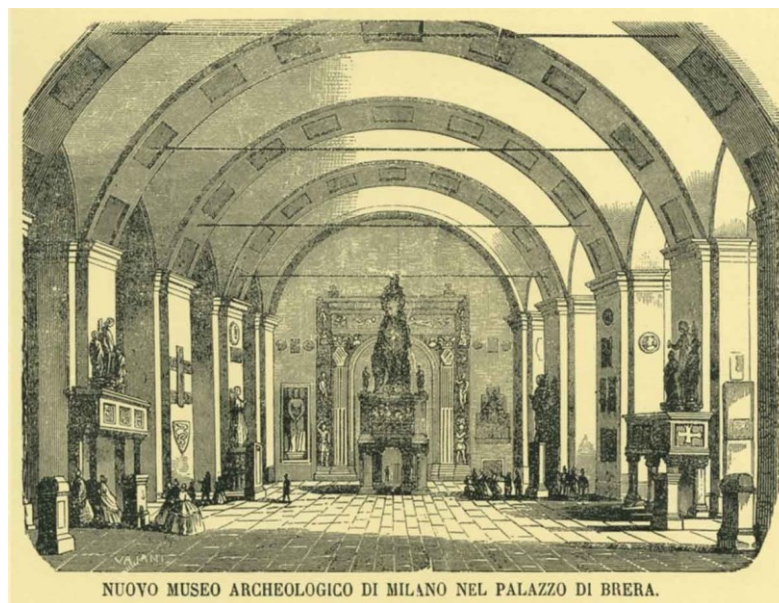


Figura 9.6. Il piano terra della ex chiesa allestito a Museo Archeologico, incisione da *L'Illustrazione Universale*, 1867: riscontro iconografico dello stato dei sostegni dopo l'irrobustimento delle colonne. Riproduzione dalla pagina *Santa Maria in Brera* di *BreraPlus*.

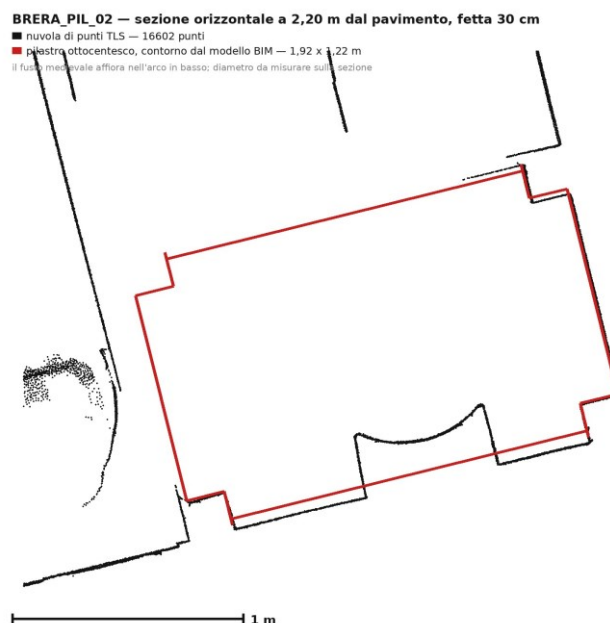


Figura 9.7. Pilastro BRERA_PIL_02: sezione orizzontale della nuvola TLS a 2,20 m dal pavimento (fetta di 30 cm, 16.602 punti) con il contorno del pilastro ottocentesco dal modello (1,92 × 1,22 m); l'arco in basso è il fusto medievale che affiora nella nicchia.

9.3 Popolamento del modello informativo

Il passaggio dalla mappa dei materiali, un raster, al dato che entra nel modello, le percentuali di materiale per singolo elemento, è il tessuto connettivo dell'intera catena e non è intelligenza artificiale, ma geometria. Le geometrie triangolate delle otto famiglie del fronte sono esportate da Revit e riproiettate sulla griglia dell'ortoimmagine con uno *z-buffer* lungo la normale di facciata. Ne risulta una

mappa degli identificativi, mostrata nella Figura 9.8, in cui ogni pixel sa a quale elemento del modello appartiene. L'attribuzione è così automatica e definita dal modello stesso, non da una convenzione, e il 3,8% dei pixel validi non coperto da alcuna geometria resta non attribuito e dichiarato. Il metodo ha risolto da sé anche l'ambiguità dei bugnati. Le famiglie dell'apparato lapideo modellano i soli conci sporgenti, quindi i corsi rientranti appartengono alla famiglia del muro, e la loro pietra è del muro per struttura del modello. La riproiezione, che combacia visivamente con l'ortoimmagine, costituisce anche una validazione dell'allineamento fra modello e rilievo.



Figura 9.8. Mappa degli identificativi: le geometrie delle otto famiglie del fronte ovest riproiettate con z-buffer sulla griglia dell'ortoimmagine, un colore per elemento; ogni pixel è attribuito all'elemento del modello che lo occupa.

I valori definitivi per elemento sono riportati nella Tabella 9.4, con la copertura, ossia la quota di superficie dell'elemento effettivamente analizzata. Il muro è laterizio al 70,7% e pietra al 24,3%. La quota di pietra è spiegata e dichiarata: comprende i corsi rientranti dei bugnati, la fascia dei davanzali del piano superiore, le specchiature cieche con cornici e lo zoccolo, più il laterizio fortemente dilavato

classificato come pietra, limite noto del classificatore. Le finestre sono pietra al 55-62%, con quote di legno, metallo o vetro coerenti con il piano (persiane in legno al piano alto, inferriate e vetri al piano terra). Il portale è pietra al 62,8%, con legno al 19,4% e metallo al 12,9%, su una copertura dell'80% dovuta all'esclusione del varco. L'apparato lapideo, infine, è pietra all'88,8% su una copertura dell'87%, e il residuo di legno del 4,1% è rumore di classificazione nelle ombre sotto la gronda, dichiarato nel campo delle anomalie.

Tabella 9.4. Percentuali di materiale per elemento del fronte ovest (attribuzione model-driven, soglia di rilevanza 5%) e copertura dell'analisi.

Elemento	Materiale 1	Materiale 2	Materiale 3	Copertura
PERIMETRO_OVEST	laterizio 70,7%	pietra 24,3%		99%
BRERA_FIN_02 (piano terra, sinistra)	pietra 55,5%	metallo 17,6%	laterizio 14,0%	100%
BRERA_FIN_07 (piano terra, destra)	pietra 54,7%	vetro 19,7%	metallo 12,8%	100%
BRERA_FIN_03 (piano primo, sinistra)	pietra 58,9%	legno 32,0%	laterizio 7,1%	100%
BRERA_FIN_05 (piano primo, centro)	pietra 61,5%	legno 29,9%	laterizio 7,6%	100%
BRERA_FIN_08 (piano primo, destra)	pietra 60,9%	legno 32,7%	laterizio 6,0%	100%
BRERA_POR_01 (portale)	pietra 62,8%	legno 19,4%	metallo 12,9%	80%
BRERA_DEC_OVEST (apparato lapideo)	pietra 88,8%			87%

Lo schema dei parametri è riportato nella Tabella 9.5. Si tratta di parametri condivisi di istanza nel gruppo Semantic Enrichment, con identificativi stabili in un file di parametri condivisi tracciabile, leggibili negli abachi e scrivibili via API, associati alle categorie Muri, Finestre, Porte, Modelli generici e Pilastri. Sono organizzati in cinque famiglie concettuali: i materiali (SE_Materiale_1, 2 e 3, con la percentuale nel testo del valore), la qualità dell'analisi (SE_Copertura), la conservazione (SE_StatoConservazione e SE_Anomalie, con il lessico della UNI 11182 dove applicabile), la conoscenza documentale (SE_Litotipo, SE_Datazione, SE_FonteStorica, SE_Stratigrafia) e la tracciabilità (SE_Doc_Link e SE_Doc_URL verso la scheda dell'elemento, SE_Provenienza con metodo,

accuratezza e data).⁹⁶ Con la scrittura dei valori storici sono stati aggiunti SE_Stratigrafia e, da ultimo, SE_Doc_URL.

Tabella 9.5. Schema dei parametri condivisi SE_ (file BRERA_SE_PARAMETRI.txt) e fonte del valore.

Parametro	Tipo	Contenuto e fonte del valore
SE_Materiale_1, _2, _3	testo	materiale e percentuale (classificatore SE-1, attribuzione <i>model-driven</i> , soglia 5%)
SE_Copertura	testo	quota di superficie dell'elemento effettivamente analizzata (maschera di validità)
SE_StatoConservazione	testo	stato sintetico («Buono» su tutti gli elementi)
SE_Anomalie	testo	anomalie osservate (registro A01-A04, lessico UNI 11182) e note di attribuzione
SE_Litotipo	testo	denominazione litologica da fonte documentale, con confidenza (SE-2)
SE_Datazione	testo	datazione con evento e stato della conoscenza (SE-2)
SE_FonteStorica	testo	riferimento bibliografico o archivistico puntuale (SE-2)
SE_Stratigrafia	testo	fasi costruttive leggibili sull'elemento (SE-2, pilastro campione)
SE_Doc_Link, SE_Doc_URL	testo, URL	percorso e collegamento alla scheda dell'elemento o alla mappa tematica
SE_Provenienza	testo	metodo, accuratezza e data del dato
SE_Materiale_1..3_Pct, SE_Copertura_Analisi	numero	parametri della prima versione, rimossi nella revisione dello schema

La scrittura nel modello è automazione deterministica. Uno script pyRevit in IronPython apre il file dei parametri condivisi, crea l'associazione di istanza sulle categorie, cerca gli elementi per contrassegno (con ricaduta sul nome della famiglia), scrive i valori e registra su file l'esito e lo stato della transazione di ogni *commit*. La scrittura ha popolato 8 elementi con 88 valori. La scrittura dei valori storici revisionati ha poi popolato 9 elementi, gli otto del fronte più il pilastro campione, con 37 valori e nessun errore, in circa 8 minuti comprensivi della creazione del parametro SE_Stratigrafia. La rilettura attraverso il ponte MCP ha confermato i valori scritti.

⁹⁶ UNI 11182:2006, Beni culturali. Materiali lapidei naturali ed artificiali. Descrizione della forma di alterazione. Termini e definizioni.

La scheda dell'elemento collegata dal parametro, riprodotta nella Figura 9.9 per il muro del fronte, riunisce l'ortoimmagine, la mappa dei materiali, la composizione materica e i valori storici con le fonti.

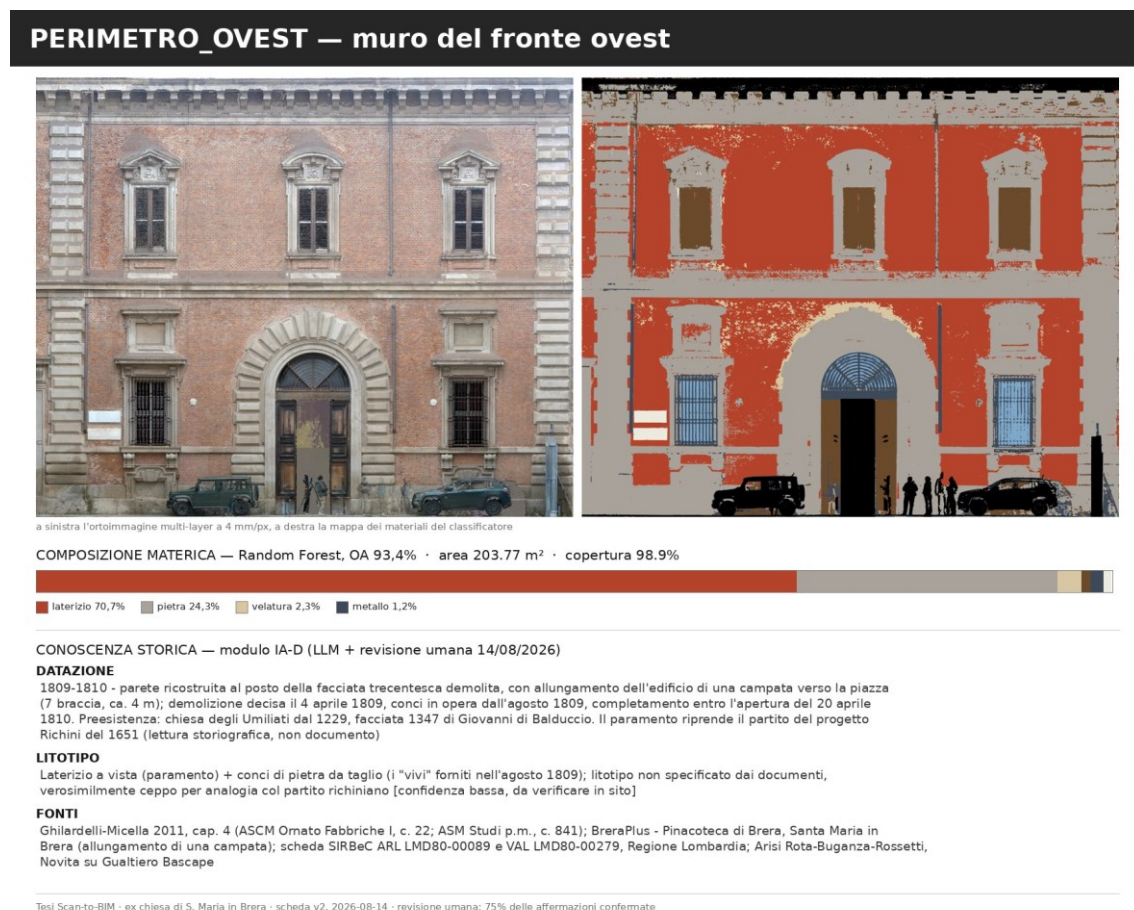


Figura 9.9. Scheda dell'elemento PERIMETRO_OVEST collegata dal parametro SE_Doc_Link: ortoimmagine e mappa dei materiali, composizione materica (Random Forest, area 203,77 m², copertura 98,9%), datazione, litotipo e fonti dal modulo SE-2 dopo la revisione umana.

I valori storici scritti sono riassunti nella Tabella 9.6. Per il muro sono la datazione 1809-1810 con l'allungamento di una campata verso la piazza (7 braccia, circa 4 m), la demolizione decisa il 4 aprile 1809 e i conci in opera dall'agosto 1809, con la preesistenza (chiesa degli Umiliati dal 1229, facciata del 1347 di Giovanni di Balduccio) e la lettura storiografica, dichiarata come tale, del paramento che riprende il partito del progetto Richini del 1651. Il litotipo resta a confidenza bassa, perché il documento del 1809 dice soltanto «i vivi» e l'ipotesi del ceppo nasce per analogia con il palazzo e va verificata in sito. Per il portale il valore è la datazione al 1865, con fonte unica e rimando archivistico. Per le due finestre del piano terra sono l'apertura del 1809 e la successione degli usi dello

spazio: il Museo di Antichità Lombarde mai inaugurato, il Museo Patrio di Archeologia, istituito nel 1862 con sede nell'aula già oratorio del ginnasio e nella sala di deposito adiacente fino al trasferimento delle raccolte al Castello Sforzesco avviato nel 1897, e infine le aule della Scuola di Scenografia. Il parametro scritto dal modulo indica l'intervallo 1862-1898.⁹⁷ Per le tre finestre del piano primo sono l'apertura del 1809-1810 per le sale napoleoniche (progetto Gilardoni del 1806, quattro sale con dodici finestre) e uno stato della conoscenza esplicito. È documentato che l'8 agosto 1943 i bombardamenti distrussero le coperture e fecero crollare in parte le pareti delle sale napoleoniche, con la ricostruzione diretta da Fernanda Wittgens e Piero Portaluppi fra il 1946 e il 1950, ma nessuna fonte citabile dice se il prospetto ovest e le sue aperture siano un rifacimento post-bellico.⁹⁸ Per il pilastro campione, infine, il nucleo in serizzo della colonna medievale e l'involucro murario ottocentesco di materiale non documentato, con la stratigrafia a due fasi leggibili sullo stesso elemento e le fonti.

⁹⁷ Rina La Guardia, «Consulta del Museo patrio di archeologia di Milano (1862 - 1903 maggio 28)», *Lombardia Beni Culturali, Archivi storici, Soggetti produttori, scheda MIDB001086*, s.d., <https://www.lombardiabeniculturali.it/archivi/soggetti-produttori/ente/MIDB001086/> (consultato il 6 settembre 2026), pp. 2 e 5 del PDF.

⁹⁸ Ghilardelli e Micella, «“Brera in Brera”», p. 94; Luisa Arrigoni, «Introduzione», *Palazzo Brera. Storia del palazzo e della Pinacoteca*, estratto in PDF (pp. 8-15) pubblicato dalla Pinacoteca di Brera nella pagina Storia del sito istituzionale, <https://pinacotecabrera.org/wp-content/uploads/2024/11/Brera-storia01.pdf> (consultato il 5 settembre 2026), p. 14.

Tabella 9.6. Valori storici scritti nei parametri SE_Datazione e SE_Litotipo dopo la revisione umana (confidenza: A alta, M media, B bassa).

Elemento	SE_Datazione (sintesi)	SE_Litotipo (sintesi)	Confidenza
PERIMETRO_OVEST	1809-1810, parete ricostruita al posto della facciata trecentesca, allungamento di una campata	laterizio a vista e conci di pietra da taglio; litotipo non specificato (ipotesi ceppo)	datazione A, litotipo B
BRERA_POR_01	1865, nuovo portale a bugne per il Museo Patrio di Archeologia	pietra da taglio a bugne; litotipo da verificare	datazione M, litotipo B
BRERA_FIN_02, FIN_07	1809, aperture del registro inferiore; piano terra	mostre e davanzale in pietra da taglio; inferriata in ferro	M
BRERA_FIN_03, 05, 08	1809-1810, sale napoleoniche; rifacimento post-bellico da verificare su fonte primaria	mostre, davanzale e frontone in pietra da taglio; serramento in legno	M
BRERA_DEC_OVEST	1809, apparato lapideo della nuova parete; registro superiore da verificare per la ricostruzione post-bellica	pietra da taglio; ipotesi ceppo non verificata	B
BRERA_PIL_02	nucleo: colonna medievale (dal 1229); involucro: irrobustimento degli anni 1860	nucleo in serizzo; involucro non documentato	nucleo A, involucro M/B

Lo stato di conservazione è «Buono» su tutti gli elementi, coerente con l'osservazione, e il registro delle anomalie alimenta SE_Anomalie con quattro voci: la patina biologica sul basamento all'estremità sinistra (A01), un distacco con perdita parziale sulla specchiatura sotto la finestra del piano terra sinistra (A02, da categorizzare con ispezione ravvicinata), depositi scuri e dilavamento lungo i pluviali e sotto i 2 m di quota (A03), le velature chiare sopra i conci dell'arco del portale (A04, in indagine). Il canale per la mappatura del degrado esiste ed è popolato dallo stesso flusso, anche se il caso studio non presenta degradi gravi: è la condizione di trasferibilità del protocollo a edifici in stato peggiore.

Letta secondo il Livello di Fabbisogno Informativo, che distingue geometria, informazione alfanumerica e documentazione (§3.3), la porzione arricchita contiene tutte e tre le componenti.⁹⁹ La geometria è quella della seconda fase, che la terza non ha modificato: famiglie posate alle coordinate del rilievo, con misure, incertezze e parti inferite dichiarate nei contratti. L'informazione alfanumerica sta nei parametri SE_, che sugli otto elementi del fronte riportano materiali e stato di conservazione. I dati storici sono scritti su tutti e nove gli elementi, e il pilastro

⁹⁹ BS EN 17412-1:2020, punto 6.1, p. 10.

campione ha in più la stratigrafia. La documentazione si raggiunge dalle schede per elemento, collegate con SE_Doc_Link e SE_Doc_URL, e dai file che conservano i valori esatti, compresi i materiali sotto la soglia del 5%. Accanto a ogni valore il modello dichiara anche il metodo, l'accuratezza e la data (SE_Provenienza) e la superficie su cui il dato si fonda (SE_Copertura). In questa forma il Livello di Fabbisogno Informativo si applica anche a un edificio storico, perché permette di chiedere agli elementi una geometria essenziale e di associare loro un'informazione ricca e documentata.

9.4 Confronto con l'arricchimento manuale

La Tabella 9.7 riporta le durate della terza fase, attività per attività, nella corsia automatica e in quella manuale. I tempi della corsia manuale sono stati ottenuti cronometrando un campione di ciascuna attività e proiettandolo sull'intero lavoro. Le due corsie partono dalla stessa ortoimmagine, con la stessa legenda dei materiali (Tabella 9.1), e lavorano sugli stessi elementi e sugli stessi documenti.

Tabella 9.7. *Durate della terza fase in minuti: corsia automatica, supervisione umana e corsia manuale. Le durate automatiche comprendono impostazione, iterazioni e redazione dei report, e le righe della corsia manuale sono proiezioni da campioni cronometrati.*

Attività	Durata
Riallineamento della nuvola originale sul modello (auto)	45
Ortoimmagine <i>multi-layer</i> (auto; 45 s di calcolo)	2
Registrazione della fotogrammetria e riempimento delle lacune (auto)	120
Definizione delle classi di materiale e legenda (auto)	25
Maschera di validità (auto)	20
Pre-annotazione automatica dei 14 riquadri (auto)	35
Correzione dell'annotazione in Photoshop (supervisione umana)	120
Addestramento, validazione, predizione e <i>post-processing</i> (auto; circa 5 min di calcolo)	15
Percentuali per elemento, schema dei parametri SE_ e scrittura nel modello (auto)	130
Configurazione del ponte MCP (auto)	15
Estrazione storica in due passate e controllo delle fonti (auto)	145
Revisione delle 12 affermazioni (supervisione umana)	30
Parametro SE_Stratigrafia e scrittura dei valori storici (auto)	8
Corsia manuale, mappatura dei materiali dell'intero fronte	718
Corsia manuale, trascrizione dei 125 valori	96
Corsia manuale, lettura e annotazione delle fonti storiche	765

Per i materiali il campione è l'annotazione stessa dei quattordici riquadri: 67,6 m² mappati a mano in 120 minuti. Allo stesso ritmo, i 404,6 m² di facciata valida richiederebbero 718 minuti, quasi 12 ore. Nella corsia automatica il lavoro manuale si ferma a quelle due ore, e il classificatore completa il resto della facciata in circa 5 minuti di calcolo.

Per i parametri il termine di paragone non è la digitazione valore per valore nella tavolozza delle proprietà, ma la trascrizione dei valori in un foglio di calcolo e la loro scrittura con Dynamo per corrispondenza. La trascrizione a mano di 26

valori di tre elementi, il muro, una finestra e il pilastro campione, ha richiesto 20 minuti, e allo stesso ritmo i 125 valori scritti nel modello richiederebbero 96 minuti. Lo script della corsia automatica li scrive in pochi secondi. Anche la scrittura con Dynamo dura pochi secondi, e la creazione dei tredici parametri condivisi, 5-6 minuti, è comune alle due corsie: la differenza sta tutta nella trascrizione.

Per la ricerca storica il campione comprende 50 pagine dei documenti in PDF e la pagina della Pinacoteca dedicata alla chiesa, lette in 80 minuti annotando ogni fatto pertinente con il suo numero di pagina. Il ritmo è di 1,5 minuti a pagina sui documenti più specifici e di 1 minuto sui due volumi di carattere più generale, gli atti per la candidatura UNESCO e il volume sull'ampliamento dell'Accademia. Esteso a tutti i documenti e alle tre pagine in rete, porta a 765 minuti, quasi 13 ore, di sola lettura e annotazione, a cui andrebbe aggiunta la sintesi in affermazioni e parametri. Nella corsia automatica le sessioni di estrazione hanno richiesto 145 minuti, e la revisione delle affermazioni 30.

Nella corsia automatica, quindi, il lavoro manuale resta in due punti: l'annotazione dei riquadri, che insegna al classificatore a riconoscere i materiali, e la revisione delle affermazioni storiche prima della scrittura nel modello. Sono i passaggi in cui serve il giudizio di chi conosce l'edificio. Il resto, dalla mappatura della facciata alla lettura delle fonti, è svolto in modo automatico, ed è lì che si concentra il tempo risparmiato.

10 Discussione critica dei risultati e protocollo operativo

10.1 Vantaggi dell'automazione nelle tre fasi

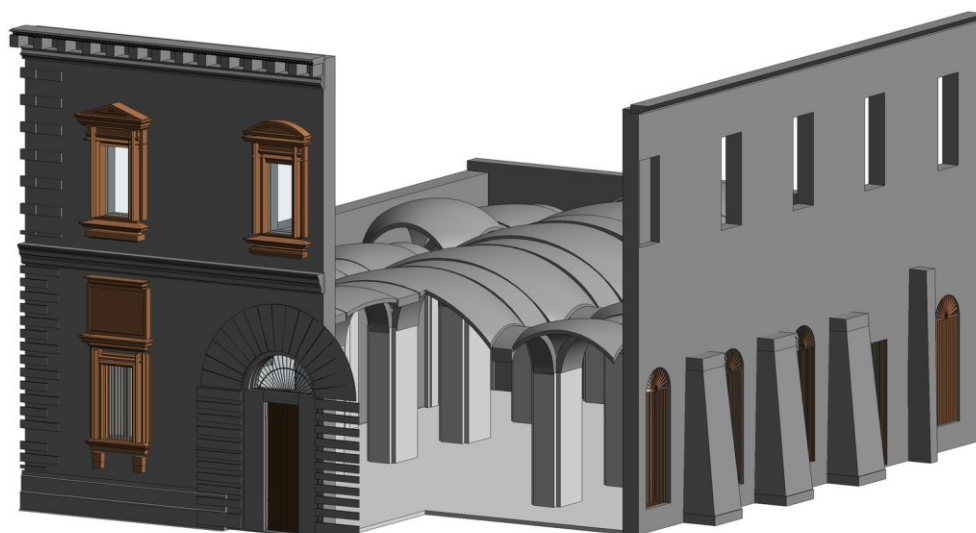
La domanda posta nel Capitolo 1 chiedeva in che misura l'integrazione di algoritmi di intelligenza artificiale nel flusso Scan-to-BIM riduca i tempi di produzione del modello e ne arricchisca il contenuto informativo, mantenendo un'affidabilità compatibile con gli usi previsti per il patrimonio costruito. I risultati dei tre capitoli sulla sperimentazione permettono di rispondere fase per fase, e la Tabella 10.1 li riunisce accanto ai tempi della procedura manuale.

Nella segmentazione il vantaggio nasce dal fatto che il lavoro manuale si fa una volta sola. Annotare a mano la porzione di riferimento ha richiesto circa 10 ore, mentre la rete, addestrata su quella porzione, la segmenta in circa un'ora di calcolo, e sull'intera area principale le stime sono di circa 36 ore a mano contro 3 con la rete. L'annotazione non si può evitare, perché è ciò da cui la rete impara, ma una volta fatta il resto dell'edificio viene riconosciuto senza altro lavoro manuale, e il vantaggio cresce con l'estensione dell'area da segmentare. Nel caso studio la rete assegna alla classe giusta oltre nove punti su dieci (accuratezza globale del 90,91%), e sbaglia soprattutto sui confini fra elementi a contatto, fra archi e volte o fra muri e pilastri. Una parte di questi errori si recupera a valle. Sul fronte ovest, dove esiste un'ortoimmagine, un modello fondazionale usato senza addestramento ha corretto il 75,3% degli errori, cioè tre su quattro, in circa 8 minuti di calcolo e senza toccare la rete.

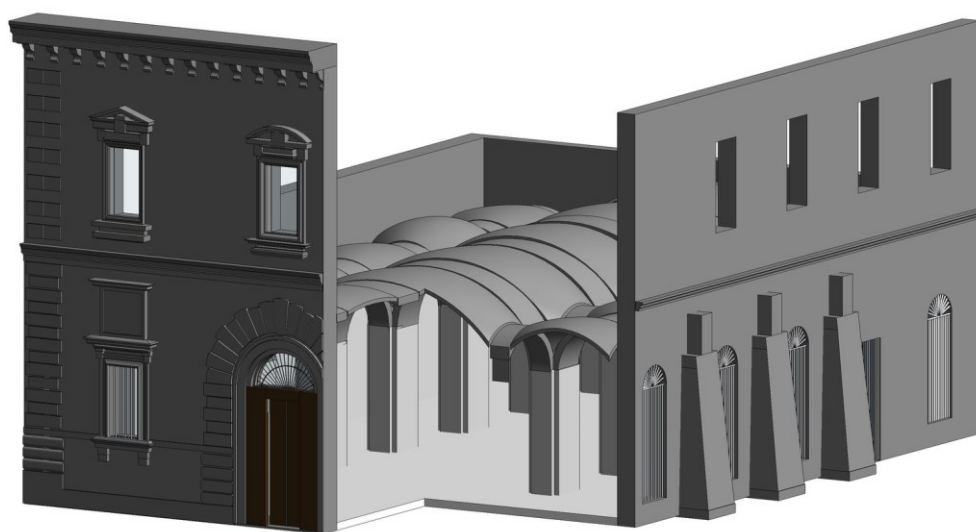
Nella modellazione il vantaggio si vede prima di tutto nei tempi. La catena automatica costruisce i 98 elementi in 22 minuti, lettura visiva compresa, contro le 11 ore della modellazione manuale delle stesse classi. Se si aggiunge il tempo per rivedere i contratti al posto di blocco, il tempo dell'operatore sale a 3 ore e 38, che resta un terzo di quello manuale. Cambia anche la natura del lavoro manuale: invece di tracciare le geometrie si definiscono le regole e si giudicano i risultati sovrapposti alla nuvola, e sono state proprio le verifiche a vista a intercettare errori che i controlli numerici non vedevano.

La Figura 10.1 mette a confronto, nella stessa vista, il modello della catena automatica e quello costruito a mano. A questa scala i due modelli quasi non si distinguono, e la differenza più importante infatti non si vede. Ogni elemento del

modello automatico ha un contratto che dichiara che cosa è stato misurato, che cosa è stato dedotto e con quale incertezza, e l'intera catena si può rieseguire da un comando ottenendo lo stesso modello. Il vantaggio si ferma invece dove la libreria di forme non arriva, e i cassettoni dei grandi arconi e i pennacchi fra archi e volte restano fuori dal modello automatico.



a) modello della corsia automatica



b) modello della corsia manuale

Figura 10.1. Il modello della corsia automatica (a) e il modello della corsia manuale (b) nella stessa vista assonometrica di confronto: fronte ovest con portale e finestre, sistema delle volte, fronte sud con paraste e contrafforti. Viste esportate dai due modelli Revit con la medesima camera.

L'arricchimento informativo è la fase in cui il vantaggio è più netto. Per i materiali bastano due ore di annotazione sul 15% della facciata per ottenere la mappa dell'intero fronte, che a mano avrebbe richiesto quasi 12 ore, e il classificatore concorda con l'annotazione manuale su oltre nove pixel su dieci. Per

la ricerca storica il modello linguistico estrae le informazioni dai documenti in 145 minuti di sessioni, mentre la sola lettura a mano richiederebbe quasi 13 ore. La trascrizione dei valori nel modello, infine, passa da 96 minuti a pochi secondi.

Il guadagno non è solo di tempo. Le informazioni aggiunte sono di natura diversa da quelle geometriche: la datazione del fronte al 1809-1810 e del portale al 1865, la stratigrafia del pilastro campione e i materiali di ogni elemento sono dati che nessuna misura della nuvola avrebbe prodotto da sola. Nemmeno il riconoscimento dei materiali è affidato alla sola fotografia, perché il 39,2% della decisione del classificatore viene dal dato laser, cioè dalla profondità e dalla riflettanza della superficie, che una foto non registra. La revisione manuale resta però necessaria, e prima della scrittura nel modello ha corretto un'affermazione storica su quattro.

Tabella 10.1. Sintesi dei risultati delle tre fasi e dei tempi, con l'automazione e con la procedura manuale.

Fase	Risultato	Con l'automazione	Procedura manuale
1 Segmentazione	OA 90,91%, mIoU 80,99%; fronte ovest 98,08% dopo il raffinamento dei bordi	annotazione ~10 h e addestramento ~1 h (una volta sola); segmentazione ~1 h sulla porzione, ~3 h stimate sull'area principale	annotazione ~10 h sulla porzione, ~36 h stimate sull'area principale
2 Modellazione	98 elementi; scarto mediano nuvola-modello 2,7-17,2 mm	22 min di esecuzione; 218 min di tempo dell'operatore	663 min (11 h 03)
3 Arricchimento	OA 93,4% sui materiali; 75% di affermazioni confermate; 37 valori storici senza errori	materiali: 2 h di annotazione e ~5 min di calcolo; ricerca storica: 145 min e 30 min di revisione; parametri: secondi	materiali 718 min; ricerca storica 765 min; parametri 96 min

C'è infine un vantaggio comune alle tre fasi, che riguarda il modo in cui l'informazione entra nel modello. Ogni valore porta con sé la propria origine: la classe di un punto con la confidenza del voto, una misura con la sua incertezza e il contratto da cui viene, un attributo con il metodo, l'accuratezza e la superficie su cui si fonda. Chi aprirà il modello in seguito saprà quindi che cosa contiene e quanto può fidarsi di ciascun dato.

10.2 Limiti, criticità e condizioni di applicabilità

I limiti sono già stati indicati insieme ai risultati, e qui si riprendono quelli che condizionano l'applicazione del metodo ad altri edifici. Il primo riguarda la validazione. In tutte e tre le fasi la capacità di generalizzare è stata misurata all'interno dello stesso edificio, e resta da verificare quanto la rete, il classificatore dei materiali e la libreria di forme si trasferiscano a un caso diverso. Il raffinamento dei bordi, poi, vale solo dove esiste un'ortoimmagine, e anche lì sull'83,6% del fronte ovest, e corregge il risultato della rete senza migliorare la rete stessa.

La modellazione geometrica richiede due condizioni. La prima è una nuvola che copra a sufficienza ogni elemento: due pilastri non sono stati modellati per mancanza di fette ben coperte, e un arco ha metà campata occlusa. La seconda è una libreria che contenga la forma dell'elemento. Le vele a sesto variabile vi sono entrate solo dopo che i numeri avevano scartato le superfici previste, mentre i cassettoni degli arconi e i pennacchi restano fuori. La parametricità è per gradi, e per gli elementi complessi passa dalla rigenerazione e non dalla modifica diretta. I muri hanno richiesto un intervento manuale puntuale, perché all'interno dell'edificio la parete pulita rimasta dopo la segmentazione è poca, e i muri interni non sono modellati. Lo scarto fra nuvola e modello certifica la fedeltà al rilievo e non l'accuratezza assoluta, per la quale servirebbe un riferimento topografico esterno. Il contributo del modello linguistico, che ha ideato il metodo e diretto l'esecuzione, non si misura con una metrica, ma la riproducibilità non dipende da esso, perché poggia sugli script depositati, che funzionano anche senza agente.

L'arricchimento informativo eredita i limiti dei dati di partenza. Nell'ortoimmagine il 9,46% dei pixel è ricostruito da fotografia, con una radiometria diversa da quella del laser, e la classe velatura ha una *Precision* del 55,9%. Sul versante documentale il modello linguistico ha letto fonti secondarie e non gli originali d'archivio, la datazione del portale poggia su una sola fonte e il litotipo della pietra non è documentato. Il 75% di conferme ha valore proprio perché la revisione è avvenuta prima della scrittura.

Da questi limiti discendono quattro condizioni per applicare il metodo a casi analoghi. Serve prima di tutto un rilievo con densità e copertura adeguate a ogni

classe, tenendo conto che le parti vetrate e gli elementi sottili restano difficili per lo scanner. L'annotazione manuale deve essere accurata e ben distribuita, e il tempo che richiede va messo in conto fin dall'inizio. L'ambiente di modellazione deve essere accessibile da codice, con un ponte affidabile e il controllo dell'esito di ogni scrittura. Infine, serve una competenza esperta che fissi le regole e giudichi i risultati al posto di blocco, perché il metodo non elimina il lavoro manuale ma lo sposta dal tracciare le geometrie al definire i criteri con cui tracciarle.

10.3 Proposta di protocollo operativo

La Tabella 10.2 riporta il protocollo che discende dalla sperimentazione, in quattordici passaggi, e per ciascuno indica chi interviene, la verifica che lo chiude e il prodotto che lascia. Il protocollo non aggiunge passaggi che nel caso studio non siano stati eseguiti, ma mette in ordine ciò che è stato fatto, comprese le regole nate dagli errori. Per ogni passaggio è dichiarato se opera un algoritmo di apprendimento, una procedura deterministica o l'operatore umano. L'intelligenza artificiale interviene in quattro passaggi su quattordici, cioè la rete di segmentazione, il modello fondazionale per i contorni, il classificatore dei materiali e il modello linguistico per i documenti, a cui si aggiunge l'agente che coordina la seconda fase senza produrre numeri. Nessun passaggio automatico si chiude senza un confronto con un dato che non ha prodotto, che sia il *ground truth*, la nuvola, il modello riletto o la revisione manuale, e le soglie di verifica sono fissate prima dell'esecuzione. Ogni valore che entra nel modello porta con sé metodo, incertezza o accuratezza, data e copertura, e ciò che non è osservabile è dichiarato convenzionale o inferito.

Tabella 10.2. Protocollo operativo proposto: passaggi, operatore, verifica di chiusura e prodotto documentale.

N.	Passaggio	Operatore	Verifica di chiusura	Prodotto
1	Rilievo laser scanner con registrazione automatica; pre-elaborazione (sottocampionamento a 1 cm, normali, traslazione)	deterministico	consistenza e densità della nuvola	nuvola regolarizzata con normali (LAS)
2	Annotazione del <i>ground truth</i> su porzione distribuita, con classe negativa e tassonomia chiusa	umano	copertura di tutte le classi; tempo registrato	nuvola annotata (campo di classificazione)

N.	Passaggio	Operatore	Verifica di chiusura	Prodotto
3	Blocchi a finestra mobile con sovrapposizione; addestramento supervisionato con costo pesato; selezione dell'epoca migliore	AI (rete)	accuratezza e mIoU di validazione per epoca	modello addestrato, registro di addestramento
4	Inferenza con finestra fitta, voto, <i>boost</i> delle classi rare, propagazione con soglia di confidenza	deterministico	matrice di confusione contro il <i>ground truth</i> (accoppiamento entro 5 cm), mappa degli errori	nuvola etichettata (LAS)
5	Ortoimmagine <i>multi-layer</i> dalla sola nuvola (RGB, riflettanza, profondità, provenienza), lacune colmate e dichiarate	deterministico	punti di controllo; griglia validata	ortoimmagine e parametri di griglia
6	Raffinamento dei bordi: contorni proposti da un modello fondazionale, completamenti geometrici, regola del non assegnato, gate di profondità	AI (fondazionale) + deterministico	OA prima/dopo; bilancio risanati/peggiorati	nuvola corretta, scontorno
7	Isolamento delle istanze per <i>clustering</i> , controllo di qualità e catalogo con identificativi	deterministico + umano	conteggio per classe; anteprime	un file per istanza, catalogo
8	Lettura delle tavole diagnostiche; misura per fette in due passate; elezione della forma; contratto con valore, σ e provenienza	AI (agente) + deterministico	<i>cloud-to-model</i> per elemento; validazioni incrociate su elementi gemelli	contratti JSON, tavole di analisi
9	Generazione della famiglia dal contratto, collaudo volumetrico come cancello, sostituzione, posa, <i>readback</i>	deterministico (agente in orchestrazione)	<i>flex test</i> ; <i>readback</i> entro 0,5 mm e 0,005°; verificatore di ingombro tassellato	famiglie, verbale a sei fasi
10	Revisione a vista al posto di blocco; correzioni per contratto e rigenerazione; controllo di giunzione fra classi	umano + deterministico	elementi promossi o esclusi con motivo; interfacce verificate	file di revisione, modello integrato
11	Maschera di validità e classi di materiale; annotazione dei riquadri; classificatore supervisionato con <i>feature</i> da immagine e da laser; <i>post-processing</i> a vincolo fisico	umano + AI (classificatore) + deterministico	OA e F1 su pixel di validazione separati; importanza delle <i>feature</i>	mappa dei materiali, percentuali di facciata
12	Attribuzione <i>model-driven</i> per riproiezione delle famiglie; percentuali per elemento con copertura	deterministico	pixel non attribuiti dichiarati; coerenza visiva della riproiezione	mappa degli identificativi, CSV per elemento
13	Estrazione della conoscenza documentale con modello linguistico, con fonte e confidenza; revisione umana prima della scrittura	AI (LLM) + umano	percentuale di affermazioni confermate; contraddizioni risolte o aperte	report storico, scheda di revisione

N.	Passaggio	Operatore	Verifica di chiusura	Prodotto
14	Scrittura dei parametri condivisi con provenienza e copertura; rilettura dal modello; schede per elemento	deterministico	stato delle transazioni; rilettura dei valori	modello arricchito, schede, registro dei tempi

Il protocollo è pensato per casi analoghi di patrimonio architettonico, e alcune sue parti hanno condizioni proprie. I passaggi 5 e 6 richiedono un fronte per cui sia possibile una proiezione ortografica e un rilievo esterno ad alta densità, senza i quali il raffinamento dei bordi non si applica. Il passaggio 8 funziona se la libreria contiene le forme presenti nell'edificio, e la libreria va estesa quando ne compare una nuova, come è avvenuto per le vele a sesto variabile. I passaggi 11 e 13 richiedono una legenda di classi chiusa e una documentazione storica leggibile come testo. Conviene infine tenere fin dall'inizio un registro dei tempi, che distingua il tempo macchina dal lavoro manuale, perché è il registro a rendere possibile il confronto con la procedura manuale. Sul piano normativo il protocollo segue l'impostazione del Livello di Fabbisogno Informativo, perché produce nell'ambiente di *authoring* le tre componenti che la UNI EN 17412-1 tiene distinte, geometria, informazione alfanumerica e documentazione, senza passaggi intermedi che ne interrompano la tracciabilità.¹⁰⁰

¹⁰⁰ BS EN 17412-1:2020, punto 6.1, p. 10.

11 Conclusioni e sviluppi futuri

11.1 Sintesi dei contributi della tesi

Il progetto di tesi ha sperimentato, sull'ex chiesa di Santa Maria in Brera, un flusso Scan-to-BIM in cui l'intelligenza artificiale interviene in tre fasi collegate, e ha misurato che cosa produce ciascuna. Nella prima, una rete neurale addestrata su una porzione annotata a mano riconosce gli elementi architettonici nella nuvola di punti con un'accuratezza globale del 90,91%, e un modello fondazionale applicato all'ortoimmagine ne corregge a valle tre errori di bordo su quattro.

Nella seconda, un agente basato su un modello linguistico, collegato a Revit con il protocollo MCP, ha portato nel modello 98 elementi misurati sulla nuvola, ciascuno con un contratto che dichiara valori, incertezze e provenienza e con un collaudo prima della posa.

Nella terza, un classificatore dei materiali, un modello linguistico applicato ai documenti e la scrittura automatica dei parametri hanno arricchito il fronte ovest e un pilastro campione con materiali, datazioni, fonti e stratigrafia, lasciando alla revisione manuale il controllo delle affermazioni storiche.

Rispetto agli obiettivi del Capitolo 1, i risultati del caso studio mostrano che il Livello di Fabbisogno Informativo si applica a un edificio storico nella forma proposta nel Capitolo 3, con una geometria essenziale e un'informazione ricca, strutturata nei parametri condivisi e collegata ai documenti. Sui tempi l'automazione conviene in modo diverso da fase a fase. Nella segmentazione il vantaggio cresce con l'estensione dell'area, perché l'annotazione manuale si fa una volta sola, mentre nella modellazione il tempo dell'operatore scende a un terzo. Il guadagno più netto è nell'arricchimento, dove restano a mano soltanto l'annotazione dei riquadri e la revisione delle affermazioni storiche. Il protocollo del §10.3 raccoglie infine in quattordici passaggi ciò che è stato eseguito, con chi interviene in ciascuno, la verifica che lo chiude e il prodotto che lascia.

Alcuni aspetti del metodo non trovano riscontro nelle fonti consultate. L'uso di modelli linguistici come agenti è arrivato di recente anche allo Scan-to-BIM: un framework multi-agente pubblicato nel 2026 legge nuvole di punti di interni e genera direttamente il modello informativo e un grafo semantico, provato su

ambienti d'ufficio e dataset sintetici,¹⁰¹ mentre Text2BIM genera edifici nuovi a partire da una descrizione a parole.¹⁰² Nei lavori esaminati non compare invece un agente che, collegato al software di modellazione con il protocollo MCP, misuri la forma sul rilievo di un edificio storico anziché deciderla. Anche il passaggio dalla mappa dei materiali agli elementi del modello, ottenuto riproiettando le famiglie sull'ortofotografia, non compare nei lavori esaminati, dove resta manuale o affidato a una convenzione. Il raffinamento dei bordi con un vincolo bidimensionale, infine, non ha un termine di confronto diretto, perché i lavori che usano l'ortofotografia se ne servono per riconoscere le forme di alterazione, non per correggere una segmentazione tridimensionale.¹⁰³

Il contributo di metodo che attraversa le tre fasi è la distinzione fra ciò che l'intelligenza artificiale decide e ciò che il calcolo deterministico esegue. La rete decide la classe di un punto, il modello fondazionale dove passa un bordo, il classificatore il materiale di un pixel e il modello linguistico quali affermazioni estrarre da un documento e, nella seconda fase, come misurare e in quale ordine procedere. Nessuna misura del modello, però, viene da una componente probabilistica, e ogni risultato automatico è verificato contro un dato che non lo ha prodotto. Il lavoro manuale non è sostituito ma spostato: si annota, si fissano le regole, si leggono le tavole e si rivede al posto di blocco, e le verifiche a vista hanno intercettato in tutte le classi errori che i controlli numerici non vedevano. È la forma concreta dell'obiettivo enunciato nell'abstract, l'intelligenza artificiale come strumento di supporto decisionale e operativo e non come sostituto del progettista.

11.2 Prospettive di sviluppo

Gli sviluppi discendono dai limiti indicati. Il primo è la prova di trasferibilità: applicare la rete addestrata, la libreria di forme e il classificatore dei materiali a un

¹⁰¹ Yuandong Pan et al., «LLM-enabled multi-agent framework for automated Scan-to-BIM and Scan-to-Graph reconstruction», *Automation in Construction* 188 (2026): 107003, pp. 1-2.

¹⁰² Changyu Du et al., *Text2BIM: Generating Building Models Using a Large Language Model-based Multi-Agent Framework*, arXiv preprint 2408.08054v2 [cs.AI], 11 luglio 2025, pp. 1, 3 e 11-12.

¹⁰³ Miky, Alshawabkeh e Baik, «Using deep learning for enrichment of heritage BIM», pp. 16-20.

edificio diverso, per misurare quanto dell'accuratezza dipenda dal caso studio e quanta annotazione serva su un edificio nuovo.

Il metodo non è legato al patrimonio storico, che anzi ne è il caso più difficile per l'irregolarità della geometria e la stratificazione delle fonti. La stessa catena si presta al rilievo dello stato di fatto di edifici esistenti anche non storici, come i beni pubblici per cui l'Agenzia del Demanio chiede modelli *as-is* con geometria essenziale e proprietà prescritte (§3.3): lì le forme sono più regolari, la libreria di forme più semplice e il vantaggio sui tempi potenzialmente maggiore. Il metodo si può estendere anche ad altri ambiti del modello. In quello strutturale, le misure con la loro incertezza, i fuori piombo rilevati e le informazioni su materiali e fasi costruttive, come la stratigrafia del pilastro campione, sono i dati che servono a conoscere una struttura esistente prima di valutarla. In quello impiantistico, tubazioni e canali sono elementi a sezione costante, il caso più favorevole per la misura per fette e per la generazione delle famiglie, a patto di aggiungere le classi corrispondenti alla segmentazione. Sono sviluppi da verificare con prove dedicate, ma si innestano sulla stessa architettura e richiedono di cambiare le classi e la libreria di forme più che il metodo.

Nella prima fase, l'integrazione di regole logico-strutturali con la rete, anticipata nel §7.7, può estendere il principio del raffinamento dei bordi oltre le superfici per cui esiste un'ortoimmagine: vincoli come «una finestra sta in un muro» o «un pilastro non fluttua» si possono scrivere come *post-processing* deterministico sulla nuvola etichettata. Un secondo addestramento con seme fissato, e con una porzione intera dell'edificio tenuta fuori come insieme di test, darebbe la variabilità fra esecuzioni e una misura su una scena mai vista. Per la seconda fase gli sviluppi sono già progettati: una classe dedicata ai pennacchi, costruibile dagli estradossi degli archi e dal piano d'imposta della volta, la modellazione dei cassettoni dei grandi arconi, dei muri interni e dei paramenti locali, e nuove scansioni mirate per gli elementi trattenuti. Nella terza fase la classe velatura richiede un'indagine ravvicinata per capire se si tratti di scialbatura, stilatura o dilavamento, il litotipo attende l'identificazione in sito e le verifiche d'archivio ancora aperte, prima fra tutte l'estensione dei danni del 1943 al fronte

ovest, possono cambiare la datazione del piano primo. L'arricchimento si può infine estendere agli altri fronti e ad altri elementi interni, con ortoimmagini e documentazione corrispondenti.

Un ultimo sviluppo riguarda il ruolo dell'agente. Nella seconda fase il modello linguistico ha ideato il metodo, scritto le procedure e diretto l'esecuzione, e il codice depositato è ciò che ne resta di verificabile, tanto che la stessa catena gira da un pulsante senza alcun agente. Il passo successivo è misurare questo ruolo, registrando il numero di iterazioni per campagna, gli errori intercettati dai collaudi e quelli rilevati in revisione, così che anche il contributo dell'agente entri nel bilancio. La direzione indicata dal lavoro è quella di un flusso in cui le decisioni interpretative restano dichiarate e verificabili, i numeri provengono da procedure esatte, e il modello informativo conserva, insieme alle proprie misure, la memoria di come sono state ottenute.

Bibliografia

- Agenzia del Demanio. *BIMSM. Specifica metodologica rilievo (as-is), documento ADM2023-ADM-SPECIFRIL-XX-SM-Z-C00001, procedura aperta per il servizio di verifica della vulnerabilità sismica, diagnosi energetica e rilievo da restituire in modalità BIM per beni dello Stato in Toscana*, Agenzia del Demanio, 2023.
- Annoni, Ambrogio. «Sulle tracce di S. Maria di Brera». In *Atti del II Convegno Nazionale di Storia dell'Architettura (Assisi, 1-4 ottobre 1937)*, 51-70. Roma, C. Colombo, 1939.
- Arisi Rota, Anna Paola, Stefania Buganza e Edoardo Rossetti. «Novità su Gualtiero Bascapè committente d'arte e il cantiere di Santa Maria di Brera alla fine del Quattrocento». *Archivio Storico Lombardo* CXXXIV (2008): 47-92.
- Bandera, Sandrina. «La Pinacoteca di Brera». In *Per Brera sito UNESCO. Atti del convegno internazionale (Milano, Accademia di Belle Arti di Brera, 29 novembre - 1 dicembre 2012)*, a cura di Sandro Scarrocchia, 87-90. Bergamo, Sestante Edizioni, 2013.
- Bloch, Tanya e Rafael Sacks. «Comparing machine learning and rule-based inferencing for semantic enrichment of BIM models». *Automation in Construction* 91 (2018): 256-272.
- Breiman, Leo. «Random Forests». *Machine Learning* 45, n. 1 (2001): 5-32.
- Buldo, Michele, Luis Agustín-Hernández e Cesare Verdoscia. «Semantic Enrichment of Architectural Heritage Point Clouds Using Artificial Intelligence: The Palacio de Sástago in Zaragoza, Spain». *Heritage* 7, n. 12 (2024): 6938-6965.
- Croce, Valeria, Gabriella Caroti, Livio De Luca, Kévin Jacquot, Andrea Piemonte e Philippe Véron. «From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning». *Remote Sensing* 13, n. 3 (2021): 461.
- Croce, Valeria, Gabriella Caroti, Livio De Luca, Andrea Piemonte, Philippe Véron e Marco Giorgio Bevilacqua. «Tra Intelligenza Artificiale e H-BIM per la descrizione semantica dei beni culturali: la Certosa di Pisa». In *Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Linguaggi Distanze Tecnologie. Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione*, 608-625. Milano, FrancoAngeli, 2021.

- Du, Changyu, Sebastian Esser, Stavros Nousias e André Borrmann. *Text2BIM: Generating Building Models Using a Large Language Model-based Multi-Agent Framework*, arXiv preprint 2408.08054v2 [cs.AI], 11 luglio 2025.
- Ghilardelli, Nicolò e Roberto Micella. «“Brera in Brera”. Restauro e creazione di nuovi spazi funzionali a servizio della città e del complesso monumentale di Brera, Milano». tesi di laurea, Facoltà di Architettura e Società, sede di Piacenza, relatore Marco Albini, Politecnico di Milano, 2011.
- Giulini, Giorgio. *Memorie spettanti alla storia, al governo ed alla descrizione della città e della campagna di Milano ne' secoli bassi*. Milano, 1760.
- Grilli, Eleonora e Fabio Remondino. «Classification of 3D Digital Heritage». *Remote Sensing* 11, n. 7 (2019): 847.
- Grilli, E., E. Özdemir e F. Remondino. «Application of machine and deep learning strategies for the classification of heritage point clouds». *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W18* (2019): 447-454.
- Kanna, Khaoula e Thomas H. Kolbe. «Automatic Enrichment of Semantic 3D City Models using LLM». *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences X-4/W6-2025* (2025): 105-112.
- Kirillov, Alexander, Eric Mintun, Nikhila Ravi, Hanzi Mao, Chloe Rolland, Laura Gustafson, Tete Xiao, Spencer Whitehead, Alexander C. Berg, Wan-Yen Lo, Piotr Dollár e Ross Girshick. *Segment Anything*, arXiv preprint 2304.02643, 2023.
- Macher, Hélène, Tania Landes e Pierre Grussenmeyer. «From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings». *Applied Sciences* 7, n. 10 (2017): 1030.
- Matrone, Francesca, Andrea Lingua, Roberto Pierdicca, Eva Savina Malinverni, Marina Paolanti, Eleonora Grilli, Fabio Remondino, Arnadi Murtiyoso e Tania Landes. «A Benchmark for Large-Scale Heritage Point Cloud Semantic Segmentation». *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2-2020* (2020): 1419-1426.
- Matrone, Francesca, Eleonora Grilli, Massimo Martini, Marina Paolanti, Roberto Pierdicca e Fabio Remondino. «Comparing Machine and Deep Learning Methods for Large 3D Heritage Semantic Segmentation». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9, n. 9 (2020): 535.
- Miky, Yehia, Yahya Alshawabkeh e Ahmad Baik. «Using deep learning for enrichment of heritage BIM». *npj Heritage Science* 12 (2024): 255.

- Murphy, Maurice, Eugene McGovern e Sara Pavia. «Historic Building Information Modelling. Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 76 (2013): 89-102.
- Pan, Yuandong, Mudan Wang, Jiechao Gao, Jie Wang, Michael D. Lepech e Ioannis Brilakis. «LLM-enabled multi-agent framework for automated Scan-to-BIM and Scan-to-Graph reconstruction». *Automation in Construction* 188 (2026): 107003.
- Pavan, Alberto. *Digitalizzazione del settore costruzioni: UNI 11337:2017. Dal BIM alla piattaforma di filiera*, presentazione, Politecnico di Milano, s.d.
- Pierdicca, Roberto, Marina Paolanti, Francesca Matrone, Massimo Martini, Christian Morbidoni, Eva Savina Malinverni, Emanuele Frontoni e Andrea Maria Lingua. «Segmentazione semantica delle nuvole di punti utilizzando tecniche di apprendimento profondo per il patrimonio culturale». *Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia*, n. 1 (2020): 1-9.
- Pierdicca, Roberto, Marina Paolanti, Francesca Matrone, Massimo Martini, Christian Morbidoni, Eva Savina Malinverni, Emanuele Frontoni e Andrea Maria Lingua. «Point Cloud Semantic Segmentation Using a Deep Learning Framework for Cultural Heritage». *Remote Sensing* 12, n. 6 (2020): 1005.
- Pocobelli, Danae Phaedra, Jan Boehm, Peter Bryan, James Still e Josep Grau-Bové. «BIM for heritage science: a review». *Heritage Science* 6 (2018): 30.
- Qi, Charles R., Hao Su, Kaichun Mo e Leonidas J. Guibas. «PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation». In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 652-660. 2017.
- Qi, Charles R., Li Yi, Hao Su e Leonidas J. Guibas. «PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space». In *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*, 5099-5108. 2017.
- Quattrini, Ramona, Roberto Pierdicca e Christian Morbidoni. «Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web». *Journal of Cultural Heritage* 28 (2017): 129-139.
- RIEGL Laser Measurement Systems. *RIEGL VZ-600i. Data Sheet*, RIEGL Laser Measurement Systems, 28 gennaio 2026.
- Tang, Pingbo, Daniel Huber, Burcu Akinci, Robert Lipman e Alan Lytle. «Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques». *Automation in Construction* 19, n. 7 (2010): 829-843.

- Trento, Dario. «Il distacco della Pinacoteca di Brera dall'Accademia». In *Per Brera sito UNESCO. Atti del convegno internazionale (Milano, Accademia di Belle Arti di Brera, 29 novembre - 1 dicembre 2012)*, a cura di Sandro Scarrocchia, 37-44. Bergamo, Sestante Edizioni, 2013.
- Volk, Rebekka, Julian Stengel e Frank Schultmann. «Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs». *Automation in Construction* 38 (2014): 109-127.
- Wang, Yue, Yongbin Sun, Ziwei Liu, Sanjay E. Sarma, Michael M. Bronstein e Justin M. Solomon. «Dynamic Graph CNN for Learning on Point Clouds». *ACM Transactions on Graphics* 38, n. 5 (2019): 146:1-146:12.
- Zhang, Chaoning, Dongshen Han, Yu Qiao, Jung Uk Kim, Sung-Ho Bae, Seungkyu Lee e Choong Seon Hong. *Faster Segment Anything: Towards Lightweight SAM for Mobile Applications*, arXiv preprint 2306.14289, 2023.

Normativa

BS EN 17412-1:2020, Building Information Modelling. Level of Information Need. Part 1: Concepts and principles.

BS EN ISO 19650-1:2018, Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 1: Concepts and principles.

Decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36, Codice dei contratti pubblici, testo vigente al 5 settembre 2026 (con le modifiche del decreto legislativo 31 dicembre 2024, n. 209).

UNI 11182:2006, Beni culturali. Materiali lapidei naturali ed artificiali. Descrizione della forma di alterazione. Termini e definizioni.

UNI 11337-1:2017, Edilizia e opere di ingegneria civile. Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi.

UNI 11337-4:2017, Edilizia e opere di ingegneria civile. Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti.

UNI EN ISO 7817-1:2024, Building Information Modelling. Livello di fabbisogno informativo. Parte 1: Concetti e principi (sostituisce la UNI EN 17412-1).

Sitografia

- Anthropic. «Model Context Protocol: introduction». *modelcontextprotocol.io*, 2024. <https://modelcontextprotocol.io/>. Consultato il 30 agosto 2026.
- Arrigoni, Luisa. «Introduzione». *Palazzo Brera. Storia del palazzo e della Pinacoteca*, estratto in PDF (pp. 8-15) pubblicato dalla Pinacoteca di Brera nella pagina Storia del sito istituzionale. <https://pinacotecabrera.org/wp-content/uploads/2024/11/Brera-storia01.pdf>. Consultato il 5 settembre 2026.
- Arsuffi, Roberto. «Milano | Brera. La chiesa scomparsa (o quasi) di Santa Maria in Brera». *Urbanfile*, 21 giugno 2026. <https://blog.urbanfile.org/2026/06/21/milano-brera-la-chiesa-scomparsa-o-quasi-di-santa-maria-in-brera/>. Consultato il 14 agosto 2026.
- Cassina, Ferdinando. «Facciata della Chiesa di S.ta Maria nella Brera del Guercio, acquaforte (334 × 268 mm), tav. 105 de Le fabbriche più cospicue di Milano pubblicate per cura di Ferdinando Cassina (Milano, Cassina e Pedrinelli, 1840)». *Imago, biblioteca digitale della Regione Emilia-Romagna, esemplare della Biblioteca comunale dell'Archiginnasio di Bologna, scheda IMA00144745*. <https://imago.regione.emilia-romagna.it/opac/resource/facciata-della-chiesa-di-sta-maria-nella-brera-del-guercio/IMA00144745>. Consultato il 5 settembre 2026.
- CNR-ICVBC. «La chiesa di Santa Maria di Brera e la chiesa di San Carpofo». *Itinerari petrografici nell'architettura romana e medievale di Milano*. http://www.icvbc.cnr.it/Itinerari_petrografici/index.php/la-citta-al-di-fuori-della-cinta-muraria-romana/il-settore-settentrionale/la-chiesa-di-santa-maria-di-brera-e-la-chiesa-di-san-carpoforo/. Consultato il 14 agosto 2026.
- La Guardia, Rina. «Consulta del Museo patrio di archeologia di Milano (1862 - 1903 maggio 28)». *Lombardia Beni Culturali, Archivi storici, Soggetti produttori*, scheda MIDB001086, s.d. <https://www.lombardiabeniculturali.it/archivi/soggetti-produttori/ente/MIDB001086/>. Consultato il 6 settembre 2026.
- Pinacoteca di Brera. «Santa Maria in Brera». *BreraPlus*, 2023. <https://breraplus.org/story/santa-maria-in-brera/>. Consultato il 14 agosto 2026.
- Regione Lombardia, Lombardia Beni Culturali. *Palazzo di Brera, Milano (MI). Scheda SIRBeC ARL LMD80-00089, con scheda collegata VAL LMD80-00279, Chiesa di S. Maria di Brera (demolita)*, 2009. <https://www.lombardiabeniculturali.it/architetture/schede/LMD80-00089/>.

«revit-mcp-plugin (repository del ponte pyRevit-MCP impiegato)». *GitHub*.
<https://github.com/revit-mcp/revit-mcp-plugin>. Consultato il 30 agosto 2026.

Elenco delle figure

Figura 1.1. I tre stati del dato sul fronte ovest dell'ex chiesa di Santa Maria in Brera: la nuvola di punti del rilievo, la geometria ricostruita e il modello informato.	5
Figura 2.1. Il flusso di lavoro tradizionale Scan-to-BIM e il collo di bottiglia rappresentato dalla modellazione manuale per ricalco.	10
Figura 3.1. La scala dei Livelli di Sviluppo da A a G della UNI 11337-4 disegnata su un pilastro, dall'oggetto simbolico all'oggetto eseguito e aggiornato; in evidenza il livello D, quello che la seconda fase assume come obiettivo per la geometria.	16
Figura 3.2. Le tre componenti del Livello di Fabbisogno Informativo (LOIN), con i loro aspetti, e i prerequisiti che lo definiscono. Elaborazione dallo schema della UNI EN 17412-1.	18
Figura 4.1. Famiglie di approcci per il riconoscimento automatico degli elementi: dal fitting di primitive geometriche alle reti neurali su nuvole di punti.	21
Figura 5.1. La facciata trecentesca di Santa Maria di Brera nel prospetto inciso da Ferdinando Cassina (Le fabbriche più cospicue di Milano, Milano 1840, tav. 105; acquaforte, Biblioteca comunale dell'Archiginnasio di Bologna, riproduzione digitale Imago IMA00144745) e il fronte ovest attuale nell'ortoimmagine a 4 mm/px generata dalla nuvola di punti (Capitolo 5.4).	28
Figura 5.2. Sezioni trasversali dell'ex chiesa: a sinistra lo stato attuale, con il solaio del 1808-1809 che separa il piano terra voltato dalla sala della Pinacoteca, a destra la ricostruzione dell'assetto medievale. Tavole di Ambrogio Annoni (1939), riprodotte da BreraPlus.	30
Figura 5.3. Lo scanner laser terrestre Riegl VZ-600i impiegato per il rilievo. Immagine tratta dalla scheda tecnica del produttore.	33
Figura 5.4. Pianta del complesso rilevato con le posizioni delle stazioni di scansione, in rosso; la numerazione è quella di progetto RiSCAN, non continua perché comprende posizioni poi eliminate. Restituzione RiPANO su nuvola di punti, DADA-LAB, 18 febbraio 2026.	36
Figura 5.5. La nuvola di punti dell'intero complesso di Brera registrata dalle 119 stazioni, in vista assonometrica.	37
Figura 5.6. Schema dell'articolazione della sperimentazione nelle tre fasi: segmentazione semantica, modellazione geometrica automatica, arricchimento informativo, con gli ambiti spaziali e i prodotti di ciascuna.	39
Figura 5.7. L'ortoimmagine multistrato del fronte ovest a 4 mm/px (5809 × 4745 pixel, 23,24 × 18,98 m): colore reale a contrasto accentuato con le lacune colmate dalle fotografie da drone, riflettanza laser, profondità dal piano medio di facciata (da -15 cm in nero a +45 cm in bianco) e provenienza del dato (laser in blu, fotografie in arancio).	41
Figura 6.1. Schema del flusso di lavoro nelle tre fasi, con l'indicazione dell'operatore di ciascun passaggio: intelligenza artificiale, automazione deterministica, operatore umano.	45
Figura 7.1. Effetto del sottocampionamento spaziale a 0,01 m su un dettaglio del fronte: a sinistra la nuvola grezza con il colore del rilievo, a destra la nuvola regolarizzata.	52
Figura 7.2. Annotazione manuale del ground truth in CloudCompare 2.13.2: in alto le otto classi con la loro etichetta numerica; al centro il ritaglio del portale sulla nuvola e la porzione estratta; a sinistra il comando con cui si aggiunge il campo scalare in cui è scritto il valore della classe; in basso l'albero degli oggetti con le selezioni segmentate elemento per elemento.	54
Figura 7.3. Le otto classi semantiche dell'annotazione, con un ritaglio della nuvola di punti per ciascuna e l'etichetta numerica assegnata in fase di annotazione.	55

Figura 7.4. Schema della rete DGCNNMod: i quattro blocchi EdgeConv confrontano ogni punto con i suoi vicini, le informazioni raccolte vengono unite e gli strati finali assegnano a ogni punto una delle otto classi.	57
Figura 7.5. Curve di apprendimento del modello DGCNNMod: errore di addestramento (cross-entropy loss pesata), accuratezza di addestramento, accuratezza e mIoU di validazione in funzione delle epoche, dal registro di addestramento.	60
Figura 7.6. Matrice di confusione della segmentazione semantica sui 15.639.738 punti accoppiati: sulle righe la classe reale, sulle colonne la classe predetta; in ogni cella il numero di punti e, in corsivo, la quota sulla riga; la diagonale principale rappresenta le classificazioni corrette, i valori esterni gli scambi tra classi. Elaborazione dai risultati di evaluate.py.	63
Figura 7.7. Mappa degli errori tridimensionale: sopra il fronte ovest, sotto la vista dall'alto con il fronte ovest in basso (verde: classificazione corretta; rosso: errore). Gli errori si concentrano lungo bordi, spigoli e linee di imposta.	64
Figura 7.8. Output del processo: nuvola di punti dell'area principale dell'ex chiesa integralmente etichettata per classe semantica.	66
Figura 7.9. La nuvola classificata dell'ex chiesa in esploso assonometrico, con il colore reale del rilievo: il fronte ovest con le sue aperture, il sistema delle volte e il pavimento, separati per classe.	66
Figura 7.10. Scontorno degli elementi del fronte ovest sulla griglia dell'ortoimmagine a 4 mm per pixel: maschere proposte da MobileSAM, completate con i vincoli geometrici; in nero le aree non assegnate (occlusioni riempite da fotografia e oggetti estranei).	70
Figura 7.11. Mappa degli errori sul fronte ovest prima (a sinistra) e dopo (a destra) il raffinamento dei bordi: in rosso i punti in disaccordo con il ground truth. Le strisce verticali delle discese pluviali, classificate come pilastri dalla rete, scompaiono dopo la correzione.	72
Figura 8.1. La strategia di modellazione per le sette classi, prima parte: pilastri, archi, volte e finestre. Per ciascuna classe la nuvola di un'istanza, le forme messe in gara e quella eletta, il livello di sviluppo obiettivo e i parametri della classe. Elaborazione ricomposta dalla tavola 05.	77
Figura 8.2. La strategia di modellazione per le sette classi, seconda parte: porte, muri e pavimento e, nell'ultimo riquadro, i controlli comuni del collaudo con i tre esiti possibili. Elaborazione ricomposta dalla tavola 05.	78
Figura 8.3. Pilastro BRERA_PIL_01: sagoma cruciforme adattata ai punti a sei quote, con la copertura del perimetro e lo scarto medio dei punti dal bordo indicati sopra ogni riquadro.	80
Figura 8.4. Pilastro BRERA_PIL_01: larghezza e profondità della sezione e scostamento del centro in funzione della quota, una misura per ciascuna delle 147 fette; le fette promosse formano una colonna stabile al millimetro nella banda affidabile, la deriva del centro è il fuori piombo.	80
Figura 8.5. Pilastro BRERA_PIL_01: confronto nuvola-modello in pianta e in prospetto, con ogni punto del rilievo colorato in base alla distanza dal solido costruito; le distanze maggiori si concentrano sui pannelli addossati esclusi dal contratto.	82
Figura 8.6. Arco BRERA_ARC_01: tavola di analisi del fitting. In alto a sinistra i punti dell'intradosso con il profilo eletto e la quota d'imposta; in alto a destra la dimensione caratteristica per fetta lungo la profondità; in basso la mappa di copertura del bordo e lo scarto mediano per settore angolare.	84
Figura 8.7. Volta BRERA_VOL_01: elezione della superficie. In alto a sinistra la campata in pianta con gli scarti in millimetri dalla superficie eletta e le tessere delle zone	

escluse; le due sezioni centrali con i punti e la superficie; in basso a destra la mediana degli scarti per cella e la classifica delle superfici candidate.	86
Figura 8.8. Finestra BRERA_FIN_01: misura del contorno sull'imbotte. A sinistra il contorno misurato sovrapposto ai punti; al centro i fianchi letti su quindici sezioni indipendenti; a destra i controlli di coerenza (arco a tutto sesto con scarto nullo, sommità alla fine dei montanti, copertura dell'impronta osservata).	88
Figura 8.9. Finestra BRERA_FIN_03: misura dal colore per le finestre a vista radente. Mappa di luminanza della nuvola proiettata sul piano di facciata, regione scura individuata dalla soglia automatica e contorno estratto (1.380×2.700 mm).	88
Figura 8.10. Portale BRERA_POR_01: misura del doppio contorno. A sinistra la nicchia al filo (arco a tutto sesto) e il vano in profondità sovrapposti ai punti; al centro i fianchi delle due aperture su quindici sezioni e il profilo di strombatura con la gola; a destra i controlli superati.	90
Figura 8.11. Sezione orizzontale di lavoro della nuvola completa (fetta di 30 cm, 1,19 milioni di punti, vista dall'alto): i quattro fronti del complesso, le sezioni cruciformi dei colonnati e i disturbi (vegetazione, corpi addossati, arredi).	92
Figura 8.12. Perimetro riconosciuto sulla sezione di lavoro: i quattro assi dei muri con le facce misurate in tratteggio, intersecati agli angoli; è la geometria posata in Revit come muri di sistema.	93
Figura 8.13. Architettura del ponte fra l'agente e Revit (protocollo MCP, server revit-mcp, pyRevit Routes, API di Revit) e le sei fasi della catena di generazione eseguita con un comando unico.	96
Figura 8.14. Il modello integrato con la nuvola: il complesso visto da sud-ovest, con i muri perimetrali misurati e le aperture che li tagliano, le diciotto vele a sesto variabile e la nuvola accesa che riempie le parti non modellate.	98
Figura 9.1. Dieci zone campione estratte dall'ortoimmagine a 4 mm per pixel, da cui sono state derivate le classi di materiale: basamento, laterizio, bugnato, marcapiano, persiana, conci del portale, targa, pluviale, inferriata, cornicione.	105
Figura 9.2. Maschera di validità del fronte ovest (nero: escluso; bianco: facciata valida): copertura oltre il cornicione, automobili, passanti, transenna, varco del portone e sede stradale, per un totale dell'8,27% dell'area utile.	106
Figura 9.3. La catena dell'arricchimento informativo in otto passaggi, con l'operatore di ciascuno: intelligenza artificiale (SE-1 e SE-2), automazione deterministica, operatore esperto.	106
Figura 9.4. Annotazione manuale di un riquadro di addestramento (lunetta del portale): a sinistra l'ortoimmagine, a destra l'annotazione corretta a mano, con i colori della legenda condivisa (pietra, metallo, vetro, legno).	107
Figura 9.5. Mappa dei materiali del fronte ovest prodotta dal classificatore Random Forest dopo il post-processing a vincolo fisico e l'applicazione della maschera, con i colori della legenda condivisa.	110
Figura 9.6. Il piano terra della ex chiesa allestito a Museo Archeologico, incisione da L'Illustrazione Universale, 1867: riscontro iconografico dello stato dei sostegni dopo l'irrobustimento delle colonne. Riproduzione dalla pagina Santa Maria in Brera di BreraPlus.	113
Figura 9.7. Pilastro BRERA_PIL_02: sezione orizzontale della nuvola TLS a 2,20 m dal pavimento (fetta di 30 cm, 16.602 punti) con il contorno del pilastro ottocentesco dal modello ($1,92 \times 1,22$ m); l'arco in basso è il fusto medievale che affiora nella nicchia.	113
Figura 9.8. Mappa degli identificativi: le geometrie delle otto famiglie del fronte ovest riproiettate con z-buffer sulla griglia dell'ortoimmagine, un colore per elemento; ogni pixel è attribuito all'elemento del modello che lo occupa.	114

Figura 9.9. Scheda dell'elemento PERIMETRO_OVEST collegata dal parametro SE_Doc_Link: ortoimmagine e mappa dei materiali, composizione materica (Random Forest, area 203,77 m ² , copertura 98,9%), datazione, litotipo e fonti dal modulo SE-2 dopo la revisione umana.....	117
Figura 10.1. Il modello della corsia automatica (a) e il modello della corsia manuale (b) nella stessa vista assonometrica di confronto: fronte ovest con portale e finestre, sistema delle volte, fronte sud con paraste e contrafforti. Viste esportate dai due modelli Revit con la medesima camera.	125

Elenco delle tabelle

Tabella 5.1. Sintesi dei parametri della campagna di rilievo laser scanner.....	34
Tabella 6.1. Passaggi del flusso di lavoro con operatore, tecnica, dati e metrica di valutazione.	46
Tabella 6.2. Strumenti software impiegati nelle tre fasi e ruolo di ciascuno nel flusso di lavoro.	49
Tabella 7.1. Riduzione della consistenza della nuvola dell'area principale a seguito del sottocampionamento spaziale (distanza minima 0,01 m).....	53
Tabella 7.2. Metriche di classificazione per singola classe calcolate sulla matrice di confusione (accoppiamento entro 5 cm, 15.639.738 punti).	62
Tabella 7.3. Metriche per classe sul fronte ovest prima e dopo il raffinamento dei bordi (2.862.914 punti di ground truth accoppiati entro 5 cm; Overall Accuracy dal 92,22% al 98,08%).	71
Tabella 8.1. Parametri del clustering DBSCAN per classe (script Cluster_exporter.py) ed esito della catalogazione dopo il controllo di qualità manuale.	75
Tabella 8.2. Contratto geometrico del pilastro BRERA_PIL_01: parametri, incertezze e provenienza.	81
Tabella 8.3. Validazione cloud-to-model del pilastro BRERA_PIL_01: distanza laterale dei punti dal solido parametrico.	81
Tabella 8.4. Campagna dei 31 pilastri: tipologie riconosciute automaticamente, elementi e collaudo.....	83
Tabella 8.5. Esito della campagna finestre: apertura misurata, soglia, forma della testa, sorgente della misura ed elementi del corredo modellati.	89
Tabella 8.6. Esito della campagna porte: apertura misurata, soglia, forma della testa ed elementi del corredo modellati.....	91
Tabella 8.7. Perimetro murario definitivo: corpi, quote, spessori e criterio di misura.....	94
Tabella 8.8. Gradi di parametricità dichiarati nel modello integrato (verifica empirica via API).....	98
Tabella 8.9. Quadro riassuntivo della seconda fase per classe: elementi nel modello, scarto fra nuvola e modello, tempo macchina (misurato su due elementi per classe) e tempo della modellazione manuale (primo elemento di ogni tipo cronometrato, istanze ripetute stimate).....	100
Tabella 9.1. Classi di materiale del fronte ovest, condivise fra corsia manuale e corsia automatica.	105
Tabella 9.2. Metriche per classe del classificatore Random Forest sui 500.000 pixel di validazione (Overall Accuracy 93,4%).	109
Tabella 9.3. Importanza delle feature del classificatore (quota del potere decisionale) e origine del dato.....	109
Tabella 9.4. Percentuali di materiale per elemento del fronte ovest (attribuzione model-driven, soglia di rilevanza 5%) e copertura dell'analisi.....	115
Tabella 9.5. Schema dei parametri condivisi SE_ (file BRERA_SE_PARAMETRI.txt) e fonte del valore.....	116
Tabella 9.6. Valori storici scritti nei parametri SE_Datazione e SE_Litotipo dopo la revisione umana (confidenza: A alta, M media, B bassa).	119

Tabella 9.7. Durate della terza fase in minuti: corsia automatica, supervisione umana e corsia manuale. Le durate automatiche comprendono impostazione, iterazioni e redazione dei report, e le righe della corsia manuale sono proiezioni da campioni cronometrati.	121
Tabella 10.1. Sintesi dei risultati delle tre fasi e dei tempi, con l'automazione e con la procedura manuale.	126
Tabella 10.2. Protocollo operativo proposto: passaggi, operatore, verifica di chiusura e prodotto documentale.	128

Abstract

Il processo Scan-to-BIM e, in particolare, la conversione di nuvole di punti in modelli parametrici informativi rappresentano oggi uno dei flussi di lavoro più onerosi del settore AEC (Architecture, Engineering and Construction), caratterizzato da un elevato dispendio di tempo per la modellazione manuale e dalla difficoltà di tradurre il dato grezzo in informazione semantica strutturata. Il problema è ancora più evidente nel caso del patrimonio costruito, dove la complessità morfologica e la stratificazione storica degli edifici rendono il ricalco manuale particolarmente lento e ripetitivo.

La presente tesi indaga e sperimenta l'applicazione di tecnologie di intelligenza artificiale, come Machine Learning e Computer Vision, per innovare tale processo, superando i limiti del ricalco manuale. La ricerca adotta un approccio metodologico applicato a un caso studio reale, l'ex chiesa di Santa Maria in Brera a Milano, e si articola in tre fasi principali.

La prima fase consiste nella segmentazione semantica della nuvola di punti: una rete neurale, addestrata su una porzione annotata manualmente, riconosce e classifica in automatico gli elementi architettonici presenti nel rilievo, quali pavimenti, murature, pilastri, archi, volte e aperture, restituendo una nuvola etichettata che costituisce la base delle fasi seguenti. La seconda fase impiega le classi così ottenute per automatizzare la modellazione geometrica dell'involucro architettonico, con la quantificazione della riduzione dei tempi rispetto alla procedura tradizionale. La terza fase, condotta su una porzione ridotta e rappresentativa dell'edificio, è dedicata all'arricchimento del livello informativo del modello: attraverso classificatori semantici la nuvola di punti viene analizzata per riconoscere automaticamente materiali e caratteristiche superficiali, informazioni che vengono integrate dall'analisi di immagini e di documentazione storica e associate agli elementi modellati sotto forma di attributi qualitativi.

L'obiettivo finale è definire un protocollo operativo che integri l'AI non come sostituto del progettista, ma come strumento di supporto decisionale e operativo, quantificandone i vantaggi in termini di tempi e di ricchezza informativa del modello HBIM (Historic Building Information Modeling).

Abstract (English version)

The Scan-to-BIM process and, in particular, the conversion of point clouds into parametric information models currently represent one of the most demanding workflows in the AEC (Architecture, Engineering and Construction) sector, characterized by considerable time expenditure for manual modeling and by the difficulty of translating raw survey data into structured semantic information. This issue is even more evident in the field of built heritage, where the morphological complexity and the historical stratification of buildings make manual redrawing particularly slow and repetitive.

This thesis investigates and tests the application of Artificial Intelligence technologies, such as Machine Learning and Computer Vision, in order to innovate this process and overcome the limitations of manual redrawing. The research adopts a methodological approach applied to a real case study, the former church of Santa Maria in Brera in Milan, and is organized into three main phases.

The first phase consists of the semantic segmentation of the point cloud: a neural network, trained on a manually annotated portion, automatically recognizes and classifies the architectural elements recorded in the survey, such as floors, walls, columns, arches, vaults and openings, returning a labeled cloud that provides the basis for the subsequent phases. The second phase employs the resulting classes to automate the geometric modeling of the architectural envelope, quantifying the reduction in processing time with respect to the traditional procedure. The third phase, carried out on a limited and representative portion of the building, is devoted to the enrichment of the information level of the model: through semantic classifiers, the point cloud is analyzed in order to automatically recognize materials and surface characteristics, information that is supplemented by the analysis of images and historical documentation and associated with the modeled elements as qualitative attributes (semantic enrichment).

The final objective is to define an operational protocol that integrates AI not as a replacement for the designer, but as a tool for decision-making and operational support, quantifying its benefits in terms of time saving and information richness of the resulting HBIM (Historic Building Information Modeling) model.

TAVOLA 01 · EX CHIESA DI SANTA MARIA IN BRERA

DAL RILIEVO AL MODELLO INFORMATIVO



LA SPROPORZIONE TEMPORALE NEL PROCESSO DI GENERAZIONE DI UN MODELLO INFORMATIVO



LA RESTITUZIONE – settimane di lavoro manuale: da questa sproporzione nascono la domanda di ricerca e la tesi.

LA DOMANDA DI RICERCA

QUANTO DEL PROCESSO SCAN-TO-BIM PUÒ ESSERE AFFIDATO ALL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE ?

La risposta si misura su tre assi:

1	TEMPO	🕒
	ore risparmiate sul lavoro manuale	
2	ACCURATEZZA	🎯
	fedeltà geometrica al rilievo	
3	INFORMAZIONE	📋
	parametri informativi compilati	

IL CASO STUDIO

Ex chiesa di Santa Maria in Brera
Milano

XIII sec.

● fondazione

1346-49

● paramento bicromo

1808

● demolizione del fronte

1943-50

● danni bellici, restauri

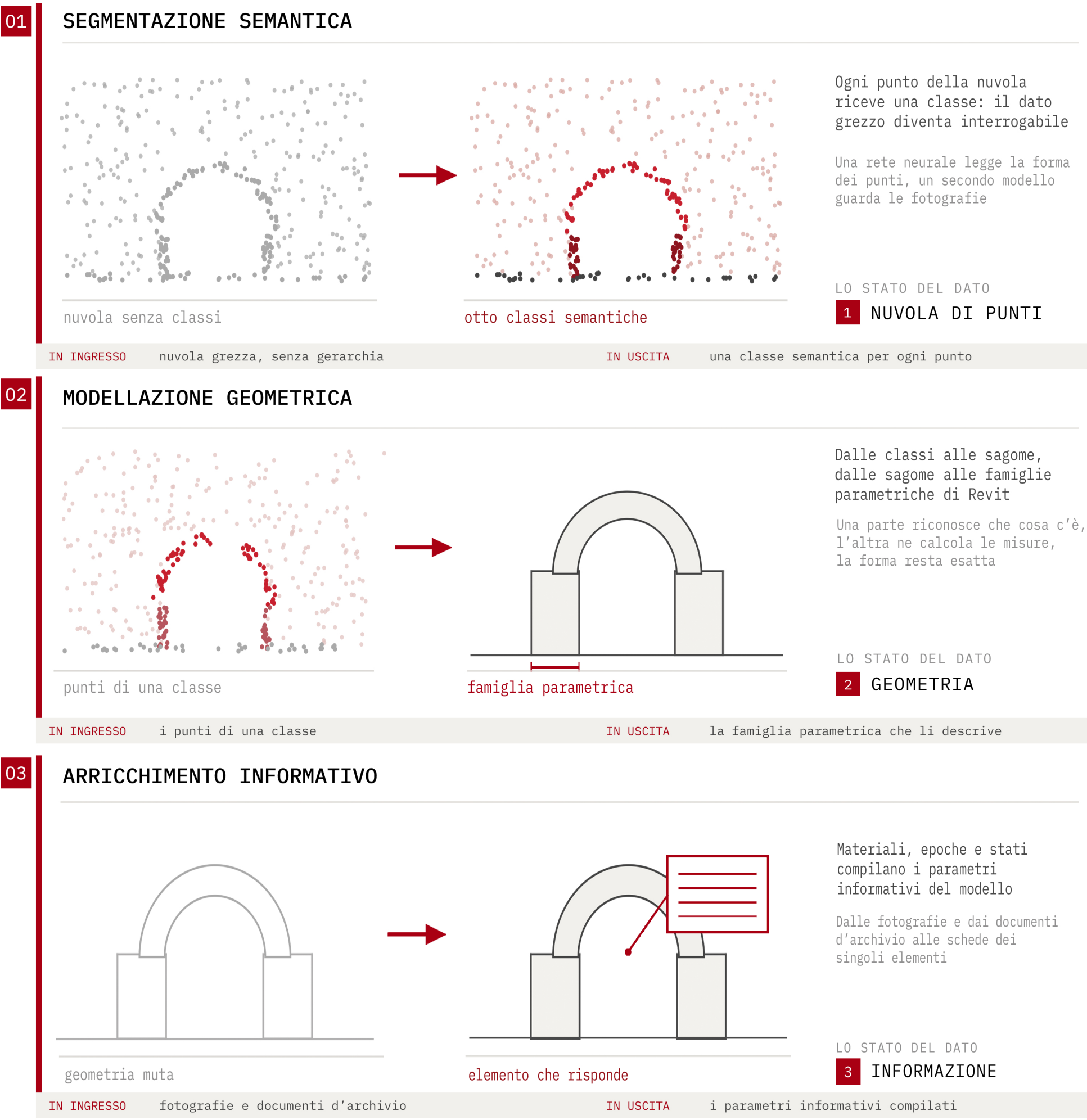
oggi

● complesso di Brera

PERCHÉ QUESTO CASO

stratificazione di epoche in un solo fronte; geometrie irregolari, dove nessun elemento si ripete; materiali diversi sulla stessa parete.

È il caso più complesso, e per questo il banco di prova adatto: se il metodo regge qui, regge altrove.



A · IL CASO STUDIO



01 · Inquadramento · il complesso di Brera, Milano

IL CASO STUDIO

Ex chiesa di Santa Maria in Brera

TIPOLOGIA	Basilica a tre navate, oggi aule universitarie
EPOCA	Prima attestazione 1201 - facciata 1346-49
USO ATTUALE	Scuola di scenografia · Accademia di Brera
COMPLESSO	Palazzo di Brera · via Brera 28, Milano

Saloni Napoleonici · Pinacoteca

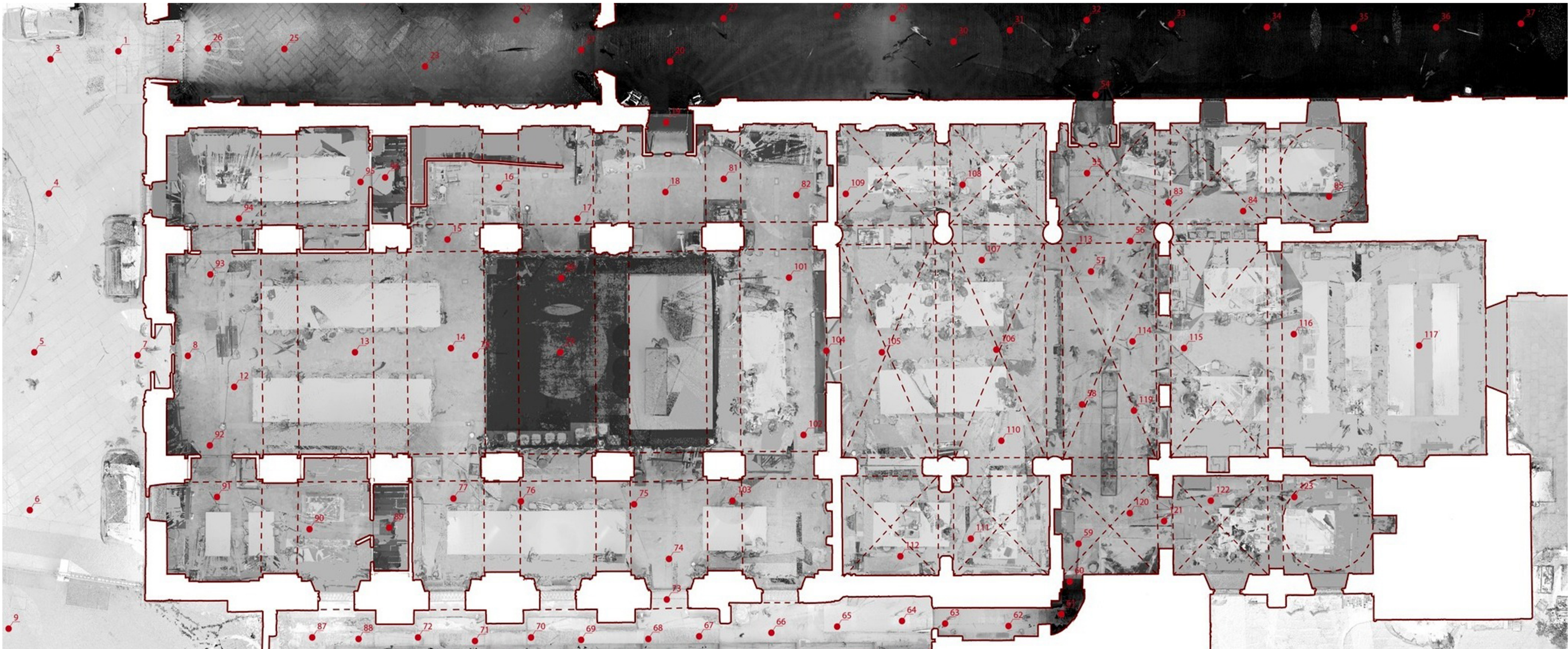
Aule della Scuola di scenografia

LIVELLO RILEVATO



Il portale sulla piazzetta · I cortili del complesso · I corridoi voltati · Le navate, oggi aule · La Scuola di scenografia

C · LA CAMPAGNA DI RILIEVO



02 · Pianta del livello rilevato con le posizioni di scansione – RiPANO

● Posizioni di scansione

LA CAMPAGNA

Due giornate

31 GENNAIO 2026



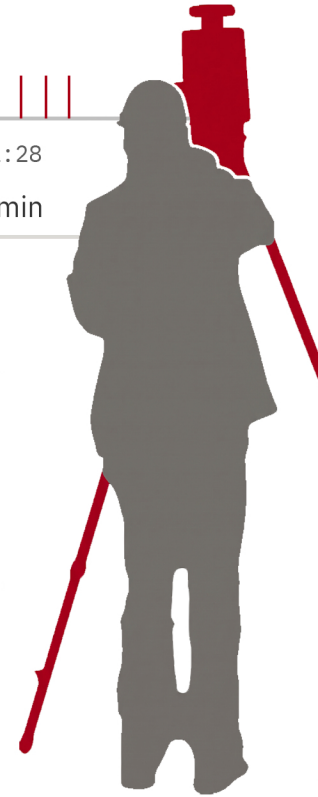
96 scansioni 4 h 13 min

16 FEBBRAIO 2026



23 scansioni 0 h 56 min

Due giornate a distanza di due settimane. La prima copre l'edificio e i cortili, la seconda integra le zone rimaste in ombra e il fronte ovest. Ogni stazione dura poco più di un minuto e si allinea da sola, senza target: è lo strumento a sapere dove si trova, e ad allineare in automatico ogni singola scansione.



LO STRUMENTO

RIEGL VZ-600i

TIPO	laser scanner terrestre
SCANSIONI	119 · 96 + 23
SUL CAMPO	~5 h di acquisizione
SOFTWARE	RISCAN Pro · RiPANO

DAL CAMPO AL DATO · TEMPI

acquisizione — 119 scansioni	~ 5 h
importazione su PC	~ 2 h
registrazione automatica	~ 3 h
esportazione .e57	~ 3 h

TOTALE ~ 13 h

L'OUTPUT

Le singole scansioni allineate e registrate unite in un unico modello: la nuvola di punti

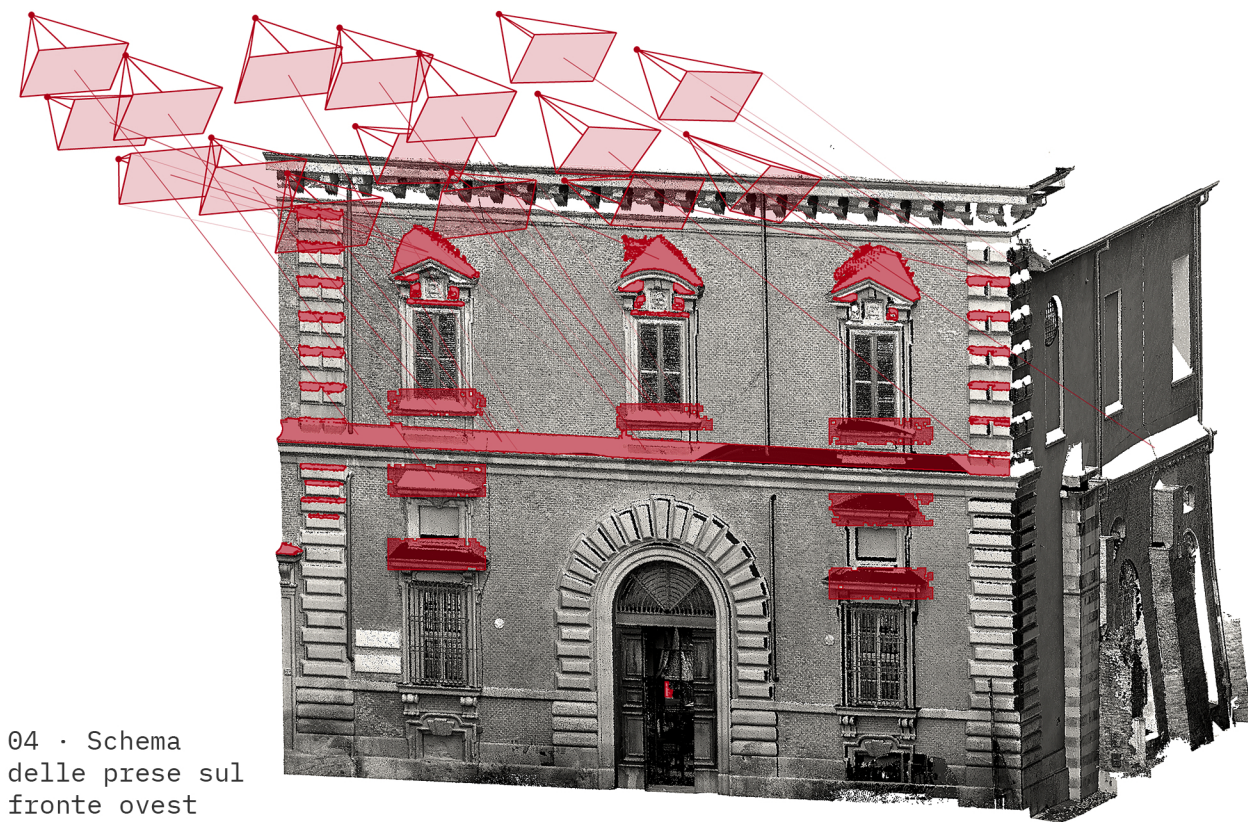


03 · Nuvola di punti dell'intero edificio

Il progetto esportato conta 2,31 miliardi di punti per circa 64 GB: è il dato grezzo, completo di colore, da cui partono tutte le fasi successive. Su questa nuvola lavorano il sottocampionamento, la segmentazione e, sul solo fronte ovest, l'ortoimmagine.

D · FOTOGRAMMETRIA DELLA FACCIATA

FOTOGRAMMETRIA



04 · Schema delle prese sul fronte ovest



16 prese da drone
zona cieca per il laser

Il laser scanner lavora da terra, a poco più di un metro di quota, davanti a un fronte alto diciannove. Tutto ciò che sta sopra un oggetto — l'estradosso del cornicione, la sommità dei timpani, i davanzali — resta nel suo cono d'ombra, e nell'ortoimmagine diventa una lacuna: il 9,5 % dei pixel. Sedici scatti da drone, ripresi al di sopra della linea di gronda, colmano proprio quelle zone.

7 stazioni laser davanti al fronte

ORTOIMMAGINE



E · SCELTA DEL CASO STUDIO

L'EDIFICIO STORICO · archi, volte, stratificazione



la navata voltata, oggi aula 38

L'AULA IN USO · quello che copre le superfici

pilastro in pietra dentro la muratura

elementi addossati alle pareti

tavoli, sedie e tende

modelli e scenotecnica della Scuola

elementi a copertura delle superfici

LA SCELTA

Un edificio storico, non un edificio recente. La geometria non è regolare: archi, volte e pilastri costruiti in tempi diversi si toccano e si compenetrano, e otto fasi occupano lo stesso livello. L'aula è in uso: modelli, armadi, impianti e attrezzature di scena stanno addossati alle superfici da rilevare. Vanno attraversati in campo e tolti in post-produzione, prima ancora di poter riconoscere qualcosa. Ogni passaggio della catena — rilievo, pulizia, riconoscimento — lavora in condizioni non ottimali, questo rende l'ex chiesa un ottimo banco di prova per il workflow con AI.

TAVOLA 03 · EX CHIESA DI SANTA MARIA IN BRERA

SEGMENTAZIONE SEMANTICA DELLA NUVOLA DI PUNTI

A · DATI DI INPUT

AREA DI SPERIMENTAZIONE

La sperimentazione non comprende l'intero complesso di Brera, ma solo la prima grande ala della ex chiesa: il piano terra voltato, oggi aule della Scuola di scenografia, e il fronte ovest sulla piazzetta.

01 · Nuvola dell'area: 35 milioni di punti

La nuvola dell'area conta 35 milioni di punti dopo il filtro di densità a un centimetro. Su questa porzione la rete impara e su questa viene giudicata: l'annotazione manuale copre 15,6 milioni di punti distribuiti su tutte e otto le classi, in modo che nessuna classe sia rappresentata da una sola zona dell'edificio.

C · INTEGRAZIONE NUVOLA E FOTOGRAMMETRIA

La rete lavora sulla nuvola e sbaglia dove la nuvola è ambigua: sugli stipiti, sulle cornici, sui bordi delle aperture. L'ortofotografia del fronte, metricamente corretta e campionata a 4 mm per pixel, porta un'informazione che alla nuvola manca. A leggerla è SAM, Segment Anything Model: un modello fondazionale che segmenta un'immagine senza essere stato addestrato su questo edificio, senza un esempio e senza etichette. SAM propone i bordi, la mappa di profondità li verifica.

04 · Il dato in ingresso

ortofotografia del fronte · 4 mm/px

05 · Che cosa vede SAM

1024 punti di innesco · 115 regioni

06 · I sei elementi riconosciuti

bordi raffinati · IoU 0,93-0,97

07 · Lo scontorno prodotto

■ muro ■ finestra ■ porta ■ non ass.

08 · Come lavora, su un elemento · finestra dell'ordine superiore

l'ortofotografia: quello che SAM riceve

le regioni che SAM propone

il bordo accettato sul salto di quota

VERIFICA PROFONDITA'

Il bordo di un elemento non è solo un contrasto di colore, è anche un salto di profondità: il contorno proposto viene accettato solo dove il laser conferma lo scalino fra muro e vano. SAM dice dove passa il bordo, non che cosa è.

D · CLASSI SEMANTICHE

1

VOLTA

Coperture curve

Label 3

18 elementi

2

MURO

Perimetrali, partizioni interne e facciata

Label 2

Elemento unico

3

PORTA

Portone principale e porte interne

Label 7

3 elementi

4

NON CLASSIFICATO

Rumore, arredi, decorazioni: sottofondo negativo

Label 0

Non modellato

5

ARCO

Collegamenti voltati fra pilastri e aperture

Label 4

33 elementi

6

FINESTRA

Aperture vetrate

Label 6

10 elementi

7

PILASTRO

Elementi verticali liberi e semipilastri

Label 5

31 elementi

8

PAVIMENTO

Superfici orizzontali di calpestio

Label 1

Elemento unico

WORKFLOW DELLA SEGMENTAZIONE AUTOMATIZZATA

Dalla nuvola grezza alla nuvola classificata

INPUT

nuvola grezza

.las · 35 M pt

FASE 01

01

ANNOTAZIONE MANUALE

ground truth annotato a mano in CloudCompare

15,6 mln punti · 8 classi · label 0-7

copertura bilanciata dell'edificio

CloudCompare · manuale

FASE 02

02

PREPROCESSING

griglia 1x1 m · overlap 50% · 4096 punti/blocco

coordinate XYZ · colore HSV · normali

1759 blocchi esportati in .npz

preprocessing.py

FASE 03

03

TRAINING DGCNN

50 epoche · batch 8 · pesi di classe

rete DGCNN: convoluzione su grafo dinamico

miglior modello: OA 94,56% · mIoU 86,55%

train.py

FASE 04

04

INFERENZA

sliding window 25 cm · voto a maggioranza

boost delle classi rare · KDTree sui 9 vicini

classifica l'intera nuvola, punto per punto

predict.py

FASE 05

05

VALIDAZIONE

matrice di confusione · recall per classe

mappa verde/rosso degli errori per punto

confusioni reali: archi/volte · finestre/muro

esiti e confronti

OUTPUT

nuvola classificata

.las · 8 classi

UNIVERSITÀ DI PAVIA

UNIVERSITÀ DI PAVIA
DIPARTIMENTO INGENGERIA CIVILE
ARCHITETTURA

bicAr

IEA

UNIVERSITÀ DI PAVIA
INGENGERIA EDILE
ARCHITETTURA

DADA LAB
DRAWING · ARCHITECTURE · DOCUMENTATION

CORSO DI LAUREA · INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

AUTOMAZIONE AI NEL PROCESSO SCAN-TO-BIM PER GLI EDIFICI STORICI

DALLA NUVOLA DI PUNTI ALL'ARRICCHIMENTO INFORMATIVO DEL MODELLO

STUDENTE

Marco Dell'Orto

RELATRICE

Prof.ssa Francesca Picchio

CORRELATORE

Dr. Hangjun Fu

TAVOLA

03 / 09

TAVOLA 04 · EX CHIESA DI SANTA MARIA IN BRERA

PROCESSO DI SEGMENTAZIONE · MANUALE vs AUTOMATICA



A · SEGMENTAZIONE MANUALE

INPUT · NUVOLA INTEGRALE DEL RILIEVO

01 · Nuvola integrale · 860 milioni di punti

01 PREPARAZIONE DELLA NUVOLA

~5 min

02 · La nuvola viene alleggerita senza perdere dettagli utili al processo

Il sottocampionamento evita la ridondanza del laser senza intaccare cornici, modanature e spessori murari: la rete lavora per blocchi locali e ha bisogno di una densità uniforme, non di tutti i punti. Le normali servono perché la rete legge l'orientamento della superficie oltre alla posizione del punto, e la traslazione all'origine evita che le coordinate assolute del rilievo, rendano instabile il calcolo.

02 ANNOTAZIONE DELLE CLASSI

~10 h

01.1 import .e57 — 860 M punti (24 GB)

01.2 subsampling 0,01 m → 35 M punti

01.3 normals · octree r 0,05 m · MST knn 10

01.4 traslazione all'origine — stabilità numerica

B · SEGMENTAZIONE AUTOMATICA

INPUT A · GROUND TRUTH

← dalla colonna A

.las · 15,6 M punti · 8 classi

INPUT B · NUVOLA RAW COMPLETA

.las · 35 M punti — l'edificio intero

↳ non passa dal training: entra nella fase 06

04 PREPROCESSING

preprocessing.py

~5 min

La rete non può leggere 15,6 M punti tutti insieme: il ground truth viene tagliato in bocconi omogenei.

- filtro delle etichette valide 0-7
- colore RGB → HSV: indipendente dalla luce
- griglia 1x1 m con finestre sovrapposte al 50 %
- 4096 punti per blocco → 1759 file .npy

overlap 50 % : nessun elemento viene spezzato dai tagli della griglia

ogni blocco = 4096 righe × 10 colonne · X Y Z · H S V · Nx Ny Nz · Label

05 · Celle 1x1 m estratte dalla nuvola annotata

05 TRAINING DGCNN

train.py

~1 h

06 · Curva di apprendimento — 50 epoche

LOSS

ACCURACY %

convergenza

~94 %

0,13

curva di apprendimento

EPOCA

una lettura completa dei 1759 blocchi · qui ripetuta 50 volte

LOSS ↓ · 1'errore

quanto la rete sbaglia: scende da ~1,0 a ~0,12 — più scende, meglio ha imparato

ACCURACY ↑ · il voto

% di punti indovinati su blocchi mai visti prima: sale fino a ~94 % — è il vero esame della rete

PLATEAU · convergenza

verso l'epoca 40 le curve si appiattiscono: la rete ha imparato tutto il possibile e non è andata in overfitting

06 PREDICT · INFERENZA

predict.py

~3 h

Inferenza

per ogni punto una probabilità per classe

Voting · finestra 0,5 m

i voti di più finestre si sommano

Propagazione KDTree

i punti isolati ereditano dai 9 vicini

07 · Nuvola segmentata in automatico dall'AI (esterno)

08 · Nuvola segmentata in automatico dall'AI (interno)

C · RISULTATI E VALIDAZIONE

① Matrice di confusione

classe reale (ground truth) vs classe predetta

	NON CLASS.	PAVIMENTO	MURO	VOLTA	ARCO	PILASTRO	FINESTRA	PORTA
NON CLASS.	5731948	31763	44305	29389	42299	154605	2087	7922
PAVIMENTO	21114	1263430	10359	0	25	5986	0	818
MURO	34680	5646	4042236	864	13838	200261	49620	87001
VOLTA	5763	3647	957	1465227	4234	998	0	8
ARCO	14918	1245	25204	144448	178037	114992	1324	789
PILASTRO	10814	857	44787	277	24903	1527071	1851	887
FINESTRA	18784	1074	143836	2453	6189	16091	741454	9480
PORTA	11093	160	56648	37	1687	5804	2729	568777

OA · ACCURATEZZA GLOBALE

90,91 %

l'OA guarda tutti i punti insieme

mIoU · INTERSEZIONE SU UNIONE

80,99 %

il mIoU pesa ogni classe allo stesso modo

PUNTI CORRETTI PER OGNI CLASSE

CLASSE	Corretto	Totale	%
VOLTA	99	100	99 %
PAVIMENTO	97	100	97 %
PILASTRO	95	100	95 %
NON CLASS.	92	100	92 %
MURO	91	100	91 %
PORTA	88	100	88 %
FINESTRA	79	100	79 %
ARCO	74	100	74 %

② Mappa degli errori

confronto punto per punto con il ground truth

09 · Facciata

10 · Archi e volte

classificazione corretta

errore di classe

L'edificio è quasi interamente verde: la massa architettonica è stata compresa. I punti rossi non sono rumore sparso: si concentrano su stipiti, linee d'imposta e spigoli fra muri perpendicolari — è l'«effetto bordo» dei metodi a finestra scorrevole, fisiologico e documentato in letteratura.

la rete riconosce le superfici, non le gerarchie strutturali

③ Raffinamento dei bordi in facciata

11 · Errori dopo il raffinamento

12 · Dove agisce la correzione

risanati 197.390

peggiorati 29.563

Su 2.862.914 punti di ground truth accoppiati entro 5 cm: 197.390 risanati contro 29.563 peggiorati. La correzione agisce sull'83,6 % del fronte ovest; I punti occlusi restano come li ha classificati la rete.

98,08 %

OA fronte ovest era 92,22 %

-75,3 %

errori di classe 222.841 → 55.014

172.818

punti riclassificati 83,6 % correggibile

F1 per classe

CLASSE	F1
FIN	0,877+0,958
POR	0,896+0,985
MUR	0,949+0,986

④ Valutazione finale

MANUALE · porzione / edificio

~10 h / ~36 h

AUTOMATICO · AI / AI + manuale

~4 h / ~14 h

~2,6× più veloce

Sulla sola segmentazione il rapporto è di 3h contro 36h, 12 volte più veloce.

MANUALE

- lavoro intensivo e ripetitivo
- possibilità di errore umano
- dipende dall'operatore

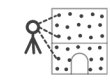
AUTOMATICO

- interamente automatizzato
- ripetibile e consistente
- scalabile su edifici complessi

MODELLAZIONE GEOMETRICA DELLA NUVOLA DI PUNTI



INTRODUZIONE



RILIEVO



SEGMENTAZIONE



MODELLAZIONE



ARRICCHIMENTO



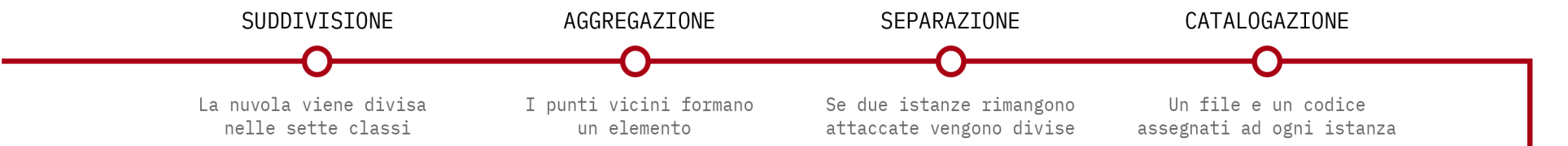
CONFRONTO

A · IL DATO IN INPUT E LA CATALOGAZIONE

01 · NUVOLA DI PUNTI CLASSIFICATA



02 · DALLA NUVOLA AI SINGOLI ELEMENTI



03 · IL CATALOGO FOTOGRAFICO DELLE ISTANZE

ID ELEMENTO	CATEGORIA REVIT	N° PUNTI	STATUS	RGB
BRERA_PIL_01	Pilastri	161 762	da modellare	
BRERA_ARC_01	Modelli generici	126 227	da modellare	
BRERA_FIN_01	Finestre	94 703	da modellare	

LE ISTANZE CATALOGATE · anteprime RGB reali dal catalogo



D · LA STRATEGIA DI MODELLAZIONE PER LE 7 CLASSI

5

BRERA_PIL_10 · nuvola RGB

PILASTRI

31 catalogati · 29 modellati · 2 esclusi

La sezione si misura dove il laser vede il fusto per intero e poi viene estrusa lungo tutta l'altezza.

FORME IN GARA

LOD OBIETTIVO

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA

larghezza e profondità della sezione, altezza del fusto

POSA

quota di base e rotazione in pianta

TRACCIA

provenienza e incertezza di ogni misura

4

BRERA_ARC_12 · nuvola RGB

ARCHI

33 catalogati · 33 modellati

Non ci sono due archi uguali: ognuno ha il suo tipo. Di ciascuno si misurano luce, freccia e profondità.

FORME IN GARA

LOD OBIETTIVO

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA

luce, freccia, spessore della ghiera, profondità

POSA

quota d'imposta; la profondità cambia da arco ad arco

TRACCIA

forma eletta, incertezze, spessore dichiarato dedotto

3

BRERA_VOL_07 · nuvola RGB

VOLTE

18 catalogate · 18 modellate · 2 da rivedere

Dodici forme si contendono ogni volta: vince sempre la vela a sesto variabile, 18 su 18.

FORME IN GARA

LOD OBIETTIVO

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA

dimensioni di pianta, quota d'imposta, spessore del guscio

FORMA

la legge della curvatura sta nel contratto, non in Revit

TRACCIA

incertezze, esito del collaudo, spessore dedotto

6

BRERA_FIN_06 · nuvola RGB

FINESTRE

10 catalogate · 10 modellate

L'apertura taglia il muro, bastano larghezza e altezza. Cinque sono ad arco e cinque rettangolari; di cui tre si riconoscono dal colore, dove il laser non arriva.

FORME IN GARA

LOD OBIETTIVO

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA

larghezza e altezza: il foro segue lo spessore del muro

CONTORNO

quote di soglia e di testa, testa retta o ad arco

CORREDO

mostre, grate, davanzali, timpani

7

BRERA_POR_01 · nuvola RGB

PORTE

3 catalogate · 3 modellate

Due porte interne e il portale, che ha due aperture una dentro l'altra: la nicchia ad arco sul filo della facciata e, dietro, il vano vero più stretto.

OGNI PEZZO MISURATO A SÉ

LOD OBIETTIVO

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA

larghezza e altezza del vano; nicchia e arco del portale

POSA

quota della soglia, spessore del muro, piano di facciata

CORREDO

bugnato, ghiera di conci, lunetta a raggiera, stipiti

2

BRERA_MUR · nuvola RGB

MURI

Nuvola unica → 4 muri · 6 corpi

Qui non c'è un file per elemento: si lavora sull'intera nuvola. Ogni lato ha il suo spessore misurato e si spezza nei corpi che l'edificio ha davvero.

UN TIPO DI MURO PER OGNI SPESSORE

LOD OBIETTIVO

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA

un tipo di muro per ogni spessore misurato

POSA

assi del perimetro, quote di base e di sommità

TRACCIA

da quali punti e con quale criterio, muro per muro

1

BRERA_PAV · nuvola RGB

PAVIMENTO

Nuvola unica → 1 elemento

L'unico elemento che non nasce dalla nuvola ma dal modello: la quota viene dal rilievo, il contorno dalle facce interne dei muri già misurati.

PIASTRA SUL PERIMETRO COSTRUITO

LOD OBIETTIVO

PARAMETRI DELLA CLASSE

GEOMETRIA

contorno dalle facce interne dei muri misurati

POSA

quota 0,650 m: è il livello di tutto il modello

TRACCIA

spessore 15 cm, dichiarato convenzionale

IL COLLAUDO

Ogni elemento passa gli stessi controlli, l'esito è scritto nel suo contratto

NON VENGONO MAI EFFETTUATI RITOCCHI A MANO: SI CORREGGE IL CONTRATTO E SI RIGENERA 95 istanze catalogate → 98 elementi del modello

WORKFLOW DELLA MODELLAZIONE AUTOMATIZZATA

Dall'istanza catalogata all'elemento BIM verificato

UNIVERSITÀ DI PAVIA

UNIVERSITÀ DI PAVIA
DIPARTIMENTO INGENGERIA EDILE
ARCHITETTURA

bicAr

ieA

UNIVERSITÀ DI PAVIA
INGEGNERIA EDILE
ARCHITETTURA

DADA LAB
DRAWING · ARCHITECTURE · DOCUMENTATION

CORSO DI LAUREA · INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

AUTOMAZIONE AI NEL PROCESSO SCAN-TO-BIM PER GLI EDIFICI STORICI

DALLA NUVOLA DI PUNTI ALL'ARRICCHIMENTO INFORMATIVO DEL MODELLO

STUDENTE

RELATRICE
CORRELATORE

Marco Dell'Orto

Prof.ssa Francesca Picchio
Dr. Hangjun Fu

TAVOLA

05 / 09

TAVOLA 06 · EX CHIESA DI SANTA MARIA IN BRERA

PROCESSO DI MODELLAZIONE - MANUALE vs AI

A · LA MANO

COME LAVORA LA MANO		L'operatore in Revit
	01	VISTE E SEZIONI Apre viste e sezioni della nuvola dentro Revit, elemento per elemento
	02	LETTURA DELLE QUOTE Legge le misure sui punti, una quota alla volta
	03	FAMIGLIA A MANO Costruisce la famiglia parametrica nell'editor e la adatta alle quote lette
	04	POSA E CONTROLLO A VISTA Posa l'elemento e lo confronta a occhio con la nuvola, mentre costruisce
	05	L'ELEMENTO DOPO Ricomincia da capo il processo

Il confronto con la nuvola è simultaneo alla modellazione: la mano verifica mentre costruisce, e ogni scelta resta nella mano di chi modella.



01 · Il modello costruito a mano

IL TEMPO		A parità di specifica
VOL		190 min
ARC		90 min
FIN		130 min
POR		90 min
MUR		21 min
PIL		140 min
PAV		2 min
In grigio la mano, in rosso la macchina		

11 h 03m contro 22 min

Tempo di esecuzione: trenta volte più veloce

Perché il confronto sia alla pari va contato anche il tempo di verifica dell'operatore. A mano il controllo è dentro la modellazione: si verifica sulla nuvola mentre si costruisce. Con la catena esce dalla costruzione e va rifatto dopo, contratto per contratto al posto di blocco — circa 2 minuti a elemento su 98, cioè 3 h 16. Sommati ai 22 minuti di esecuzione, la corsia con l'IA costa 3 h 38 contro 11 h 03.

Restano due misure diverse: trenta volte sull'esecuzione; tre volte sul processo intero, che è il tempo davvero risparmiato.

Tempo dell'operatore: 11 h 03m contro 3 h 38m · tre volte

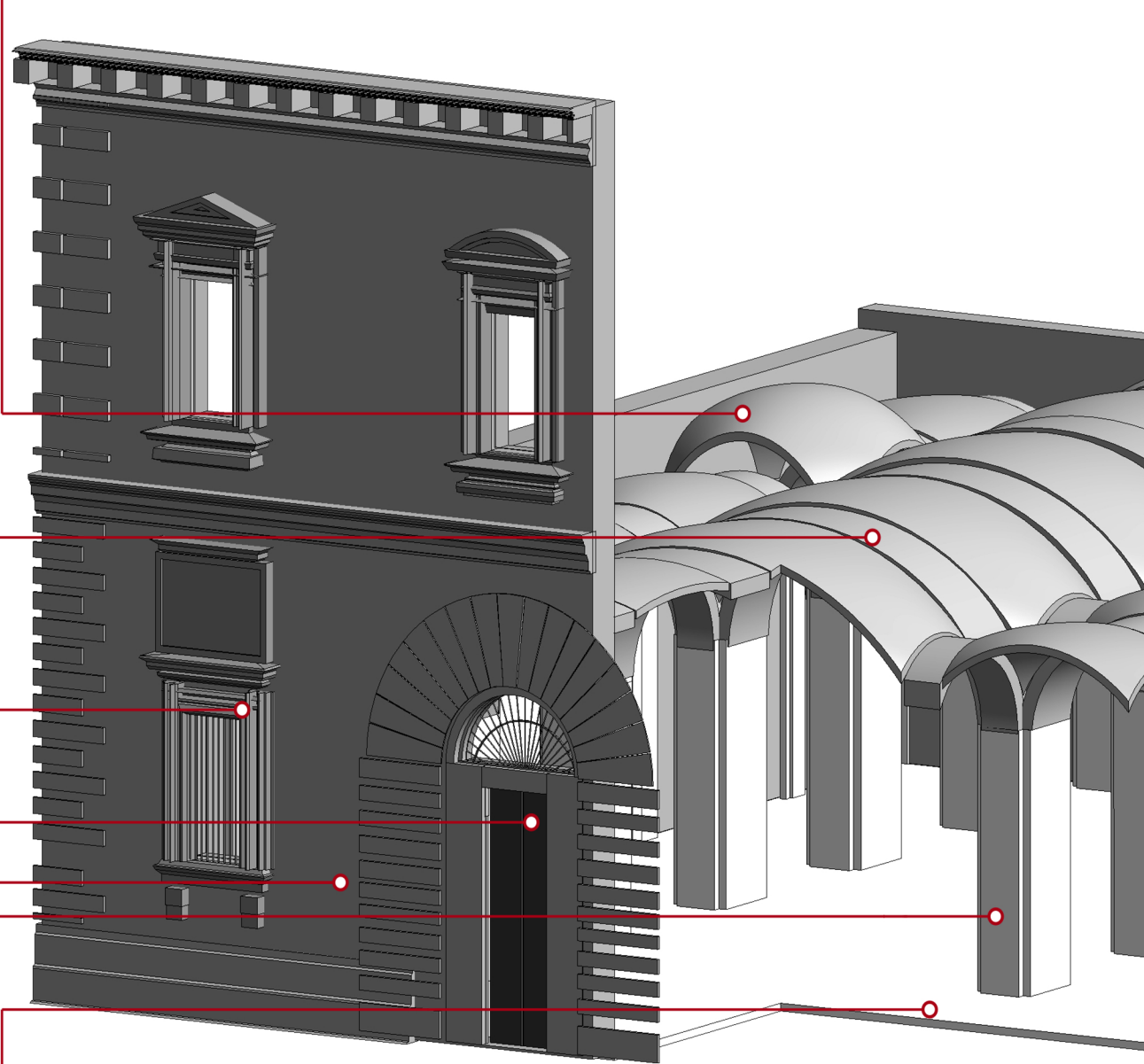
B · MODELLAZIONE DI OGNI CLASSE · MANUALE E CON AI

A MANO	
La vela segue i parametri.	
Una sfera centrata alla quota d'imposta e tagliata da quattro piani : raggio e spessore come parametri, imposta e colmo letti sulla nuvola.	
20 min la prima, 10 min le altre · 190 min	La volta a manoLa vela: raggio, estradosso, imposta
L'intradosso segue la nuvola.	
Luce, freccia e quota d'imposta lette sui punti diventano i parametri di una famiglia costruita a mano.	
10 min la prima di ogni tipo, 2min le altre · 90 min	L'arco a manoLa famiglia parametrica: luce, freccia, imposta
Il vano e il suo corredo modellati sulla nuvola.	
Mostra, davanzale, timpano e grata, ricalcati a vista sulla nuvola, un profilo alla volta.	
30 min la prima, 10 min le simili, 20 min le diverse · 130 min	La finestra a manoIl davanzale: profilo estrusoLa finestra nell'editor
Il portale e il bugnato modellati sulla nuvola.	
Ghiera ricostruita concio per concio e corsi del bugnato ridisegnati manualmente sul prospetto.	
30 min l'una · 90 min	Conci e bugnato ricalcati a vistaIl portale a mano
Assi e spessori murari a misura diretta.	
Sulla nuvola sezionata in pianta si posa il muro adattando lo spessore lungo le facce.	
21 min in totale	I quattro muri a manoIl muro posato sui punti, in pianta
Profilo disegnato e poi estruso.	
La sezione si traccia sui punti della nuvola e si estrude su tutta l'altezza dell'elemento.	
10 min il primo di ogni tipo 4 min gli altri · 140 min	Pilastro a manoLo sagoma della sezione cruciformeIl profilo parametrico
Una piastra sulla quota rilevata.	
Il perimetro segue quello dei muri già modellati, quota adattata ai punti della nuvola.	
2 min in totale	Il pavimento a mano

CLASSE		CON AI	
VOL		Nessuna volta di catalogo andava bene: la catena ne ha ricavata una nuova.	
18 elementi		Ogni volta è tagliata a fette e dodici superfici note si contendono i punti: vince quella che li segue meglio, qui una vela con il sesto che cambia dal colmo ai bordi, 18 volte su 18. Lo spessore non si vede dall'intradosso ed è dichiarato convenzionale.	
190 min		Dodici superfici in gara · sesto variabile 18 su 18 Scarto dalla nuvola 5,6-17,2 mm	
5 min			
ARC		Trentatré archi, una sola famiglia.	
33 elementi		Tre profili in gara su ogni intradosso: cerchio, ellisse, tre centri; a parità vince il più semplice. Se il colmo ricostruito si scosta dai punti oltre 60 mm, la catena scarta il profilo eletto e rifà la scelta da sola. Tutti e 33 escono da un'unica famiglia ellittica.	
90 min		I punti dell'intradosso e il profilo eletto	
3 min		L'arco costruito	
		Scarto dalla nuvola 3-8 mm	
FIN		Il bordo del vano si legge dentro lo spessore del muro.	
10 elementi		L'unico giudizio umano della catena è per definire di che tipo di finestra si tratta; le misure vengono dai fianchi del vano. Dove il muro è visto di striscio la geometria non basta: tre finestre su dieci sono misurate con il colore, e il contratto lo dichiara.	
130 min		I punti e il contornoLa misura dal colore, a vistaLa finestra costruita	
6 min			
POR		Tre porte, tre letture: l'operatore dice che cos'è, i punti quanto misura.	
3 elementi		Il portale ha due contorni annidati: la nicchia al filo della facciata, a tutto sesto, e il vano vero nel punto più stretto della strombatura. Conci e corsi del bugnato sono letti uno per uno; i tratti persi per occlusione sono completati a passo regolare e dichiarati.	
90 min		I due contorni misurati sui puntiConci e corsi riconosciutiIl portale costruito	
2 min		Scarto 6,9-11,7 mm	
MUR		Un muro finisce dove incontra l'altro muro, non dove finisce il dato.	
4 corpi		La catena lavora sull'intera nuvola da dentro Revit: da una fetta a un metro di quota, 1,2 milioni di punti, ricava la giacitura dell'edificio (13,90 gradi) e, per ogni lato, le due facce e l'asse; il perimetro si chiude intersecando gli assi.	
21 min		La fetta della nuvola con gli assi riconosciuti	
25 s		I quattro muri costruiti	
		Residui sulle facce ~1 cm	
PIL		La forma del pilastro non viene da una libreria: è letta nei punti.	
29 elementi		Sezioni ogni 4 cm: dove il laser vede il fusto la catena apprende la sagoma, altrove cerca solo il centro. Tre sagome in gara su ogni nuvola; il profilo a gradoni delle paraste esce dalle sezioni, non da un catalogo.	
140 min		Una sezione: i punti e la sagoma eletta	
6 min		Ogni punto colorato per distanza dal solido	
		Pilastro costruito	
		Cruciformi 13 · paraste a gradoni 11 · a L 4 · rettangolo 1 147 sezioni · scarto 2,7 mm sul pilota, 1,2-13,4 sugli altri	
PAV		L'unico che non torna al rilievo: nasce dal modello.	
1 elemento		La quota è il picco dell'istogramma delle quote della scena, 0,65 m; il contorno sono le facce interne dei muri già misurati. Spessore convenzionale, 15 cm, perché il solaio non si vede. A ogni revisione dei muri si rigenera da solo.	
2 min		Le quote dei punti: il picco è il calpestio	
< 1 s		Il pavimento costruito	
		Quota 0,65 m	

C · LA MACCHINA

COME LAVORA L'AI		Gli otto passi del workflow
	01	LETTURA L'IA interpreta le tavole della nuvola: dove il dato è affidabile e dove no
	02	MISURA SEZIONI Sezioni ogni 4 cm, due passate; più forme in gara, vince quella che i punti sostengono
	03	CONTRATTO GEOMETRICO Un file per elemento: ogni misura con la sua incertezza e da dove viene
	04	FAMIGLIA La famiglia Revit generata dal contratto, con piani e quote associate
	05	COLLAUDO Il volume del solido contro la formula esatta: se non passa, non si salva
	06	POSA Posata alle coordinate del rilievo: nuvola e modello coincidono
	07	RILETTURA Riletta dal modello: scarto di posa 0,000 mm su 98 elementi
	08	CONFRONTO NUVOLA Distanza dei punti dalla superficie costruita, elemento per elemento



02 · Il modello costruito dalla catena

LO SCARTO DALLA NUVOLA		Mediana per classe, in millimetri
VOL		5,6-17,2
ARC		3-8
FIN		4,0-10,7
POR		6,9-11,7
MUR		~10
PIL		2,7-13,4
PAV		
La barra copre il minimo e il massimo della classe, scala 0-18 mm		

2,7-17,2 mm

Di scarto fra nuvola e modello, mediana su 98 elementi

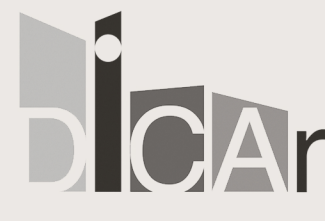
Quanto dista ogni punto del rilievo dalla superficie costruita: certifica la fedeltà del modello alla nuvola da cui è nato. Gli elementi gemelli misurati per vie indipendenti coincidono entro 1-2 cm; la rilettura di posa è 0,000 mm su tutti e 98.

La forma eletta dai punti, non scelta a occhio · LOD D



UNIVERSITÀ DI PAVIA

UNIVERSITÀ DI PAVIA
DIPARTIMENTO
INGEGNERIA
CIVILE
ARCHITETTURA



UNIVERSITÀ DI PAVIA
INGEGNERIA
EDILE
ARCHITETTURA



CORSO DI LAUREA · INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

AUTOMAZIONE AI NEL PROCESSO SCAN-TO-BIM PER GLI EDIFICI STORICI

DALLA NUVOLA DI PUNTI ALL'ARRICCHIMENTO INFORMATIVO DEL MODELLO

STUDENTE

Marco Dell'Orto

RELATRICE
CORRELATORE

Prof.ssa Francesca Picchio
Dr. Hangjun Fu

TAVOLA

06 / 09

TAVOLA 07 · EX CHIESA DI SANTA MARIA IN BRERA

ARRICCHIMENTO INFORMATIVO DEL MODELLO

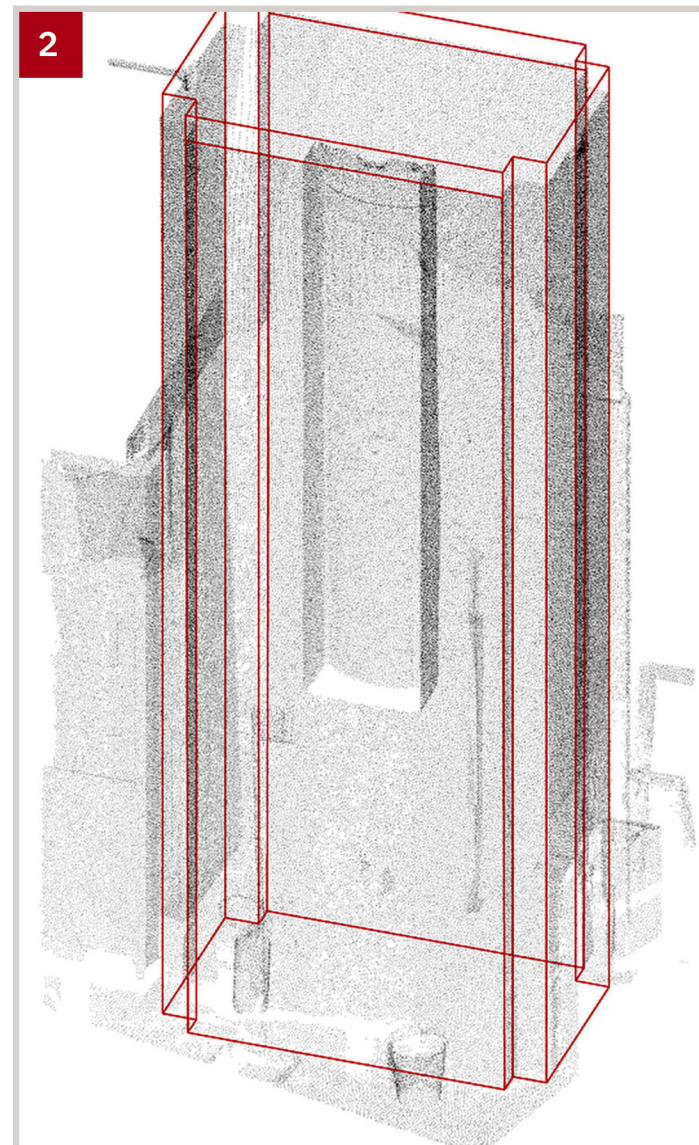
A · DATI DI INPUT · ZONA CAMPIONE



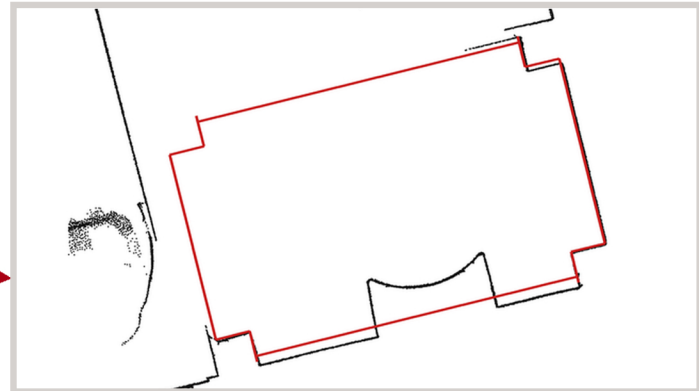
01 · La nuvola del fronte e il modello geometrico

È il prospetto che la terza fase arricchisce. L'ortoimmagine a quattro millimetri per pixel copre 23,24 × 18,98 m e su di essa vengono riconosciuti i materiali; i documenti d'archivio aggiungono le date, le fonti e le fasi costruttive.

Ogni valore entra nel modello legato all'elemento a cui si riferisce, con il metodo e l'accuratezza con cui è stato ricavato.

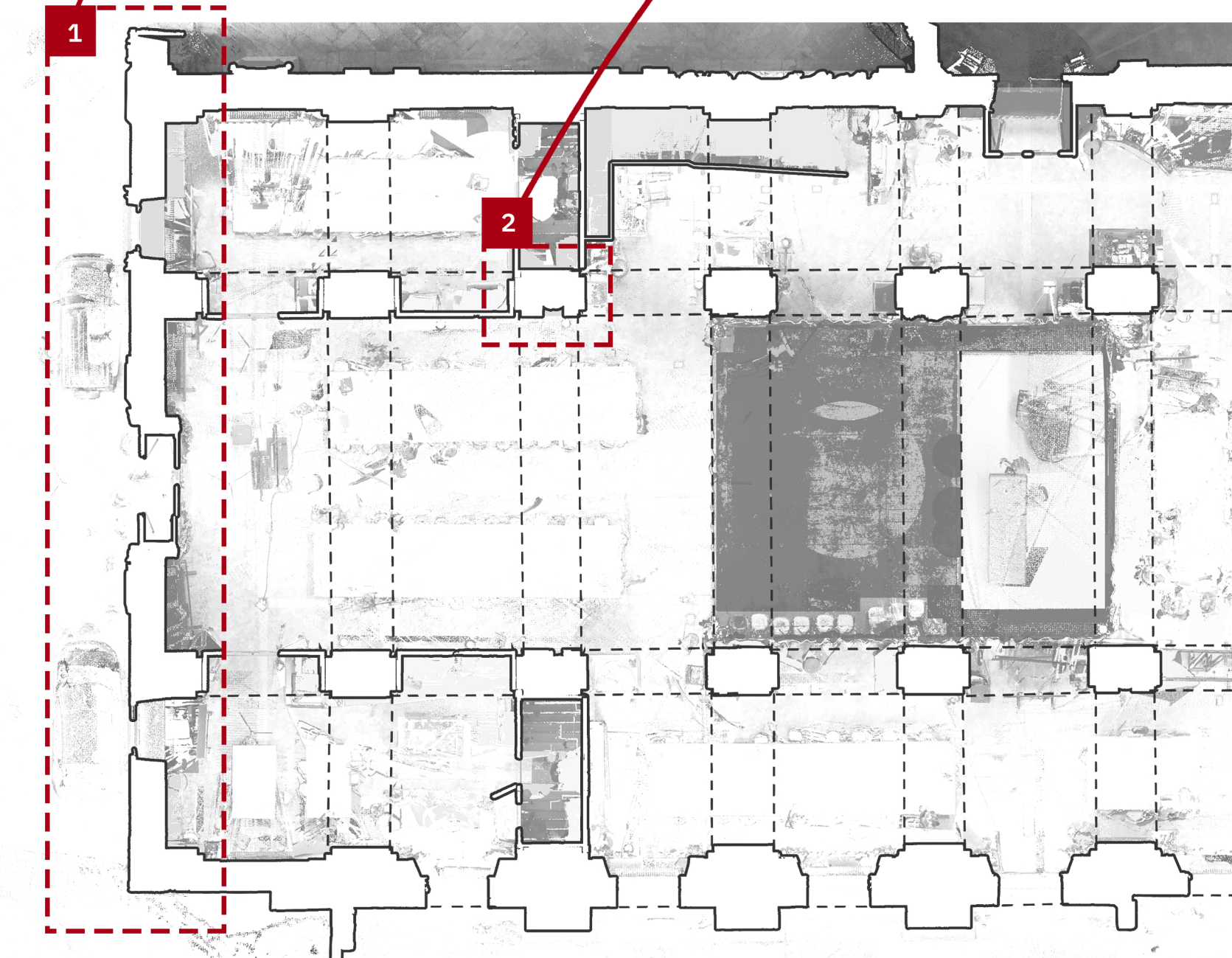


02 · Nuvola TLS e contorno del modello



03 · Sezione a 2,20 m: il fusto medievale

FRONTE OVEST	BRERA_PIL_02	9 ELEMENTI DA ARRICCHIRE
23,24 × 18,98 m · 4 mm per pixel	1 ELEMENTO INTERNO ALL'EDIFICIO	PERIMETRO_OVEST · FIN x5 · POR_01 · DEC_OVEST · PIL_02



DUE AMBITI, UN EDIFICIO

La sezione orizzontale della nuvola al piano terra colloca il campione nell'edificio intero:

- 1 LA FACCIATA OVEST**
il fronte pubblico: muro, 5 finestre, portale, decorazione
- 2 IL PILASTRO PIL_02**
dentro la navata, piano terra:
l'unico elemento interno arricchito

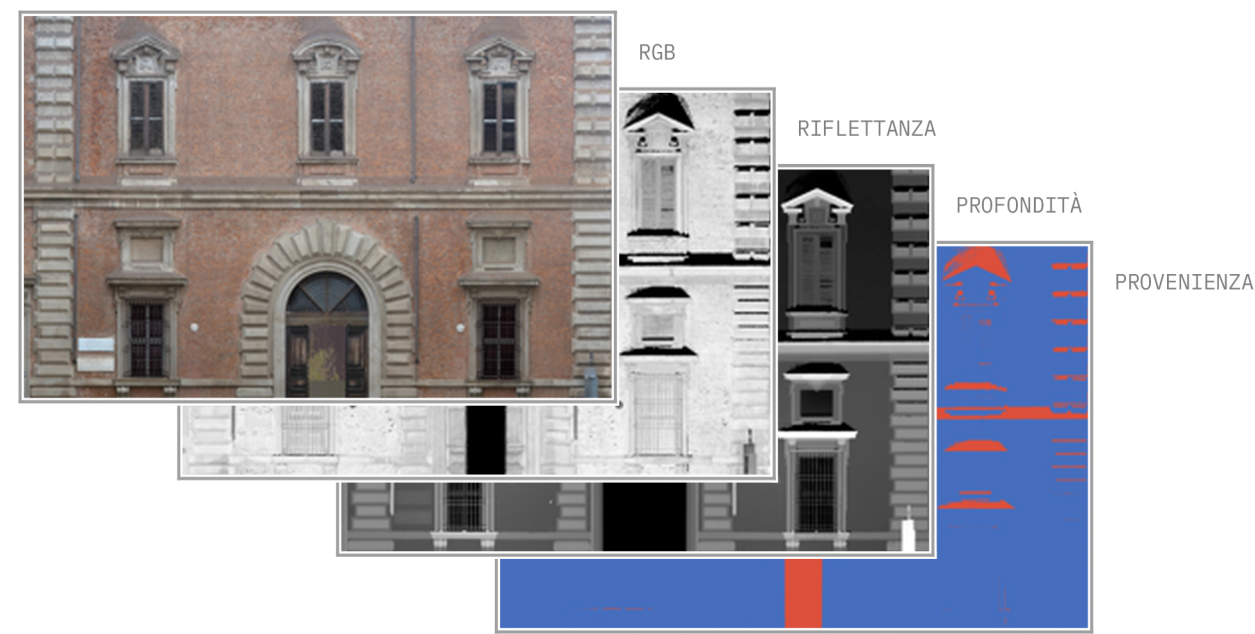
Questa fase della sperimentazione si concentra su due ambiti campione dell'ex chiesa: il fronte, per testare l'arricchimento informativo con i dati forniti dall'ortoimmagine; un pilastro, unico elemento interno, poiché presenta un'apertura che permette di osservare la colonna originale al suo interno.

04 · Sezione orizzontale ex chiesa

B · LE FONTI E QUALI IA LE LEGGONO

SE-1 · CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI

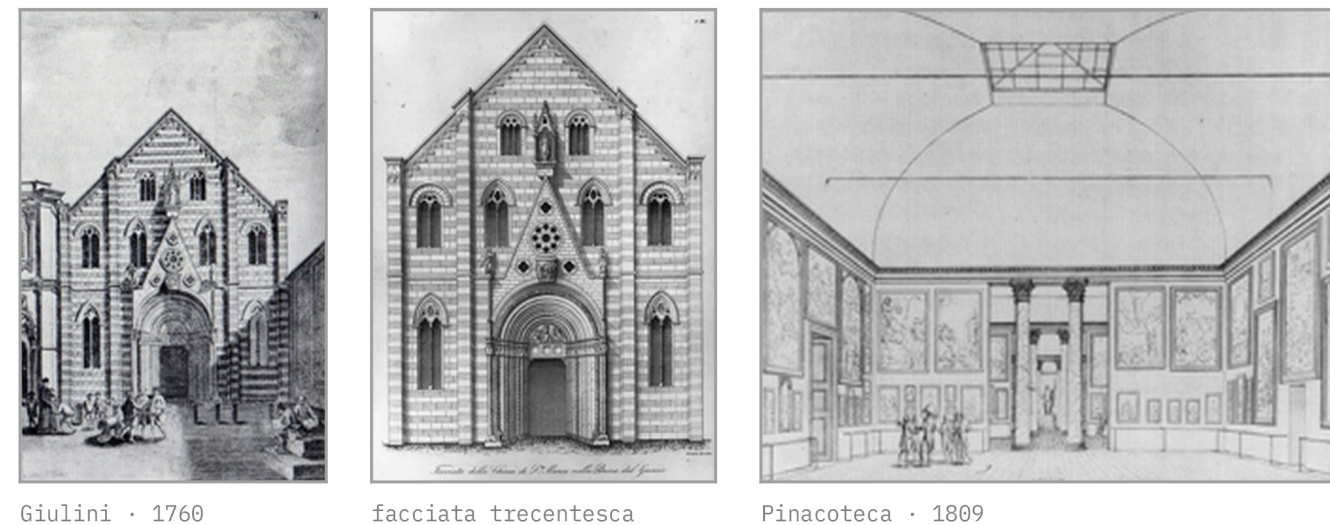
Random Forest · 120 alberi · 12 caratteristiche (feature) per pixel



LA DOCUMENTAZIONE · l'ortoimmagine a quattro strati, 4 mm per pixel
proiettata dalla sola nuvola di punti · 4 strati → 12 caratteristiche per pixel

SE-2 · ESTRAZIONE DELLA CONOSCENZA STORICA

un LLM legge i documenti d'archivio



Giulini · 1760

facciata trecentesca

Pinacoteca · 1809

- 1 L'LLM LEGGE ED ESTRAE**
date, interventi, pietre · con la fonte
- 2 L'OPERATORE REVISIONA**
conferma · corregge · scarta – 30 min
- 3 SOLO CIO' CHE E' CONFERMATO PASSA**
la revisione precede la scrittura

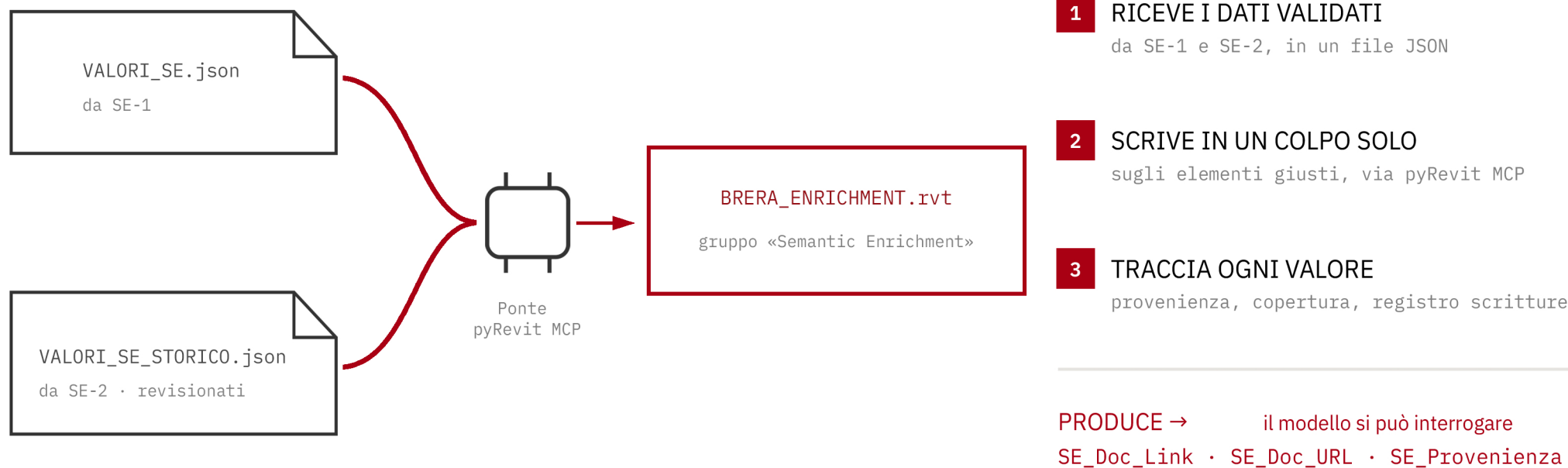
PRODUCE l'identità storica per elemento
SE_Datazione · SE_Litotipo
SE_FonteStorica · SE_Stratigrafia

LA DOCUMENTAZIONE · fonti d'archivio + iconografia

6 PDF storici · 622 pagine (1 via OCR) · 35 immagini datate

SE-3 · SCRITTURA NEL MODELLO

script deterministici che scrivono in Revit · ponte pyRevit MCP



- 1 RICEVE I DATI VALIDATI**
da SE-1 e SE-2, in un file JSON
- 2 SCRIVE IN UN COLPO SOLO**
sugli elementi giusti, via pyRevit MCP
- 3 TRACCIA OGNI VALORE**
provenienza, copertura, registro scrittura

PRODUCE → il modello si può interrogare
SE_Doc_Link · SE_Doc_URL · SE_Provenienza

LA DOCUMENTAZIONE · i dati strutturati validati da SE-1 e SE-2
scrittura in blocco · registro con l'esito di ogni scrittura

L'IA decide i contenuti (SE-1 e SE-2), calcolo e script li verificano e li depositano: ogni valore risale alla sua fonte.

C · L'OBIETTIVO INFORMATIVO

LOIN · LIVELLO DI FABBISOGNO INFORMATIVO

Quanta e quale informazione serve a uno scopo dichiarato, decisa prima di produrla.
La norma non elenca i dati da scrivere, detta le regole per ricavarli.

DA DOVE DERIVA



Il LOD dà un voto all'oggetto; il LOIN dichiara che cosa serve sapere, per quale scopo e a chi. Rappresenta il metro migliore per qualificare l'arricchimento informativo.

LA REGOLA DELLA NORMA · DA COSA DIPENDE IL LIVELLO DI FABBISOGNO INFORMATIVO

LO SCOPO	+	GLI OGGETTI	+	IL MOMENTO	+	GLI ATTORI
Interrogare il modello su materia, stato e storia		I 9 elementi del campione, presi uno per uno		La consegna di questa fase		Chi fornisce il dato e chi lo riceve

= FABBISOGNO INFORMATIVO DI QUESTA FASE SI TRADUCE IN TRE FORME

INFORMAZIONE GEOMETRICA	INFORMAZIONE ALFANUMERICA	DOCUMENTAZIONE
Il solido e le sue misure	I valori scritti nei campi	Le prove allegate

I PARAMETRI OBIETTIVO · COSA VOGLIAMO ESTRARRE, E DA DOVE

DALL'ORTOIMMAGINE MULTI-LAYER	modulo SE-1
SE_Materiale_1..3 + quote %	i materiali prevalenti e le percentuali
SE_Copertura	su quanta superficie si fonda il dato

DA DOCUMENTI E ICONOGRAFIA	modulo SE-2
SE_Datazione	quando l'elemento nasce o si trasforma
SE_Litotipo	di quale pietra è fatto
SE_FonteStorica	il documento che lo attesta
SE_Stratigrafia	le fasi costruttive sovrapposte

DALL'OSSERVAZIONE DEL RILIEVO	registro anomalie
SE_StatoConservazione	la condizione, nel lessico UNI 11182
SE_Anomalie	i difetti osservati, per elemento

PRODOTTI DALLA PROCEDURA	tracciabilità LOIN
SE_Doc_Link · SE_Doc_URL	la scheda collegata, anche cliccabile
SE_Provenienza	metodo, accuratezza e data del valore

13 parametri condivisi di istanza · gruppo «Semantic Enrichment»

A CHI VANNO · LA MATRICE DEGLI OBIETTIVI



05 · I contorni dei 9 elementi presi dal modello e riproiettati sull'ortoimmagine.

La matrice è la specifica della fase: dichiara, per ogni classe di elementi, quali informazioni servono e con quale grado di certezza.

OGNI VALORE VIAGGIA CON PROVENIENZA E COPERTURA: È IL LOIN RESO OPERATIVO

WORKFLOW DELL'ARRICCHIMENTO INFORMATIVO



ARRICCHIMENTO INFORMATIVO - MANUALE vs AI

A · ARRICCHIMENTO MANUALE

INPUT · nuvola di punti, modello geometrico e documentazione storica
ortoimmagine 4 mm/px · nuvola di punti · modello Revit · sei PDF storici

01

ANALISI E RICONOSCIMENTO

L'operatore riconosce a vista, elemento per elemento

01

02

03

04

ORTOIMMAGINE
il fronte a 4 mm/px

NUVOLA
i piani e gli aggetti

MODELLO REVIT
i nove elementi

Da qui escono i materiali (1, 2, 3) e lo stato di conservazione:

- riconosce i materiali per prevalenza
nessuna percentuale: l'occhio non la misura
- valuta stato di conservazione e anomalie
velature, dilavamento, distacchi

1 Laterizio - Muro

2 Pietra - Porta

3 Legno - Finestre

4 Metallo - Finestre

02

ANALISI DOCUMENTAZIONE STORICA

la bibliografia storica

SE_Datazione

SE_FonteStorica

SE_Doc_Link

L'analisi dell'intera documentazione e l'annotazione di ogni fatto pertinente richiedo oltre dodici ore di lavoro manuale.

03

ORGANIZZAZIONE E TRASCRIZIONE DATI

SE_Materiale_1	SE_Materiale_2	SE_Materiale_3	SE_Copertura	SE_StatoConservazione	SE_Datazione	SE_FonteStorica	SE_Provenienza
pietra	legno	-	-	Buono	1809-1810	Archivio Storico 1905	Manuale
pietra	pietra	-	-	Buono	1809-1810	Rilievo 2023	Manuale
pietra	legno	-	-	Buono	1809-1810	Ghilardelli-Micella 2011	Manuale
pietra	intonaco	-	-	Buono	1809-1810	Ghilardelli	Manuale
pietra	vetro	-	-	Buono	1809-1810	Ghilardelli	Manuale
pietra	legno	-	-	Buono	1809-1810	Ghilardelli	Manuale
pietra	vetro	-	-	Buono	1809-1810	Ghilardelli-Micella 2011	Manuale
pietra	legno	-	-	Buono	1809-1810	Archivio Storico 1905	Manuale

Dai dati del rilievo · passo 01 8 parametri
Dalla documentazione storica · passo 02 4 parametri
SE_Copertura: Non misurata nella corsia manuale escluso

Nove elementi, dodici parametri su tredici - la copertura a mano non è riproducibile - 125 valori da trascrivere manualmente per passare alla fase successiva.

04

ASSEGNAZIONE DEI PARAMETRI AL MODELLO

DATI EXCEL

STRUTTURAZIONE DATI

ALLINEAMENTO DATI

MODELLO REVIT

SE_MATERIALE

SE_CONSERVAZIONE

SE_ANOMALIE

03

Schema rappresentativo dei nodi Dynamo per l'assegnazione dei parametri

OUTPUT · LA SCHEDA DELL'ELEMENTO

PERIMETRO_OVEST

muro del fronte ovest

SE_Materiale_1	laterizio
SE_Materiale_2	pietra
SE_Materiale_3	non distinto
SE_Copertura	-
SE_StatoConservazione	Buono
SE_Anomalie	velature, dilavamento, distacco
SE_Litotipo	laterizio a vista + conci
SE_Datazione	1809-1810
SE_FonteStorica	Ghilardelli-Micella 2011
SE_Doc_Link	scheda compilata a mano
SE_Provenienza	osservazione diretta

B · ARRICCHIMENTO CON AI

INPUT · nuvola di punti, modello geometrico e documentazione storica
gli stessi documenti che ha davanti l'operatore: cambia chi li legge

01

I QUATTRO STRATI DELL'ORTOIMMAGINE

automazione · nessuna mano

colore · il colore reale, RGB

riflettanza · quanta luce torna al laser

profondità · quanto un punto è arretrato

provenienza · laser o fotografia

02

IL GROUND TRUTH MANUALE

L'operatore annota i campioni che addestrano e misurano

04 · Quattro dei quattordici riquadri annotati a mano

14 riquadri, il 15,3 % della facciata:
698.637 pixel per addestrare,
500.000 per validare, a blocchi separati.

03

LA CLASSIFICAZIONE CON RANDOM FOREST

AI

IL PIXEL ATTRAVERSA 120 ALBERI, CHE PONGONO DOMANDE DIVERSE

ALBERO 1

ALBERO 2

altre domande

E' arretrato ?

Riflettanza alta ?

E' in rilievo ?

E' chiaro ?

GIUSTO

SBAGLIATO

il 39,2 % della decisione viene dalle grandezze del laser - profondità, rilievo, riflettanza - non dal colore.

04

DALLA MAPPA ALL'ELEMENTO

Il Random Forest produce la mappa, il resto è automazione deterministica

OA 93,4 %

misurata sui 500.000 pixel tenuti da parte per la validazione

pietra 47,2 %

laterizio 39,7 %

legno 6,0 %

metallo 3,8 %

vetro 1,5 %

velatura 1,4 %

06 · La mappa dei materiali dell'intera facciata, pixel per pixel

La maschera toglie dall'analisi ciò che non è facciata - automobili, passanti, il varco del portone: l'8,3 %.
Le geometrie delle famiglie Revit - 11.394 triangoli - riproiettate sull'ortoimmagine dicono a quale elemento appartiene ogni pixel:
è il modello a fissare il perimetro.

07 · La maschera di validità e la mappa degli ID

05

ANALISI DELLA DOCUMENTAZIONE

l'IA legge ed estrae, l'operatore convalida

la Galleria dello stesso Collegio ad uso del pubblico" (A. BORRONI, *Il forestiere in Milano ossia Guida delle cose rare antiche moderne della città di Milano suo circondario e territorio*, Milano, 1808, p. 160); infine, nel 1809 venne demolita la facciata cretta a metà Trecento da Giovanni di Balduccio.

1809

SE_Datazione = 1809-1810

12 affermazioni verificabili, una delle sei fonti lette:
75 % confermate dalla revisione umana.

OUTPUT · LA STESSA SCHEDA, SCRITTA DA UNO SCRIPT DETERMINISTICO

PERIMETRO_OVEST

muro del fronte ovest

SE_Materiale_1	laterizio - 70,7 %
SE_Materiale_2	pietra - 24,3 %
SE_Materiale_3	niente sopra il 5 %
SE_Copertura	99 %
SE_StatoConservazione	Buono
SE_Anomalie	velature, dilavamento, distacco
SE_Litotipo	laterizio a vista + conci
SE_Datazione	1809-1810
SE_FonteStorica	Ghilardelli-Micella 2011
SE_Doc_Link	MAPPA_MATERIAI_AI_v1.png
SE_Provenienza	Random Forest · OA 93,4 %

C · IL PILASTRO CAMPIONE

L'unico elemento interno che entra nell'arricchimento: qui la nuvola e l'archivio dicono la stessa cosa attraverso due strade diverse.

CHE COSA DICE LA NUVOLA

sezione orizzontale a 2,20 m

Il fusto medievale affiora

1,92 × 1,22 m

Fusto medievale · diametro 0,84 m
± 0,05, media di 4 sezioni

Pilastro, dal modello

Nuvola TLS

08 · Il nucleo cilindrico affiora entro l'involucro squadrato.

CHE COSA DICE IL DOCUMENTO

una delle sei fonti

SIRBeC scheda ARL - LMD80-00089

Cesta tonda, munita d'ogni anello di pilastrino in pietra più un orlo. La costruzione aveva piane sporgenti per un transetto terminante in tre vani absidali quadrati; l'interno era suddiviso in tre navate separate da eleganti pilastri cilindrici in serizzo, con basi modulate ad anelli e capitelli che rimandano, per il tipo di esecuzione ed il repertorio figurativo (a decorazioni zoomorfe, alla scultura lombarda tardoduecentesca). Le navatelle laterali contavano undici nervi ciascuna; sull'arco grande esisteva un transetto a tre campate. Manteneva la struttura della pianta

09 · Scheda SIRBeC ARL LMD80-00089, p. 23 - il passo sui sostegni

SE_Stratigrafia

il dodicesimo parametro, su un elemento solo

FASE 1 · fusto cilindrico in serizzo, base ad anelli, capitello a decorazione zoomorfa, scultura lombarda tardoduecentesca - uno dei sostegni delle tre navate.

FASE 2 · ringrosso ottocentesco che ingloba il fusto entro un pilastro rettangolare, per la nuova volta sulla ex navata centrale e i carichi del piano superiore.

Le parole derivano dai documenti, le misure dalla nuvola.

D · RISULTATI E CONFRONTO

1

IL MODELLO ARRICCHITO

Il risultato sono gli undici parametri assegnati ad ognuno degli elementi.

PERIMETRO_OVEST

laterizio 70,7 % · pietra 24,3 %
copertura 99 % · stato Buono

BRERA_FIN_08

pietra 60,9 % · legno 32,7 %
copertura 100 %

BRERA_DEC_OVEST

pietra 88,8 %
copertura 87 %

BRERA_POR_01

pietra 62,8 % · legno 19,4 %
copertura 88 % · varco escluso

SE_Doc_Link

porta alla scheda materica:
è l'allegato, non il risultato.

10 · Prospetto ovest : gli elementi arricchiti

Contassegno	SE_Materiale_1	SE_Materiale_2	SE_StatoConserv	SE_Litoti
BRERA_FIN_02	pietra - 55,5 %	metallo - 17,6 %	Buono	Mostre e
BRERA_FIN_03	pietra - 58,9 %	legno - 32,0 %	Buono	Mostre, d
BRERA_FIN_05	pietra - 61,5 %	legno - 29,9 %	Buono	Mostre, d

l'abaco SE - Finestre del modello: le colonne sono i parametri.

2 VALUTAZIONE FINALE

Ore impiegate dall'operatore vs ore impiegate dalla macchina + supervisione umana

A MANO

26 h

CON IA

9h 20m macchina + 2h 30m uomo

= 11h 50m

CHE COSA RESTITUISCE OGNUNA DELLE DUE CORSIE

A MANO

CON L'IA

gli undici parametri SE_

la fonte dichiarata di ogni valore

quantità materiali, in percentuale

su quanta superficie il dato si fonda

quanto è affidabile la lettura

Tempo impiegato

✓

✓

-

-

-

26 h

✓

✓

70,7 %

99 %

93,4 %

9h 20m

Stesso output, stesse fonti: in più la macchina misura, e dichiara su quale campione è stata misurata.

UNIVERSITÀ DI PAVIA

UNIVERSITÀ DI PAVIA
DIPARTIMENTO
INGEGNERIA
CIVILE
ARCHITETTURA

bicar

iea

UNIVERSITÀ DI PAVIA
INGEGNERIA
EDILE
ARCHITETTURA

DADA LAB
DRAWING · ARCHITECTURE · DOCUMENTATION

CORSO DI LAUREA · INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

AUTOMAZIONE AI NEL PROCESSO SCAN-TO-BIM PER GLI EDIFICI STORICI

DALLA NUVOLA DI PUNTI ALL'ARRICCHIMENTO INFORMATIVO DEL MODELLO

STUDENTE Marco Dell'Orto

RELATRICE
CORRELATORE Prof.ssa Francesca Picchio
Dr. Hangjun Fu

TAVOLA

08 / 09

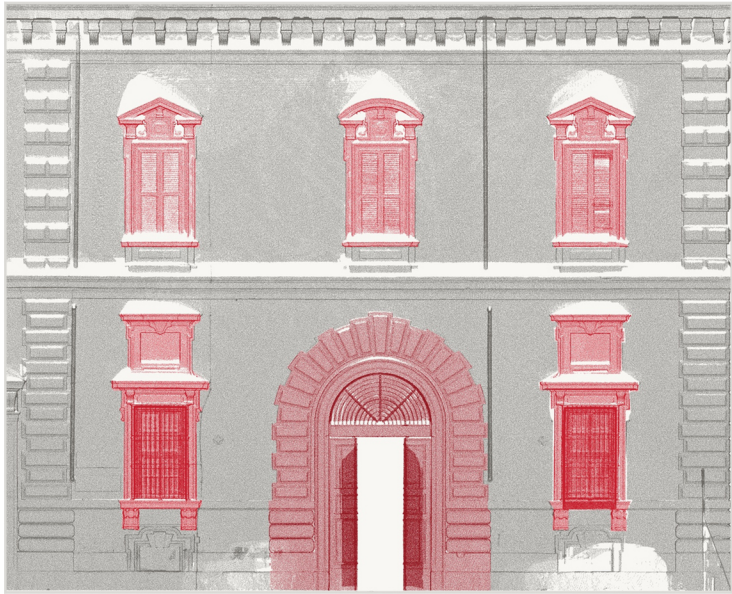
TAVOLA 09 · EX CHIESA DI SANTA MARIA IN BRERA

IL BILANCIO DELL'INTERO PROCESSO

A · FASE 1 · SEGMENTAZIONE

PROCESSO MANUALE

Il fronte, classificato



~36 h stimate sull'intero edificio

8 CLASSI

- 0 non class.
- 1 pavimento
- 2 muro
- 3 volta
- 4 arco
- 5 pilastro
- 6 finestra
- 7 porta

Il campione: ogni punto ha la sua classe

Selezione di un elemento alla volta

Nessun automatismo: l'operatore isola l'elemento e gli assegna la classe. È il campione che addestra la rete, ed è il metro con cui poi la si giudica.

preparare la nuvola ~5 min

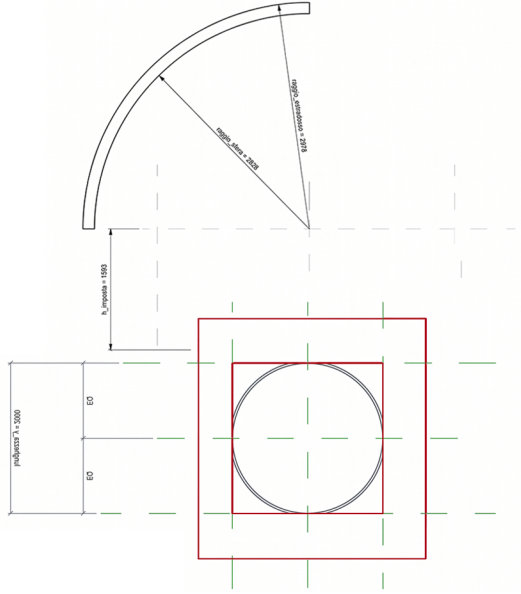
annotare le otto classi ~10 h

unire ed esportare ~5 min

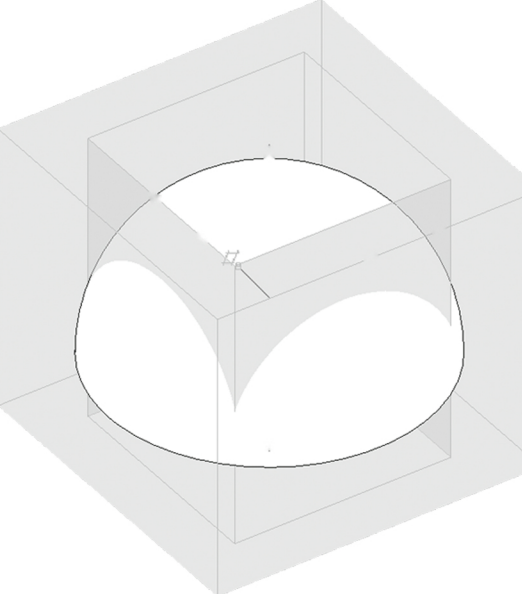
B · FASE 2 · MODELLAZIONE

La volta modellata

11 h 03 · primo di ogni tipo, ripetizioni stimate



La costruzione della volta in Revit



Il solido di sottrazione

663 MIN

- volte 150'
- pilastrini 140'
- finestre 130'
- archi 90'
- porte 90'
- muri 21'
- pavim. 2'

Si costruisce manualmente la forma più simile e con i parametri si adatta alla nuvola.

leggere la nuvola

modellare le famiglie

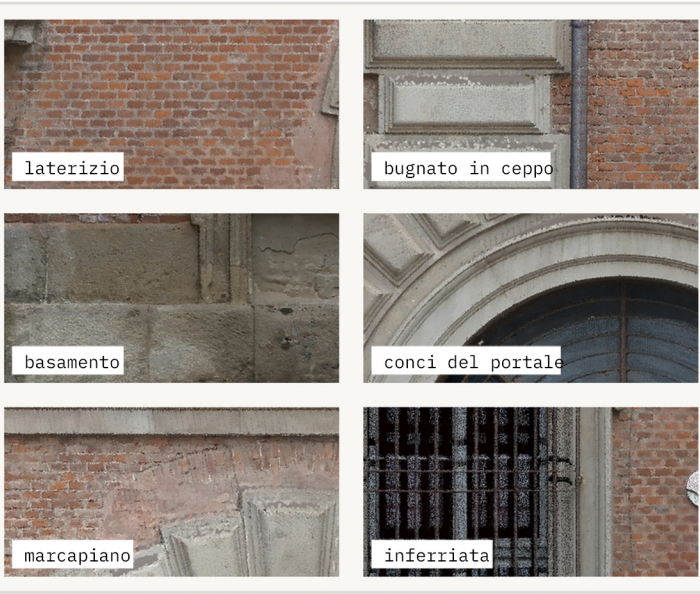
adattare con parametri

copiare le ripetizioni

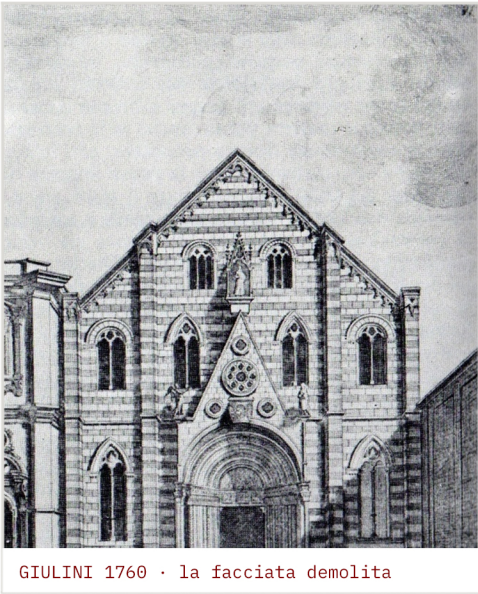
C · FASE 3 · ARRICCHIMENTO

Il fronte riconosciuto

≈ 26 h 19 · proiettate dai campioni cronometrati



L'occhio riconosce e nomina, campione per campione



GIULINI 1760 - la facciata demolita

Raffigurazione dalla documentazione

CRONOMETRATO

materiale

67,6 m² su 404,6

128' → 718'

documenti

50 pagine su 622

80' → 765'

valori

26 su 125

20' → 96'

L'occhio riconosce e nomina — laterizio, pietra — ma non sa su quanta superficie. I dati storici sono ricavati da un'attenta analisi della documentazione .

mappare i materiali

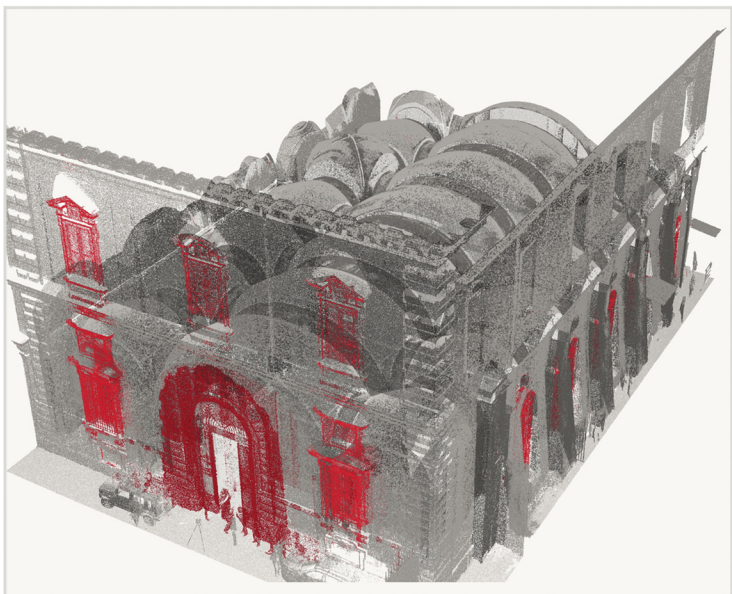
leggere i documenti

trascrivere nei parametri

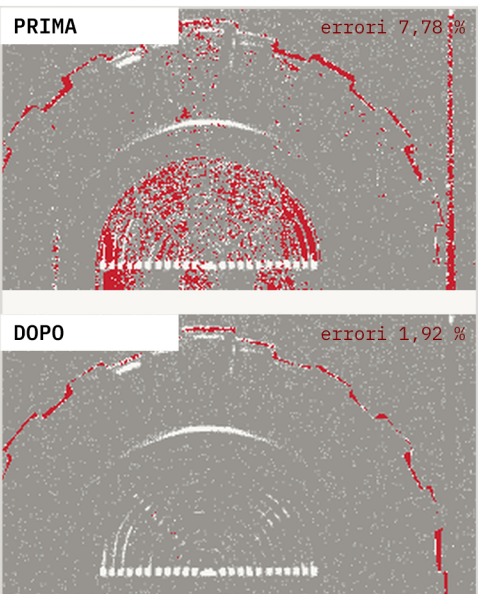
PROCESSO CON AI

Tutto l'edificio, letto dalla rete

14 h · 4 di macchina + 10 di annotazione



un campione annotato, 33,7 milioni di punti letti



PRIMA errori 7,78 %
DOPO errori 1,92 %

il bordo del portale, prima e dopo l'ortofoto

PUNTI GIUSTI

- volta 99
- pavimento 97
- pilastrino 95
- non class. 92
- muro 91
- porta 88
- finestra 79
- arco 74

regge sulle superficie cede su archi e bordi

Dal campione annotato a mano la rete rilegge l'edificio intero: 33,7 milioni di punti, otto classi. Sbaglia sui bordi, dove il laser è incerto, e l'ortofoto li rifinisce: da 7,78 a 1,92 % di errori.

annotare il campione 10 h

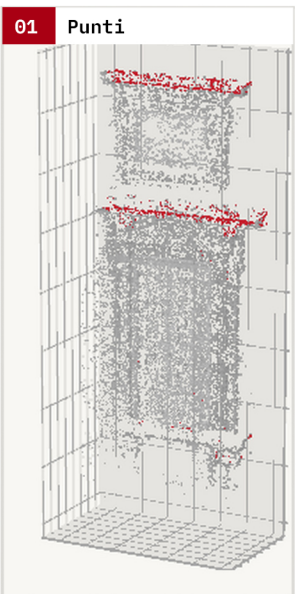
addestrare ~1 h

classificare ~3 h

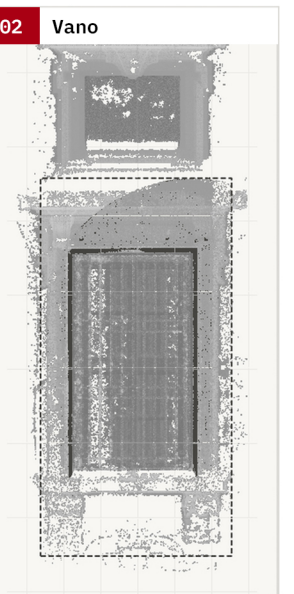
zifinare i bordi ~8 min

La finestra e le sue modanature

3 h 38m · 22 min di macchina + 3 h 16m al posto di blocco



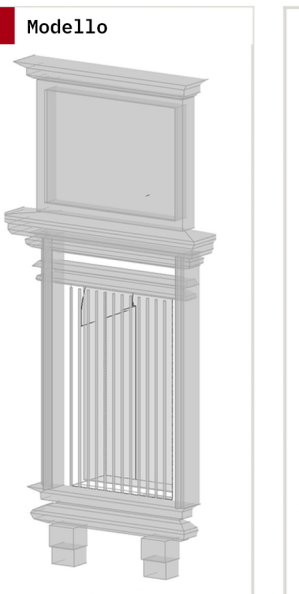
la nuvola isolata



l'apertura riconosciuta



Il profilo dai punti



BRERA_FIN_07, costruita

SCARTO mm

- volte 5,6-17
- pilastrini 2,7
- finestre 4,0-11
- archi 3-8
- porte 6,9-12
- muri ~10
- pavim. esatto

gli scarti misurati su 98 elementi

Si parte dai punti, si riconosce l'apertura sul prospetto, si legge il profilo delle modanature nella sezione: solo allora si costruisce. Nessuna forma è disegnata, tutte sono misurate.

leggere l'elemento

misurare a fette 4 cm

costruire e collaudare

posto di blocco 2 min

Dalla pagina e dalla superficie, al modello

11 h 50m · 9 h 20m di sessioni + 2 h 30m di supervisione

LE FONTI

622 pagine, 6 documenti letti per intero

145 min

La facciata trecentesca è demolita nel 1809 e sostituita da una parete in continuità di linguaggio col palazzo gesuitico.

Ghilardelli-Micella 2011, cap. 4
ASCM, Ornato Fabbriche - confidenza A

9 affermazioni su 12 confermate dalla revisione umana

I MATERIALI

404,6 m²

laterizio pietra intonaco metallo vetro

la pagina porta il dato, la superficie porta la quantità

BRERA_FIN_02

1809

SE_Datazione

SE_FonteStorica

SE_Materiale_1

SE_Materiale_2

revisione umana - confermato

1809

Ghilardelli 2011

pietra · 55,5 %

laterizio · 14,0 %

e tutto finisce attaccato all'oggetto, non a una tabella

Il dato non viene da un'ispezione: viene da una pagina e da una superficie misurata. Arriva nel modello con la fonte accanto — ed è per questo che si può contestare.

ortofoto e maschera 47'

pre-annotare 35'

correggere 2 h

leggere le fonti 2 h 25m

D · RISULTATI E VALUTAZIONE, FASE PER FASE

IL TEMPO

36 h → 14 h

4 h di macchina + 10 h di annotazione

a mano

con l'IA

L'ACCURATEZZA

90,91 %

dei punti letti correttamente; 98 % sul fronte dopo il raffinamento

otto classi, punto per punto

VANTAGGI

La nuvola diventa interrogabile: ogni punto sa che cos'è, e l'errore è misurato invece che stimato.

SVANTAGGI

le dieci ore di annotazione restano

IL TEMPO

11 h → 3 h 38m

22 min di macchina + 3 h 16 al posto di blocco

a mano

con l'IA

L'ACCURATEZZA

2,7-17,2 mm

di scarto dalla nuvola

la forma eletta dai punti, non scelta a occhio

VANTAGGI

L'elemento è quello che i punti dicono, e la scelta della forma è documentata elemento per elemento.

SVANTAGGI

il dettaglio si ferma al LOD D

IL TEMPO

26 h → 11 h 50m

9 h 20 di sessioni + 2 h 30 di supervisione

a mano

con l'IA

L'ACCURATEZZA

93,4 %

sui materiali

undici parametri, con la fonte accanto

VANTAGGI

Il modello risponde alle domande: quantità, stato e storia stanno dentro l'elemento, con la provenienza.

SVANTAGGI

ciò che i documenti non dicono resta un'ipotesi

E · IL WORKFLOW

AI

Automazione

Operatore

LA NUVOLA

FASE 1
dalla nuvola alle classi
rete bordi voto
l'annotazione a mano che addestra

LE CLASSI

FASE 2
dalle classi alla geometria
lettura misura collaudo
il posto di blocco a vista

LA GEOMETRIA

FASE 3
dalla geometria all'informazione
materiali documenti scrittura
la revisione delle fonti

L'INFORMAZIONE

CONCLUSIONI

MURO laterizio 70,7 %

FINESTRA 1809 · legno e vetro

PORTA 1809 · pietra

VOLTA vela a sesto variabile

ARCO scarto 3-8 mm

PILASTRO fusto interno in serizzo

Ogni elemento porta i suoi parametri, compresi di fonte.

IL BILANCIO

73 h → 29 h 30

×2,5 volte più veloce

A MANO

73 h

CON AI

13 h 45m

15 h 45m

43 h 30 in meno

di macchina

dell'operatore

CHE COSA IL MODELLO SA DIRE

	A MANO	CON L'IA
di quanto si scosta dai punti	a vista	2,7-17 mm
su quanta superficie vale il materiale	—	404,6 m² · 99 %
da dove viene ogni valore	—	1a fonte, accanto
quanto è giusta la lettura della nuvola	stimata	90,91 %, misurato

CHE COSA RESTA ALL'OPERATORE

		15 h 45
Annotare	Giudicare	Confermare
10 h	3 h 16	2 h 30
Il campione che addestra la rete	98 elementi	12 affermazioni

+ fissare le regole · andare in sito

I LIMITI DEL PROCESSO SVOLTO CON AI

10 h	LOD D	3 su 12
di annotazione a mano, che non si evitano	oltre questo dettaglio il modello non va	affermazioni storiche restano ipotesi

SVILUPPI FUTURI

01

Il degrado, da giudizio a mappa misurata

Lo stato di conservazione è, oggi, prevalentemente basato su una valutazione a vista dell'operatore. Dall'ortomaggine che quantifica i materiali si potrebbe misurare anche il degrado e restituire una mappa che illustri su quanta superficie siano effettivamente presenti

02

Il dettaglio oltre il LOD D

degradi di vario tipo.

03

Il bordo

La definizione di livello di dettaglio del modello si limita ad una esistente libreria di forme: la cassettonatura dei grandi arconi e i pennacchi fra archi e volte restano elementi esclusi. Estendere la catena a questi elementi, permetterebbe di conoscere di quanto è possibile aumentare il livello di dettaglio della procedura.

04

73 h

Un secondo edificio, cronometrato

LA RISPOSTA ALLA DOMANDA DI RICERCA

SI AFFIDA ALL'AI

TRACCIARE

· annotare i punti

· posare gli elementi

· scrivere i valori

RESTA ALL'OPERATORE

DEFINIRE I CRITERI

· i criteri

· il giudizio a vista

· la verifica in sito

Il metodo sposta e semplifica il lavoro, ma non lo elimina completamente.

L'intelligenza artificiale come strumento del progettista, non come sostituto.



UNIVERSITÀ DI PAVIA

UNIVERSITÀ DI PAVIA

DIPARTIMENTO INGEGNERIA CIVILE ARCHITETTURA

bicar

iea

UNIVERSITÀ DI PAVIA

INGEGNERIA EDILE ARCHITETTURA

DADA LAB

DRAWING · ARCHITECTURE · DOCUMENTATION

CORSO DI LAUREA · INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

AUTOMAZIONE AI NEL PROCESSO SCAN-TO-BIM PER GLI EDIFICI STORICI

DALLA NUVOLA DI PUNTI ALL'ARRICCHIMENTO INFORMATIVO DEL MODELLO

STUDENTE

RELATRICE
CORRELATORE

Marco Dell'Orto

Prof.ssa Francesca Picchio
Dr. Hangjun Fu

TAVOLA

09 / 09