FREQUENZE_conservazione/restauro

La Cultura dell'Ingegneria per la Conservazione del Patrimonio e del Paesaggio

a cura di
Aldo Aveta

editori paparo

Il termine ‘frequenze’ ha una duplice valenza: la ripetitività di fenomeni in una data unità di tempo e, in seconda istanza, anche la presenza di cose in un determinato luogo, come sinonimo di affluenza, affollamento. È un termine che fa riferimento ad una più o meno intensa manifestazione di un fenomeno in relazione ad altre coordinate, siano esse di spazio, tempo o afferenti ad altri fenomeni ancora.
È dunque un’espressione che rimanda ad eventi materiali, fisicamente tangibili, e d’altro canto a circostanze non fisiche. Infine, appare un termine che lascia inquadrare, in uno sguardo di sintesi, la pluralità culturale che anima il nostro tempo: le fluttuazioni della comunicazione, le declinazioni della filosofia della scienza con le sue ripercussioni sull’evoluzione del pensiero, le interazioni tra il mondo esterno e la dimensione della mente, tutti elementi questi che si ritrovano ‘dentro’ e accanto alla disciplina della conservazione.
Frequenze è allora una parola chiave scelta per questa collana che intende sviluppare argomenti e problemi di conservazione e di restauro del patrimonio architettonico, nel suo significato più inclusivo delle pluralità degli aspetti materiali ed intangibili che inevitabilmente lo contraddistinguono.
Accogliendo contributi specialistici provenienti da diversificati ambiti disciplinari, la collana si propone di concorrere a sviluppare un confronto aperto e interdisciplinare sempre più necessario per fronteggiare adeguatamente le complesse questioni contemporanee, in termini di comprensione e di gestione delle contraddizioni che il progetto sul preesistente e della nostra memoria del futuro portano sempre più alla ribalta.

Incoraggiando, dunque, la *frequentazione* di differenti campi di pensiero e stimolandone la interrelazione, FREQUENZE_Conservazione/Restauro intende coadiuvare la registrazione e la comprensione di quegli elementi comuni tra diverse discipline che consentono di mettere a fuoco quelle *frequenze* di taluni fenomeni storici, passati e nel loro divenire, come brani di verità che possono essere utili alla decodificazione delle autentiche esigenze della comunità e a una responsabile prassi nel campo del patrimonio culturale.

FREQUENZE_conservazione/restauro

La Cultura dell'Ingegneria per la Conservazione del Patrimonio e del Paesaggio

a cura di
Aldo Aveta

editori paparo

FREQUENZE_conservazione/restauro
Collana - n. 5

Direttore responsabile
Aldo Aveta

Direttore scientifico
Bianca Gioia Marino

Consiglio scientifico
Alfredo Buccaro, Alessandro Castagnaro
Stéphane Dawans, Stefano Della Torre
Daniela Esposito, Donatella Fiorani
Claudine Houbart, Jean-Louis Luxen
Tomaso Montanari, Stefano Francesco Musso
Renata Picone, Francesco Vitale

Vol. n. 5
La Cultura dell'Ingegneria per la Conservazione
del Patrimonio e del Paesaggio

a cura di
Aldo Aveta

Coordinamento editoriale
e progetto grafico
editori paparo

Pubblicato con il contributo di:
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli
Olympus Srl
Tecnolab Srl

In copertina
I Ponti della Valle a Maddaloni (CE)

© 2023 editori paparo srl - Roma - Napoli
www.editoripaparo.com
editori@editoripaparo.com

Euro 20,00

ISSN 2531-6354
ISBN 979 12 81389 182

Sommario

Presentazione
5 Gennaro Annunziata, *Presidente dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli*

Introduzione
6 Aldo Aveta, *Università di Napoli Federico II*

Prefazione
8 La Cultura dell'Ingegneria. Questioni del presente e possibili orizzonti
Bianca Gioia Marino

1. Restauro dell'architettura e dell'archeologia, tra formazione e prassi

15 I saperi specialistici degli Ingegneri per il restauro del Patrimonio e del costruito storico tra formazione, norme e prassi
Aldo Aveta

32 Strategie di tutela, conservazione, restauro e fruizione nel Parco Archeologico di Pompei: il contributo dell'ingegneria ad un approccio multidisciplinare
Vincenzo Calvanese

45 Conoscere per conservare. Il contributo dell'Ingegneria per il costruito storico e per i paesaggi culturali
Maurizio Di Stefano

2. Miglioramento strutturale, efficientamento energetico, geotecnica per il Patrimonio

65 Soluzioni avanzate e progettazione integrata di interventi a basso impatto per la mitigazione del rischio e la conservazione del patrimonio costruito
Marco Di Ludovico, Stefano Iaquinta, Andrea Prota

81 Metodologie per gli interventi di efficienza energetica sul patrimonio edilizio tutelato. Obiettivi, peculiarità, criticità
Filippo de Rossi, Claudia Colosimo

100 Ingegneria Geotecnica e patrimonio culturale: la Torre di Pisa
Carlo Viggiani

112 Aspetti geotecnici nella tutela di alcuni siti storici e archeologici della Campania
Stefano Aversa, Alessandro Flora

3. Difesa dei paesaggi costieri

127 *Trade off* nella protezione strutturale delle spiagge
Mario Calabrese, Mariano Buccino, Margherita Carmen Ciccaglione, Sara Tuozzo

149 Recupero di infrastrutture stradali in aree di valore paesaggistico: il caso di Amalfi ed altri interventi
Pietro Moretti

4. Informatica e modellistica per il Patrimonio

160 *PorBec*. Un ponte tra tecnologia e arte
Angelo Chianese, Mario Byron Coppola, Alfredo Troiano, Isabella Valente

177 *Additive Manufacturing* e digitalizzazione per la conservazione dei Patrimoni
Gino Nicolais, Flavio Galdi, Costantino Menna

192 *Autori*

M
direzione Vergata

Presentazione

Gennaro Annunziata
Presidente dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli

Il volume *La Cultura dell'Ingegneria per la Conservazione del Patrimonio e del Paesaggio* rappresenta un'importante testimonianza del ruolo cruciale che gli ingegneri svolgono nella salvaguardia e nella valorizzazione del nostro straordinario patrimonio culturale e paesaggistico.

L'ingegneria, infatti, non è solo una disciplina tecnica, ma un tessuto connettivo tra passato e futuro, tra scienza e creatività. Attraverso i contributi di esperti di chiara fama, l'opera ci guida in un viaggio attraverso le sfide e le soluzioni per il restauro dell'architettura e dell'archeologia, la conservazione del patrimonio costruito, l'efficienza energetica, la geotecnica applicata al patrimonio, la difesa dei paesaggi costieri ed evidenzia i vantaggi che l'uso delle moderne tecnologie informatiche e di modellistica possono dare a queste attività.

Il prof. ing. Aldo Aveta, curatore della pubblicazione, regala al lettore un'introduzione stimolante a questo mondo di conoscenze; gli Autori dei vari contributi offrono una panoramica ricca e approfondita delle migliori pratiche e delle sfide che gli ingegneri affrontano nel loro lavoro quotidiano. Dalle antiche rovine di Pompei alla Torre di Pisa, dai paesaggi costieri ai ponti tecnologici, l'opera contiene un ampio spettro di esperienze ed *expertise*.

La cultura dell'ingegneria è un elemento fondamentale per preservare il nostro passato e costruire un futuro sostenibile. La speranza è che questo libro possa essere fonte di ispirazione non solo per gli ingegneri ma per tutti coloro che si interessano, a vario titolo, alla conservazione del nostro patrimonio culturale.

Un sentito ringraziamento a chi ha contribuito a questa straordinaria raccolta di conoscenze.

Introduzione

Aldo Aveta
Università di Napoli "Federico II"

Come curatore del volume ringrazio, innanzitutto, il Presidente Gennaro Annunziata e l'intero Consiglio dell'Ordine degli Ingegneri di Napoli, che hanno accolto con entusiasmo l'iniziativa di svolgere un Seminario su di un tema così significativo – tenutosi il 23 giugno 2023 presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli Federico II – le cui risultanze sono qui pubblicate.

Quali, in sintesi, le motivazioni dell'odierno Seminario?

a) Sottolineare quanto la Cultura dell'Ingegneria, anche attraverso le sue molteplici specializzazioni, abbia contribuito e contribuisca alla salvaguardia ed alla valorizzazione del Patrimonio, costituito da beni culturali e dal Paesaggio.
b) Incrementare la consapevolezza, soprattutto nei giovani ingegneri, delle potenzialità di un settore professionale, quello inerente al Patrimonio, in forte crescita in termini di opportunità, in considerazione della sempre maggiore sensibilità che negli ultimi decenni si registra nei decisori politici e nelle comunità.

Vengono approfonditi sia gli aspetti della Conoscenza che il Progetto delle attività di restauro/consolidamento, di valorizzazione e fruizione inerenti al Patrimonio, che caratterizza, così diffusamente ed intensamente, la nostra nazione, la nostra regione e la nostra straordinaria città.

Si tratta però di un Patrimonio molto fragile e vulnerabile: basti pensare alla frequenza dei terremoti, dei moti bradisismici, alle frane ed ai dissesti idrogeologici, eventi disastrosi nei quali gli Ingegneri, a vario titolo, hanno svolto e svolgono un ruolo importante.

Dunque, un settore nel quale da decenni la Cultura dell'Ingegneria porta il proprio fondamentale apporto specialistico, nell'ambito dei beni culturali, immobili e mobili, e del Paesaggio modernamente inteso, ovvero quello che viene definito il Paesaggio storico culturale.

Per raggiungere tale obiettivo, al suddetto Seminario sono stati invitati come relatori Ingegneri ed esperti, sia accademici che professionisti, di valenza nazionale ed internazionale, per affrontare da vari punti di vista la complessità della Conoscenza e del Progetto e dibattere delle specificità delle esperienze compiute nonché del ruolo della formazione degli ingegneri nel campo in esame.

Si susseguiranno una serie di interventi, con approfondimenti e aggiornamenti nei diversi settori specialistici. Sono preceduti da una Prefazione della prof. Bianca Gioia Marino, moderatrice del Seminario, che con lucide e colte argomentazioni apre scenari scientifici di grande interesse in tema di interazione dei saperi.

Gli apporti dei vari esperti riguardano alcuni di tali saperi specialistici e di certo non esauriscono il quadro delle potenzialità della Cultura dell'Ingegneria per il Patrimonio, e sono stati distinti in quattro sezioni:

1. Restauro dell'architettura e dell'archeologia, tra teorie, formazione e prassi
2. Miglioramento strutturale, efficientamento energetico, geotecnica per il Patrimonio
3. Difesa dei paesaggi costieri
4. Informatica e modellistica per il Patrimonio

Orbene, gli argomenti trattati sono molteplici e riguardano aspetti sia di impostazione teorico-metodologica e progettuale, che di formazione specialistica, nonchè problematiche di scottante attualità a causa della vulnerabilità del territorio campano nei confronti degli eventi sismici e dei movimenti franosi, ma anche per l'efficientamento energetico del patrimonio architettonico, vincolato e non. Si aggiunge ancora il tema della salvaguardia dei territori costieri e della protezione dei litorali che arricchiscono lo straordinario paesaggio della Baia di Napoli, ovvero le coste prospicienti i golfi di Napoli e di Pozzuoli e quelle della costiera amalfitana.

Il volume è arricchito dal riferimento a casi concreti, passati e recenti, nei quali gli Autori si sono cimentati: dalla Torre di Pisa al parco archeologico di Pompei e così via, e tanti esempi di grande interesse. Altrettanto significative sono le alternative progettuali che vengono illustrate per evidenziarne gli esiti in rapporto alla salvaguardia del paesaggio storico. Nell'ultima sezione, in tema di valorizzazione del Patrimonio, si evidenziano gli interessanti apporti dell'Informatica e della Modellistica nel campo della conservazione e valorizzazione dei beni culturali.

Mi auguro anche che il volume, così ricco di aggiornamenti e di spunti di riflessione sulle specifiche tematiche, possa rappresentare un documento di utile aggiornamento per i tecnici, per gli esperti, per le giovani generazioni di ingegneri e di architetti che intendono dedicarsi a questo affascinante settore.

Prefazione

La cultura dell'ingegneria. Questioni del presente e possibili orizzonti

Bianca Gioia Marino

> «La vieille alternative: 'Science ou Art de la construction?', consciente de la longue histoire qui a divisé les Académies et les Ecoles polytechniques, avait été même sommairement composée au moment où le mouvement rationaliste exerçait une hégémonie en Architecture, favorisant ainsi l'entrée et la valorisation des disciplines structurales. Mais il s'agissait d'une solution provisoire, qui, en partie seulement, correspondait aux problèmes bien plus profonds suscités par un récent débat encore vif sur le rôle et sur les compétences de l'architecte.
> Désormais l'alternative n'est pas entre science et art, mais, entre deux positions épistémologiques différentes: et ce n'est pas une alternative, mais une rencontre féconde, quoique problématique, dont l'histoire est très riche et peut-être inexplorée.»
>
> E. Benvenuto
> *Between Mechanics and Architecture*
> edité par edited by Patricia Radelet-de Grave, Edoardo Benvenuto
> Birkhauser Verlag Basel, Boston, Berlin 1995

Il punto di osservazione che il Seminario del 23 giugno u.s. ha consentito di avere, per quanto ristretto ad una giornata di confronto tra diversi versanti della ricerca applicata nel campo dell'ingegneria, ha dato modo di registrare un significativo 'stato di fatto' dell'attuale condizione in cui le scienze ingegneristiche, ciascuna nel proprio campo specifico, si avvicinino, considerino, in altre parole, intervengano sul patrimonio culturale.

Il titolo, infatti, del suddetto Seminario, promosso dal prof. Aldo Aveta, è *La Cultura dell'Ingegneria per la conservazione del patrimonio e del paesaggio: aspetti di metodo e prassi*; e credo che risponda ad un'esigenza che trova la sua ragione in una dimensione tutto sommato etica, oltre che scientifica, e che l'iniziativa svoltasi nella Facoltà di Ingegneria, nella sala dedicata a Leopoldo Massimilla – che, oltre a rappresentare una figura di grande spicco nel suo campo della ricerca, si è dedicato ai percorsi di formazione organicamente raccordati alle esigenze del territorio - sottenda, probabilmente, la volontà di verifica delle modalità dell'attuale cultura dell'ingegneria di guardare al patrimonio culturale, intravedendo criticità e potenzialità.

Un patrimonio culturale di cui oramai oggi anche la giurisprudenza, già molto avanti nella delineazione del patrimonio come 'bene comune', sta approfondendo risvolti e significati all'interno del sistema giuridico per stabilire, nelle sue ricadute concrete, confini,

prospettive e scenari di azione in relazione agli ordinamenti che regolano la vita della comunità. Un patrimonio che, come nozione, nel tempo ha subito trasformazioni concettuali ed ampliamenti di senso. Il patrimonio culturale se è difatti un'entità sicuramente riconducibile alle testimonianze materiali del nostro passato, di esso però, col passar del tempo, l'aspetto sociale, quindi quello meno approcciabile deterministicamente e meno quantitativamente determinabile, sta assumendo un ruolo importante.

Ciò attiene alla cosiddetta dimensione immateriale del patrimonio riconosciuta anche dalla giurisprudenza italiana, oltre che europea, e che trova riscontro nel concetto di 'eredità culturale' sancito quasi vent'anni fa dalla convenzione di Faro, nel 2005 – ratificata in Italia il 23 settembre 2020, in particolare l'art. 12 sull'accesso all'eredità culturale e partecipazione democratica e l'art. 13 sul patrimonio culturale e la conoscenza – e nel relativo diritto da parte della collettività nei suoi confronti.

Né sfugge l'estrema attualità delle istanze poste all'origine del Seminario: gli orizzonti posti dalle strategie post pandemiche e i progetti messi in campo in virtù dei finanziamenti PNNR, insieme alle transizioni energetica e digitale supportati dai fondi europei, rendono vieppiù velato lo scenario delle ricadute sul sistema valoriale del patrimonio architettonico su cui lo spirito emergenziale del momento storico tende a fare calare le priorità delle risposte alle *performances* del costruito storico, ciò all'interno di un'intricata connessione, se non conflitto, tra le nuove normative e quelle di tutela.

Da qui la necessità, che già si profila per una 'cultura' dell'ingegneria, di un approccio ai temi capace di utilizzare e perfezionare i propri specialismi guardando e intravedendo, nel confronto con le esigenze manifestate da altri campi del sapere, altri inimmaginati orizzonti di ricerca, auspicabilmente finalizzati al miglioramento delle condizioni di vita dell'uomo.

I contributi si sono mossi in diversi ambiti, facendo emergere la complessità del patrimonio, anche se solo si fa riferimento alle diverse scale che esso coinvolge: quella architettonica, dell'aggregato urbano, paesaggistico, infrastrutturale e ambientale. Il riguardo di questi soli aspetti mettono i progettisti di fronte ad operazioni che non possono prescindere da approcci multidimensionali: ciò se si ha l'intenzione di lavorare sul patrimonio con progetti con un alto tasso di consapevolezza e qualità.

Le importanti iniziative rivolte nell'ultimo decennio ai siti ed al patrimonio archeologico, finalizzate soprattutto all'incremento della fruizione culturale, hanno portato ad una notevole attenzione nei confronti di strategie e programmi volti alla valorizzazione dei cosiddetti 'luoghi di cultura' – si veda il D.M. 23/12/2014, con i relativi aggiornamenti e nel DM 28/01/2020 – e dei musei con conseguenti interventi che sono entrati a stretto contatto con la materia archeologica tanto che numerosissimi e corposi sono, nel solo sito archeologico di Pompei, gli interventi di restauro, di conservazione e di messa in sicurezza. Basti guardare, tra gli altri, al Piano dei 14 investimenti strategici per il rilancio del paese avviato nel 2021 dal Ministero della Cultura e che si focalizza sul recupero dei complessi di elevato valore storico ed architettonico, dei siti di grande significato culturale e rilevanza nazionale in stato di abbandono o bisognosi di radicali azioni di restauro, in gran parte inseriti in contesti urbani. Si considera, in altre parole, la cultura

come precipuo motore di sviluppo da avviare con grandi infrastrutture culturali nazionali, il che mette anche le discipline ingegneristiche e informatiche in moto nel campo del patrimonio culturali, sia per quanto riguarda l'intervento diretto sul bene, sia per quanto riguarda la comunicazione dell'*heritage* attraverso le tecnologie digitali.

Relativamente al primo ambito, il sito archeologico di Pompei può essere considerato un campionario di 'culture' che, afferenti al campo ingegneristico, si sono misurate con la complessità del sito archeologico più noto al mondo e con una intrinseca e notevole importanza mediatica.

Le relazioni presentate al Seminario – che ritroviamo nel presente volume - ne hanno affrontato qualche aspetto: si è mostrato il lavoro afferente a quelle specializzazioni ingegneristiche risultate cogenti per implementare tutte quelle le attività necessarie per far funzionare il processo di programmazione, monitoraggio, collaudo e rendicontazione. Si parla di numerose decine di interventi di restauro, conservazione e messa in sicurezza del patrimonio archeologico, di cui alcune in corso ed altre programmate che per brevità qui non analizziamo. Tuttavia, il rilievo necessario si muove nell'ambito, appunto culturale, delle politiche e, dunque, delle prassi, che non possono essere riconnesse alla sfera del restauro e che d'altronde hanno le loro ricadute materiali sul bene, condizionandone la conseguente fruizione e trasmissione al futuro, così come da Codice dei Beni culturali e del Paesaggio (D.Lgs n. 42/2004) attualmente in vigore: l'art. 29, al comma 4, com'è noto, ne definisce confini e contenuti, se «per restauro si intende l'intervento diretto sul bene culturale attraverso un complesso di operazioni finalizzate all'integrità materiale e al recupero del bene medesimo, alla protezione e alla trasmissione dei suoi valori culturali. Nel caso di beni immobili situati nelle zone dichiarate a rischio sismico in base alla normativa vigente, il restauro comprende l'intervento di miglioramento strutturale». Quest'ultimo fa riferimento ad un'altra questione sfidante: l'assicurazione della stabilità della compagine archeologica/architettonica deve confrontarsi con i valori della preesistenza e questi valori sono frutto non di processi informatici di dati oggettivi relativi alla realtà fisica e/o dimensionale del manufatto, ma scaturiscono da indagini in cui il dato immateriale, definito dalla *summa* dei significati che nel tempo si sono stratificati relativamente e che ne hanno definito il sistema valoriale per cui quella 'struttura', attraverso il suo 'aspetto' e la sua immagine è patrimonio culturale.

Da qui l'importanza di riferirsi ad una consolidata cultura del restauro cioè di una cultura che, innestata tradizionalmente sull'interazione tra saperi diversi, ha tracciato, nella sua lunga elaborazione di principi, riflessioni e teorie e relative prassi, alcuni criteri, da non considerare però come ricette ma come ingredienti di riferimento per la configurazione del progetto che, come dicevamo prima, non può che essere di restauro. I criteri della distinguibilità, dell'autenticità, della compatibilità e del minimo intervento; questi ultimi quasi 'disegnano' il terreno progettuale all'interno del quale muoversi, là dove alla compatibilità da un punto di vista, naturalmente, fisico-meccanico o chimico - presupposti di base di un qualsiasi intervento - si aggiunge quella estetico-storica, cioè del rispetto di una situazione contestuale che, con tutti gli aspetti

appartenenti a quel sistema valoriale di cui prima si diceva, definiscono e richiedono l'apporto del sapere di tipo umanistico.

Il tema è complesso, ma chi può negare l'importanza dell'impatto sul paesaggio archeologico – perché 'esiste' un paesaggio archeologico vista pure l'estensione dei nostri siti – di una copertura a volte indispensabile per le esigenze di protezione della materia antica? Chi può ridurre l'importanza dell'impraticabilità di alcune zone di cui, legittimamente, si intende assicurare la fruizione di coloro che hanno difficoltà nella deambulazione e da qui la ricerca di soluzioni ingegneristiche che renderebbero sicuramente praticabile i percorsi all'interno del sito ma talvolta in conflitto con i valori materiali ed immateriali della preesistenza? Si aprono perciò dei versanti speculativi ma strettamente afferenti alla realtà fisica cui il progetto si rivolge, definendo un campo, quello del patrimonio, in cui gli specialismi, pur nella loro individuazione della corretta risposta al problema, devono mediare, integrare la soluzione con altri specialismi. Il che potrebbe portare a nuovi ambiti di investigazione, a nuove sperimentazioni di tecniche e materiali nonché ad ulteriori orizzonti di ricerca, i quali scaturiscono proprio dal dialogo tra le discipline.

L'aspetto geotecnico, in relazione al patrimonio, assume un interesse particolare: gli esempi citati nel presente volume hanno dato conto, in un caso, della soluzione esito di un confronto tra i diversi aspetti – storici, architettonici, simbolici, strutturali ecc. – e comunque misurata con le istanze del restauro; nell'altro, si è mostrato il fondamentale ruolo del monitoraggio e, se vogliamo, della prevenzione del rischio riguardante il patrimonio, ma ha aperto anche alla dimensione ambientale e territoriale – ma anche paesaggistica - del tema. La conoscenza, anche storica, del comportamento di versanti rocciosi e l'utilizzo di tecnologie capaci di interpretare il comportamento meccanico di terre e rocce consente, oltre che arrivare a diagnosi appropriate di eventuali dissesti alle diverse scale, anche di programmare azioni preventive che conducono, di conseguenza, a scelte improntate, appunto, al minimo intervento, nonché, se integrate con gli altri specialismi attinenti al determinato tipo di patrimonio, ad interventi coerenti con i valori di quest'ultimo.

Il caso della Torre di Pisa - che ha visto all'opera una Commissione internazionale, composta peraltro, oltre che da M. Jamiolkowski e Carlo Viggiani, anche, tra gli altri, dal belga Jean Barthélemy e da Roberto Di Stefano - ha lavorato considerando le istanze del restauro riferibili peraltro alla considerazione della persistenza, nell'immaginario collettivo, di una torre inclinata e che benché un restauratore architetto come E.E. Viollet-le-Duc l'avesse giudicata negativamente per il conflitto della sua immagine con l'idea di stabilità, la cultura novecentesca del restauro ha individuato nel suo problema una parte importante della sua identità, indirizzando dunque, oltre alle altre considerazioni di tipo tecnico, le scelte dell'intervento. Ciò corrisponde all'idea per cui – come Roberto Di Stefano ha sottolineato - il «consolidamento strutturale costituisce uno degli interventi fondamentali di quell'insieme di operazioni che prendono il nome di 'restauro': intervento che sono tutti, quindi anche il consolidamento) finalizzati alla conservazione. Pertanto il consolidamento è una parte del restauro e non qualcosa di diverso o addirittura alternativo… il restauro di consoli-

damento non è mai miope e chiusa visione tecnicistica», o riflessione sul «mero fatto strutturale, fredda osservazione dei materiali della loro natura o resistenza. Lo studio del comportamento statico delle strutture...è sempre indagine storica».

Non v'è dubbio che le questioni legate alla protezione strutturale delle spiagge, così come il tema della ricostruzione di fronti stradali in siti, come quello della costiera amalfitana, un bene inserito nella Lista del Patrimonio Culturale Mondiale dell'UNESCO, attengono alla questione complessa, ma quanto mai stimolante, del confronto con gli aspetti legati all'autenticità e all'identità dei luoghi su cui si interviene, con il coinvolgimento, qui, ancora una volta, di ambiti argomentativi al vaglio storico critico ed interpretativo dell''oggetto'.

L'altro argomento impellente, su cui la cultura dell'ingegneria è chiamata a lavorare, è quello del contenimento dei consumi energetici relativo alla transizione ecologica, un importante *pillar* del PNNR e delle direttive europee degli ultimi due decenni. Se si considera il nostro patrimonio, da quello urbano a quello architettonico, composto non solo da quello vincolato ma anche da quel costruito storico che 'fa' paesaggio urbano storico, costituendo una specificità tutta italiana per la disseminazione omogenea di borghi e centri storici sul nostro territorio, tra l'altro mete attrattive per il turismo internazionale e non solo, non possiamo non immaginare i possibili conflitti tra i valori storico architettonici e finanche paesaggistici con gli inderogabili obbiettivi posti: la riduzione dei consumi attraverso impianti efficienti e l'utilizzo di dispositivi di fonti energetiche rinnovabili.

È un problema che tocca quindi diverse scale, non solo quella architettonica ma anche quella paesaggistica, con tutte le implicazioni normative di tutela e di governo del territorio, il quale dovrebbe impegnare diversi ettari per far fronte all'insediamento dei dispositivi energetici nella misura idonea a soddisfare i fabbisogni, locali e non. Emerge dunque la necessità, non più dilazionabile, di una cultura aperta all'approccio multidimensionale al problema, consapevole che la risposta non può essere riposta nel solo ambito tecnico-ingegneristico ma che coinvolge ben altri aspetti che naturalmente fanno parte di un'entità complessa come quella del patrimonio architettonico e paesaggistico.

Allo stesso modo, interessante è l'approfondimento del rapporto tra la tecnologia ed il patrimonio. Il crescente sviluppo di dispositivi in uso nel mondo del restauro oggi si confronta con le ultime frontiere, quelle dell'intelligenza artificiale e del Metaverso, sul cui utilizzo andrebbe aperto un confronto a più voci, coinvolgenti le discipline umanistiche nel loro complesso, soprattutto per gli effetti che posso verificarsi non solo sul patrimonio, ma anche sull''utente finale', e cioè la collettività.

Da questo punto di vista, anche l'uso di tecnologie al servizio del patrimonio, in particolare quelle che riproducono 'parti' dell'edificio, con processi di *Digital Fabrication*, grazie alla crescente disponibilità di strumenti avanzati di digitalizzazione e delle tecnologie di stampa 3D, aprirebbero un proficuo terreno di lavoro se più che «riparare e ricreare manufatti storici e artistici», operando nel campo del patrimonio culturale, vi fosse un confronto critico sulle forme e le ragioni della riproduzione in quanto ogni manufatto ha il suo peculiare tasso di 'irriproducibilità', nella loro doppia veste di materia

e di documento storico. Apertissimo pure è il campo della conoscenza che le piattaforme informatiche, come incubatori di dati, specialmente quelli 'invisibili', di opere e manufatti artistici assicurano e diffondono nell'ambito della agli esperti del settore, storici dell'arte, studiosi, ricercatori al servizio di strutture. Il tema richiede anche in questo caso un lavoro fortemente interdisciplinare per le implicazioni culturali e sociali del fattore 'comunicazione' del patrimonio, un aspetto foriero di approfondimenti su più fronti.

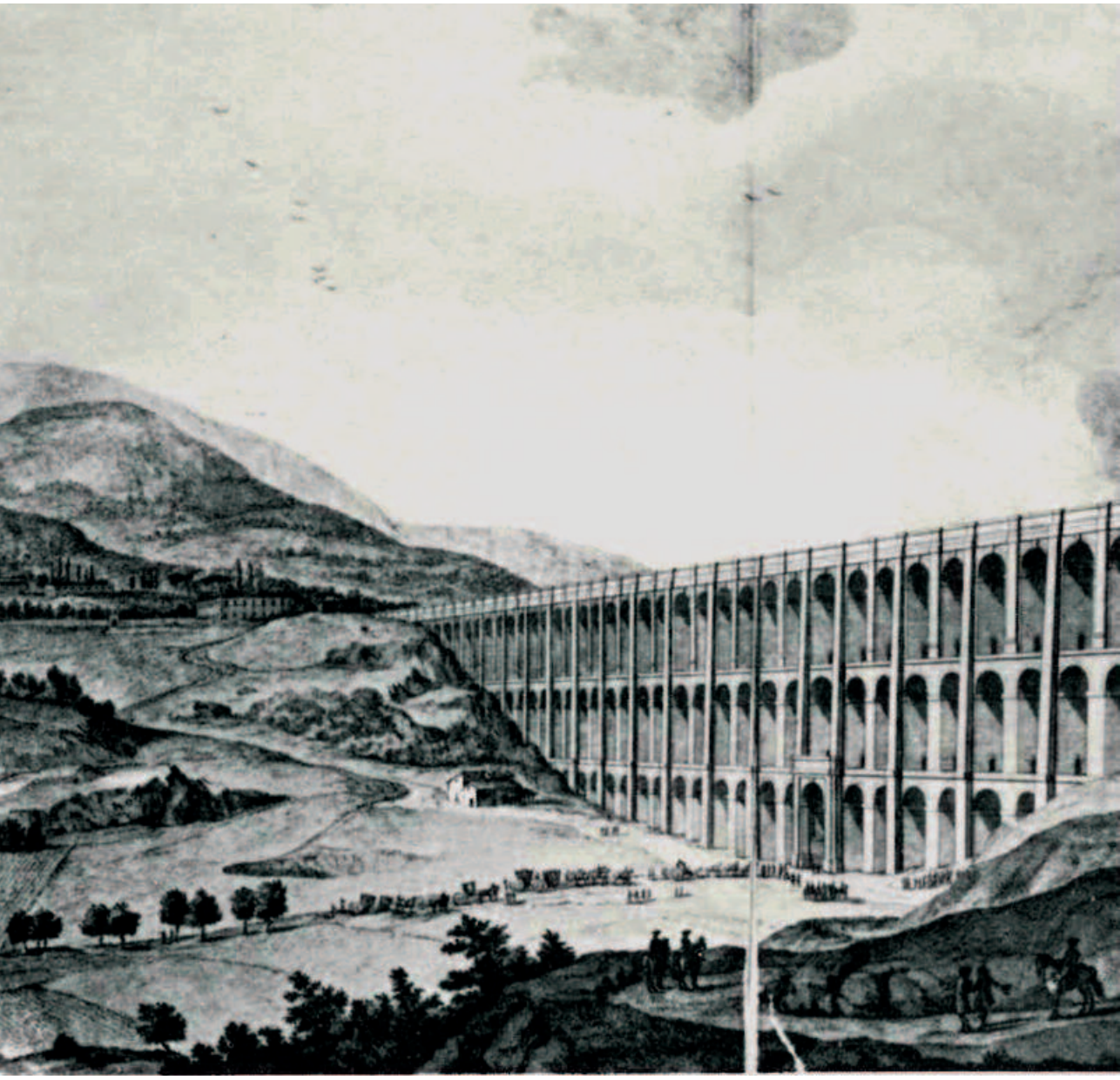
Tutto è compreso dunque nella sfera del progetto per il patrimonio. Ed è Edoardo Benvenuto a segnalare, per quest'ultimo, l'inutilità dei confini tra l'aspetto ingegneristico e quello umanistico: «il progetto di restauro merita di essere inserito nel grande progetto di architettura dove si coniugano poesia e tecnica, dove si accede all'ineffabilità dell'opera e nel medesimo tempo si esercita il pensiero critico e scientifico».

In conclusione, è la stessa complessità del patrimonio culturale e delle questioni di fronte alle quali la contemporaneità ci pone a suggerire un approccio ad esso finanche transdisciplinare. La raccomandazione di muoversi 'in frontiera', di cercare le interazioni tra i saperi per affrontare più attrezzati gli obiettivi del presente e del futuro, è frutto di una necessità no solo avvertita ma posta dalla situazione attuale e dai problemi che sii devono fronteggiare e di cui il patrimonio e la sua protezione appare essere un fattore determinante per dominare le crisi dei nostri tempi. La recentissima estensione della buffer zone ai siti archeologici Pompei, Ercolano e di Torre Annunziata è sintomo di una consapevolezza dell'intersettorialità della visione della protezione di patrimoni unici al mondo, ma rappresenta anche una spinta ad impostare lo sviluppo della cultura dell'ingegneria in un senso anche trasversale, permeabile alle capacità interattive con le altre discipline, in apparenza lontane, ma anche esse interne al patrimonio, alimentando insomma quella esigenza dialogo tra discipline STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) e quelle umanistiche. Ciò è tanto impellente e necessario per la responsabilità della formazione dei giovani: attrezzarli a vedere il problema anche dall'alto oltre che dal di dentro è un compito per le Università che da tempo si sta evidenziando e non è un caso che alcuni politecnici stiano aumentando lo spazio per le materie umanistiche, un passaggio così essenziale per quella identità europea che si riflette nella cultura tecno-umana.

Concluderei con un monito di Sabino Cassese, letto da Alberto Ortioli, quando parla della necessità dell'azione di élite non 'elitarie': considerando lo studio, la ricerca come chiave per superare le aporie del nostro momento storico, avverte che non è «lo studio codificato, separato dalle diverse declinazioni artificiali dei saperi, discipline anchilosate e autoreferenziali spesso gioco di potere, solo accademico; piuttosto lo studio delle intersezioni, quello che sa osare l'interdisciplinarietà e obbedisce alla curiosità dell'animo umano «fuori dalle parrocchie dipartimentali, con i piedi sulla linea di confine».

Ciò perché la realtà è fatta di problemi non di divisioni settoriali e coltivare l'arte del dubbio fa intravedere uno spiraglio del nostro futuro.

1.
RESTAURO DELL'ARCHITETTURA E DELL'ARCHEOLOGIA, TRA FORMAZIONE E PRASSI



I saperi specialistici degli Ingegneri per il restauro del Patrimonio e del costruito storico tra formazione, norme e prassi

Aldo Aveta

Premessa

Il contesto culturale e scientifico proprio degli Ingegneri mi spinge a svolgere alcune riflessioni che derivano da esperienze compiute in alcuni decenni come professionista, ma soprattutto come docente di Restauro architettonico nell'Università di Napoli Federico II, sia nella Facoltà di Architettura, che in quella di Ingegneria (poi Dipartimenti DiARC e DICEA), e dopo aver svolto il ruolo di Direttore della Scuola di Specializzazione in Beni architettonici e del Paesaggio dal 2010 al 2017. Sono riflessioni 'aperte', pronte a cogliere anche stimoli che possono emergere dal dibattito su di un tema così complesso quale è la Conservazione del Patrimonio. Vorrei segnalare che sono un ingegnere laureato in Ingegneria Civile Edile nel 1971, in un'epoca diversa da quella attuale, allievo di un altro ingegnere, il prof. Roberto Di Stefano, che mi ha iniziato al Restauro in ambito accademico e applicativo. In sostanza, per alcuni decenni ho insegnato una disciplina, il Restauro, non acquisita nella mia formazione universitaria, ma solo dopo la frequenza nella Scuola di specializzazione citata. Forse tali due diverse formazioni, presso Ingegneria e presso Architettura, mi hanno consentito di apprezzare ed appassionarmi al Restauro, che coniuga conoscenze umanistiche e tecniche.

Ciò premesso, sono convinto – così come tanti altri esperti – del fatto che il futuro dell'attività professionale sarà sempre più fortemente legato ad operazioni riguardanti il Patrimonio culturale ed il Paesaggio, nonché il costruito storico. Tre sono gli argomenti che tendono a confermarlo:

- Ormai da qualche decennio l'obiettivo dichiarato a livello nazionale nella agenda politica, dalle istituzioni, dagli esperti e dalla società in generale è il 'consumo suolo pari a zero': dunque, la Rigenerazione urbana investe l'intero costruito storico.
- La evidente vulnerabilità del territorio campano e le condizioni di diffuso degrado del patrimonio immobiliare. Ciò determina una maggiore consapevolezza del fatto che in operazioni complesse di salvaguardia e tutela, restauro e recupero, fruizione e valorizzazione di architetture storiche e siti siano indispensabili apporti pluridisciplinari e tra questi quelli inerenti la Cultura dell'Ingegneria, nelle sue variegate specializzazioni, che risulta fondamentale.
- Il boom turistico post Covid, che vede nelle città d'arte in Italia, ed in particolare

a Napoli, un abnorme incremento dell'afflusso di visitatori nazionali ed internazionali: e questo non può non avere ricadute sulle attività di tutela, conservazione, restauro, fruizione e valorizzazione del patrimonio di beni culturali immobili e mobili e di siti di valore paesaggistico.

È utile ricordare i fondi del PNRR destinati dal Ministero della Cultura alla Campania con cospicui finanziamenti. Vanno citati, in tal senso, *I percorsi nella storia: treni storici e itinerari culturali*, con fondi destinati ad una serie di ponti storici quali Ponte San Marco, Ponte Ladrone e Ponte delle Chianche a Buonalbergo, Ponte Rotto o ponte Appiano sul Calore ad Apice, Ponte Leproso a Benevento; alla antica via Appia a S. Maria Capua Vetere; all'area archeologica dell'antica *Aeclanum* ed all'anfiteatro di Benevento ed altri ancora per un totale di 8.445.000. Si segnala poi la valorizzazione e la rigenerazione urbana dell'Albergo dei Poveri a Napoli con un finanziamento di 133.000.000 euro; ed ancora 25.000.000 per il complesso del Parco della Reggia di Caserta, 31.993.178 euro per l'intero complesso di Villa Favorita a Ercolano, 25.000.000 per il Real Bosco di Capodimonte e, sempre a Napoli, oltre 6.000.000 di euro per i Giardini storici del complesso dell'ex monastero dei SS. Severino e Sossio, il giardino storico di Palazzo Cellamare, ed a Valva il parco d'Ayala.

Insomma, si tratta di circa 230 milioni di euro e non è poco, trattandosi del solo Ministero della Cultura; a questi vanno a sommarsi tante altre risorse del PNRR destinate dagli altri Ministeri per infrastrutture ed interventi di diversa natura che pure incidono positivamente sui beni culturali.

1. Restauro e Ingegneria

1.1 Gli Ingegneri e la Storia

Va ricordato che il Restauro – concetto evolutosi nel XIX e XX secolo e di cui l'Italia vanta il primato in campo teorico - è un atto critico, che deve fondarsi su di una solida ed approfondita formazione umanistica (Storia dell'Architettura, Storia dell'Urbanistica, Storia dell'Arte, Storia della Critica, Museografia, ecc.): il restauratore – tecnico formatosi nei Dipartimenti di Architettura e di Ingegneria delle Università italiane – deve saper svolgere indagini storico– archivistiche e bibliografiche, ecc. che gli consentano di conoscere, interpretare l'origine e le trasformazioni di un manufatto esistente, comprenderne i valori autentici e documentari. Analogamente ciò vale per un sito o per una città storica.

Dunque, questo tipo di formazione si lega alla presenza di discipline umanistiche nei piani di studio degli allievi ingegneri: una formazione che, diversamente da quanto si registra nelle altre nazioni e soprattutto negli Stati americani, in Italia viene sottovalutata. Non è qui possibile delineare le evoluzioni nel campo universitario avvenute tra il XIX ed il XX secolo; si può solo convenire che alla metà del XX

secolo in Italia si è determinato un modello di formazione che, con poche varianti, è giunto fino ai giorni nostri.

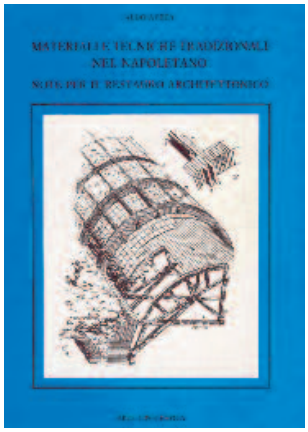
Nella nostra nazione, mentre la formazione dell'Ingegnere è andata sempre più specializzandosi, con una sottovalutazione dell'importanza dell'apporto della cultura umanistica, con la costituzione delle Facoltà di Architettura, ovvero le Scuole Superiori di Architettura con legge 812 del 1932 (Politecnico di Milano 1933, di Napoli Federico II 1935) secondo il modello previsto da Gustavo Giovannoni, si può ben affermare che la situazione sia peggiorata: ad Ingegneria si insegnano ormai quasi esclusivamente discipline scientifiche e tecniche, anche per gli ingegneri civili ed edili. Il caso del Corso in Ingegneria edile-Architettura – istituito da una ventina di anni e con titolo riconosciuto a livello europeo – va considerato a parte e più avanti svolgeremo qualche considerazione specifica.

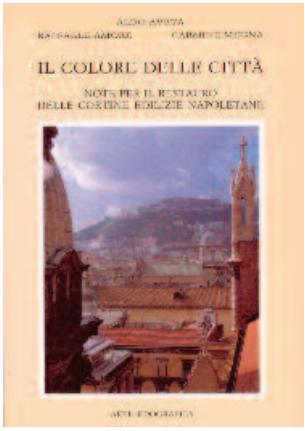
Va comunque ricordato che il Italia, negli anni '80 del Novecento il Politecnico di Torino inseriva discipline umanistiche e premiava per prima la conoscenza della Storia dell'Ingegneria, così che tali indirizzi formativi «permettessero agli studenti di affrontare con maggiore ampiezza di orizzonti le nuove dimensioni del progettare e in generale dei contesti tecnologici e produttivi».

Dopo qualche anno, su tale strada si è avviato il Politecnico di Milano: qui Paolo Mormando sostenne: «una cultura che prescinda dal confronto con la scienza è infatti semplice erudizione d'altri tempi. Reciprocamente, una formazione scientifica che ignori il proprio fondamento umanistico è puro addestramento».

Il quesito sostanziale è: una formazione che serva a progettare e risolvere i problemi solo dal punto di vista tecnico o una formazione che piuttosto preveda anche di far comprendere perché progettare, quali sono le motivazioni alla base del processo progettuale, quale è il contesto storico di riferimento, quali le alternative in campo e con quali esiti alla luce delle esigenze più ampie del mondo contemporaneo? Questa seconda opzione, che condivido pienamente, è legata indissolubilmente ad un apporto della Storia che solo le discipline umanistiche possono contribuire a fornire.

In tale direzione, negli ultimi decenni l'Università di Napoli Federico II con la sua Facoltà di Ingegneria ha fatto registrare apporti molto significativi: come non ricordare la determinazione con la quale Salvatore D'Agostino, professore di Scienza delle Costruzioni, ha perseguito per molti anni la promozione di significativi Convegni di Storia dell'Ingegneria, pubblicando ponderosi volumi di grande utilità (fig. 1). E come non citare Alfredo Buccaro e Andrea Maglio, professori di Storia dell'Architettura, che hanno svolto cospicue ricerche sulla nascita e sulle trasformazioni della facoltà napoletana e sui preziosi Libri Antichi della biblioteca F. Gasparrini (fig. 2) A livello nazionale Edoardo Benvenuto ha dedicato ampio spazio alla storia ed alla evoluzione della Scienza delle Costruzioni (fig. 3) e in tale direzione vanno citati i contributi a Napoli di Renato Sparacio (fig. 4) e quelli molto significativi, nel campo della Geotecnica, di Carlo Viggiani, che nel





1. Copertina di uno dei volumi dei convegni promossi e organizzati da S. D'Agostino, di cui ha curato la pubblicazione degli Atti.

2. Il volume *I libri antichi nella Facoltà di Ingegneria di Napoli nel bicentenario della Scuola di Applicazione (1811-2011),* a cura di A. Buccaro, A. Maglio (2012).

3. Il volume di E. Benvenuto *La Scienza delle Costruzioni ed il suo sviluppo storico* (2010).

4. Il volume di R. Sparacio *La Scienza e i tempi del costruire* (1999).

5-7. I volumi di A. Aveta, *Materiali e tecniche costruttive tradizionali nel napoletano* (1987), *Il colore delle città* (1993), *Tecniche per il restauro. Problemi di umidità negli edifici napoletani* (1996).

presente volume richiama l'attenzione su di un caso straordinario, la salvaguardia della Torre di Pisa. Nei decenni trascorsi ad Ingegneria è fortemente cresciuto il ruolo della Tecnica delle Costruzioni, a partire dall'apporto del Maestro Elio Giangreco e fino ai tanti allievi e docenti dell'attuale DiST con grande attenzione al costruito storico.

Ad Architettura, per migliorare il bagaglio conoscitivo degli allievi sull'evoluzione storica delle tecniche costruttive, a partire dagli apporti di Ferdinando Chiaromonte e del già citato Roberto Di Stefano – del quale si segnala lo straordinario saggio del 1973 *Luigi Vanvitelli ingegnere e restauratore*, in cui ricorda l'impegno per la realizzazione dei Ponti della Valle a Maddaloni (in copertina e a p. 14) – il sottoscritto pubblicava, a partire dal 1987, una serie di volumi, sui materiali, sull'umidità, sul colore dell'edilizia, sul consolidamento delle strutture lignee, sempre fondati sulla conoscenza storica e sull'evoluzione della tecnica edilizia (figg. 5, 6, 7). Dunque, la Storia del costruire al centro della formazione dei giovani allievi di Ingegneria e di Architettura.

Venendo all'attualità, oggi a Napoli nel Dipartimento DICEA di Ingegneria si tengono i corsi di Ingegneria edile-Architettura, di cui parleremo più avanti.

1.2 La pluridisciplinarietà nel Progetto di Restauro

Un altro aspetto che vorrei evidenziare riguarda la complessità del Progetto di Restauro. Quale istituzione universitaria può oggi assicurare tante specializzazioni utili a tale tipo di Progetto?

Credo che quelle di Ingegneria (Politecnici, Facoltà, Dipartimenti) abbiano una offerta superiore rispetto alle altre e cercherò di dimostrarlo.

Oggi sono tante e tutte particolarmente utili risultano, sia nell'approccio metodologico che nelle soluzioni progettuali di Restauro, le competenze degli ingegneri in un processo complesso, tra Conoscenza e Progetto, sul Patrimonio culturale, che richiede un fattore ineludibile: la 'pluridisciplinarietà', o meglio la 'trandisciplinarietà' per affrontare e risolvere problematiche finalizzate ad un obiettivo comune e condiviso: la conservazione e la valorizzazione di tale patrimonio.

Negli anni tale fattore lo abbiamo sperimentato in molteplici esperienze professionali e di ricerca applicata. Tra queste vorrei ricordare il caso del Rione Terra a Pozzuoli, del Castello di Carlo V a Capua, di Castel Capuano e Castel Nuovo a Napoli, del Parco archeologico di Pompei e così via. Come potrebbe un singolo professionista, sia pure specializzato, affrontare i tanti e diversi temi in gioco?

Nelle esperienze citate gli approfondimenti conoscitivi utili per il Progetto hanno richiesto di indagare origine, trasformazioni, tipologie dei componenti costruttivi, degrado e dissesti e, soprattutto, interpretare all'attualità significati e valori autentici e documentari di un manufatto storico per conservarne il palinsesto e adattarlo a nuove funzioni compatibili e utili alla società. Così hanno operato in stretta sinergia

storici dell'architettura, ingegneri e architetti, strutturisti, impiantisti, geotecnici, esperti di geomateriali e tanti altri specialisti formatisi nella Scuola di Ingegneria.

1.3 La Conoscenza per il Progetto

La 'Storia', ai fini del progetto di restauro, da acquisire nella formazione universitaria e post-universitaria, costituisce – come abbiamo già segnalato - un elemento fondante ed indispensabile.

L'indagine storica, bibliografica ed archivistica è da estendersi agli aspetti architettonici ed urbanistici dell'edificio storico: vanno indagate le fonti archivistiche, analizzando anche i capitolati relativi ai lavori eseguiti e le fonti iconografiche, per cercare di ricostruire le diverse fasi costruttive a partire dalla sua origine, di individuare le maestranze operanti ed i materiali impiegati, dall'epoca del primo impianto fino agli interventi post-sismici e più recenti. Tale tipo di ricerca presuppone la padronanza delle metodologie di indagine storiografica e la capacità di distinzione fra le fonti e l'interpretazione critica. L'attività si sviluppa con studi e accertamenti presso archivi ed uffici pubblici e privati per la raccolta delle fonti e con riscontri da effettuare in cantiere. Circa la natura delle fonti da indagare, si fa riferimento alla documentazione bibliografica, archivistica, storico-catastale, grafica ed iconografica, storico-cartografica, alle foto ed ai filmati d'epoca, ecc.

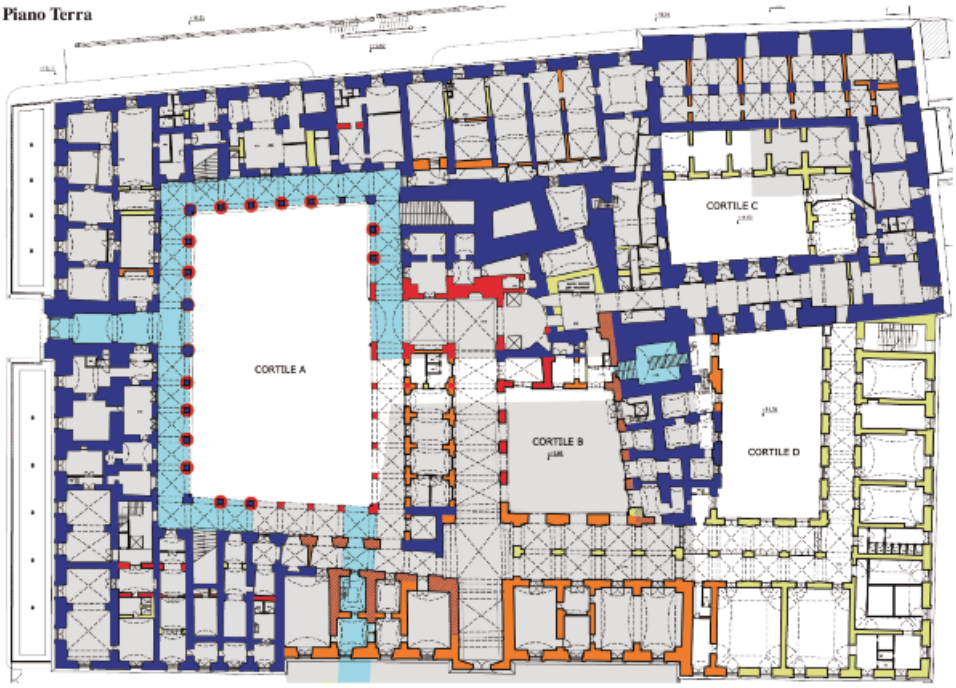
In sostanza, senza l'apporto della Storia, non vi può essere interpretazione dei valori e degli elementi materiali che caratterizzano la fabbrica, che rappresenta il fondamento per la sua conservazione, da intendersi in modo dinamico ed attivo e non certo per la 'museificazione' dello *status quo*: la conoscenza dei soli componenti costruttivi della fabbrica e delle loro patologie non può determinare un corretto progetto di restauro, limitandosi a competenze specifiche di un geometra o di un ingegnere di formazione generalista o specialistica (figg. 8, 9, 10).

Il 'Rilievo' è fondamentale per avere piena contezza della consistenza del manufatto: oggi ci si avvale necessariamente del laser scanner, per le difficoltà che si incontrano laddove non possono utilizzarsi strumentazioni tradizionali (distanziometri, ecc.).

Dunque, il Rilievo architettonico configura lo stato attuale del manufatto storico, con tutti i segni e le manifestazioni della sua storia costruttiva, ovvero del suo palinsesto.

Il rilievo metrico riguarda le misure di ogni parte della costruzione e dunque definisce gli elementi dimensionali della costruzione e dei suoi componenti, per dar luogo a piante, sezioni, prospetti, particolari costruttivi, sui quali evidenziare discontinuità e deformazioni, fuori piombo e tutto quanto può avere influenza sull'equilibrio statico.

8. Giuseppe Castiglione, *Castel Capuano nel 1858*, Bari, Pinacoteca Provinciale Corrado Giaquinto, in *Castel Capuano* (2013), fig. 89, p. 244.



9. Tavola sinottica delle trasformazioni delle murature, in M. Visone, *Trasformazioni storico-architettoniche*, nel volume *Castel Capuano* (2013), p. 218.

10. La Torre di Mezzo dopo il crollo avvenuto il 14 luglio 1879, in R. Amore, *I restauri del Filangieri: gli interventi di ripristino delle cortine edilizie*, nel volume *Castel Nuovo in Napoli* (2017), p. 422.

Con gli elaborati del rilievo metrico anche con l'ausilio di drone è possibile quindi definire le tavole grafiche del Rilievo dei materiali e delle tecniche costruttive e, in particolare, il rilievo strutturale, nel quale indicare il quadro fessurativo (fig. 11).

11. Un'applicazione del rilievo con laser scanner nella chiesa di S. Maria di Piedigrotta a Pizzo Calabro (coordinamento dell'Autore).

1.4 Il 'cantiere della conoscenza' e la Diagnostica

Nel Restauro non può essere sottovalutato il ruolo della Diagnostica, sia nel 'cantiere della conoscenza' che nel monitoraggio delle patologie e della efficacia nel tempo degli interventi eseguiti: si tratta di operazione complessa, sia preliminare alle attività di progettazione del Restauro, che nel post-restauro. Essa si collega al Rilievo, sul quale evidenziare il progetto di campionatura, che individua l'ubicazione delle indagini in situ ed i punti di prelievo per le prove di laboratorio.

Si fonda sulla condivisione e sulla interpretazione di conoscenze ed indagini multidisciplinari attraverso il prelievo di campioni, l'esecuzione di prove ed accertamenti strumentali, non invasivi o minimamente invasivi, sempre in continuo confronto con i risultati delle indagini storiche e l'osservazione diretta della fabbrica.

Entrando nel merito, va ricordato che, dopo aver indicato l'importanza delle indagini diagnostiche nel Restauro fin dal 1989, da anni abbiamo contribuito a introdurre l'uso del termine *diagnostica integrata*, proprio per evidenziare l'integrazione dei saperi specialistici in questa fase di indagine, dopo che fin dagli anni '90 del secolo scorso avevamo segnalato l'importanza della diagnostica nel

12-15- I volumi *Restauro e conoscenza strutturale* (1989), *Restauro e Consolidamento* (2005), *Diagnostica e Conservazione.* (2008), *Restauro strutturale e riduzione del rischio sismico* (2019).

campo del restauro e sottolineato nei primi anni Duemila lo stretto rapporto tra il Restauro ed il Consolidamento, dedicandovi uno specifico Convegno e pubblicandone gli Atti (figg. 12, 13, 14, 15).

Per esplicitare, in estrema sintesi, i molteplici aspetti della diagnostica si indicano le prove su:

• Le murature.

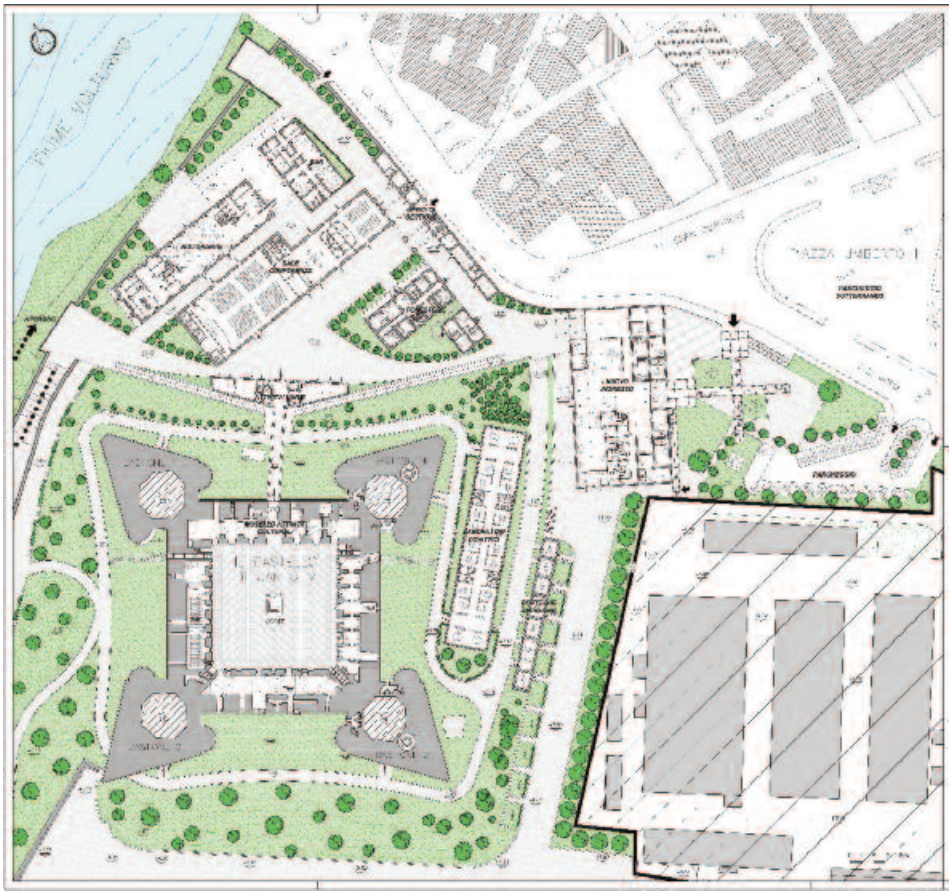
Si tratta di compiere indagini per analizzare le caratteristiche legate alla composizione mineralogiche, alla resistenza strutturale ed al degrado di tali strutture portanti in vista, generalmente in conci di tufo, ma anche in mattoni laterizi protetti da intonaci nel contesto napoletano. Occorre indagare la resistenza strutturale, ma anche lo spessore murario e la sua stratificazione.

Tra le operazioni riportate nel Prezzario del Provveditorato alle OO.PP. della Campania vi sono: la misura ponderale del contenuto d'acqua nelle murature, l'esame endoscopico con boroscopio rigido e videoendoscopico, le prove con martinetti piatti singoli e doppi; le indagini soniche, l'analisi microbiologica a fresco, con biologo esperto, l'analisi dei sali solubili mediante cromatografia ionica, l'analisi petrografica su sezione sottile, il carotaggio e la lettura della carota.

Ora trascurando le analisi su strutture in calcestruzzo armato - che pure si ritrovano in alcuni casi nei quali gli edifici storici hanno subito trasformazioni ed ampliamenti - nonché quelle su solai e volte e, ancora, quelle sui terreni, ci riferiamo agli intonaci, di cui occorre indagare la composizione e lo stato di conservazione; per gli intonaci, dunque, si compiono: il tassello stratigrafico, la colorimetria a riflettanza, la sezione sottile, la diffrattometria, l'analisi petrografica su sezione sottile.

Altre indagini riguardano le malte, ovvero: la descrizione macroscopica, la sezione sottile, l'analisi dei sali solubili mediante cromatografia ionica, l'analisi petrografica su sezione sottile, la diffrattometria.

Insomma, abbiamo segnalato una variegata tipologia di analisi preventive al progetto, a dimostrazione della complessità delle scelte da compiere nel Progetto esecutivo per evitare danni irreversibili al patrimonio culturale. E in tutte queste



16. Castello di Carlo V a Capua: ipotesi del progetto di rifunzionalizzazione (Convenzione CIRA/Istituto di Storia dell'Architettura e Restauro, Unina).

prove, non distruttive o minimamente invasive, l'apporto degli ingegneri è fondamentale, a fianco degli architetti.

Tutte le specializzazioni proprie del ramo 'Edile', ma anche altre, rientrano a pieno titolo in tale apporto: dunque, in generale, possiamo evidenziare il contributo fondamentale di: Ingegneri edili-architetti, Strutturisti, Geotecnici, Impiantisti, Gestionali, Energetici, Tecnologi, Materialisti, Chimici, Fisici, Informatici, ecc.

Tutte tali specializzazioni possono fornire un ausilio essenziale per garantire la qualità del Progetto e l'efficacia delle scelte tecniche e senza di esse il prodotto dell'attività intellettuale finalizzata al restauro dei beni culturali si dimostra carente. Questo è l'apporto fondamentale della Cultura dell'Ingegneria nel settore in esame.

1.5 Il Progetto

Come è noto, si tratta degli interventi di consolidamento e di restauro, nonché di adeguamento funzionale ed impiantistico, che devono rispettare i principi ed i criteri condivisi dalla Cultura del Restauro ed il complesso ed articolato apparato di normative di varia natura. In particolare, va segnalata l'esigenza attuale di progettare il restauro di un edificio storico tenendo conto anche di aspetti cogenti, come l'efficientamento energetico ed il miglioramento sismico delle costruzioni. Oggi, dunque, un progetto di qualità deve confrontarsi non solo con le problematiche proprie del restauro, ma anche con temi di sostenibilità ambientale e con la sostenibilità economica: quest'ultima coinvolge gli aspetti gestionali legati alle nuove funzioni dei manufatti. Dunque, un intervento di restauro non fine a sé stesso, ma rivolto alle aspettative ed alle esigenze delle comunità che ne fruiranno: dunque, gestione e manutenzione rappresentano obiettivi di attenta utilizzazione dei fondi disponibili, in relazione alle funzioni future del manufatto (fig. 16).

Molti di questi aspetti legati a tematiche attuali sono stati indagati nei decenni trascorsi da Roberto Di Stefano, che attraverso la Rivista RESTAURO, a partire dal 1972, ha contribuito a determinare una significativa evoluzione della disciplina, negli ultimi decenni del secolo scorso e sino ai primi anni del Duemila, con valenza nazionale ed internazionale (fig. 17).

2. L'Ingegnere edile-Architetto oggi: la formazione per il progetto di Restauro

Ora vorrei soffermarmi, in particolare, sui temi legati alla 'Formazione' e nello specifico a quella dei Corsi di laurea specialistica in Ingegneria edile- Architettura, anche sulla base di esperienze pregresse di insegnamento del Restauro nella Federico II. Questa disciplina, sconosciuta nelle Facoltà di Ingegneria prima della ultima riforma universitaria, è insegnata nel quinto anno del suddetto Corso di laurea a Napoli, con 12 CFU, mentre in altre Università anche meno, ovvero 9 CFU, essendo comunque raggiunto, con opportune alchimie, il traguardo del riconoscimento europeo.

In tali corsi sono previste lezioni teoriche e di laboratorio progettuale di restauro. Un po' poco per una adeguata formazione nel campo del restauro, a fronte del fatto che nei dipartimenti di Architettura sono previsti corsi di Teoria e Storia del restauro e nell'anno successivo il Laboratorio progettuale di restauro.

Ma oltre alla quantità complessiva dei CFU attribuiti al Restauro, c'è un problema di *humus* culturale caratterizzato ad Architettura da altre materie di tipo umanistico che risultano indispensabili per la maturità degli allievi preposti anche ad operare con piena consapevolezza nel campo dei beni culturali.

Eppure, vorrei sottolineare che nonostante questo *gap*, allievi particolarmente motivati dei corsi di Ingegneria edile - Architettura, continuando la formazione nel post laurea del Dottorato di Conservazione e della Scuola di specializzazione in Beni architettonici e del Paesaggio, hanno raggiunto traguardi rilevanti.

Un risultato davvero inaspettato per tanti che si erano iscritti al Corso di laurea specialistica in Ingegneria edile- Architettura, senza poter immaginare prospettive e potenzialità nel campo dei Beni Culturali.

Nelle mie lezioni introduttive ho sempre precisato agli allievi l'importanza attuale del Restauro, ma anche l'esigenza di incrementare la formazione storico-critica nel post laurea, tenendo conto del fatto che dopo la laurea essi possono iscriversi all'Albo degli Ingegneri ed all'Albo degli Architetti.

Ho registrato di aver toccato argomenti molto sensibili per le giovani generazioni di futuri tecnici: alcuni di essi si sono laureati con tesi in Restauro, poi hanno deciso di svolgere percorsi formativi post laurea come quelli citati.

Hanno così raggiunto un risultato impensabile: con i titoli accademici acquisiti hanno potuto partecipare ai concorsi del Ministero della Cultura e oggi, nel nostro territorio, sono funzionari nella Reggia di Caserta, nel parco archeologico di Pompei, nelle Soprintendenze di Napoli e della Città metropolitana di Napoli, nel Parco archeologico dei Campi Flegrei.

Dunque, un esito formativo davvero molto interessante e stimolante per le giovani generazioni.

A questo punto non si intende avanzare proposte a chi svolge il complesso ruolo di Presidente del Corso di laurea specialistica in Ingegneria edile-Architettura, ma solo sommessamente consigliare, per i motivi suesposti, la possibilità di conferire un maggior peso alle discipline umanistiche, da definire, se possibile tra quelle a scelta oggi presenti all'ultimo anno del percorso formativo. Ciò determinerebbe un sicuro e proficuo arricchimento culturale soprattutto per gli allievi che intendono dedicarsi professionalmente ad attività inerenti il progetto di Restauro.

Agli ex colleghi del Dipartimento di Architettura consiglierei, invece, di coordinare efficacemente i corsi delle materie scientifiche che si insegnano agli allievi nei vari anni e nei diversi corsi di laurea o di laurea specialistica, che in alcuni casi risultano slegati dagli altri insegnamenti. Dunque, ad esempio, è utile favorire le attività laboratoriali congiunte di Restauro e di Tecnica delle costruzioni, ma occorre anche ben collegare ai contenuti di Tecnica quelli degli altri corsi scientifici previsti negli anni precedenti.

In tal modo il percorso formativo sarà caratterizzato, nel suo iter, da una reale coerenza congruente con gli obiettivi da raggiungere.

D'altra parte, è appena il caso di ricordare che al pari dell'Ingegnere l'architetto può svolgere attività professionali che implicano progettazioni strutturali e consolidamenti.

3. Norme e competenze professionali nel Restauro:
PFTE, progetto esecutivo, direzione lavori

Sembra utile, a questo punto, citare qualche riferimento normativo.

Innanzitutto, si richiamano le definizioni presenti nel Codice dei beni culturali e del paesaggio (D.Lgs. 42/2004) alle quali si è pervenuti dopo un intenso dibattito scientifico che si è sviluppato nel corso del XX secolo, anche tenendo conto degli indirizzi a livello internazionale.

La *Conservazione* « è assicurata mediante una coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro».

Per *Prevenzione* «si intende il complesso delle attività idonee a limitare le situazioni di rischio connesse al bene culturale nel suo contesto».

Per *Manutenzione* «si intende il complesso delle attività e degli interventi destinati al controllo delle condizioni del bene culturale e al mantenimento dell'integrità, dell'efficienza funzionale e dell'identità del bene e delle sue parti».

Per *Restauro* «si intende l'intervento diretto sul bene attraverso un complesso di operazioni finalizzate all'integrità materiale ed al recupero del bene medesimo, alla protezione ed alla trasmissione dei suoi valori culturali. Nel caso di immobili situati nelle zone dichiarate a rischio sismico in base alla normativa vigente, il restauro comprende l'intervento di miglioramento strutturale».

E' opportuno sottolineare come tra tali definizioni vi è quella di Restauro, di certo condivisibile, ma questa è carente circa la prescrizione di criteri e regole – largamente condivisi dagli studiosi universitari - sul come progettare il restauro. Ne deriva una palese anomalia: nel momento in cui il progettista richiede l'autorizzazione alla Soprintendenza per un suo progetto, il parere di questo ente di tutela può essere discrezionale e mettere in discussione la bontà delle scelte del tecnico.

Proprio per questo motivo, pertanto, la forte preparazione culturale del progettista ingegnere edile-architetto, che si iscrive nell'Albo degli Architetti, può essere utile ad argomentare le motivazioni delle scelte frutto del proprio prodotto intellettuale.

Circa poi la 'distinzione delle competenze di ingegneri e architetti' nel campo specifico del restauro, va ricordato che per decenni si è dibattuto nelle sedi dei Consigli degli Ordini, nel Consigli nazionali, nei TAR fino a quando il Consiglio di Stato ha messo fine a una serie di incertezze precisando con una Sentenza del 2014 la competenza esclusiva degli iscritti all'Albo degli Architetti nelle attività di progettazione e direzione lavori di restauro di edifici vincolati.

Ciò significa che gli ingegneri sono esclusi dalle suddette attività di restauro dei beni vincolati, ma occorre ricordare che tali beni immobiliari costituiscono una percentuale infinitesima rispetto al costruito storico. Pertanto, è evidente che:

- I laureati in Ingegneria edile - Architettura possono iscriversi anche all'Albo degli Architetti e svolgere attività di progettazione e direzione lavori di restauro a pieno titolo.

- Il carattere pluridisciplinare di un processo complesso quale è quello legato ad operazioni di restauro dei beni culturali implica che gli ingegneri di diverse formazioni specialistiche possono e devono fornire – e ne hanno specifica competenza – un indispensabile apporto, dialogando costruttivamente con chi ha la funzione di coordinamento, ovvero l' architetto, che spesso ha difficoltà di confrontarsi in quanto nel suo percorso formativo sono state da decenni cancellate materie importanti come la Chimica, la Fisica, gli Impianti tecnologici, la Topografia ecc.

Altro aspetto di rilievo è costituito dal fatto che gli ingegneri specialisti condividano il fine ultimo di simili attività, ovvero la conservazione dei beni culturali e sappiano applicare le loro conoscenze specialistiche alle tematiche poste sia dalla conservazione dell'autenticità e dei valori documentari del bene tutelato.

Si tratta spesso per tali ingegneri specialisti di dover adeguare il proprio *know how* alle esigenze specifiche e non applicare metodi standardizzati e sperimentati sulle nuove costruzioni: dunque, anche loro dovranno, consapevoli del loro ruolo, trovare soluzioni efficaci tecnicamente ma anche compatibili con le esigenze conservative.

Ancora, va evidenziato che nella prassi non può non tenersi in conto il nuovo Codice degli Appalti (D.Lgs 36/2023) con riferimento a quanto previsto per la progettazione, la diagnostica, i beni culturali anche archeologici. Si è semplificato il processo progettuale, riducendolo al Progetto di fattibilità tecnica ed economica ed al Progetto esecutivo. In sostanza, considerato che i tempi di attuazione delle opere pubbliche sono sempre più ristretti – pena la perdita dei finanziamenti – dopo aver elaborato il PFTE le Amministrazioni pubbliche emettono bandi di gara per 'appalti integrati' e, dunque, i progettisti vengono scelti dalle Imprese.

4. Gli Ingegneri e la Rigenerazione urbana

Ancora, vorrei sottolineare un altro aspetto significativo che fa emergere il ruolo degli Ingegneri nei processi quanto mai attuali di Rigenerazione urbana, in particolare in Campania, che coinvolgono il patrimonio edilizio e le risorse paesaggistiche. Basta riferirsi al recente volume *Patrimonio culturale e naturale. Rigenerazione urbana*, a cura di chi scrive e di A. Castagnaro, nel quale si affrontano le sfide della contemporaneità con autorevoli apporti tecnici di esperti e di accademici. Si segnala che un terzo dei contributi è fornito da Ingegneri, che partecipano all'intenso dibattito in corso fornendo significativi indirizzi metodologici ed applicativi in tema di città storiche e paesaggio, di miglioramento sismico, di efficientamento energetico, di conservazione e restauro del paesaggio, anche costiero, di verde urbano (fig.18).

Nel citato volume il tema della Rigenerazione urbana è stato affrontato con approccio innovativo, con rigore ma anche con spirito pragmatico – proprio della cultura ingegneristica – e ciò ha riguardato un territorio straordinario, quello campano, con problematiche complesse che richiede apporti e declinazioni

17. Il volume *Roberto Di Stefano. Filosofia della conservazione e prassi del restauro* (2013).

18. Il volume *Patrimonio culturale e naturale della Campania. Rigenerazione urbana* (2023).

proprie di tanti saperi, in primis degli Ingegneri, senza sottovalutare quelli inerenti la sfera del Sociale. Fra i tanti aspetti affrontati vi è stato quello dell'esigenza di una svolta, di un cambiamento di paradigma, di un approccio innovativo alla Rigenerazione urbana con una visione integrata ed illuminata dello sviluppo. Tutti i saperi umanistici e scientifici devono svolgere la loro parte e, per quanto sin qui espresso, la Cultura dell'Ingegneria si impone senza dubbio in virtù delle sue articolate e molteplici specializzazioni che si devono arricchire anche di contenuti che le scienze umane offrono.

I campi d'azione indagati hanno riguardato le città storiche ed il Paesaggio storico urbano, i borghi abbandonati o semiabbandonati delle zone interne della regione, la filiera delle costruzioni, i Siti Unesco in Campania, i territori agricoli ed il verde urbano, le coste ed il mare: ambiti tutti nei quali l'apporto specialistico e propositivo ha dato frutti molto importanti.

Dunque, anche in questa importante e recente iniziativa – promossa dal Distretto Rotary 2101 – la Cultura dell'Ingegneria ha espresso le sue valenze e le sue potenzialità nel campo dei beni culturali.

Considerazioni finali

In conclusione, è sul 'campo', ovvero nella Prassi, sia nelle attività del 'cantiere della conoscenza', sia prima che dopo l'avvio delle opere, che di Progetto – dal Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica a quello Esecutivo – che della direzione lavori, e poi di esecuzione e collaudo, che si misura e si esalta la Cultura dell'Ingegneria nelle attività inerenti al restauro e la valorizzazione dei beni culturali immobili e mobili, e più in generale del 'Paesaggio Storico Culturale'.

Le esperienze di ricerca e le applicazioni illustrate dagli esperti nel presente volume confermano tale asserzione.

Riferimenti bibliografici

AVETA A.

- *Materiali e tecniche costruttive tradizionali nel Napoletano, Note per il restauro architettonico*, Arte Tipografica, Napoli 1987

- *Restauro e Conoscenza strutturale*, Arte Tipografica, Napoli 1989

- *Tecniche per il restauro. Problemi di umidità negli edifici monumentali*, Arte Tipografica, Napoli 1996

- *Consolidamento e restauro delle strutture in legno*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2013

AVETA A., AMORE R., MEGNA C.

- *Il colore delle città. Note per il restauro architettonico delle cortine edilizie napoletane,* Arte Tipografica, Napoli 1993

BENVENUTO E.

- *La Scienza delle* Costruzioni *ed il suo sviluppo storico*, Edizioni di Storia e Letteratura, Roma 2010

Castel Capuano. La cittadella della Cultura giuridica e della Legalità. Restauro e valorizzazione, a cura di A. Aveta, Elio de Rosa Editore, Napoli 2013

Castel Nuovo in Napoli. Ricerche integrate e conoscenza critica per il progetto di restauro e di valorizzazione, a cura di A. Aveta, artstudiopaparo, Napoli 2017

Diagnostica e Conservazione. L'insula 14 del Rione Terra, a cura di A. Aveta, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli 2008

I libri antichi nella Facoltà di Ingegneria di Napoli nel bicentenario della Scuola di Applicazione (1811-2011), a cura di A. Buccaro, A. Maglio, Cuzzolin Editore, Napoli 2012

Patrimonio culturale e naturale della Campania. Rigenerazione urbana, a cura di A. Aveta e A. Castagnaro, Editori Paparo e fedOAPress, Napoli 2023

Proposte per il futuro di Napoli e del suo hinterland, a cura di A. Aveta, Editori Paparo, Napoli 2019

Restauro e Consolidamento, a cura di A. Aveta, S. Casiello, F. La Regina. R. Picone, Atti del Convegno 'Restauro e consolidamento dei beni architettonici ed ambientali. Problematiche attuali' (Napoli 31 marzo-1 aprile 2003), Mancosu Editore, Roma 2005

Restauro strutturale e riduzione del rischio sismico. Teorie, tecniche e materiali innovativi per il consolidamento, a cura di A. Aveta, Editori Paparo, Napoli 2019

Rigenerazione e riqualificazione urbana, a cura di A. Aveta e A. Castagnaro, artstudiopaparo, Napoli 2015

Roberto Di Stefano. Filosofia della conservazione e prassi del restauro, a cura di A. Aveta e M. Di Stefano, Arte Tipografica Editrice, Napoli 2013

SPARACIO R.

- *La Scienza e i tempi del costruire*, Utet, Torino 1999

- *Il recupero statico degli immobili del centro storico di Napoli*, Quaderni della Didattica, Università degli Studi Suor Orsola Benincasa, Napoli 2009

Storia dell'Ingegneria, a cura di S. D'Agostino, Atti del 3° Convegno Nazionale (Napoli 19-20-21 aprile 2010), Cuzzolin Editore, Napoli 2010. Tutti i contributi nei convegni, organizzati dallo straordinario studioso napoletano di Scienza delle Costruzioni sulla storia dei diversi saperi specialistici sono stati pubblicati e ad essi si rinvia per l'apporto fondamentale che hanno fornito nel ricostruire l'evoluzione delle diverse discipline di Ingegneria

VIGGIANI C.

- *Ingegneria Geotecnica e patrimonio culturale: la Torre di Pisa*, in 'La Cultura dell'Ingegneria per la conservazione del patrimonio e del paesaggio', a cura di A. Aveta, Editori Paparo, Napoli 2023, pp. 100-110

Strategie di tutela, conservazione, restauro e fruizione nel Parco Archeologico di Pompei: il contributo dell'ingegneria ad un approccio multidisciplinare

Vincenzo Calvanese

Nell'ambito delle articolate e complesse attività di gestione ordinaria e straordinaria del Parco Archeologico di Pompei, uno dei siti della cultura più visitati d'Italia, inserito nella lista del Patrimonio UNESCO dell'Umanità[1], il contributo della specializzazione ingegneristica è risultato negli ultimi anni determinante per implementare in maniera efficiente tutte le attività di programmazione, monitoraggio, realizzazione, collaudo e rendicontazione dei numerosi interventi di manutenzione, messa in sicurezza, restauro, tutela e conservazione del patrimonio archeologico di tutti i siti del Parco[2].

L'area archeologica di Pompei, Ercolano e Torre Annunziata trova nel sito pompeiano (fig. 1) il suo massimo attrattore, sia per dimensione areale (66 ettari intra-moenia di cui circa i 2/3 già scavati e per la gran parte finalmente fruibili), che per complessità ed articolazione (oltre 8 ettari di spazi pubblici - strade e piazze - circa 36 ettari di edificato archeologico, suddiviso in ben 1221 edifici censiti, per un numero di ambienti superiore ai 10.000, abitati al 79 d.C. da almeno 20-30.000 Pompeiani).

Con il presente contributo si intende sinteticamente presentare le strategie che si stanno mettendo in campo a Pompei in questi ultimi anni sotto la guida del Di-

[1] *Sito seriale UNESCO 829*, *Aree archeologiche di Pompei, Ercolano, Torre Annunziata* è stato inserito nella lista dei siti Patrimonio Mondiale dell'Umanità il 6 dicembre 1997 sulla base di tre *criteri culturali* definiti dal Comitato del Patrimonio Mondiale, ovvero:

• Criterio iii: «Rappresentare una testimonianza unica o eccezionale di una tradizione culturale o di una civiltà vivente o scomparsa».

• Criterio iv: «Offrire un esempio eminente di un tipo di costruzione o di un complesso architettonico o di un paesaggio che illustri un periodo significativo della storia umana».

• Criterio v: «Costituire un esempio eccezionale di un insediamento umano tradizionale o di un utilizzo del territorio che sia rappresentativo di una o più culture, specialmente se divenuto vulnerabile per l'impatto di cambiamenti irreversibili».

[2] Il *Parco Archeologico di Pompei*, istituto autonomo del Ministero della Cultura, ha competenza territoriale, oltre che sull'area archeologica di Pompei, sull'*Antiquarium* di Boscoreale (Napoli), sul Castello di Lettere (Napoli), sul Parco archeologico preistorico di Longola in Poggiomarino (Napoli), sull'ex Real Polverificio borbonico a Scafati (Salerno), sulla Reggia del Quisisana a Castellammare di Stabia (Napoli), sugli Scavi archeologici di *Oplontis* (Villa A o di Poppea e Villa B o di Lucius Cassiu Tertius) a Torre Annunziata (Napoli), sugli Scavi archeologici del'antica *Stabiae* (Villa Arianna e Villa San Marco) a Castellamare di Stabia (Napoli), nonché sul sito archeologico di Villa Regina a Boscoreale (Napoli). (http://pompeiisites.org/).

1. Vista zenitale del sito di Pompei: volo di drone di proprietà del PAP, inserita in foto aerea Google Earth.

rettore Generale Gabriel Zuchtriegel. Nel febbraio 2021 Zuchtriegel succedeva al prof. Massimo Osanna che era stato nominato Direttore Generale dei Musei italiani, dopo essere stato per sette intensi anni alla guida del Parco di Pompei attuando una gestione dell'intervento straordinario del Grande Progetto Pompei[3], universalmente riconosciuta come vincente e portata ad esempio come una buona pratica di spesa di Fondi Europei.

Le nuove strategie sono rigorosamente implementate con un approccio di tipo 'ingegneristico', seppur condiviso ed articolato in una perfetta sinergia multidisci-

[3] *Il Grande Progetto Pompei* nasce da una azione del Governo italiano che, attraverso il decreto legge n. 34/2011 (art. 2), ha inteso rafforzare l'efficacia delle azioni e degli interventi di tutela nell'area archeologica di Pompei mediante la elaborazione di un Programma straordinario ed urgente di interventi conservativi, di prevenzione, manutenzione e restauro. Con la Decisione n. C (2012) 2154 del 29 marzo 2012 fu finanziato quale Grande Progetto UE a valere su risorse del Programma Operativo Interregionale 'Attrattori culturali, naturali e turismo' FESR 2007-20013 (POIn). Con decisione n. C (2016) 1497 del 10 marzo 2016, inoltre, fu recepita la richiesta del Governo Italiano, volta ad ottenere la c.d. fasizzazione, determinandone l'articolazione in due fasi. La prima fu completata il 31 dicembre 2015 a valere – come anzidetto – su fondi FESR 2007 – 2013; la seconda si è conclusa a fine 2022 ed è stata finanziata con risorse del PON 'Cultura e Sviluppo' – FESR 2014 – 2020. Il Grande Progetto Pompei si avvalse dell'Intesa Inter-istituzionale Legalità e Sicurezza del 20 gennaio 2012 tra il Ministro della Coesione, il Ministro dei Beni e delle Attività Culturali, il Ministro dell'Interno, il Ministro dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca ed il Presidente dell'Autorità di Vigilanza sui contratti pubblici per la sicurezza degli appalti, attestata dal Protocollo di Legalità del 5 aprile 2012. L'intervento diviso in 5 grandi Piani ha investito in 76 diversi interventi un importo superiore ai 105 milioni di euro inizialmente stanziati, venendo definito, da più parti, una *best practice* di spesa di fondi comunitari per obiettivi raggiunti e capacità di spesa e rendicontazione in tempi certi.

2. Vista del peristilio della Casa dei Vettii dopo i recenti restauri.

plinare (che contraddistingue l'agire del Parco Archeologico di Pompei contemperando le plurime competenze archeologiche, architettoniche, ingegneristiche, di restauro, funzionali, gestionali, economiche, ecc.), affinché non ci sia più bisogno in futuro di un altro Grande Progetto Pompei. Questo intervento straordinario è stato attuato con fondi pubblici della Comunità Europea e del Governo nazionale e si è reso necessario a causa di un serio aggravamento delle condizioni di abbandono e di degrado del sito archeologico: allorquando ci fu il crollo della *Schola Armaturarum* nel novembre 2010 con cui si raggiunse il picco di massima visibilità negativa in relazione alla gestione della tutela nell'antica città Pompeiana[4].

Oggi, dopo la conclusione dell'operazione eccezionale che ha cambiato il volto e l'immagine di Pompei[5] e terminata la difficile fase pandemica degli anni 2020-2022, il sito vive una nuova fase idilliaca in termini di qualità e quantità dell'offerta per la fruizione e di aumento costante dei flussi di visitatori, anche

[4] Di questo ne dà conto Massimo Osanna in *Pompei al tempo del Grande Progetto. 2012-2018,* all'interno del volume *Restaurando Pompei - Riflessioni a margine del Grande Progetto,* a cura di M. Osanna e R. Picone, L'Erma di Bretschneider, Napoli 2018.

[5] Per ogni ulteriore approfondimento sugli interventi del Grande Progetto Pompei si consulti il citato volume *Restaurando Pompei.*

grazie al richiamo delle tante scoperte, novità e riaperture al pubblico di *Domus* negate per problematiche conservative e manutentive per lunghi periodi alla visita pubblica. Tra queste è emblematico l'esempio della *Casa dei Vettii*, riaperta alla fruizione dei visitatori di tutto il mondo alla presenza del Ministro della Cultura, Gennaro Sangiuliano, nel gennaio 2023, dopo decenni di chiusura ed un lungo e complesso intervento di restauro integrale della casa (fig. 2) che ne ha resuscitato l'originario splendore[6].

In ogni caso però, per motivi legati alla vastità, unicità e complessità del sito, il superamento dell'emergenza, legata al pericolo di un nuovo avanzare incontrollato del degrado, potrà avvenire soltanto con un insieme di azioni coordinate e continuative finalizzate alla gestione del monitoraggio, della manutenzione programmata, dei restauri e di un accorto coordinamento degli imponenti flussi di visitatori, che risultano essere sempre più rilevanti nell'attuale fase post pandemica e di importante espansione turistica che interessa tutto il nostro Paese e particolarmente la Regione Campania e l'area napoletana nella quale anche Pompei è collocata.

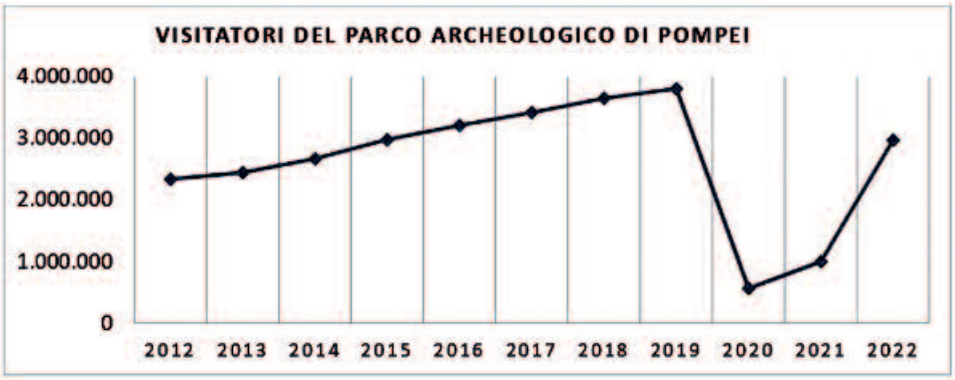
Il trend dell'aumento dei numeri delle presenze dei visitatori (fig. 3) è al tempo stesso incoraggiante ed emblematico: nel settembre del 2023 – precisamente il giorno undici – il numero dei visitatori del Parco Archeologico, con ben 3.022.084 ingressi, aveva già superato il numero complessivo totalizzato nel 2022, pari a 2.972.159 turisti.

Dai dati ufficiali del Servizio Statistica della Direzione Generale Bilancio del Ministero della Cultura[7], si possono ricavare i seguenti risultati: l'anno in assoluto con più entrate resta ad oggi ancora il 2019 (subito prima dell'avvento della pandemia da Covid 19 ed in piena ondata di interesse a valle dei successi e delle inaugurazioni post-cantieri del Grande Progetto): in quell'anno a Pompei sono arrivati ben 3.935.791 visitatori per un incasso complessivo proveniente dalla bigliettazione superiore a 41 milioni di Euro, classificando Pompei come terzo sito della cultura più visitato d'Italia dopo il Colosseo e le Gallerie degli Uffizi. Gli anni della pandemia sono falsati dai lunghi periodi di chiusura in cui, per motivi di contenimento del contagio, non era possibile visitare il sito archeologico, anche se le attività di controllo e di manutenzione non si sono mai fermate: nel 2020 solo 603.422 persone hanno potuto o voluto visitare Pompei, mentre nel 2021 i visitatori hanno di poco superato il milione di unità. Quello che è interessante, però, al di là dei numeri assoluti sono le tendenze, come si evince dal grafico (fig. 4) che indicano un forte trend in aumento che va avanti dal 2012 (anno in cui si cominciarono ad attivare i primi cantieri dei lavori del Grande Progetto) con la sola discontinuità degli anni 2020-2021. Complessivamente dal 2000 al 2022

[6] Il recente intervento di restauro è stato descritto dall'autore, dai progettisti e da chi lo ha realizzato nel volume: *Il restauro della Casa dei Vettii,* a cura di A. Sodo e G. Zuchtriegel, Arte'm, Napoli 2023.

[7] http://www.statistica.beniculturali.it/

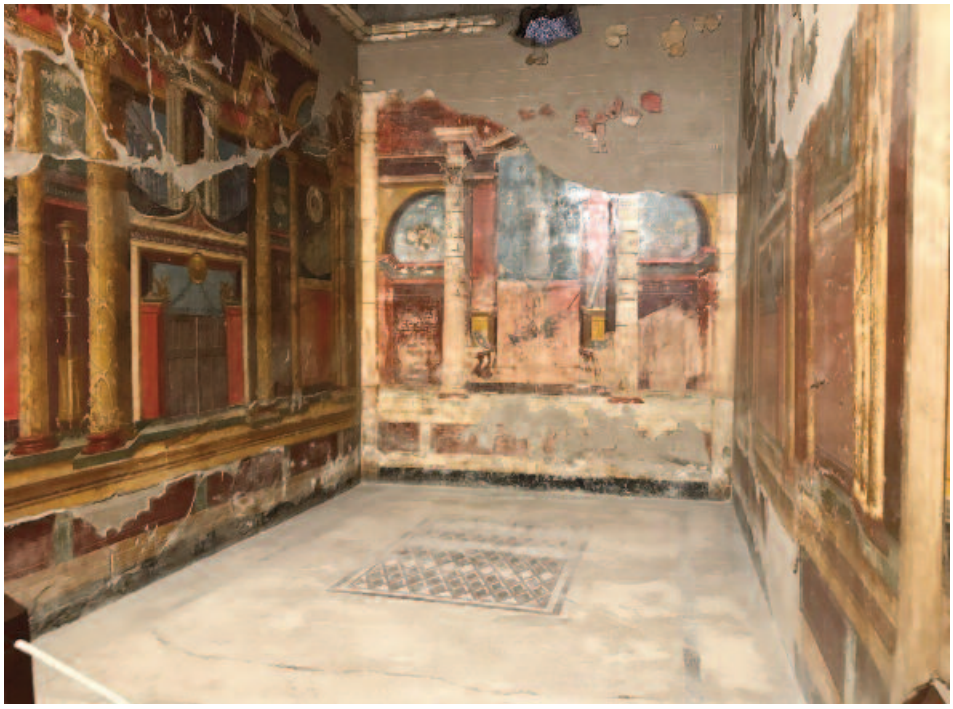
3: Vista di via dell'Abbondanza in un giorno qualunque di apertura del sito.



4. Andamento storico del numero di visitatori del Parco Archeologico di Pompei (elaborazione dell'autore).

hanno visitato Pompei circa 26 milioni di persone per una media di circa un milione e duecentomila turisti all'anno.

A fronte di un tale interesse ed apprezzamento da parte del pubblico, da sempre appassionato ed affascinato dalla 'più viva delle città morte', si stagliano problematiche gestionali, organizzative e pratiche connesse con la gestione dei flussi di

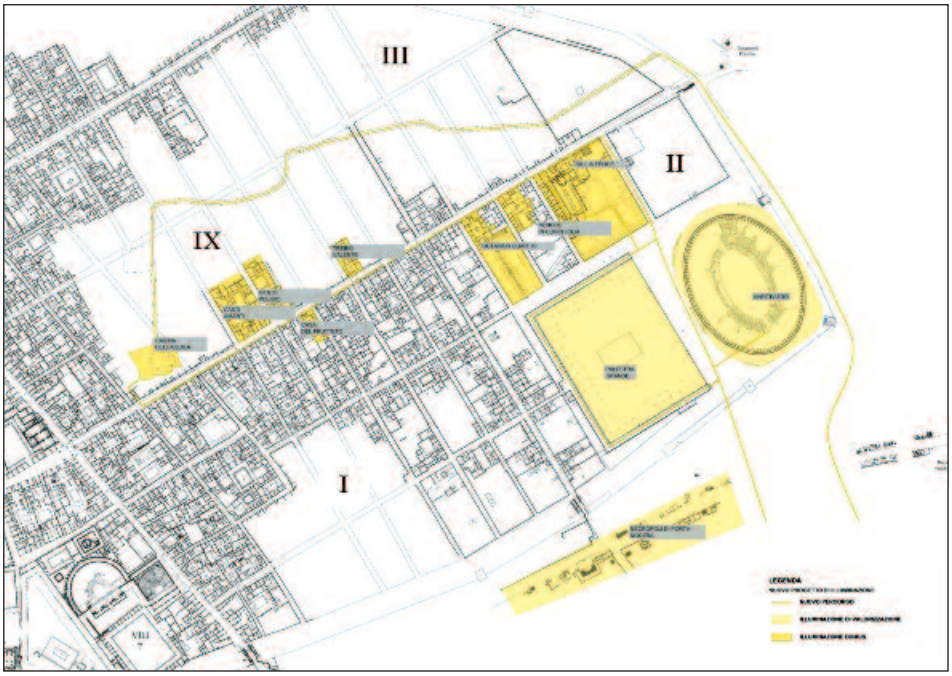


5. Vista del Triclinio illuminato della Villa di Poppea ad Oplontis - Torre Annunziata.

visitatori (nel 2023 in media 10-15.000 ingressi al giorno con picchi in occasione delle 'domeniche gratuite' di ben 29.942 presenze in data 02/10/2022 ed addirittura di 31.203 presenze in data 01/10/2023, in concomitanza – nella prima domenica di ottobre – anche con la Supplica alla Beata Vergine del Rosario di Pompei, evento religioso che attrae decine di migliaia di fedeli nella città Mariana: in queste occasioni il sito di Pompei supera di gran lunga gli altri musei o parchi italiani e si classifica come luogo della cultura più visitato d'Italia.

Pertanto, all'aumento del numero dei visitatori, devono far fronte politiche e strategie di gestione e valorizzazione del sito che puntino a rendere sostenibili tali incrementi, affinché l'eccessiva pressione antropica non si trasformi in criticità ingestibili e, dunque, costringendo a perniciosi contingentamenti e/o a coercitive chiusure del Parco in caso di sovraffollamento incontrollato, sia per motivi di sicurezza dei visitatori, che per la protezione delle strutture antiche da possibili danni causati dall'eccessivo concentramento di persone.

Tali strategie, messe in atto secondo una previsione di breve-medio periodo, si possono sintetizzare in due grandi categorie: aumento delle ore di apertura e differenziazione dei percorsi, distribuendo quanto più possibile la massa dei turisti all'interno del già pur vasto sito archeologico.



6. Planimetria preliminare dei nuovi percorsi ed aree da illuminare (Elaborazione U.T. PAP).

In particolare, per raggiungere il primo obiettivo, già da qualche anno sono stati previsti eventi di valorizzazione con accesso serale al Sito di Pompei ed agli altri siti territoriali del Parco: Oplontis (fig. 5), Villa San Marco e Villa Arianna a Stabia, Villa Regina a Boscoreale. Per tali eventi però gli impianti di illuminazione sono in parte provvisori e con periodicità limitata ad alcune date specifiche, opportunamente pubblicizzate e con un notevole successo di pubblico.

Per il futuro, invece, si sta progettando un impianto stabile di illuminazione notturna (fig. 6) che possa consentire, verificandone preliminarmente anche la sostenibilità e la convenienza, il prolungamento dell'orario delle visite a ben oltre il tramonto (attualmente il Parco chiude alle ore 17:00 nei mesi invernali ed alle ore 19:00 nei mesi estivi). Un impianto stabile e sostenibile che sarà alimentato in gran parte da fonti alternative (tegole fotovoltaiche, come quelle già installate sulla copertura della casa dei Vettii e sul peristilio della Villa dei Misteri, vetrate fotovoltaiche, come quelle già inserite nei lucernari della grande copertura in corso di completamento sull'Insula dei Casti Amanti ed altri sistemi compatibili con le esigenze di tutela e sostenibilità). L'uso delle nuove tecnologie LED a basso consumo e senza alcun impatto sulle superfici decorate, nonché la possibilità di modulare intensità, colore e direzione dei fasci luminosi, consentirà ai visitatori serali di Pompei di vivere una nuova esperienza di immersione nell'antico, con

suggestioni diverse e, in alcuni casi, ancora più intense rispetto alle visite diurne.

La seconda strategia per ridurre l'impatto dell'aumento dei visitatori sulle strutture archeologiche si persegue con una serie coordinata di azioni che vanno dalla differenziazione dei percorsi con itinerari tematici ed *APP* multimediali per indirizzare al meglio i visitatori, al mantenimento della percorribilità dell'intera rete viaria del sito, nonché al mantenimento del massimo numero di *Domus* possibile aperte e visitabili (compatibilmente con le esigenze di gestione del personale di vigilanza e della conservazione, per cui si ricorre anche a rotazioni e/o turnazioni delle aperture, per distribuire la pressione dei turisti nella maniera più omogenea possibile).

Tutte queste attività vivono ancora una volta di un approccio 'ingegneristico' di riduzione della pressione antropica sui monumenti: la pressione è, per definizione, una forza (il numero dei visitatori che si auspica continui a crescere) diviso una superficie (il totale delle aree visitabili) in un dato periodo di tempo (l'intervallo delle ore di apertura). Ebbene, occorre quindi aumentare i fattori al denominatore per ridurre la pressione specifica: per far ciò occorre aumentare la superficie delle aree (intese anche come singoli monumenti o *Domus*) fruibili al pubblico, invogliando i visitatori a differenziarsi nella visita, in funzione delle loro diverse curiosità ed esigenze; inoltre occorre, per quanto possibile, aumentare le ore di apertura del sito, come si sta facendo con l'implementazione di percorsi illuminati e visite notturne.

Per fare tutto questo, preliminarmente e propedeuticamente, occorre che il livello di conservazione e restauro dell'intero Sito permanga all'ottimo stato conseguito faticosamente a valle degli interventi areali del Grande Progetto Pompei. Pertanto, il primo obiettivo dell'Amministrazione del Parco è quello della tutela e conservazione dell'immenso patrimonio archeologico, architettonico ed artistico: *unicum* universalmente riconosciuto della città di Pompei, preservata per quasi due millenni sotto i materiali vulcanici dell'eruzione pliniana del 79 dopo Cristo, un po' per volta disvelata e via via riscoperta dal 1748 ad oggi.

Questo patrimonio, vulnerabile e fragilissimo, va attentamente controllato e monitorato per essere sottoposto a cure continue, consapevoli e specialistiche, che lo tramandino ai posteri nelle migliori condizioni possibili.

Facendo tesoro dell'esperienza estremamente positiva del Grande Progetto, il Parco Archeologico di Pompei ha pertanto individuato nel 'monitoraggio e nella manutenzione programmata' una delle azioni chiave per trasformare i favorevoli risultati ottenuti negli anni scorsi in un prossimo modello di governo sostenibile sotto il profilo conservativo, economico e gestionale ed in grado di garantire nel futuro una maggiore sicurezza e uno stato di conservazione più stabile e decoroso rispetto alla disastrosa situazione antecedente al 2012.

La prima fase di approccio sistematico al tema è legata alla capacità di avere la conoscenza 'in tempo reale' delle condizioni del sito: tale obiettivo è perseguito

a più livelli e con differenti gradi di approssimazione e consiste nel nostro sistema di monitoraggio.

Si parte, alla scala maggiore, dal 'monitoraggio satellitare', consistente nella rielaborazione delle immagini radar dalla costellazione di satelliti, in continuità con l'attività già svolta grazie ad un precedente accordo attuativo del Ministero per i beni e le attività culturali (oggi MIC) con la società e-Geos del Gruppo Leonardo - Finmeccanica. Dal 2014 quest'accordo ha permesso di acquisire i dati delle immagini radar dalla costellazione di satelliti COSMO-SkyMed e, grazie alla collaborazione con ISPRA, è stato possibile evidenziare alcuni elementi del Parco cui porre maggiore attenzione. Le attività svolte in concorso con ISPRA e E-GEOS hanno completato quanto già realizzato dal 2015, permettendo l'analisi e l'interpretazione dei dati di monitoraggio satellitare interferometrico del costruito e l'analisi geomorfologica e geotecnica dei fronti non scavati nell'area archeologica, prima dell'intervento risolutivo della 'messa in sicurezza dei fronti di scavo' (GPPM).

L'impiego di tale sistema consente di ottenere il catalogo dei fenomeni pregressi di instabilità e può servire a verificare quanto e come la tecnica di monitoraggio interferometrico satellitare sia in grado di identificare possibili andamenti deformativi pre-collasso a fini predittivi, oltre che a valutare la stabilità delle coperture presenti nell'area archeologica e l'efficacia degli interventi di puntellatura delle strutture murarie. Il rilevamento geomorfologico può, inoltre, evidenziare quelle aree più instabili dove indirizzare un eventuale monitoraggio strumentale aggiuntivo e porre maggior attenzione.

Il secondo livello è quello del 'monitoraggio sul campo', implementato con modalità esecutive e gestionali innovative e tecnologiche. L'ottimizzazione della procedura di monitoraggio mediante attività ispettive dei tecnici del Parco è svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Salerno, con il quale è stato siglato un accordo programmatico di collaborazione. Dallo studio teorico che ha portato alla predisposizione di schede *ad hoc* per il rilevamento, la classificazione e la quantificazione del danno, si è passati, con il supporto della società *VisionLab*, allo sviluppo di una APP dedicata per il monitoraggio speditivo del sito, definendo una piattaforma per le attività che possa dialogare seguendo le metodologie, gli approcci e le funzioni già esistenti all'interno del Sistema Informativo Pompei. Sfruttando in particolare la base cartografica e topografica sviluppata all'interno del GIS, la APP si aggancia ai referenti topografici e ai tracciati schedografici già in essere all'interno del Sistema Informativo del Parco, precedentemente implementato, sotto il nome di *Piano della Conoscenza* (un rilievo completo ad alta definizione dell'intero patrimonio archeologico ed architettonico dell'antica Pompei) finanziato con i Fondi Europei del Grande Progetto.

Il sistema informatico sviluppato, inoltre, permette di lavorare su due metodologie di monitoraggio:

- *Monitoraggio orizzontale*: viene effettuato con cadenze mensili al di sopra di ortofotopiani prodotti da drone. Permette di valutare variazioni e fenomeni di degrado disposti su coperture, creste di muri e superfici piane.
- *Monitoraggio puntuale*: viene effettuato direttamente sul campo e permette di registrare in maniera rapida tutti quei fenomeni di degrado che si riscontrano sugli elementi architettonici del Parco.

Infatti, tra i due livelli di monitoraggio sopra descritti, se ne inserisce un terzo reso possibile dalla disponibilità di strumentazioni tecnologiche all'avanguardia (Droni ad ala fissa di ultima generazione) che effettuano, sotto il controllo di personale adeguatamente formato, voli di ricognizione e foto-rilevamento mensili con restituzione di orto-fotopiani ad alta definizione, utilissimi sia per le attività di verifica dell'avanzamento dei cantieri, che per la verifica delle condizioni del patrimonio verde, che, infine, per rilevare anomalie e/o criticità anche confrontando le immagini prodotte con quelle dei mesi precedenti.

A valle del monitoraggio seguono gli interventi risolutivi delle criticità rilevate con le metodologie sopra descritte, anch'essi organizzati scientificamente su tre livelli:

- *Manutenzione Ordinaria*
  Viene programmata ed eseguita con il supporto del personale tecnico ed operativo della Società *in house* del MIC: *ALES* (Arte Lavoro E Servizi SpA), che lavora sotto il coordinamento del personale tecnico del Parco, occupandosi della manutenzione ordinaria specialistica e del mantenimento dei livelli di decoro del Sito);
- *Manutenzione Straordinaria*
  È legata ad operazioni di complessità e difficoltà maggiore, genericamente e semplicisticamente accorpate nell'accezione di 'manutenzione straordinaria e restauro'. In tale definizione sono compresi tutta una serie di interventi ed operazioni più o meno articolate che si ripetono con caratteristiche analoghe e attengono alle coperture (inerenti per esempio i manti impermeabilizzanti), alle murature (il rifacimento dei colmi murari, l'integrazione delle lesioni e/o delle lacune), agli apparati decorativi (operazioni di messa in sicurezza e restauro di superfici musive, apparati decorativi parietali, affreschi, elementi architettonici e/o decorativi) ed alle superfici di sacrificio (cocciopesti, battuti etc.).
  Vista la sostanziale ripetitività di tali operazioni, l'acquisita esperienza progettuale e realizzativa, consolidata in ormai un decennio di interventi posti in essere a partire dai grandi cantieri areali delle Messe in Sicurezza del Sito durante il Grande Progetto Pompei[8], l'attuale *governance* del sito ha predisposto

[8] Si fa riferimento ancora agli articoli inerenti le Messe in Sicurezza contenuti nel citato volume *Restaurando Pompei.*

7. Planimetria di Pompei con ubicazione dei cantieri attualmente in corso (elaborazione U.T. PAP su mappa di Pompei redatta dall'arch. S. Capecchi).

e messo in atto una nuova tipologia di appalto relativo alla Manutenzione Straordinaria mediante l'utilizzo dello strumento dell'*Accordo Quadro di Manutenzione*, applicando le metodologie del *facility management* al caso archeologico ed alla peculiarità del sito pompeiano, che si contraddistingue per essere una vera e propria città per estensione e complessità.

- *Interventi di restauro puntuali*
  Il Parco, nella sua qualità di Istituto ad Autonomia Speciale, approva nel proprio Consiglio d'Amministrazione annualmente la Programmazione triennale dei Lavori Pubblici, redatta dall'Ufficio Tecnico contemperando le disposizioni della Direzione, le proposte dei funzionari tecnici e le risultanze dei monitoraggi. Tutti questi interventi (fig. 7) vengono prima programmati, poi progettati (fig. 8) ed infine finanziati con fondi ordinari di Bilancio, ovvero attivando, mediante schedature e richieste ai diversi Uffici competenti, altre fonti di sostegno come Fondi PON Cultura e Sviluppo, fondi CIPESS, fondi legati al Contratto Istituzionale di Sviluppo Pompei-Vesuvio-Napoli, contributi della Direzione Bilancio del MIC, Fondi legati al Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (il PNRR in particolare sta contribuendo alla realizzazione di diversi progetti legati all'accessibilità, all'inclusione ed alla sostenibilità ambientale del Parco). Questo insieme di attività comprende una gestione manageriale di diverse decine di milioni di euro all'anno che, responsabilmente e consapevolmente, vengono impiegati per il restauro e la valorizzazione dello straordinario patrimonio che ci è affidato.

8. Planimetria di Pompei con ubicazione delle progettazioni in progress (elaborazione U.T. PAP su mappa di Pompei redatta dall'arch. S. Capecchi.

In conclusione, si ribadisce quanto un rigoroso approccio metodologico, culturalmente improntato ad una deterministica e sistematica impostazione ingegneristica – sia pur stemperata e/o indirizzata dal confronto continuo e proficuo con le diverse competenze ed istanze di tipo archeologico, architettonico, artistico, di tutela, di restauro ed economico-finanziaria – sia alla base dell'implementazione strategica che si sta oggi applicando al Parco Archeologico di Pompei, per garantire tutela, sostenibilità, conservazione, fruizione e valorizzazione del Patrimonio, proiettando un passato millenario verso un fulgido futuro.

Riferimenti bibliografici

AUTELITANO F., BRUNO N., MARTINELLI R., CALVANESE V., GARILLI E., BIANCARDO S.A., DELL'ACQUA G.,VEROPALUMBO R., ZERBI A., RONCELLA R., GIULIANI F.

- *The construction of a street never opened to traffic. The extraordinary discovery of pavement engineering in vicolo dei Balconi of Pompeii,* in 'Journal of Cultural Heritage' 54, 2022, pp. 108-117

BIANCARDO S.A., INTIGNANO M., VEROPALUMBO R., MARTINELLI R., CALVANESE V., AUTELITANO F., GARILLI E., GIULIANI F., DELL'ACQUA G.

- *BIM approach for stone pavements in Archaeological Sites: The case study of Vicolo dei Balconi of Pompeii,* in 'Transportation Research Interdisciplinary Perspectives' journal 17, 2023

CALVANESE V., ZAMBRANO A.

- *Le nuove coperture del complesso di Championnet*, in 'Restauri a Pompei. Dalle case di Championnet alla domus dei mosaici geometrici, a cura di C. Cicirelli, Arte'm, Napoli 2017

CALVANESE V., ZAMBRANO A.

- *Design aspects to repair and protect ancient houses in archeologic area: application to a domus in Pompeii*, negli Atti del Convegno Internazionale 42nd IAHS 2018 'The Housing for the dignity of mankind, Napoli 10-13 aprile 2018

CALVANESE V., ZAMBRANO A.

- *Conceptual Design Approach for Archaeological Structures, a Challenging Issue between Innovation and Conservation: A Studied Case in Ancient Pompeii,* 2021, rivista on line 'Buildings'

CALVANESE V.

- *Il restauro della Casa dei Vettii. Consolidamento strutturale e nuove coperture,* in '*Il restauro della Casa dei Vettii* ', a cura di A. Sodo e G. Zuchtriegel), Arte'm, Napoli 2023

CICIRELLI C., SPURIA L., CALVANESE V., VALENTINI M.

- *Il restauro del complesso di Championnet***,** in 'RESTAURANDO POMPEI. Riflessioni a margine del Grande Progetto' a cura di M. Osanna e R. Picone, L'Erma di Bretschneider, Napoli 2018

FUMO M., CALVANESE V., D'ANGELO G., TRINCHESE G.

- *Gli effetti dell'acqua nell'interramento e nel disvelamento delle aree archeologiche. Pompei, Pozzuoli e Nola: casi a confronto,* negli Atti del convegno 'Gli effetti dell'acqua sui beni culturali. Valutazioni, critiche e modalità di verifica', Venezia, 17-19 novembre 2020 – Edizione Arcadia Ricerche

OSANNA M., CALVANESE V., MAURO A., GRAVINA E.

- *Intervento di restauro per il recupero e la conservazione delle colonne dell'atrio tetrastilo della Casa del Fauno di Pompei*, in Atti del XII Convegno Internazionale AIES (Associazione Italiana Esperti Scientifici) 'Diagnosis for the Conservation e Valorization of Cultural Heritage', Cervino Edizioni, 2021

Conoscere per conservare. Il contributo dell'Ingegneria per il costruito storico e per i paesaggi culturali

Maurizio Di Stefano

1. Il contributo dell'ingegneria tra scienza, tecnologia e società

La riflessione più immediata sul tema del Seminario del 23 giugno 2023 *La cultura dell'ingegneria per la Conservazione del patrimonio e del paesaggio. Aspetti di metodo e prassi* è rivolta a considerare il contributo che deve essere riconosciuto alle scienze tecniche dell'ingegneria, considerando in questa sede soprattutto quelle impegnate nella Conservazione e valorizzazione del patrimonio e dei paesaggi culturali. Una riflessione questa che ha richiamato, abbastanza di recente, l'interesse di molti studiosi portandoli a condividere la trasversalità del percorso *Scienza, Tecnologia, Società (STS),* per un definitivo superamento della divisione tra cultura umanistica e scientifica, tra scienze umane e sociali, aprendosi maggiormente al contesto sociale e culturale più ampio che coinvolge il pensiero critico, l'impegno civico, le questioni formative di integrazione interdisciplinare.

La filosofia del *STS* coglie un'esigenza che riguarda da vicino le scienze tecniche e, quindi, gli atenei tecnici stimolati dalla ormai troppo tardiva cultura dello sviluppo sostenibile *(SOS)*. Aspetti entrambi *(STS-SOS)* che impegnano a formare soprattutto ingegneri capaci di esprimere da professionisti un giudizio critico con una consapevolezza etica delle tecniche e delle tecnologie (*new capacity building*). Infatti, negli ultimi 20 anni, molte sono state le iniziative di ricerca per aprire la formazione e la cultura dell'ingegneria ben oltre i 17 obiettivi dell'Agenda 2030, ma la strada è ardua. Non sempre una adeguata conoscenza del dibattito internazionale trova le sensibilità necessarie a cogliere i cambiamenti, accumulando così gravissimi ritardi di cui sono colpevolmente responsabili le politiche culturali nazionali.

Le scienze dell'ingegneria hanno avuto ed hanno un ruolo centrale in questo cambio di paradigma sociale (quindi culturale), e la conservazione del patrimonio culturale è una parte integrante di questo processo *SOS-STS.*

Ecco che il ruolo degli Ingegneri italiani nel campo dei beni culturali e del paesaggio li rende interpreti della conoscenza scientifica del Restauro nella nazione più ricca di patrimoni culturali al mondo. L'ingegnere si pone come 'mediatore' del rapporto tra tecnologia, sviluppo economico e società. Dunque, il compito dell'ingegnere in questo processo è sempre più attivo e articolato acquisendo nuove dinamiche della scienza come istituzione sociale centrale.

Anche per quanto concerne i campi di applicazione delle scienze tecniche, gli ingegneri sono sempre più attenti ed aperti al contesto sociale e alle esigenze di salvaguardia ambientale ed ecologica in una realtà divenuta oggi più globale: dai cambiamenti climatici alle nanotecnologie, dalle energie alternative all'intelligenza artificiale. Occorre quindi essere consapevoli di un nuovo corpo di conoscenze che Papa Francesco ha saputo ben sintetizzare nelle sue due encicliche *Fratelli tutti*, sulla fraternità ed amicizia sociale (3/10/2020)[1] e soprattutto, *Laudato Si*, sulla cura della casa comune (24/5/2015)[2] ritenuta di 'valenza storica' perché introduce il concetto di 'ecologia integrale' (cap. IV) con esplicito riferimento ad alcune risultanze di discipline scientifiche, riconoscendo 'un' ampia libertà accademica', ma richiamando la necessità dell'etica perché essa non venga sopraffatta dalla tecnica.

L'enciclica del 2015 affronta il tema dell'ecologia integrale con esplicito riferimento anche all'urbanistica, entrando profondamente nelle patologie delle città di oggi per la necessità di tutelare gli aspetti fondativi delle realtà urbane ambientali e di vita curando l'architettura dei luoghi e deplorando esplicitamente le architetture ripetitive e in serie (par. 113). L'estetica urbana (par. 151) deve assumere rilevanza in quanto «la bellezza salverà il mondo» (L'idiota di Dostoevskij), una bellezza troppo spesso messa in secondo piano da processi edilizi inconsapevoli ed ignoranti delle priorità e del valore del restauro urbanistico sempre più posto a rischio dalla confusa interpretazione dei principi di rigenerazione urbana. Tutelare la bellezza è dunque, azione necessaria per garantire la migliore qualità della nostra vita, che è, la nostra ricchezza.

A tal riguardo giova ricordare quanto riportato nella Dichiarazione di Davos del 2018 dove illustri esponenti della cultura europea hanno sottoscritto l'atto *Verso una cultura delle costruzioni di qualità per l'Europa*[3]. Ancora, il Papa mette in guardia dai fenomeni economico finanziari che spesso hanno annullato la qualità di vita e, quindi, in memoria del passato, hanno ingabbiato i centri storici che, nemmeno lontanamente, in questi nuovi interventi reinterpretano i valori che esprimono. Numerosi sono gli spunti che cogliamo negli aspetti di salvaguardia del 'patrimonio costruito' (par. 143) come elementi non solo simbolici di tutela di una consolidata identità (par.144) e per un miglioramento della qualità della vita (par. 143) fino a trattare i temi della mobilità sostenibile. Un richiamo all'urbanistica è rivolto alla gestione del territorio come elemento di etica sociale (par. 156) definita come 'regola d'oro' del comportamento comune. (par. 93). Battersi, quindi, perché non vengano meno i saldi riferimenti del passato e perché la città possa conservare e rappresentare il suo significato di risposta alla domanda di identità e perché possa stimolare sempre la ricerca e la creatività e non solo esasperato senso di ricerca della rendita fondiaria.

[1] *Fratelli tutti*, Enciclica di Papa Francesco, La fraternità e l'amicizia sociale, Roma 3/10/2020.
[2] *Laudato Si'*, Enciclica di Papa Francesco sulla Cura della Casa Comune, Roma 24/5/2015.
[3] *Towards a high-quality Baukultur for Europe*, Dichiarazione Ministri della Cultura Europei, Davos (CH) 2018.

Viene, quindi, dalle riflessioni di Sua Santità l'esigenza di 'conoscere per conservare' attraverso una visione consapevole complessiva di valori che devono guidare anche il contributo dell'ingegnere e dell'ingegneria, soprattutto quando rivolti al costruito storico ed ai paesaggi culturali.

Questi temi si riconoscono nei principi della disciplina del Restauro definito della 'Conservazione Integrata'. Roberto Di Stefano, tra i massimi esponenti della scuola dell'ingegneria napoletana, è tra i fondatori di questa teoria. Egli scrive: «La conservazione integrata dei beni culturali è elemento fondamentale del processo di sviluppo globale della società ed i principi che la ispirano – sia che si tratti di conservare l'antico che di costruire il nuovo – sono quelli che tendono a creare una nuova società, basata sull'equilibrio armonioso tra il progresso tecnico e l'elevazione intellettuale e morale dell'umanità. E poiché essa richiede come postulato la partecipazione più ampia e convinta di tutti, essa stessa si basa sull'educazione, globale ed innovatrice, capace di informare e di rinnovare»[4].

Una 'educazione globale e innovativa' a cui l'ingegnere contribuisce con le sue conoscenze tecniche ed umanistiche per la conservazione del patrimonio culturale costruito e per i paesaggi, con il suo operato quotidiano.

2. Ingegneri e patrimonio culturale del XX secolo

L'ampio campo degli interventi di conservazione del patrimonio culturale del XX secolo sta già impegnando le istituzioni e gli esperti e rappresenterà la prossima sfida del Restauro architettonico strutturale delle opere in cemento armato per le quali gli ingegneri sono chiamati a dare il loro contributo a tutti i livelli. Occorre dare un particolare risalto e la necessaria attenzione professionale alla rilevanza che assume per l'ingegneria del restauro italiana la tutela e valorizzazione del patrimonio culturale del XX secolo. Sono in corso da anni studi applicati, rivolti al recupero del cemento armato adoperato nelle opere di valore storico architettonico anche nel campo infrastrutturale.

Il crollo del ponte Morandi a Genova (14.8.2018) ha rappresentato un campanello di allarme che ha richiamato l'attenzione su di una tragedia che si sarebbe potuta evitare se vi fosse stato maggiore controllo sulle strutture in c.a. del secolo scorso. L'episodio, nella sua gravità, ha determinato una accelerazione nel programma di censimento e catalogazione del patrimonio culturale, già parzialmente avviato dal MiC nel 2000[5] per i soli beni architettonici del XX secolo.

Al Ministero delle Infrastrutture si deve la costituzione dell'Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche (AINOP), introdotto dal cosiddetto 'Decreto Genova'

[4] R. Di Stefano, *Antiche Pietre per una Nuova Civiltà,* Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli 1984.
[5] *La Catalogazione del Patrimonio Culturale*, MiC, Ministero della Cultura, 2000.

che ha ricompreso anche il censimento dei BB.CC.[6] L'AINOP, oltre alle principali infrastrutture nazionali (ferrovie, metropolitane, porti, aeroporti, dighe, acquedotti, gallerie), prevede l'inventario dell'edilizia pubblica. Particolare attenzione viene dedicata con specifico riferimento al *Sistema di monitoraggio dinamico per la sicurezza delle infrastrutture stradali e autostradali in condizioni di criticità e piano straordinario di monitoraggio dei beni culturali immobili* (art.14) l'intero patrimonio edilizio pubblico.

Il Decreto Legge per Genova si rivolge esplicitamente al patrimonio edilizio tutelato ex D.Lgs. 42/2004[7]. Il comma 4 dell'art. 14 della L. 109/2018, recita che il Ministero per i beni e le Attività Culturali «adotta un piano straordinario nazionale di monitoraggio e conservazione dei beni culturali immobili, che definisce i criteri per l'individuazione dei beni da sottoporre a monitoraggio e ai conseguenti interventi conservativi, nonché i necessari ordini di priorità dei controlli». Lo scopo è la conservazione del patrimonio culturale costruito nazionale implementando «le misure di sicurezza, conservazione e tutela»[8].

Ebbene questo compito è proprio degli ingegneri, trattandosi di valutazioni strettamente connesse al 'restauro strutturale' le cui competenze sono specifiche dell'ingegneria.

L'approfondimento sulle tecniche di realizzazione e sulle modalità di fruizione dei risultati prodotti tecnicamente dall'attuale MiC (Ministero per la Cultura) per il sistema dinamico dei monitoraggi, ex art. 14 del D.L. 109/2023, sarebbe quanto mai urgente che fosse conosciuto per una fruibilità pubblica, soprattutto da parte degli ingegneri e degli architetti.

Il richiamo al crollo del Ponte di Genova apre una ulteriore riflessione sull'interesse culturale, oltre che storico architettonico, di quella straordinaria opera di ingegneria d'autore[9] che dovrebbe rientrare tra i beni vincolati *ope legis*, ai sensi del D.Lgs 42/2004 (fig. 1).

Conferma l'importanza e l'urgenza della conoscenza nel campo del restauro architettonico strutturale da parte degli ingegneri italiani la norma introdotta dall'articolo 55 bis del decreto legislativo n. 76/2020, poi divenuto legge n. 120 del 2020,

[6] Decreto Legge 28 settembre 2018, n. 109, *Disposizioni urgenti per la citta' di Genova, la sicurezza della rete nazionale delle infrastrutture e dei trasporti, gli eventi sismici del 2016 e 2017, il lavoro e le altre emergenze*, Modificato con legge di conversione n. 130 del 16/11/2018. G.U. 19/11/2018, n. 269.

[7] D.Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42, *Codice dei beni culturali e del paesaggio*, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137- G.U.n. 45 del 24/2/2004 (Supplemento Ordinario n. 28).

[8] Alla elaborazione della norma ha collaborato chi scrive nella qualità di Componente della 'Struttura Tecnica di Missione per l'indirizzo strategico, lo sviluppo delle infrastrutture e l'alta sorveglianza' (D.M. n.434 del 12/10/2018) e quale Componente della 'Task Force per la vigilanza sull'efficacia dei piani di manutenzione e gestione delle opere, viarie e non, oggetto dell'azione di ricognizione e monitoraggio avviata dalle competenti strutture del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti' (D.M. n.1947 del 23/10/2018).

[9] Riccardo Morandi (1902-1989) Ingegnere, uno dei maggiori esperti di progettazione del calcestruzzo.

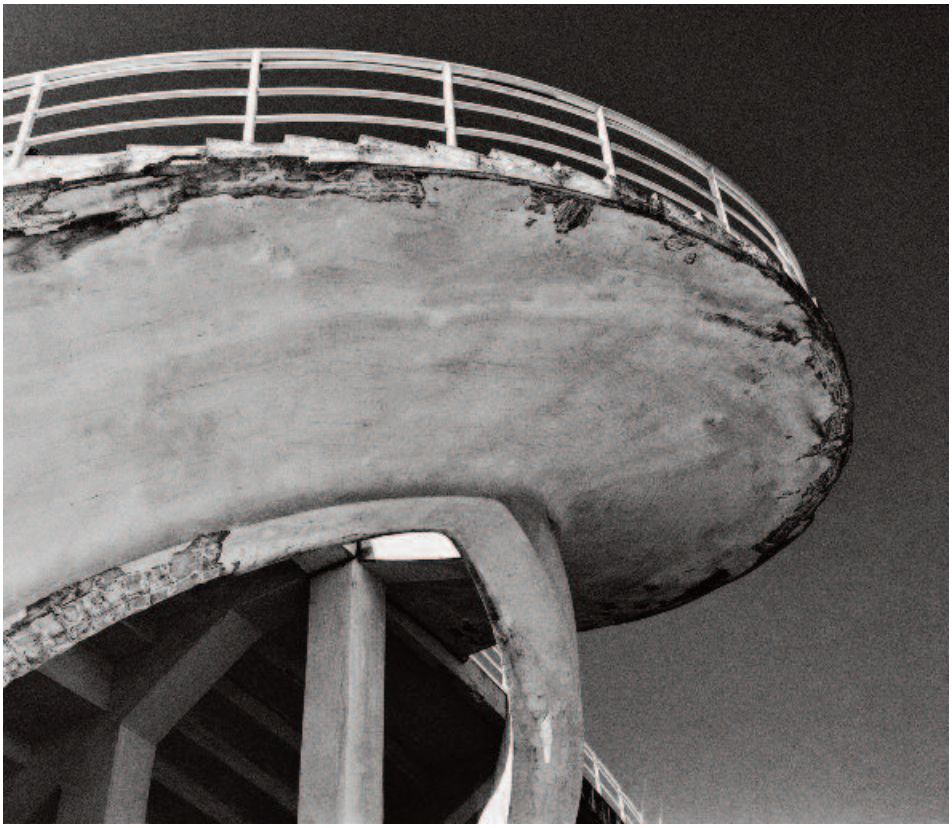
1. Genova, Viadotto Polcevera - Ponte Morandi (prima del crollo) 2017.

cosiddetto 'decreto semplificazioni', che prevede, per i soli impianti sportivi, di «procedere anche in deroga agli articoli 10,12, 13, 136 e 140 del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, e alle eventuali dichiarazioni di interesse culturale o pubblico già adottate… mediante interventi di ristrutturazione o sostituzione edilizia». Tali norme valgono, salvo espresso parere motivato da parte del MiC, che seppe formularle entro il termine di 120 giorni. Dopo tale termine «il vincolo di tutela artistica storico e culturale ricadente sull'impianto sportivo viene meno e cessano gli effetti della dichiarazione di interesse culturale eventualmente già adottate».

Una norma controversa per il mondo della cultura ed in cui l'ingegnere italiano può divenire protagonista del possibile rigore del *restyling* degli stadi storici come dimostrano alcuni interventi già avviati, ad esempio, nel caso dello stadio Renato dall'Ara di Bologna, realizzato con un intervento condiviso da molti esperti contrariamente a quanto sta avvenendo per lo Stadio di Firenze di cui si dirà più avanti.

Gli stadi, edifici ed impianti sportivi, aventi un valore storico-architettonico, giuridicamente riconosciuto, sono al centro dell' attività degli Ingegneri come nel caso, forse più rilevante e dibattuto in Italia, dello stadio Artemio Franchi di Firenze (fig. 2). Opera dell'Ingegner Pierluigi Nervi[10], vincolato per il suo alto valore architettonico, ubicato in una città riconosciuta dall'UNESCO patrimonio dell'umanità. Su tale tema l'Ordine degli Ingegneri di Firenze ha aperto e mantenuto un osservatorio costante rivolto proprio alle tecniche del recupero strutturale dell'opera in cemento armato, promuovendo continui confronti anche accademici, oltre che tecnico-professionali, per riportare al centro dell'attenzione dell'intera categoria questo argomento.

[10] Pier Luigi Nervi (1891-1979) Ingegnere e imprenditore italiano tra i maggiori scienzati nell'utilizzo del calcestruzzo.



2. Il deperimento delle strutture in cemento armato dello stadio Artemio Franchi.

3. Il progetto di Restauro e la Scuola napoletana

Con questi principi e con questa missione è, dunque, possibile compiere un approfondimento sulla cultura dell'ingegneria nel campo del restauro e più in generale della conservazione del patrimonio edilizio costruito, consapevoli che si tratta di un tema estremamente complesso. Una complessità rappresentata dal fatto che il progetto di restauro urbanistico, strutturale, architettonico e le opere che tali progetti devono seguire, riguardano molteplici competenze.

Come detto in precedenza, le competenze non sono solo di carattere tecnico, legate al restauro strutturale, all'ampio ambito delle diagnostiche preventive (rilievi, materiali, componentistica strumentale), ma anche di carattere umanistico, innanzitutto storico, archeologico, artistico, creativo. Occorre, pertanto, anche confrontarsi con diversi ambiti tecnico-scientifici e professionali che la tutela del costruito richiede in maniera sempre più crescente, in particolare quando il patrimonio su cui si interviene è vincolato o riconosciuto come monumentale. Necessita un approccio olistico tal-

mente ampio che richiede approfondimenti preliminari attraverso studi di fattibilità tecnica che indirizzino le fasi della progettazione esecutiva delle opere e della realizzazione fino al piano di manutenzione. Solo un corretto approccio metodologico alle diverse fasi del progetto, che sappia coinvolgere le numerose e diverse competenze e conoscenze, potrà assicurare il rispetto architettonico, tecnico, economico e normativo del progetto di restauro e dell'intervento, raggiungendo il grado di sostenibilità a cui tutti noi tecnici siamo chiamati a contribuire. Ciò compatibilmente con i percorsi formativi ed i rischi del pragmatismo del fare, conseguenza di un approccio fattuale dell'ingegnere non sempre in accordo con le rigorose discipline del restauro. Inoltre, il ricorso a tecniche realizzative sempre più complesse e finalizzate a mitigare gli impatti sul patrimonio ed i sempre crescenti effetti meteorologici straordinari attribuiscono all'ingegnere un ruolo ampio e fondamentale e inscindibile da quello delle altre professioni non esclusivamente tecniche.

Su questi temi è necessario continuare la tradizione della scuola italiana di restauro e di conservazione del patrimonio culturale e dei paesaggi, in particolare quella napoletana.

L'ingegneria napoletana ha rappresentato nel mondo l'eccellenza nel settore della conservazione del patrimonio culturale costruito e dei paesaggi la cui valorizzazione sarebbe riduttivo, oltreché profondamente sbagliato, attribuire a singole figure espressione di individuali competenze professionali. Un'attività continuata nel tempo nella sua interdisciplinarietà, dunque complessa ed articolata, condotta costantemente negli anni da un gruppo di appassionati tecnici.

Il ruolo dell'ingegnere per la conservazione dei centri storici, dei borghi, e, in particolare del patrimonio paesaggistico è sempre maggiore anche nel campo impiantistico per consentire di ottenere la transizione energetica e tecnologica al fine di selezionare materiali sempre più ecocompatibili e tecniche meno invasive, che la ricerca, anche in coerenza con gli obiettivi dell'Agenda 2030 SDGs della Nazioni Unite e della *Green Economy*. Infatti, un importante ruolo è affidato agli ingegneri per l'attuazione delle politiche *green* e, in genere, al risparmio energetico applicato ai 'grandi contenitori storici' che costituiscono il patrimonio culturale e su cui illustri colleghi ingegneri, altamente specializzati nella materia, sono anche intervenuti nel presente confronto.

Il tema è ormai fortemente approfondito e all'attenzione del legislatore, sollecitato in Italia per l'ampio utilizzo di immobili storici che, soprattutto a Roma, sono sedi di Ministeri, Istituzioni, Enti e società pubbliche per i quali sono in corso massicci interventi di miglioramento energetico. Ad esempio, particolare attenzione viene rivolta alla sostituzione soprattutto degli infissi esterni e dei sistemi di coibentazione affinchè vengano rispettati i caratteri architettonici e stilistici ed estetici degli edifici e l'uso dei materiali.

Le scuole napoletana e romana di ingegneria del restauro anche strutturale hanno sempre offerto un ampio contributo a livello nazionale e internazionale. La scuola

napoletana si è affermata grazie ad ingegneri di chiara fama, tra i quali Luigi Adriani, Paolo Belli, Salvatore D'Agostino, Alberto Defez, Roberto Di Stefano, Elio Giangreco, Mario Locascio, Renato Sparacio, e tanti altri a cui si devono interventi di restauro strutturale di portata internazionale.

Giova ricordare la figura di Roberto Di Stefano, fondatore della Scuola napoletana del restauro strutturale, professore emerito di Restauro dei monumenti nell'Università di Napoli Federico II, per trenta anni Direttore della Scuola di Specializzazione in Restauro dei Monumenti, Consigliere dell'Ordine degli Ingegneri di Napoli e Direttore per molti anni della rivista *Ingegneri* e fondatore e direttore della Collana editoriale *RESTAURO. Quaderni di restauro dei monumenti e di urbanistica dei centri antichi* (fig. 3)[11]. Scrive Aldo Aveta «un ulteriore apporto di Di Stefano, di grande significato teorico, metodologico ed applicativo, riguarda il restauro strutturale. La premessa a tali studi è da collegarsi alla sua straordinaria e già segnalata conoscenza sia del sottosuolo urbano che dei manufatti edilizi, per le esperienze 'sul campo' compiute fin da giovane. La sua partecipazione attiva nei convegni di Geotecnica (Varsavia 1965, Cagliari 1967, Madrid 1969), la sua presenza nella Commissione per il sottosuolo di Napoli cui seguirono due relazioni pubblicate nel 1967 e nel 1971, i suoi articoli sui dissesti nella città di Napoli e sulla diagnosi dei dissesti statici evidenziano la sua particolare capacità tecnica».

Roberto Di Stefano ha portato la scuola napoletana dell'ingegneria nel mondo anche come Presidente dell'ICOMOS Internazionale dal 1987 al 1990, con sede a Parigi dedicandosi ad interventi in Brasile, per il restauro della Cattedrale di Salvador di Bahia; in Sud America per le Missioni Gesuitiche, in Grecia, per il restauro del Partenone, oltre ad aver svolto docenze presso le Università straniere in Australia, Argentina, Brasile e Grecia.

La scuola napoletana, dunque, ha sempre contribuito nell'approccio imprescindibile tra consolidamento strutturale e restauro architettonico. Proprio in merito agli aspetti di metodo e di prassi, Aldo Aveta chiarisce che «tra teoria e prassi c'è una grande differenza e chi opera si trova di fronte alle complesse problematiche del cantiere di restauro»[12].

Da questa fondamentale considerazione consegue la necessità di documentare i criteri di restauro strutturale che testimoniano l'attività degli ingegneri napoletani, che sono divenuti un riferimento costante per soluzioni di intervento tecnico in circostanze analoghe.

Alcuni casi di studio, che costituiscono la sintesi tra teoria e prassi, possono essere riconosciuti tra alcune 'buone pratiche' di Roberto Di Stefano quali gli interventi:

[11] M. Di Stefano, *La Mostra sulla figura, l'opera e il pensiero di Roberto Di Stefano*, in 'Roberto Di Stefano, Filosofia della Conservazione e prassi del restauro', a cura di A. Aveta e M. Di Stefano, Arte Tipografica, Napoli 2013.

[12] A. Aveta, *Roberto Di Stefano: un protagonista nello sviluppo del restauro e della Conservazione*, in 'Roberto Di Stefano, Filosofia della Conservazione... p. 60.

3. *Ingegneri,* rivista dell'Ordine degli Ingegneri di Napoli e la collana editoriale *Restauro*, quaderni di restauro dei monumenti e di urbanistica dei centri storici, dirette da Roberto Di Stefano.

per la Torre di Pisa, il restauro del Duomo di Napoli, il restauro del portale di Santa Chiara, il Convento di San Pietro Martire (ex Manifattura Tabacchi di Napoli).

Gli interventi richiamati, quindi, costituiscono solo alcuni dei casi in cui gli aspetti di metodo si 'conciliano' con la prassi per molteplici espressioni, da quelle filologiche fino alle conoscenze ed all'utilizzo delle tecniche tradizionali; dalla intuizione degli originari schemi statici all' applicazione delle tecniche più avanzate ed innovative.

Sono questi gli aspetti di metodo e prassi che accompagnano l'opera dell'ingegneria sistematicamente nella attuazione in cantiere dei progetti di conservazione del patrimonio culturale.

Una vera e propria 'scuola napoletana di ingegneria per la conservazione' di cui hanno potuto godere le istituzioni napoletane soprattutto nel periodo dei grandi interventi di restauro. Tra questi ritengo opportuno richiamare il grande Piano di restauri per la città di Napoli voluto dalla presidenza del Consiglio dei Ministri nella seconda metà degli anni '70 per circa 300 miliardi di lire, motivato per risolvere il grave problema sociale della disoccupazione a Napoli, coordinato dall' ing. Paolo Martuscelli, già Presidente dell'Ordine degli Ingegneri di Napoli, Provveditore alle OO.PP. per la Campania e poi Deputato al Parlamento. Un piano molto controverso, dibattuto e criticato per la presunta assenza di metodo nell'approccio progettuale e nel riconoscimento di specifiche priorità e per l'assenza di competenze professionali nel campo del Restauro, affidato alla gestione del Provveditorato alle Opere Pubbliche.

Nonostante le critiche ed il dibattito acceso, anche giornalistico, il Piano pose al centro la capacità dei tecnici, dipendenti e liberi professionisti, in particolare degli in-

gegneri napoletani, a porre in campo le più rigorose tecniche di conduzione dei cantieri. L'impegno fu enorme ed i tempi contingentati del piano – che assunse un carattere emergenziale realizzando interventi sull'edilizia monumentale napoletana pubblica ed ecclesiastica – mai, a tutt'oggi, ripetutosi nella storia di Napoli e che richiama, al confronto, l'incapacità dimostrata dal Comune di Napoli nella gestione di un analogo piano per il *Grande progetto Centro Storico di Napoli UNESCO*, attuato per poco più di un terzo rispetto alle risorse poste a disposizione dalla Regione Campania[13].

Per la prima volta la Conservazione del patrimonio culturale, proprio grazie al grande Piano per i restauri di Napoli, mise in evidenza gli aspetti della complessità e la differenza tra metodo e prassi contribuendo anche a definire le funzioni tra uffici decentrati dello Stato come appunto il Provveditorato alle OO.PP. e le Soprintendenze ai beni culturali da poco istituite. Il Piano fu un'occasione per porre in evidenza le difficoltà operative e normative che furono affrontate con circolari e norme ancora oggi di riferimento. Procedure che consentirono di trovare preparati gli uffici tecnici all'indomani del terribile terremoto che di lì a breve avrebbe colpito Napoli, l'intera Campania, la Basilicata e la Puglia, ovvero il sisma del 23 novembre 1980.

Ancora una volta, gli ingegneri napoletani in prima fila, e tra questi anche chi scrive collaborò intensamente sia alla realizzazione di numerosi lavori di restauro su monumenti napoletani, sia assumendo il coordinamento delle verifiche statiche degli edifici nelle ore subito successive al terremoto, nelle circoscrizioni prima di Miano e poi di Poggioreale, con l'ing. L. Castelluccio.

L'impegno degli ingegneri napoletani, per il post terremoto meriterebbe un capitolo a parte così come il ruolo che ebbe il Consiglio Nazionale degli Ingegneri (CNI) allora presieduto da un altro grande ingegnere napoletano, Silvio Terracciano.

Il Piano di Martuscelli si rivelò una svolta pragmatica perché egli trovò ancora in fase di ultimazione alcuni cantieri su edifici storici pubblici dove i tecnici napoletani e gli imprenditori delle costruzioni avevano maturato una notevole competenza nella gestione dei cantieri di restauro e soprattutto consentì di fare affidamento su maestranze formatesi in quegli anni. Il Piano, infatti, accolse diverse centinaia di disoccupati anche provenienti dal disagio post carcerario, ex detenuti, trasformandoli in operai manovali, specializzati e artigiani edili alcuni dei quali grazie ai Centri di Formazione della Cassa Edile raggiunsero buone competenze.

Questa fu una importante pagina sociale per l'esperienza napoletana nel campo del restauro, per l'ingegneria napoletana e in genere per i tecnici, geometri, geologi, architetti, impegnando nelle tecniche e nelle procedure economico-amministrative che sembra ancora oggi cogliere appieno lo spirito ispiratore del Seminario degli Ingegneri del 23 giugno 2023 e l'esigenza di formazione sul campo.

[13] *Grande Progetto Centro Storico di Napoli – La Rigenerazione del Centro Storico di Napoli, Valorizzazione del sito UNESCO* – Protocollo d'intesa per l'attuazione 29.5.2012.

4. Metodi e prassi. Alcune testimonianze

Vengono qui segnalati alcuni esempi di metodi e prassi di lavori, utili a definire il contributo dell'ingegnere nella disciplina del Restauro anche per i paesaggi culturali, con alcune realizzazioni dello scrivente sin dalla fine degli anni '70.

• Il restauro dell'*ex Caserma Cavallerizza alla Maddalena,* poi *ex Caserma Bianchini*, realizzato dal 1978 al 1981, da destinare ad uffici pubblici, costituì un importante episodio di rigenerazione urbana per la Città di Napoli, in una area fortemente degradata anche a causa delle dimensioni del rudere (75.000 m³). Abbandonato per un ventennio, posto di fronte all'edificio del Mercato ittico (1929 -1933) - opera del grande Luigi Cosenza - entrambi situati nella piazza Duca degli Abruzzi, determinava una sorta di 'zona molle' dell'area est di Napoli. L'edificio, tuttavia, conservava la sua dignità architettonica ed urbanistica, esempio di edilizia militare; sebbene mutilato dell'ala del *Serraglio*, che volgeva verso la via Marina, risultava ancora riconoscibile nei valori architettonici ed estetici oltre che storici. I bombardamenti alleati per la vicinanza al porto di Napoli distrussero molti edifici e danneggiarono la Caserma Bianchini pesantemente, che risultava completamente priva dei solai e delle coperture. Inoltre, la facciata principale su piazza Duca degli Abruzzi era integralmente crollata nella sua parte centrale la cui ricostruzione ha assorbito gran parte dell'intervento di ricostruzione filologico e quindi strutturale (figg. 4, 5).

Il cantiere fu aperto nel 1978 con una prima impresa appaltatrice incaricata delle opere di diserbo, decespugliamento, pulizia dei terreni, movimenti di terra e, in generale, di messa in sicurezza dei luoghi. Poi si procedette alla messa in sicurezza dei due spazi principali: del cortile d'ingresso, che ospita la cappella vanvitelliana, e il secondo cortile, entrambi sommersi da circa 4 m. di terra, detriti e materiali di risulta. Prevedibilmente, con l'inizio dei lavori nella zona dell'ex Serraglio, furono rinvenuti due ordigni bellici, fortunatamente disinnescati in loco dagli artificieri del Genio militare. La struttura così liberata fu oggetto di un intenso lavoro di diagnostica strutturale, riferita alle murature di tufo superstiti, integralmente bonificate e riqualificate nelle malte e nelle integrazioni murarie stesse. Assoluta priorità fu data agli interventi di restauro e ricostruzione dei collegamenti verticali, presenti nella zona del complesso edilizio, a partire da quella ubicata, nell'angolo tra la via Marina e corso Arnaldo Lucci. Il progetto strutturale fu realizzato prevalentemente con il ricorso a carpenterie metalliche con ampie luci di grandi dimensioni sia per la ricostruzione di tutti i solai sia per la ricostruzione delle coperture a falda. Anche per la ricostruzione del prospetto si è proceduto ad un analitico studio, prima architettonico, poi strutturale: quest'ultimo affidato al prof. ing. Fabrizio Leccisi, anche per la parte fondazionale.

Una ricostruzione filologica, rigorosamente documentata iconograficamente e storicamente dalla Soprintendenza, consentì così la rapida approvazione dei progetti. Il rigoroso ricorso all'uso di materiali e tecniche originari vennero preceduti da pun-

4. Napoli, Ex Caserma Cavallerizza alla Maddalena. Lo stato post bellico dell'edificio.

tuali campionature anche degli intonaci interni ed esterni e delle finiture in pietra. Il restauro della Caserma Bianchini rappresentò il più grande cantiere di rigenerazione edilizia storica della Città di Napoli in quel periodo. Nel cantiere furono assunte 250 unità di ex disoccupati assorbiti nel grande piano dei restauri di Napoli.

Il complesso fu destinato ad uso uffici pubblici del Ministero delle Finanze con il quale si procedette alle opere di arredo e adattamento, congiuntamente agli uffici del MIBAC e del Ministero LL.PP.

In tema di interventi di edifici bombardati è utile qui richiamare il pensiero critico del prof. Guglielmo de Angelis d'Ossat: «soltanto per quelle parti di edifici monumentali che furono distrutte dalla furia bellica, ma di cui avevamo ancora viva l'immagine davanti ai nostri occhi e nella nostra memoria, era possibile una pronta ricostruzione, più o meno parziale secondo la consistenza delle parti superstiti. L'edificio si poteva difatti considerare scomparso nei suoi elementi, più che distrutto. Il paragone... mi sembra ancora efficace: quello dei preziosi vasi greci o etruschi, spezzati e ridotti in tanti frammenti e per i quali la ricomposizione è perfettamente legittima e, come tale, va estesa al restauro monumentale»[14]. La citazione è doverosa in questo caso in cui si fa riferimento appunto ad un edificio fortemente danneggiato, ma certamente non completamente distrutto.

• Il restauro di una parte della *Certosa di San Martino*, nel 1986, fu conseguenza dell'impegno di un grande rotariano, Rodi Lupoli, Governatore dell'epoca. Il Rotary raccolse numerosi fondi per oltre due miliardi di lire attraverso i Clubs Rotary del

[14] G. De Angelis D'Ossat, *Danni di guerra e restauro dei monumenti*, in 'Architettura e Restauro', Milano 1955, p. 8.

5. Napoli, ex caserma Cavallerizza alla Maddalena, dopo gli interventi di ricostruzione, consolidamento e restauro.

mondo al fine di aiutare le popolazioni della Campania, della Basilicata e della Puglia, colpite dal terremoto del 1980.

Infatti, a partire dal 1983 ebbi l'opportunità di collaborare con il Governatore nella pianificazione degli interventi e tra questi, per la Città di Napoli, fu colta la sollecitazione del Soprintendente di Napoli per restaurare alcune parti del complesso museale della Certosa di San Martino: fu deciso di intervenire sia nei sotterranei della Certosa che nell'ala del cosiddetto *Quarto del Priore*, entrambi danneggiati.

Per quanto riguarda i sotterranei, il progetto era riferito agli ambienti destinati a deposito di materiale lapideo, portali e frammenti marmorei ivi depositati; elementi di spoglio di edifici provenienti dal centro storico di Napoli e da demolizioni effettuate nel periodo del Risanamento, oltreché raccolti dagli edifici colpiti dagli eventi bellici bombardati nel corso della seconda guerra mondiale.

Il progetto prevedeva l'inventario e la catalogazione dei reperti ivi collocati e la successiva scelta di alcuni di essi in grado di essere esposti con tecniche riferite all'anastilosi degli elementi inventariati. Fu così ideato un sistema di portale di grandi dimensioni, con altezze fino a 4/5 m. realizzati con telai in profilati metallici IPE ed HEA, all'interno dei quali collocare gli elementi lapidei sorretti da tiranti in acciaio di supporto ai reperti stessi. La struttura e la carpenteria metallica venivano così ancorati ad una fondazione del tipo diretto con imposta al di sotto del piano di posa dei pavimenti in basolato anch'essi restaurati ed integrati. Completavano l'intervento i progetti impiantistici di illuminazione e di aerazione dei locali.

Un secondo intervento, forse anche di maggiore complessità, fu quello progettato per il restauro dell'ala cosiddetta del *Quarto del Priore* dove furono allestiti altri elementi lapidei e installati sistemi di supporto espositivi per i vari reperti nella disponibilità del museo capaci di ospitare anche iniziative esterne al museo. Ulteriore restauro di quell'ala fu il collegamento con l'esterno, in particolare con l'ampio *Giardino del Priore*, allora totalmente abbandonato e privo di una architettura del verde.

I luoghi erano interdetti a causa delle condizioni di non praticabilità della scala di collegamento, anche essa opera monumentale di grande valore. Si trattava, infatti, della scala a 'tenaglia' attribuita a Cosimo Fanzago.

Il progetto, pertanto, fu dedicato al consolidamento strutturale ed al restauro architettonico complessivo degli esterni. Una attenta ricerca storica-iconografica, coordinata dalla prof. arch. Cettina Lenza, consentì di riconoscere, con sufficiente precisione, il distributivo dei percorsi del giardino e la geometria delle aiuole ed il pozzo centrale. Fu realizzato il consolidamento del pavimento e dei sottoservizi e reso fruibile anche con la realizzazione di un sistema illuminotecnico adeguato[15].

• Il progetto del *borgo di Terravecchia e del castello di Giffoni Valle Piana* costituisce un caso di restauro urbanistico relativo ad un tessuto edilizio storico inserito all'interno del Parco dei Monti Picentini. Esso ha coinvolto competenze sia strutturali che paesaggistiche.

Il consolidamento statico e la parziale ricostruzione di alcune parti crollate del castello si resero necessarie per lo stato di rudere dell'immobile, in quanto fortemente danneggiato a seguito del sisma del 1980 che vide rovinare un'intera ala del castello con conseguenti ulteriori crolli anche delle rimanenti parti del maniero.

Fu quindi opportuno condurre preliminari attenti studi diagnostici sia topografici e metrici, sia sui materiali per la individuazione degli schemi statici che costituivano l'impianto strutturale originario al fine di ripristinarne le capacità portanti dell'edificio.

Il progetto di restauro ha previsto oltre al recupero, al consolidamento di quanto risultava superstite del rudere, la rifunzionalizzazione dell'intero complesso storico monumentale. Come si è detto, solo una parte dell'edificio conservava un importante paramento murario merlato integro per il quale si è proceduto a un restauro integrale; mentre, nella zona opposta risultavano presenti solo alcuni tratti di muratura con un numero limitato di pareti ortogonali parzialmente rimaste in piedi.

Si è pertanto proceduto alla realizzazione di nuovi impalcati dei due livelli crollati e delle coperture piane. Sono state inoltre, realizzate strutture in carpenteria metallica con profilati HEA ed IPE e solai anch'essi in carpenteria metallica.

Per quanto riguarda l'ala ricostruita è stata introdotta una struttura in vetro portante con elementi in acciaio, cosiddetti 'ragni', capaci di sostenere le strutture orizzontali dei reticoli in vetro. Oltre al calpestio del primo e del secondo impalcato è stata realizzata in vetro l'intera parete del prospetto crollato a seguito del terremoto.

Si è ritenuto opportuno, d'intesa con la Soprintendenza, inserire l'ampia parete vetrata al di sotto dell'impalcato di copertura, rifunzionalizzando il percorso di guardia situato. Il dimensionamento strutturale e le carpenterie metalliche sono state progettate congiuntamente all'ing. L. Petti e all'ing. D. Benincasa.

[15] La piantumazione delle essenze storicamente idonee fu curata dai vivai specializzati congiuntamente alla Soprintendenza, gli studi allestitivi, sia del Quarto del Priore che delle zone di connessione museale per eventuali mostre, dall'arch. E. Di Ferrante.

6. Giffoni Valle Piana (SA), Progettazione esecutiva ed esecuzione dei lavori di Rinascita del Borgo medioevale di Terravecchia, Restauro Castello.

Altra opera di ingegneria complessa ha riguardato la realizzazione degli accessi. Una pista carrabile si è resa necessaria per le emergenze dal momento che il castello era raggiungibile solo con la pedamentina di collegamento dal borgo antico che costituiva un prolungamento del camminamento di ronda inteso come spazio interposto tra le mura del castello e la prima cinta antemurale, anch'essa individuata e valorizzata nell'ambito dell'intero progetto. L'opera quindi ha costituito un caso di integrazione tra le tecniche di restauro urbanistico, architettonico, strutturale ed impiantistico a cui il castello di Giffoni Valle Piana partecipa in quanto parte del sistema fortificato salernitano (fig. 6).

5. L'ICOMOS ed il confronto internazionale sulla conservazione

L'ampiezza del tema oggetto del presente intervento rivolto al patrimonio culturale ed al paesaggio richiede un richiamo anche alle azioni internazionali. A tal riguardo, è ben noto che l'ICOMOS, International Council on Monuments and Sites[16], è la più

[16] L'ICOMOS (*International Council on Monuments and Sites*), fondato nel 1965, è la principale

importante organizzazione internazionale non governativa impegnata nella conservazione del patrimonio mondiale.

L'ICOMOS studia dalla sua fondazione (1965) le materie tecnico-scientifiche in applicazione della Carta internazionale sulla conservazione ed il restauro dei monumenti e dei siti (1964), e cura l'attuazione delle convenzioni internazionali dell'UNESCO, a partire dalla Convenzione sulla Protezione del Patrimonio Mondiale, culturale e naturale dell'Umanità del 1972[17]. L'ICOMOS, attraverso trenta Comitati Scientifici[18] impegnati nel campo della ricerca applicata, espleta il compito di organo di consulenza del Centro del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO, insieme a IUCN ed ICCROM[19].

L'ICOMOS Italia – che presiedo - ha elaborato una schematizzazione per 'Aree tematiche' dei 30 Comitati Scientifici ICOMOS. Inoltre, sono stati inserite anche le 'Commissioni specializzate' e quelle impegnate nei 'Progetti di Ricerche e Sviluppo'.

L'ICOMOS ha pubblicato numerosi testi ritenuti fondamentali nel campo della disciplina della conservazione, fornendo linee guida operative in molti ambiti tecnici e scientifici e procedurali. In particolare, nel settore dell'analisi strutturale, l'ICOMOS attraverso il Comitato ISCARSAH (International Committee on Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage) – coordinatore per l'Italia prof. ing. Alessandro Baratta – ha predisposto le *Linee guida per l'Analisi e il Restauro delle Strutture del Patrimonio Architettonico*[20]. Inoltre, sempre nel campo dell'attività di ingegneria, l'ICOMOS Italia ha in corso importanti iniziative, tra queste: *Cooperation partnership* finanziata dal programma Erasmus+ dell'Unione Europea; '*REcube: REthink, REvive,*

organizzazione internazionale non governativa dedicata alla conservazione e protezione del patrimonio culturale. ICOMOS è stata designata, dalle origini, come organismo di consulenza del Comitato del Patrimonio Mondiale UNESCO. ICOMOS promuove, attraverso 104 Comitati Nazionali e 31 Comitati Scientifici Internazionali, ed oltre 10.000 esperti presenti in 151 nazioni, l'applicazione delle teorie, delle metodologie, tecniche e scientifiche la conservazione del patrimonio architettonico, archeologico e dei paesaggi. I membri di ICOMOS sono architetti, archeologi, storici, antropologi, geografi, ingegneri, urbanisti e contribuiscono all' applicazione delle metodologie di salvaguardia del patrimonio culturale UNESCO e non solo.

[17] *La Convenzione sulla Protezione del Patrimonio Mondiale, culturale e naturale dell'Umanità* del 1972, approvata dall'Assemblea federale il 19 giugno 1975, istrumento di ratificazione depositato il 17 settembre 1975 rappresenta il documento di riferimento mondiale per incoraggiare i paesi aderenti all'UNESCO ad identificare, proteggere e conservare il patrimonio culturale e naturale mondiale considerato di importanza per tutta l'umanità.

[18] ICOMOS International Council On Monuments and Sites - Comitati Scientifici.

[19] L'ICCROM è un'organizzazione intergovernativa che opera al servizio dei suoi Stati membri per promuovere la conservazione di tutte le forme di patrimonio culturale, in ogni regione del mondo. L'istituzione opera nello spirito della Dichiarazione Universale dell'Unesco sulla Diversità Culturale del 2001, che afferma che «il rispetto della diversità delle culture, la tolleranza, il dialogo e la cooperazione in un clima di fiducia e di mutua comprensione sono tra le migliori garanzie di pace e di sicurezza internazionali».

[20] ICOMOS – *Principi per l'analisi, la conservazione e il restauro strutturale del patrimonio architettonico*, Ratificato dalla XIV Assemblea Generale dell'ICOMOS a Victoria Falls - Zimbabwe (ottobre 2003).

REuse Transmitting the knowledge for the green regeneration of the European Concrete Heritage', in particolare, attraverso la *Key action: KA220 - HED - Cooperation partnerships in higher education*. Il progetto è coordinato dal Politecnico di Milano ed i partner sono: Budapest University of Technology and Economics (HU); HafenCity Universität Hamburg (DE); ICOMOS Italia (IT); Middle East Technical University (TR); PLN Project Foundation (BE); Politecnico di Torino (IT); Sapienza Università di Roma (IT); Delft University of Technology (NL); Université libre de Bruxelles (BE); University of Minho (PT); Università degli Studi di Napoli Federico II (IT); Universidad Politécnica de Madrid (ES), Associated Partners: Fédération Internationale du béton, fib (CH); Fundación Juanelo Turriano (ES); Getty Foundation - Keeping it modern (USA); Instituto Eduardo Torroja (ES); European design firms (to be selected)[21].

Ulteriore progetto in cui gli esperti di ICOMOS Italia (Comitato Scientifico ICOMOS-ISC20C) è relativo alla ricerca europea *InnovaConcrete – Innovative Materials and Techniques for the Conservation of 20th Century Concrete-based Cultural Heritage*, nelll'ambito del Programma di finanziamento: Horizon 2020, Unione Europea (gennaio 2018 – dicembre 2021). Il progetto è coordinato dalla Prof.ssa María Jesús Mosquera Díaz, Universidad de Cadiz (Spagna)[22].

Solo una profonda conoscenza dottrinale ed applicativa e di ricerca attraverso questi studi, principi, linee guida, e missioni comparate a casi di studio reali, condotte a livello internazionale potrà consentire all'ingegneria italiana di offrire il proprio prezioso consapevole contributo professionale alla conservazione rivestendo un ruolo da protagonista attivo e responsabile di una disciplina così complessa connotato da profondo valore sociale ed istituzionale rivolto alla salvaguardia e alla conservazione del patrimonio culturale italiano, parte fondamentale dei nostri principi costituzionali nazionali[23].

La produzione scientifica di ICOMOS comprende, come è noto, anche altri documenti di riferimento di ICOMOS, e tra questi, *l'Heritage Impact Assessment - HIA*[24]; *Heritage Urban Landscale - HUL*[25]; *European Quality Principles for*

[21] Le linee guida del progetto *ReCuBe* saranno pubblicate sul bollettino della FIB Fédération International du Béton.

[22] Il progetto *InnovaConcrete*, sviluppato da un consorzio di 29 partner di 11 diversi Paesi, ha avuto come principale obiettivo lo sviluppo di nuovi materiali per la conservazione del patrimonio culturale in cemento.

[23] Secondo la Costituzione italiana (1948), art. 9 «La Repubblica promuove lo sviluppo della cultura e la ricerca scientifica e tecnica [cfr. artt. 33, 34]. Tutela il paesaggio e il patrimonio storico e artistico della Nazione. Tutela l'ambiente, la biodiversità e gli ecosistemi, anche nell'interesse delle future generazioni. La legge dello Stato disciplina i modi e le forme di tutela degli animali».

[24] *Guidance on Heritage Impact Assessment (HIA) for Cultural World Heritage Properties* (gennaio 2011), L'HIA affronta il problema della valutazione degli impatti dei progetti che interessano i siti della World Heritage List (WHL) ed è rivolto, principalmente, agli stakeholder

[25] *Recommendation on the Heritage Urban Landscale – HUL*, adottato dall' UNESCO nel corso della General Conference, 36th session, Paris 10 novembre 2011, nasce come prodotto finale di uno studio durato sei anni in merito alla revisione delle politiche e delle migliori pratiche interna-

Eu-Funded Interventions with Potential Impact Upon Cultural Heritage[26]; *Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action*; *The Cádiz Document Innova Concrete Guidelines for Conservation of Concrete Heritage*[27].

Un ringraziamento, dunque, agli ingegneri ed ai tecnici italiani è doveroso perché hanno svolto e svolgono con passione e competenza il difficile ruolo di Conservare, attraverso i secoli, le migliaia di edifici e paesaggi storici che l'Italia, nonostante tutto, ancora custodisce con orgoglio e competenze per la conoscenza dell'Umanità.

zionali relative alla gestione delle risorse del patrimonio in ambienti in continua evoluzione (città e centri storici).

[26] *European Quality Principles for Eu-Funded Interventions with Potential Impact Upon Cultural Heritage. Manual* (2019): prodotto da ICOMOS International su mandato della Commissione europea nel quadro dell'iniziativa dell'Unione europea «Prendersi cura del patrimonio culturale: principi di qualità per gli interventi finanziati dall'UT che hanno un impatto potenziale sul patrimonio culturale*»,* fornisce a tutti gli *stakeholder* coinvolti in ambito UE le linee guida di Principi di Qualità.

[27] Il documento di Cadice *Linee guida InnovaConcrete per la conservazione del patrimonio in calcestruzzo. Relazione sul progetto*, ICOMOS Internazionale.

Riferimenti bibliografici

BANDARIN F., VAN OERS R.

The Historic Urban Landscape: Managing Heritage in an Urban Century, 2012

BELLICINI L.

- voce *Rigenerazione Urbana sostenibile,* in Enciclopedia Italiana Treccani IX App. 2015

Costituzione della Repubblica Italiana, Edizione Senato, 1948

DE ANGELIS D'OSSAT G.

- *Danni di guerra e restauro dei Monumenti*, in 'Architettura e Restauro', Milano 1955

DE ROGATIS C., DI STEFANO M.

- *Beni Comuni sui lavori di restauro dell'Ex Caserma Cavallerizza alla Maddalena*, Napoli 1981

DI STEFANO M.

- *Symposium Heritage and Lanscape as Human Values,* Atti del Convegno ICOMOS (Firenze, 9-14 novembre 2014), Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli 2015

DI STEFANO R.

- *Il recupero dei valori. Centri Storici e monumenti. Limiti della conservazione e del restauro,* Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli 1979
- *Antiche Pietre per una nuova Civiltà*, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli 2003 [1984]

FUSCO GIRARD L., GRAVAGNUOLO A.

- *Multicriteria Tools for the Implementation of Historic Urban Landascape,* in 'Quality Innovation Prosperity', vol. 21, n.1, 2017

Guidance on Heritage Impact Assessment (HIA), ICCROM / ICOMOS 2011

ICOMOS Simposio, Patrimonio motore di sviluppo (Parigi 2011) e il Simposio *Eredità Culturale e Paesaggio come Diritto dell'Uomo*, Raccolta delle Comunicazioni (Firenze 2014)

La Convenzione sulla Protezione del Patrimonio Mondiale, culturale e naturale dell'Umanità del 1972, approvata dall'Assemblea federale il 19 giugno 1975, istrumento di ratificazione depositato il 17 settembre 1975

LEPORE D.

- *Città. Il centro storico di Napoli. Vecchi propositi e nuovi progetti,* in 'Meridiana', 1989, n. 5

Operational Directives for the Implementation of the Convention for the Safeguarding of the Intangible Cultural Heritage Paris, 5 to 7 July 2022

PAPA FRANCESCO

- *Fratelli Tutti*, Enciclica 30 Ottobre 2020, in particolare il capoverso 216 *L' incontro fatto cultura*, Edizione San Paolo 2020
- *Fratelli tutti*, Enciclica, La fraternità e l'amicizia sociale, Libreria Editrice Vaticana, Roma 2020
- *Laudato Si*, Enciclica sulla Cura della Casa Comune, Libreria Editrice Vaticana, Roma 2015

Roberto Di Stefano. Filosofia della Conservazione e prassi del restauro, a cura di A. Aveta e M. Di Stefano, Arte Tipografica, Napoli 2013

Sostenibilità Globale, cfr. definizione in Rapporto Annuale International Science Council 2021

2.
MIGLIORAMENTO STRUTTURALE, EFFICIENTAMENTO ENERGETICO, GEOTECNICA PER IL PATRIMONIO

Soluzioni avanzate e progettazione integrata di interventi a basso impatto per la mitigazione del rischio e la conservazione del patrimonio costruito

Marco Di Ludovico, Stefano Iaquinta, Andrea Prota

Premessa

La salvaguardia del patrimonio edilizio esistente, in termini di conservazione e valorizzazione, è una sfida attuale e rilevante. Un obiettivo fondamentale è quello di definire interventi che riducano i rischi, minimizzando l'impatto ambientale e materiale sull'opera. Per raggiungere questo obiettivo è necessaria una solida competenza tecnica, integrata ad una visione multidisciplinare che favorisca soluzioni innovative ed efficaci, in grado di apportare benefici tangibili, come il miglioramento della sicurezza strutturale e l'estensione della vita utile dell'opera.

Negli ultimi anni si è assistito ad una notevole evoluzione ed applicazione di materiali e tecniche avanzate per il consolidamento delle strutture esistenti, che presentano numerosi vantaggi rispetto ai sistemi tradizionali di rinforzo. Nel caso degli edifici, il rafforzamento sismico deve soddisfare rigorosi requisiti, tra cui quello di consentire la continuità d'uso del manufatto durante l'esecuzione dei lavori, evitando evacuazioni forzate. Questo aspetto cruciale deve guidare la progettazione e la realizzazione di tali interventi, che devono essere compatibili con le funzioni quotidiane dell'edificio.

Queste considerazioni hanno posto nuove sfide e stimolato la ricerca di soluzioni di rinforzo basate su materiali avanzati e a basso impatto, al fine di migliorare l'esperienza e la sicurezza delle persone che fruiscono delle strutture esistenti.

Va qui precisato che gli interventi con le tecnologie e le soluzioni strutturali, che di seguito si illustrano e che dimostrano gli avanzamenti scientifici e tecnologici nel campo del miglioramento sismico, sugli edifici in muratura e su quelli di architettura moderna in c.a. soggetti a vincoli devono essere adattati caso per caso. In presenza di valori da salvaguardare sui prospetti esterni o negli interni fondamentale è contemperare le esigenze strutturali con quelle conservative.

1. Introduzione

Il patrimonio edilizio europeo, ormai prossimo o oltre il termine della sua vita nominale, presenta evidenti segni di obsolescenza e deterioramento sia nelle componenti strutturali che in quelle non strutturali (D. Giardini, et al. 2003). Questa condizione si accentua particolarmente nell'area mediterranea, dove molti di questi edifici

sono esposti a potenziali eventi sismici di considerevole entità. La maggior parte di queste strutture è stata originariamente progettata per resistere esclusivamente ai carichi gravitazionali o conformemente a normative sismiche ormai superate.

Per di più, le recenti direttive europee stabiliscono l'ambizioso obiettivo di ridurre il consumo energetico complessivo dell'Unione Europea di almeno il 32,5% entro il 2030 (UE, Direttiva 2018/2002/UE). In questo contesto il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici esistenti si è affermato come uno dei principali strumenti per raggiungere questa fondamentale meta. Ciò pone una sfida cruciale: individuare soluzioni innovative che prevedono l'utilizzo di materiali avanzati e l'adozione di nuove tecniche costruttive, permettendo così di adeguare e ristrutturare le strutture esistenti in modo da, non solo garantire la sicurezza sismica, ma anche contribuire all'ottimizzazione dell'efficienza energetica degli edifici.

In Italia, il raggiungimento di tali obiettivi è molto complesso in quanto oltre il 50% degli edifici esistenti è stato costruito prima del 1974, ossia prima dell'entrata in vigore delle normative sismiche e delle linee guida sull'efficienza energetica per la progettazione e il *retrofit* delle costruzioni (ANCE 2013). Recentemente, numerosi terremoti in Italia (L'Aquila 2009, Emilia 2012, Italia centrale 2016) hanno dimostrato che l'alta vulnerabilità degli edifici esistenti ha comportato ingenti perdite economiche e tragiche perdite umane (D.N. Grant et al. 2007, Di Ludovico et al. 2017). Molti degli edifici danneggiati durante questi eventi sismici (in misura maggiore o minore) erano stati precedentemente sottoposti a interventi di miglioramento energetico, principalmente grazie a sovvenzioni nazionali per l'efficienza energetica, come ad esempio l'ECO-BONUS e politiche di incentivi precedenti (CdM, 2020). Questa pratica è divenuta comune a partire dagli anni 2000 al fine di conformarsi alle direttive dell'Unione Europea (UE) e agli accordi internazionali sulla promozione dell'efficienza nell'uso dell'energia e della sostenibilità (UE, Directive 2010/31/EU).

In tale scenario complesso, l'obiettivo principale è sviluppare un approccio integrato che affronti congiuntamente le esigenze di sicurezza sismica e le sfide legate all'efficienza energetica. Questo implica l'ideazione e l'applicazione di soluzioni sinergiche capaci di potenziare le prestazioni globali degli edifici, tenendo conto anche degli aspetti economici e ambientali.

Negli ultimi anni, la ricerca nel campo dei sistemi di rinforzo, finalizzati ad offrire soluzioni veloci ed economicamente convenienti, ha attirato un notevole interesse a livello nazionale ed internazionale. I metodi tradizionalmente impiegati in passato sono stati rivisti e perfezionati in conformità ai nuovi requisiti delle moderne norme sismiche. Allo stesso tempo, nuovi approcci basati sull'utilizzo di materiali e tecnologie avanzate hanno registrato un crescente utilizzo nel campo del rinforzo strutturale e nell'applicazione di interventi di *retrofit* in tutto il mondo. In base alla classificazione delle strategie di mitigazione del rischio sismico definite dalle NTC18 (2018), gli interventi di rafforzamento sismico possono essere realizzati at-

traverso interventi locali o globali. Tra le diverse opzioni disponibili, gli interventi locali sulle componenti strutturali presentano il vantaggio di apportare modifiche trascurabili alla massa e alla rigidezza della struttura, senza influire in modo significativo sulla risposta dinamica globale della stessa. Tali interventi mirano a prevenire i prematuri meccanismi di rottura a livello locale e consentono l'adozione di soluzioni rapide ed a basso impatto ambientale. I materiali compositi rappresentano la scelta più idonea per tale tipologia di interventi, sia per le strutture in cemento armato che per quelle in muratura. Essi, infatti, possono essere applicati senza alcun impatto significativo sulla massa della struttura e sulla rigidezza degli elementi, garantendo allo stesso tempo i requisiti di rapidità di messa in opera, basso impatto ambientale e sostenibilità economica.

L'efficacia dei materiali fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) nel campo del rinforzo sismico è stata ampiamente dimostrata negli ultimi decenni, e sono state sviluppate e rese disponibili linee guida per la progettazione di interventi che prevedano l'uso di questa tecnica di rinforzo (CNR-DT 200-2013, fib Bulletin 90).

Oltre ai tradizionali sistemi in FRP, i materiali compositi fibrorinforzati a matrice inorganica, cosiddetti FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*) hanno attirato notevole attenzione, principalmente per le loro caratteristiche di sostenibilità e la loro compatibilità con il substrato esistente, specie nel campo delle applicazioni sulle strutture in muratura. Tale soluzione prevede l'applicazione di reti in composito (per lo più realizzate con fibre di vetro o basalto) incorporate in malte a base di cemento o calce; il loro impiego in campo strutturale è divenuto oggi decisamente rivelante grazie allo sviluppo di documenti pre-normativi che ne disciplinano la qualifica e la certificazione, l'utilizzo e la progettazione in ambito sismico (CNR-DT 215-2018, ACI 549 2013).

Di seguito vengono illustrate diverse possibili soluzioni di consolidamento e mitigazione del rischio sismico di edifici esistenti mediante soluzioni a basso impatto e facilmente implementabili sugli elementi più vulnerabili delle strutture; in particolare, si presentano i risultati sperimentali di campagne di prove sperimentali progettate ed eseguite presso il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università degli studi di Napoli Federico II, al fine di evidenziare l'efficacia di tali materiali di nuova concezione nel prevenire meccanismi di rottura fragile, tipicamente responsabili di inadeguate risposte strutturali alle azioni sismiche.

2. Rinforzo sismico delle strutture esistenti

Le strutture esistenti progettate secondo vecchie normative e pratiche costruttive presentano tipicamente molteplici carenze, responsabili, di meccanismi di rottura prematura in caso di azioni sismiche. Di segutio, si riportano gli esiti di diversi

programmi sperimentali volti ad investigare e validare soluzioni innovative di intervento sia su strutture in muratura che in cemento armato.

2.1 Interventi su edifici in muratura

Le strutture in muratura esistenti risultano particolarmente vulnerabili alle azioni sismiche specie a causa della limitata, o in alcuni casi assente, connessione tra le pareti ortogonali e/o tra pareti e solai. Questa condizione favorisce lo sviluppo di meccanismi di rottura locale (ad esempio, innesco di meccanismi di ribaltamento delle pareti, ovvero crisi fuori piano), come mostrato in figura 1.

Tale problematica è, invece, molto meno rilevante nelle moderne strutture in muratura in cui sono tipicamente presenti solai o cordoli in calcestruzzo armato (Calderoni et al. 2020).

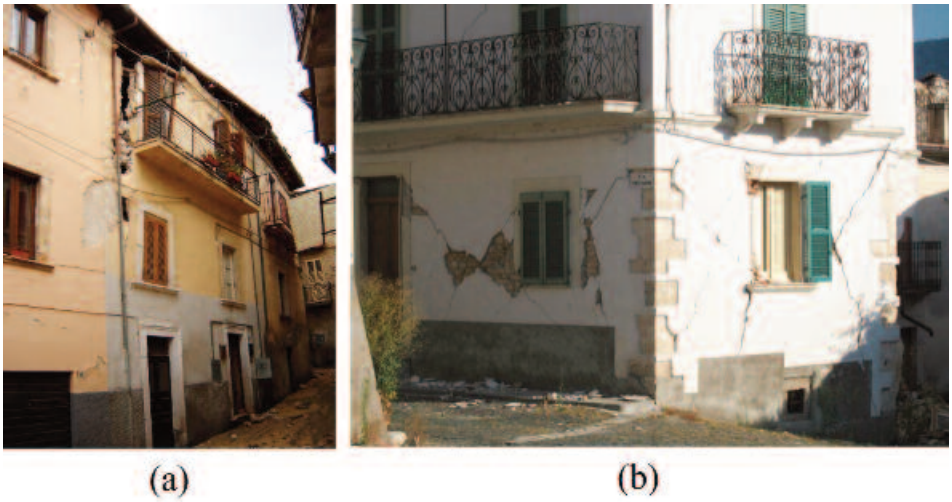
Le analisi dei danni rilevati a seguito di eventi sismici nelle strutture in muratura hanno, inoltre, evidenziato che, anche nei casi in cui non si siano verificati meccanismi fuori piano, si sono spesso rilevate ampie fessure diagonali (cosiddette crisi nel piano), come mostrato in figura 1b, chiaramente ascrivibili alla limitata capacità dei maschi murari di resistere alle azioni di taglio. Questo fenomeno riduce notevolmente la capacità portante delle strutture durante gli eventi sismici ed è una problematica principalmente imputabile alla limitata resistenza meccanica dei materiali utilizzati nella costruzione della muratura.

Di seguito vengono presentati esempi di soluzioni innovative volte a mitigare i meccanismi di rottura sia fuori piano che nel piano delle strutture in muratura.

2.1.1 Interventi per prevenire l'attivazione di meccanismi fuori del piano

Le tecniche tradizionali mirate alla prevenzione di meccanismi di rottura fuori del piano delle pareti in muratura sono molteplici e prevedono l'uso di tiranti in acciaio, cordoli in calcestruzzo armato o ancoraggi in acciaio inseriti tra pareti ortogonali. Tali soluzioni hanno oggi trovato una valida alternativa nell'utilizzo di materiali compositi; un tipico esempio è l'utilizzo di tiranti o cordoli in materiali compositi rinforzati, in forma di barre pultruse o tessuti in fibre di vetro impregnate in sito, come mostrato in figura 2 (Ceroni e Prota 2009).

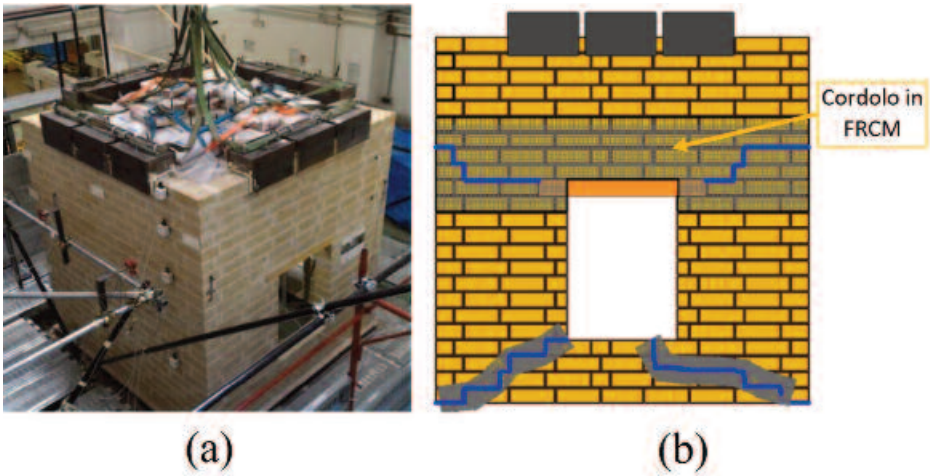
Al fine di valutare l'efficacia dei cordoli in materiale composito, ed in particolare mediante l'utilizzo di sistemi compositi (FRCM e malte fibrorinforzate) nel prevenire i meccanismi di rottura fuori piano (Maddaloni et al. 2018), è stata recentemente condotta una campagna sperimentale specificatamente mirata alla analisi del comportamento sismico di provini in muratura di tufo. Il programma sperimentale ha riguardato prove dinamiche su un edificio monopiano in scala 1:2, rappresentativo di edifici esistenti (come mostrato nella figura 3a. Le prove sono state condotte mediante l'ausilio di tavole vibranti che rappresentano il sistema più avanzato per riprodurre l'effetto del sisma sulle strutture.



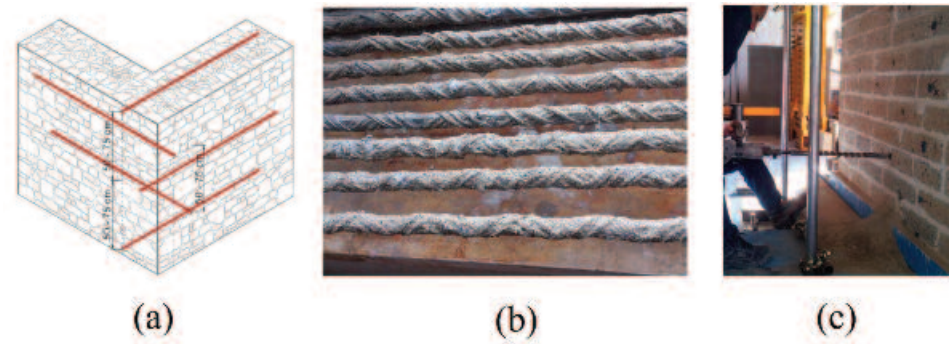
1. Meccanismi di danneggiamento nelle strutture in muratura dopo il terremoto di L'Aquila del 2009, a) cinematismo delle pareti fuori piano, b) crisi delle pareti nel piano.

2. Soluzioni di *retrofit* per la prevenzione della rottura fuori piano delle pareti in muratura, a) tiranti in FRP, b) cordoli in FRP.

Il provino in muratura è stato in primo luogo sottoposto ad una azione sismica di entità tale da produrre un danno severo ma riparabile sullo stesso e, successivamente, è stato sottoposto ad un intervento di rinforzo con l'uso di materiali compositi. Questo intervento ha coinvolto l'avvolgimento dell'intera struttura al fine di prevenire la rottura fuori piano (fig. 3b). In seguito, è stato applicato inoltre uno strato di malta fibrorinforzata di spessore ridotto (circa 2 cm.) attraverso cui garantire anche un incremento delle prestazioni nel piano delle murature. La strategia di intervento, pertanto, ha mirato a sanare in primo



3. Studio sperimentale su efficacia di sistemi di rinforzo in FRCM e malte fibrorinforzate, a) campione, b) schema di riparazione e *retrofit*.



4. Studio sperimentale sugli ancoraggi in FRP tra pareti ortogonali, a) schema esecutivo, b) connettori in CFRP, c) messa in opera dei connettori.

luogo i meccanismi prematuri di crisi (cinematismo fuori piano) attraverso soluzione in FRCM e poi i meccanismi di crisi nel piano (crisi taglianti) attraverso l'adozione di malte fibrorinforzate. La messa in opera di tale intervento ha notevolmente migliorato il comportamento strutturale complessivo del provino, trasformandolo in un blocco rigido in cui non sono stati rilevati meccanismi locali fuori piano o in piano. La soluzione di riparazione/rinforzo con FRCM e intonaco rinforzato con fibre, ha permesso di ripristinare le proprietà dinamiche iniziali del provino senza che danni siano stati osservati nonostante l'applicazione di azioni sismiche che hanno riprodotto l'evento sismico registrato a L'Aquila nel 2009. Questo tipo di tecnica di *retrofit* si caratterizza per la sua elevata efficienza e la scarsa invasività, in quanto può essere applicata interamente dall'esterno della struttura.

Una tecnica alternativa alla precedente consiste nell'utilizzare materiali compositi come connettori tra pareti ortogonali. Questa tecnica è stata recentemente testata e validata su un provino rappresentativo di connessioni murarie, vale a dire un provino in muratura in scala reale costituito da due elementi in muratura tra loro ortogonali (provino a forma di T), come mostrato in figura 4a (Maddaloni et al. 2016). Il provino è stato testato mediante l'applicazione simultanea di carichi verticali (per simulare il carico gravitazionale) e orizzontali ciclici (per simulare l'effetto dell'azione sismica) applicati in maniera pseudo-statica. Una prima prova ha avuto come obiettivo il raggiungimento di un danneggiamento significativo cui ha fatto seguito la fase di riparazione e rinforzo propedeutica alla successiva prova. Una volta riparate le fessure mediante iniezioni di malta super-fluida, si è proceduto alla installazione di sistemi di connessioni innovative tra la parete ortogonali. La connessione è stata realizzata mediante ancoraggi iniettati e realizzati con barre cave del diametro di 10 mm. in carbonio, CFRP (poliestere rinforzato con fibre di carbonio). Tali barre cave, inoltre, sono state avvolte longitudinalmente, e a spirale, con tessuti in acciaio inossidabile, il tutto per migliorare l'adesione tra malta e barre nonché tra il sistema di rinforzo e la muratura circostante (fig. 4b).

Grazie alla leggerezza dei tubi in CFRP, la procedura di installazione si è dimostrata semplice e veloce. L'avvolgimento dei tubi in CFRP con tessuti in acciaio inossidabile è risultato essenziale per evitare lo scorrimento tra il sistema di rinforzo e la muratura circostante. La soluzione di rinforzo si è dimostrata particolarmente efficace nel collegare le pareti ortogonali, conferendo al sistema nel suo complesso la capacità di sostenere azioni orizzontali di gran lunga superiori a quelle che hanno prodotto il danno sul provino non rinforzato (ed un incipiente innesco di cinematismo fuori piano) come chiaramente mostrato dall'attivazione di una rotazione rigida dell'intero provino.

2.1.2 Interventi per aumentare la capacità nel piano

I meccanismi di rottura fragili nel piano sono spesso riscontrati, a valle di eventi sismici, su murature di scarsa qualità. Per incrementare la capacità di resistere ad azioni di taglio nel piano dei maschi murari, una tipica soluzione di rinforzo prevede l'applicazione di intonaci armati, ovvero l'applicazione sui due lati della parete muraria di paretine in calcestruzzo connesse tra loro attraverso tiranti e al cui interno viene inserita una rete in acciaio. Sebbene questa tecnica sia risultata efficace nel migliorare la capacità resistente a taglio nel piano delle pareti in muratura, essa può indurre nel tempo effetti indesiderati quali l'innesco di fenomeni di corrosione della rete di rinforzo in acciaio. Un altro aspetto critico da segnalare è il significativo incremento di massa indotto dal sistema di rinforzo (a causa dello spessore significativo delle pareti, (5-10 cm.) nonché l'obbligo (per garantire l'efficacia dell'intervento ai sensi di quanto riportato nelle NTC18) di applicare il rinforzo su entrambi i lati della parete originaria in muratura (quindi

anche nella parte interna dell'edificio), collegandoli poi opportunamente mediante ancoraggi meccanici (tipicamente tiranti in acciaio).

I materiali compositi rappresentano un'adeguata alternativa agli intonaci armati tradizionali per il rinforzo nel piano delle pareti in muratura; in particolare, è oggi largamente diffusa la soluzione in FRCM che consente di perseguire gli stessi obiettivi prestazionali ma con spessori di intervento notevolmente ridotti (fig. 5). La soluzione, infatti, prevede l'immersione in una malta (comunemente a base calce sulle strutture in muratura) di una rete in fibra di vetro o basalto il cui spessore è trascurabile. Lo spessore del 'pacchetto' malta rete in questo modo risulta molto ridotto, 1-3 cm., e facilmente applicabile; sebbene sia sempre consigliato applicare il rinforzo su entrambe le facce della parete non è, tuttavia, fatto obbligo di ottemperare a tale requisito ed è possibile applicare il sistema in FRCM su una sola faccia del pannello purché si adottino connettori di lunghezza tale da penetrare all'interno dello strato più esterno del paramento non rinforzato. E' evidente, pertanto, che tale soluzione si presta ad applicazioni veloci e realizzate anche dal solo esterno del fabbricato, minimizzando così il disturbo agli occupanti l'edificio.

Numerose campagne sperimentali che hanno previsto l'esecuzione di prove a compressione diagonale (utili al fine di valutare la capacità a taglio di un pannello in muratura) sono state condotte nell'ultimo decennio sia su pannelli realizzati con diverse tipologie di muratura sia nella configurazione non rinforzata che rinforzata con sistemi in composito. Le sperimentazioni hanno dimostrato l'efficacia di questi sistemi nel migliorare la capacità di resistere a sollecitazioni di taglio nel piano dei provini in muratura (Prota et al. 2006, Marcari et al. 2007, Menna et al. 2015, Del Zoppo et al. 2019a, Del Zoppo et al. 2020, tra molti altri).

Recentemente si è anche attentamente esaminata l'efficacia di interventi eseguiti su di un solo lato del paramento murario (realizzabili esclusivamente dall'esterno) utilizzando diversi materiali compositi (non solo FRCM, ma anche malte fibrorinforzate, FRM – *Fiber Reinforced Mortar*, o più di recente con reti e angolari preformati in FRP immersi in strati di malta, CRM – *Composite Reinforced Mortar*. Il sistema CRM si differenzia dal sistema FRCM per lo spessore del pacchetto di intervento che nel caso di CRM supera i 3 cm. mentre nel caso di FRM la rete interna flessibile (FRCM) o rigida (CRM) viene sostituita dall'utilizzo di fibre corte immerse nella malta.

La sperimentazione ha mostrato che gli interventi applicati su un solo paramento murario sono risultati in grado di fornire un significativo incremento della capacità a taglio, con effetti collaterali trascurabili dovuti all'applicazione asimmetrica del rinforzo. L'impiego di materiali compositi come il CRM per il rinforzo della muratura nel piano, si è, inoltre, rivelato un'alternativa efficace e adeguata rispetto agli intonaci armati tradizionali (Del Zoppo et al. 2019a). In ogni caso l'utilizzo di materiali compositi offre numerosi vantaggi rispetto alle soluzioni convenzionali, tra cui la resistenza alla corrosione, la bassa invasività dell'intervento, applicabile anche solo esternamente, la reversibilità e la sostenibilità.

(a) (b)

5. Reti in FRP immerse in una matrice inorganica, a) dettaglio di un intervento in FRCM, b) messa in opera dell'intervento..

(a) (b)

6. Meccanismi di danneggiamento nelle strutture in calcestruzzo armato, a) rottura dei nodi trave-colonna, b) rottura per taglio delle colonne.

2.2 Interventi su edifici in c.a.

L'esperienza acquisita nell'analisi dei danni riscontrati sulle strutture in calcestruzzo armato dopo eventi sismici ha evidenziato che la maggior parte delle deficienze strutturali derivano dalla scarsa armatura a taglio nei nodi trave-colonna e negli elementi strutturali, e dalla mancanza di confinamento del calcestruzzo, come chiaramente mostrato in figura 6. Queste carenze possono indurre, in caso di evento sismico, all'innesco di meccanismi di crisi fragile, o all'innesco di meccanismi di collasso dovuto alla formazione di 'piani deboli' e/o a grandi spostamenti residui (Prota et al., 2004, Di Ludovico et al., 2008, Biskinis and Fardis, 2013, Del Vecchio et al., 2014, Del Zoppo et al., 2017).

Analisi numeriche hanno dimostrato che prevenire tale meccanismo di rottura fragile può aumentare significativamente il livello di sicurezza delle strutture in calcestruzzo armato esistenti. Di seguito si illustrano alcune soluzioni di *retrofit* per le strutture in calcestruzzo armato con materiali compositi.

2.2.1 Interventi sul nodo trave-pilastro

La rottura per taglio del nodo trave-pilastro rappresenta una minaccia significativa per la sicurezza sismica delle strutture in cemento armato. Tale problematica può condurre al collasso prematuro o a gravi danni strutturali. La crisi del nodo può essere prevenuta mediante l'adozione di diverse tecniche di intervento, alcune delle quali possono certamente condurre all'esecuzione di un intervento classificabile come *intervento locale*. Tra tali tecniche certamente l'utilizzo di materiali compositi è particolarmente idoneo alla realizzazione di interventi che non vadano a compromettere in modo significativo la massa e la rigidezza laterale dell'intera struttura, evitando così la necessità di un'analisi globale. L'intervento prevede tipicamente l'applicazione di sistemi in FRP (tessuti con fibre in diverse direzioni, comunemente quadriassiali) impregnati in sito ed applicati sul pannello nodale

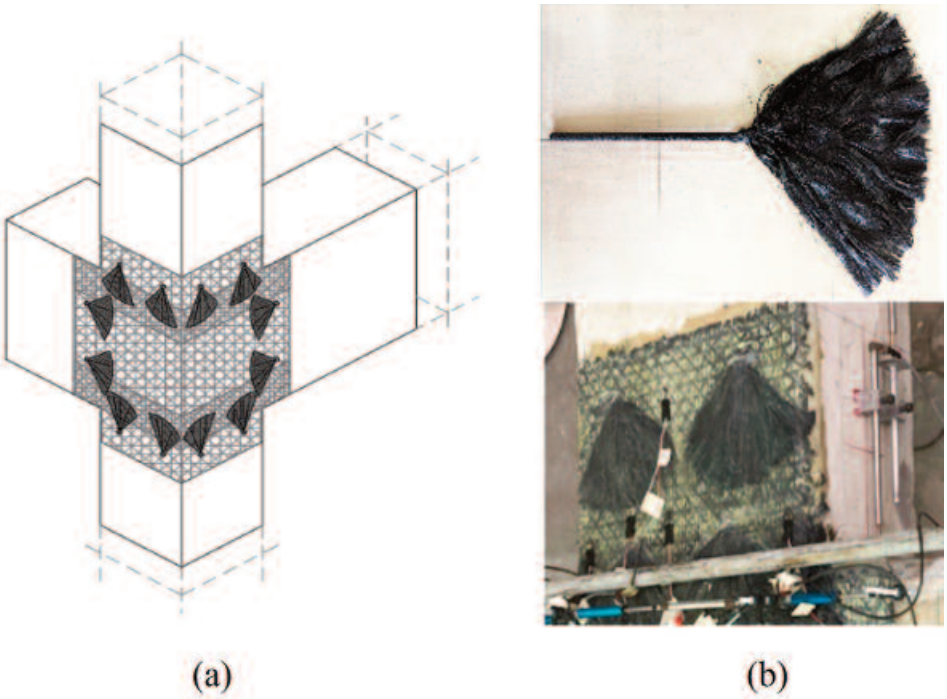
per fornire un contributo resistente integrativo a quello del calcestruzzo e sostitutivo a quello delle staffe (carenti o assenti del tutto nei nodi degli edifici esistenti). Tale soluzione già di per sé minimamente invasiva può, tuttavia, indurre piccole demolizioni di componenti non strutturali (tamponature) o di intonaci per essere messe in opera. Ciò evidentemente induce qualche disagio agli occupanti oltre a rendere più lunghi i tempi di intervento e, conseguentemente, i tempi di inutilizzo della costruzione. Al fine di eliminare tale disagio, si è recentemente deciso di esplorare soluzioni innovative di rinforzo che possano essere applicate con un impatto ancor più ridotto ovvero attraverso un processo di applicazione completamente realizzato dall'esterno. Una soluzione all'avanguardia, che offre una adeguata risposta a tale esigenza, oltre a garantire una veloce e facile applicazione, è mostrata in figura 7. L'innovazione è relativa all'utilizzo di fiocchi in FRP che vengono utilizzati come sistemi di ancoraggio del tessuto quadriassiale in sostituzione di classici sistemi realizzati attraverso fasce ad U avvolte attorno alla trave nella zona terminale del rinforzo.

Grazie a questa innovazione, è possibile migliorare la sicurezza delle strutture senza interrompere gravemente la fruibilità dell'edificio per lunghi periodi di tempo. La soluzione descritta è stata recentemente validata mediante prove sperimentali che hanno ampiamente dimostrato l'efficacia degli ancoraggi descritti. Sono attualmente in corso di esecuzione ulteriori prove mirate allo sviluppo di specifiche formulazioni che consentano, con un buon grado di affidabilità, il dimensionamento del numero di ancoraggi.

2.2.2 Interventi sui pilastri

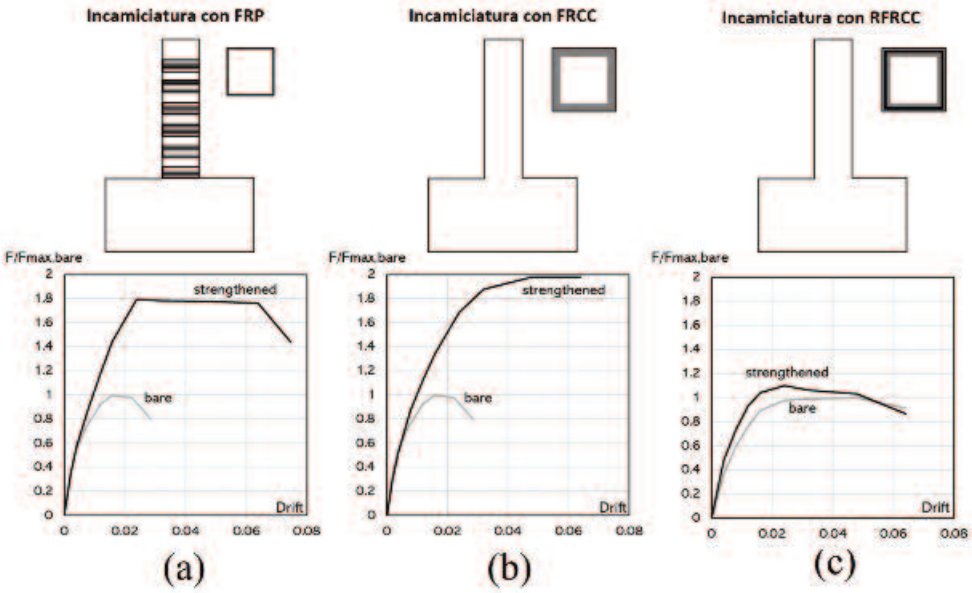
I pilastri rappresentano uno dei punti deboli nei riguardi delle prestazioni sismiche delle strutture in calcestruzzo armato, poiché spesso caratterizzati da materiali di bassa qualità e scarsa presenza di armatura trasversale. Ciò può portare allo sviluppo di meccanismi di rottura fragile, quale ad esempio la rottura per taglio.

L'impiego di materiali rinforzati con fibre a matrice polimerica (FRP), è oggigiorno ampiamente riconosciuto come una soluzione affidabile per potenziare la resistenza al taglio dei pilastri in calcestruzzo armato. Le fibre unidirezionali, sia continue che discontinue, possono efficacemente prevenire la rottura per taglio negli elementi in calcestruzzo armato, trasformando la modalità di crisi da fragile a duttile, a condizione che il sistema FRP venga progettato adeguatamente. (Del Zoppo et al., 2017). Inoltre, l'avvolgimento con FRP può anche risolvere il problema dell'interazione tra taglio e flessione, ossia la rottura per taglio che si verifica dopo l'attingimento della capacità a flessione (Del Zoppo et al., 2018). E', tuttavia, da segnalare che tali interventi, sebbene efficaci, devono spesso essere affiancati ad interventi di risanamento volti a sanare le problematiche connesse alla presenza di fenomeni di degrado legati alla corrosione delle armature ed alla conseguente espulsione (incipiente o già presente) del copriferro.



7. Intervento di rinforzo trave-colonna, a) schema esecutivo, b) fiocchi di ancoraggio.

Una soluzione innovativa, recentemente sviluppata e testata presso l'Università di Napoli, ha riguardato l'utilizzo di una nuova classe di compositi inorganici, i cosiddetti Compositi Cementizi Rinforzati con Fibre (FRCC - *Fiber Reinforced Cementitious Composites*). Tali materiali si presentano come una promettente soluzione per la riparazione ed il rinforzo dei pilastri in calcestruzzo armato, offrendo un miglioramento notevole sia in termini di capacità di resistenza a taglio che di durabilità strutturale. Nello specifico, l'applicazione di un leggero rivestimento di FRCC (pochi cm di spessore) a sostituzione dell'originario copriferro può apportare un significativo incremento nella capacità di resistenza al taglio (Del Zoppo et al., 2021) oltre, al contempo, a garantire uno strato di protezione delle armature interne più idoneo nei confronti dello sviluppo di futuri fenomeni di corrosione. Si sottolinea inoltre che l'intervento di rifacimento del copriferro sarebbe in ogni caso necessario (nel caso anche di adozione di sistemi in FRP o altre tecniche) qualora l'elemento sia caratterizzato da un calcestruzzo scadente o da significativi fenomeni di degrado. Inoltre, questo rivestimento ad alte prestazioni riduce il passaggio di agenti aggressivi grazie alla sua bassa porosità. Allo stesso tempo è opportuno sottolineare che l'incamiciatura 'leggera', in quanto di spessore ridotto e a sostituzione dell'originario copriferro, in FRCC può presentare una



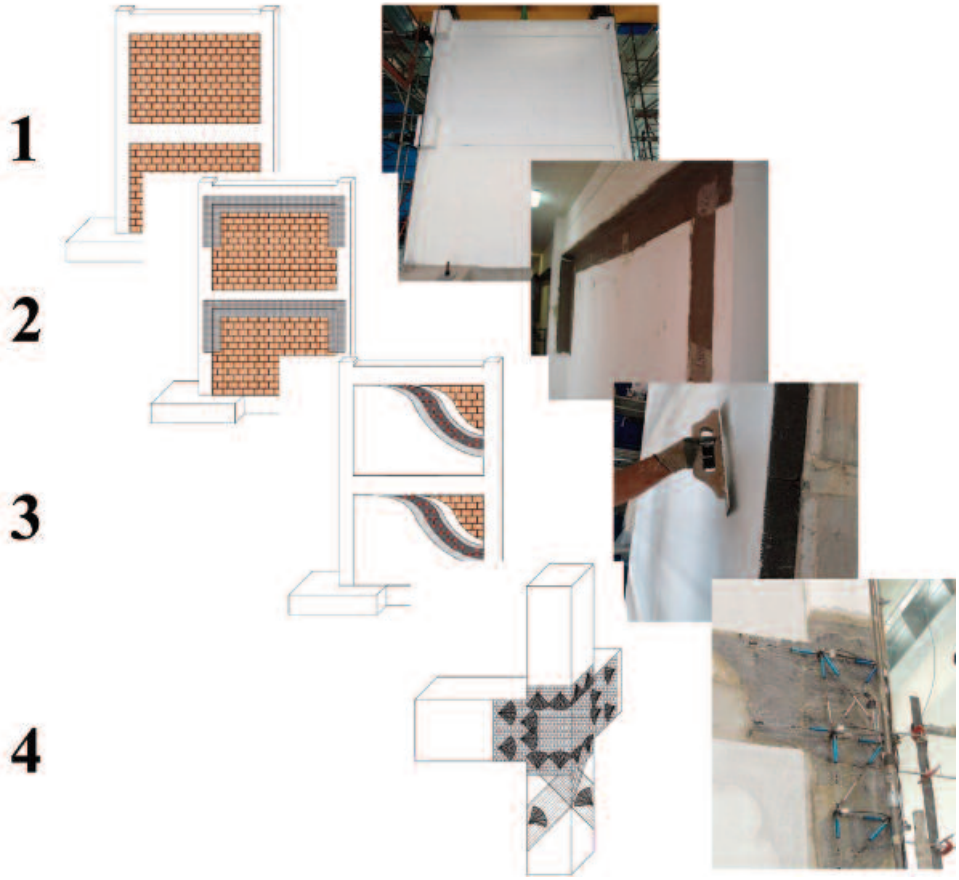
8. Risultati sperimentali: bare vs. strisce discontinue in FRP (a); bare vs. incamiciatura leggera con FRCC (b); bare vs. incamiciatura leggera in FRCC accoppiata con un rinforzo in acciaio ad alte prestazioni (c).

limitata capacità di deformazione prima della rottura della matrice. Queste limitazioni possono essere parzialmente superate mediante l'aggiunta di rinforzi in acciaio ad alte prestazioni (RFRCC), i quali non solo forniscono ulteriore supporto trasversale al rivestimento, ma migliorano anche la duttilità complessiva del sistema e, se necessario, agiscono come rinforzo flessionale aggiuntivo (Del Zoppo et al, 2023).

È possibile osservare in Figura 8 l'efficacia delle soluzioni di consolidamento discusse in precedenza. Difatti, si mostrano le curve di capacità normalizzate (rispetto alla capacità massima del pilastro di riferimento) relative al comportamento sperimentale di pilastri in calcestruzzo armato, sia senza intervento di rinforzo (*bare*) e sia con diverse tecniche di intervento (*strengthened*). Tali interventi includono strisce discontinue in fibra di carbonio, CFRP (fig. 8a), incamiciatura 'leggera' in FRCC (fig. 8b) e incamiciatura 'leggera' in FRCC accoppiato a un rinforzo in acciaio ad alte prestazioni (fig. 8c). Le curve mostrano chiaramente l'efficacia dei diversi sistemi nonché i loro pregi e difetti in termini prestazionali.

2.2.3 Protezione sismica degli elementi non strutturali

I recenti terremoti hanno, inoltre, messo in luce l'importanza dei danni e collassi degli elementi non strutturali degli edifici che, non solo possono causare feriti, ma influiscono notevolmente, se non in maniera preponderante, sui costi necessari per riparare e rendere nuovamente accessibili gli edifici danneggiati



9. Fasi di costruzione dell'intervento combinato di *retrofit* e di efficientamento energetico.

(Del Vecchio et al. 2020). Recentemente è nata una pressante necessità di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici esistenti che ha portato all'ampio utilizzo di interventi mirati a incrementare l'efficienza energetica degli stessi. Da qui è nata la necessità di sviluppare soluzioni che possano proteggere tali investimenti in caso di eventi sismici e ridurre le perdite dovute ai danni estesi.

Per affrontare questa sfida, è stato recentemente avviato un programma sperimentale per esaminare le prestazioni sismiche di un telaio in cemento armato bidimensionale in scala reale testato mediante prove pseudo-dinamiche, ovvero prove che, pur consentendo di riprodurre fedelmente l'azione sismica sul provino, garantiscono la possibilità di monitorare al passo il quadro fessurativo indotto dalle azioni impartite. Nel corso di questo programma sperimentale, il campione è stato rinforzato utilizzando una combinazione di materiali compositi applicati sia agli elementi strutturali che non strutturali. L'intervento ha mirato non solo ad

incrementare la capacità sismica del telaio oggetto di analisi, ma anche a valutare il comportamento dello stesso allorquando siano state adottate misure per migliorare l'efficienza energetica dell'edificio. Le prove sono state, pertanto, eseguite in maniera comparativa sul telaio non rinforzato e su quello rinforzato a valle di diverse tipologie di intervento: rinforzo del nodo trave-colonna per aumentare la capacità a taglio con l'applicazione di materiale composito (FRP); applicazione di sistemi in FRCM per connettere alla struttura la tamponatura ed evitare meccanismi fuori piano; applicazione di cappotto termico per efficientamento energetico (sistema EIFS, *Exterior Insulation and Finish Systems*), come mostrato in figura 9.

Le prove sperimentali hanno chiaramente mostrato l'efficacia del sistema di rinforzo nell'incrementare le prestazioni del telaio oggetto di studio.

Conclusioni

Nell'ambito della conservazione e valorizzazione del patrimonio edilizio è cruciale considerare interventi che siano finalizzati a migliorare l'efficienza energetica e la sicurezza sismica degli edifici esistenti. Tali interventi richiedono competenze tecniche approfondite e una prospettiva multidisciplinare per sviluppare soluzioni innovative e integrate.

In Europa, il progressivo invecchiamento del patrimonio edilizio pone sfide significative. Molte delle strutture esistenti non sono progettate per affrontare le moderne richieste sismiche o i requisiti di efficienza energetica imposti dalle direttive europee. In Italia, dove più della metà degli edifici è stato costruito prima del 1974, la questione della sicurezza sismica è particolarmente urgente a causa dei recenti e devastanti terremoti. L'adozione di un approccio integrato che combini miglioramenti nella sicurezza sismica ed efficienza energetica è fondamentale per affrontare questa sfida.

Studi e recenti sperimentazioni si sono concentrate sull'adozione di soluzioni che prevedano l'utilizzo di materiali avanzati di moderna concezione. L'utilizzo di materiali compositi, come i materiali fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) e i materiali compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM), si è dimostrato efficace per rinforzare elementi strutturali quali pareti in muratura e nodi trave pilastro o pilastri in calcestruzzo armato. Le pareti in muratura possono beneficiare dell'uso di tiranti o cordoli in FRP per prevenire l'innesco di cinematismi fuori piano, mentre l'intonaco rinforzato con fibre può aumentare la capacità nel piano delle stesse pareti in muratura. Nel caso dei pilastri in calcestruzzo armato, l'impiego di FRP o compositi cementizi rinforzati con fibre (FRCC) può migliorare la resistenza al taglio e la durabilità. Soluzioni innovative, come i connettori iniettati in FRP, sono state poi sviluppate per rinforzare i nodi trave-colonna. Inoltre, la protezione sismica degli elementi non strutturali è cruciale, specialmente

se si considerano i notevoli investimenti in corso per raggiungere l'obiettivo di una maggiore efficienza energetica degli edifici. Interventi combinati che prevedano l'applicazione simultanea di materiali compositi a sistemi di isolamento termico esterno (EIFS), possono proteggere questi elementi riducendo pertanto le perdite attese in caso di azione sismica oltre ad incrementare significativamente la sicurezza delle strutture esistenti.

Riferimenti bibliografici

ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili), Audizione dell'ANCE 'Sulla Situazione dell'Edilizia Scolastica in Italia', 2013

CALDERONI B., CORDASCO E.A., DEL ZOPPO M., PROTA A.

- *Damage assessment of modern masonry buildings after the L'Aquila earthquake*, Bulletin of earthquake engineering 18(5), 2020, pp. 2275-2301

CNR-DT 200 R1/2013

- *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures e materials, RC and PC structures, masonry structures*, Italian National Research Council, 2013

CNR-DT 215/2018

- *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for Strengthening Existing Structures*, Italian National Research Council, 2018

- *Consiglio dei Ministri: Incentivi per l'efficientamento energetico (ECO-BONUS), 2020*

DEL VECCHIO C., DI LUDOVICO M., PROTA A.

- *Repair costs of reinforced concrete building components: From actual data analysis to calibrated consequence functions*. Earthq. Spectra 2020, 36, pp. 1-25

DEL ZOPPO M., DI LUDOVICO M., BALSAMO A., PROTA A., MANFREDI G.

- *FRP for seismic strengthening of shear kcontrolled RC columns: Experience from earthquakes and experimental analysis. Composites Part B*: Engineering 129, 2017, pp. 47-57

DEL ZOPPO M., DI LUDOVICO M., BALSAMO A., PROTA A.

- *Comparative analysis of existing RC columns jacketed with CFRP or FRCC*, Polymers 10(4), 361, 2018

- *In-plane shear capacity of tuff masonry walls with traditional and innovative Composite Reinforced Mortars (CRM*). Construction and Building Materials 210, 2019a, pp. 289-300

DEL ZOPPO M., DI LUDOVICO M., PROTA A.

- *Analysis of FRCM and CRM parameters for the in-plane shear strengthening of different URM types. Composites Part B*: Engineering 171, 2019b, 20-3

DEL ZOPPO M., DI LUDOVICO M., BALSAMO A., PROTA A.

- *Diagonal compression testing of masonry panels with irregular texture strengthened with inorganic composites*, Materials and Structures 53(4), 2020, pp. 1-17

- *Repair, flexural upgrading and seismic retrofit of RC columns with Reinforced light FRCC jacket*, Submitted to Constructions and Building Materials, 2023

DEL ZOPPO M., MENNA C., DI LUDOVICO M., ASPRONE D., PROTA A.

- *Opportunities of light jacketing with Fibre Reinforced Cementitious Composites for seismic retrofitting of existing RC columns.* Composite Structures 263, 113717, 2021

DI LUDOVICO M., DIGRISOLO A., GRAZIOTTI F., MORONI C., BELLERI A., CAPRILI S., CAROCCI C., DALL'ASTA A., DE MARTINO G., DE SANTIS S., FERRACUTI B., FERRETTI D., FIORENTINO G., MANNELLA A., MARINI A., MAZZOTTI C., SANDOLI A., SANTORO A., SILVESTRI S., SORRENTINO L., MAGENES G., MASI A., PROTA A., DOLCE M., MANFREDI G.

- *The contribution of ReLUIS to the usability assessment of school buildings following the 2016 central Italy earthquake*, Boll. Di Geofis. Teor. Ed Appl. 58, 2017, pp. 353–376

DI LUDOVICO M., PROTA A., MORONI C., MANFREDI G., DOLCE M.

- *Reconstruction process of damaged residential buildings outside the historical centres after L'Aquila earthquake* - part II: 'heavy damage' reconstruction, Bull. Earthq. Eng. 15, 2017, pp. 693–729

Externally applied FRP reinforcement for concrete structures, Federation Internacionale du beton *fib* Bulletin 90, fib TG 5.1, Task Group 5.1 FRP, 2019

GIARDINI D. et AL.

- *Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource,* doi: 10.12686/SED00000001-SHARE, 2013

GRANT D.N., BOMMER J.J., PINHO R., CALVI G.M., GORETTI A., MERONI F.

- *A prioritization scheme for seismic intervention in school buildings in Italy,* Earthq, Spectra 23, 2007

MADDALONI G., DI LUDOVICO M., BALSAMO A., PROTA A.

- *Out-of-plane experimental behaviour of T-shaped full scale masonry wall strengthened with composite connections. Composites* Part B: Engineering 93, 2016, pp. 328-343

MADDALONI G., DI LUDOVICO M., BALSAMO A., PROTA A.

- *Dynamic assessment of innovative retrofit techniques for masonry buildings. Composites* Part B: Engineering 147, 2018, pp. 147-161

MARCARI G., MANFREDI D., PROTA A., PECCE M.

- *In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP, Composites* Part B: Engineering 38(7-8), 2007, pp. 887-901

MENNA C., ASPRONE D., DURANTE M., ZINNO A., BALSAMO A., MENNA C., ASPRONE D., DURANTE M., ZINNO A., BALSAMO A., PROTA A.

- *Structural behaviour of masonry panels strengthened with an innovative hemp fibre composite grid.* Construction and Building Materials 100, 2015, pp.111-121

PROTA A., MARCARI G., FABBROCINO G., MANFREDI G., ALDEA C.

- *Experimental in-plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix–grid composites*, Journal of Composites for Construction 10 (3), 2006, pp. 223-233.

UE Directive 2010/30/EU on the Indication by Labelling and Standard Product Information of the Consumption of Energy and Other Resources by Energy-Related.

UE, Directive 2010/31/EU: the Energy Performance of Buildings, 2010

Metodologie per gli interventi di efficienza energetica sul patrimonio edilizio tutelato: obiettivi, peculiarità e criticità

Filippo de Rossi, Claudia Colosimo

1. Obblighi ed obiettivi legislativi per gli interventi di prestazione energetica sul patrimonio edilizio

Il settore Civile, e in particolare quello residenziale, come noto, rappresenta, in Italia ed in tutta Europa, il settore con il maggior consumo di energia primaria e la maggior quantità di emissione di gas climalteranti. Pertanto, è il settore verso cui si indirizzano maggiormente gli strumenti legislativi, regolatori e fiscali, sia comunitari che nazionale, al fine di traguardare obiettivi ambiziosi nell'ambito della transizione ecologica, quale la decarbonizzazione del parco immobiliare al 2050. E' evidente che per raggiungere tale obiettivo sono necessari interventi capillari e diffusi alla scala dell'edificio ma anche alla scala urbana con le relative infrastrutture.

Riferendosi al patrimonio costruito degli edifici, distinguibili per destinazione d'uso, per epoca costruttiva, per materiali e sistemi costruttivi impiegati, per contesto in cui sono inseriti a livello comunitario, le direttive sulla *performance* energetica degli edifici *EPBD* (*Energy Performance Building Directive*), succedutesi a partire dal 2002, individuano linee di indirizzo ed obiettivi comuni lasciando a ciascuno Stato la declinazione di specifiche prescrizioni, verifiche, obblighi e deroghe. La direttiva 2010/31/CE anche detta EPBD II o *recast* è alla base dell'attuale impianto legislativo nazionale, basato sulla legge di recepimento n.90 del 2013 e sui suoi decreti attuativi D.M. 26.6.2015.

E' con questi decreti che viene introdotta l'attuale metodologia di calcolo della classe energetica degli edifici basata sull'edificio di riferimento e vengono individuati i nuovi requisiti minimi da rispettare per le nuove costruzione (*nzeb, nearly zero energy building*) e per gli edifici esistenti oggetto di ristrutturazione.

Per qualsiasi tipologia di intervento è sempre prevista la redazione della relazione sul contenimento dei consumi energetici, secondo lo schema contenuto nel suddetto decreto ministeriale, opportunamente corredata di tutti gli allegati obbligatori. All'interno di tale relazione vanno esplicitamente indicate eventuali deroghe adottate ovvero l'impossibilità di rispetto delle verifiche previste.

In merito alle deroghe, il par. 1.4.3 dell'allegato 1 del D.M. 26.6.2015 'Requisiti minimi' prevede che sia necessario ottemperare agli obblighi previsti dal decreto ogni qual volta si interviene su strati che non sono ininfluenti dal punto di vista

termico e che laddove si rimuova l'intonaco per oltre il 10% della superficie lorda disperdente è necessario procedere alle verifiche previste dal caso. Questa deroga, apparentemente ragionevole ed utile, ha non poche difficoltà di utilizzo proprio nei centri storici e laddove regolamenti e disposizioni locali vietino gli interventi di isolamento termico, perché in tal caso risulta difficile intervenire anche solo ai fini di miglioramento delle condizioni di sicurezza strutturale dell'edificio e quindi di conservazione del bene stesso.

Le deroghe, che possono quindi facilitare, almeno sul piano legislativo, la conciliazione tra efficientamento energetico e tutela richiedono sempre un'interazione ed una valutazione multidisciplinare condivisa, sin dalle fasi preliminari, anche con gli enti e le istituzioni locali; tant' è che il D.Lgs. 192 del 19 agosto del 2005 , decreto cardine per la prestazione energetica in edilizia, all'art. 3 comma 3 individua tra gli edifici esclusi dall'applicazione del decreto stesso: «gli edifici ricadenti nell'ambito della disciplina della parte seconda e dell'articolo 136 del D.Lgs. 42/2004»; ed al successivo comma 3-bis specifica che: «gli edifici di cui all'art.3 comma 3, lettera a), sono esclusi dall'applicazione del presente decreto ai sensi del comma 3-bis, solo nel caso in cui, previo giudizio dell'autorità competente al rilascio dell'autorizzazione ai sensi del codice di cui al decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, il rispetto delle prescrizioni implichi un'alterazione sostanziale del loro carattere o aspetto, con particolare riferimento ai profili storici, artistici e paesaggistici». Al fine di facilitare il dialogo tra i soggetti coinvolti nei processi di riqualificazione degli edifici, ed in particolare tra progettisti ed enti preposti alla tutela del bene, il Ministero dei beni culturali nel 2015 ha emanato le *Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale - Architettura, centri e nuclei storici ed urbani*, che contengono criteri e metodi sia per i progettisti che per le Amministrazioni; ma tali linee rappresentano solo una generica cornice di inquadramento che non può prescindere da valutazioni per ciascun caso specifico.

La legislazione energetica deve poi incrociare la disciplina edilizio-urbanistica per individuare i titoli e gli iter idonei alla realizzazione di un eventuale intervento di efficientamento energetico ed anche su questo aspetto per i beni con vincolo di tutela d'area, il più diffuso sul territorio nazionale, ai sensi della parte III del Codice dei beni culturali (artt. 136 e 142), sono state negli anni introdotte delle procedure semplificate per acquisire il parere degli Enti preposti, tra cui il D.P.R. 31/2017 che disciplina l'autorizzazione paesaggistica semplificata per gli interventi di lieve entità.

Nonostante il prolifico susseguirsi di leggi, gli obiettivi di riduzione dei consumi energetici negli edifici non sono stati raggiunti a causa sia di complessità legislative, che determinano aleatorietà dei tempi di progettazione, autorizzazione ed esecuzione degli interventi stessi, che di una mancanza di supporto finanziario, in un Paese in cui, secondo l'OIPE nel 2020, 2.1 milioni di famiglie (8% del to-

tale) si trovano in condizioni di povertà energetica. Lo stesso strumento finanziario tanto dibattuto del Superbonus 110%, introdotto dal D.L. 34/2020, pur avendo attivato molti cantieri (411.871 il numero degli edifici coinvolti al mese di maggio 2023 e 78.353.945.998 euro totale degli investimenti), non è riuscito a migliorare in maniera netta la classificazione energetica media del parco immobiliare esistente.

Pertanto, per raggiungere il nuovo obiettivo di decarbonizzazione del parco immobiliare al 2050 la nuova direttiva europea, in fase di approvazione, introduce parametri molto stringenti in un'ottica sempre maggiore di economia circolare e di sostenibilità, non solo energetica ma anche ambientale, degli edifici nell'arco della loro vita utile. La nuova direttiva prevede, con riferimento alla classificazione energetica degli edifici, entro il 2030 (entro il 2027 per gli edifici non residenziali) che tutti gli edifici residenziali esistenti debbano essere in classe energetica E ed entro il 2033 in classe energetica D ed inoltre, da gennaio 2026 gli edifici pubblici di nuova costruzione dovranno essere ZEB (*zero emission buildings*). Tuttavia sono esclusi dagli obblighi introdotti diverse tipologie edilizie tra cui gli edifici vincolati e protetti, quelli storici e quelli ecclesiastici.

Lo stesso approccio di valutazione nell'arco della vita utile finalizzato a ridurre la produzione di rifiuti ed il costo di esercizio di un edificio è contenuto nel D.M. 23.6.2022, *Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi*, brevemente detto 'CAM Edilizia'. Questo decreto, che si applica a qualsiasi tipologia di opera della Pubblica Amministrazione, patrimonio storico incluso, prevede espliciti criteri energetici a tutti i livelli, scala territoriale-urbanistica, scala dell'edificio, scala dei componenti e gestione della fase di cantiere.

La riduzione dei consumi energetici di settore, sia pubblici che privati, viene promossa anche nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, varato nel 2020, con circa 60 miliardi dedicati alla misura M2, rivoluzione verde e transizione ecologica, ed in particolare alle scuole, ai tribunali, all'edilizia residenziale: oltre al rispetto delle normative energetiche ed ambientali sinora citate viene anche aggiunto il rispetto del principio DNSH, *do not significant harm*, cioè il principio di non arrecare danno significativo all'ambiente.

Al di là degli obiettivi comunitari e degli obblighi legislativi occorre anche considerare che la riduzione dei consumi degli edifici non deve compromettere, bensì deve migliorare, le condizioni di comfort *indoor* e proprio la ricerca del benessere da parte dell'individuo rende difficile la riduzione del fabbisogno energetico pro-capite in cui oramai rientrano servizi a cui l'uomo difficilmente potrà rinunciare in nome di un beneficio collettivo.

Quanto sin qui esposto va coniugato con l'esigenza di tutelare il patrimonio costruito, intendendo genericamente con il termine tutela, la conservazione del

paesaggio e delle caratteristiche storiche, artistiche ed architettoniche degli edifici esistenti. Ai sensi dell'art.9 della Costituzione: «La Repubblica promuove lo sviluppo della cultura e la ricerca scientifica e tecnica. Tutela il paesaggio e il patrimonio storico e artistico della Nazione. Tutela l'ambiente, la biodiversità e gli ecosistemi, anche nell'interesse delle future generazioni. La legge dello Stato disciplina i modi e le forme di tutela degli animali». Si tratta dunque di un principio, quello della tutela, imprescindibile che deve essere opportunamente coniugato, però, con le esigenze energetiche delle collettività.

2. Metodologia di intervento sul patrimonio costruito: obiettivi, peculiarità e criticità

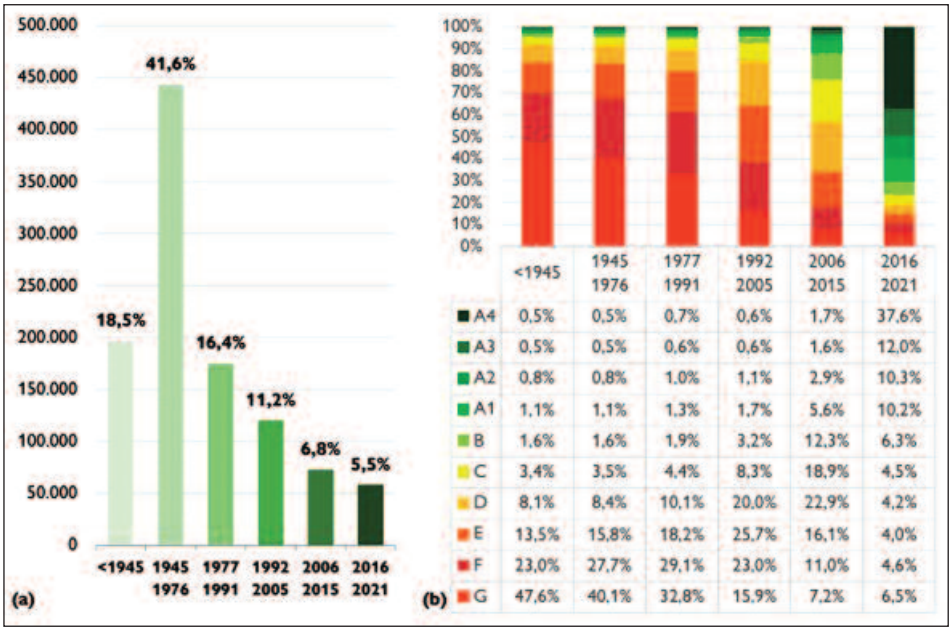
Il patrimonio costruito nazionale è composto da oltre il 50% di immobili edificati nel secondo dopoguerra e prima dell'emanazione della legge n.373/1976, prima legge sulla prestazione energetica in edilizia.

Dal Rapporto annuale Enea sull'efficienza energetica (fig. 1), emerge che la classe energetica G è la classe energetica di oltre il 40% degli immobili edificati ante 1945 e di oltre il 70% degli immobili ad uso residenziale ed assimilati (classe E.1 secondo D.P.R. 412/1993).

È altresì evidente che la classe energetica ha un valore indicativo e un contenuto informativo standardizzato spesso non coincidente con i reali consumi energetici; soprattutto per il patrimonio storico l'attestato di prestazione energetica è un'etichetta che non consente di fare valutazioni *tailored* dettagliate sul singolo edificio, sui suoi consumi e sulle possibili tipologie di intervento. Per tali edifici l'individuazione di una soluzione di efficientamento energetico non può prescindere dall'acquisizione di una moltitudine di dati sull'edificio e sul suo uso, presente e futuro, che solo una diagnosi energetica – come definita dal D.Lgs. 115/2008 e normata dalla UNI 16247 – può contemplare.

Tuttavia, tale necessità di conoscenza richiede tempo, indagini ed integrazioni di competenze professionali diversificate, quali ad esempio, quelle energetiche, impiantistiche, strutturali, acustiche, di restauro, ma non solo con i conseguenti costi che spesso i committenti privati non possono sostenere. La conseguenza è un progetto soggetto a frequenti revisioni che spesso non arriva a trasformarsi in cantiere lasciando pertanto, nel concreto, un edificio al suo stato iniziale sia di degrado che di inefficienza energetica. Dunque, la riduzione dei consumi energetici delle città storiche è sicuramente una sfida della contemporaneità.

Tanto premesso, approfondendo nel dettaglio la prestazione energetica degli edifici secondo l'attuale impianto normativo l'edificio è un sistema complesso, composto da una parte prevalentemente passiva, l'involucro, e da una attiva,



	<1945	1945 1976	1977 1991	1992 2005	2006 2015	2016 2021
A4	0,5%	0,5%	0,7%	0,6%	1,7%	37,6%
A3	0,5%	0,5%	0,6%	0,6%	1,6%	12,0%
A2	0,8%	0,8%	1,0%	1,1%	2,9%	10,3%
A1	1,1%	1,1%	1,3%	1,7%	5,6%	10,2%
B	1,6%	1,6%	1,9%	3,2%	12,3%	6,3%
C	3,4%	3,5%	4,4%	8,3%	18,9%	4,5%
D	8,1%	8,4%	10,1%	20,0%	22,9%	4,2%
E	13,5%	15,8%	18,2%	25,7%	16,1%	4,0%
F	23,0%	27,7%	29,1%	23,0%	11,0%	4,6%
G	47,6%	40,1%	32,8%	15,9%	7,2%	6,5%

1. Distribuzione degli APE per periodo di costruzione (a) e distribuzione percentuale degli APE per periodo di costruzione e classe energetica (b). Fonti: Regioni e Province Autonome e SiApe.

gli impianti, parti che interagiscono ed interferiscono reciprocamente sulla base anche del comportamento dell'utente, e quest'ultima è a sua volta una componente meno facile da modellare.

Solitamente, gli edifici del settore civile sono caratterizzati da consumi energetici che dipendono fortemente dalle caratteristiche dell'involucro e dal clima esterno, cosiddetti 'involucro-dipendenti' e, quindi, gli impianti maggiormente coinvolti negli interventi di efficientamento energetico sono quelli termici destinati alla climatizzazione dell'edificio, necessari per mantenere le condizioni di comfort termo-igrometrico *indoor*. Gran parte del patrimonio costruito, secondo i dati pubblicati annualmente da Enea, è dotato di impianti termici alimentati da fonti fossili, quali gas naturale e gpl.

Le azioni per ridurre i consumi energetici del patrimonio edilizio genericamente tutelato sono riconducibili a tre categorie di intervento, presentate anche nei casi studio del paragrafo seguente:

- riduzione dei fabbisogni termici mediante interventi passivi sull'involucro;
- riduzione dei consumi mediante l'adozione di impiantistica di elevata efficienza;
- integrazione di dispositivi di conversione da fonti energetiche rinnovabili.

3. Casi studio di intervento sul patrimonio costruito residenziale e non residenziale

I casi studio che si illustrano nel seguito sono stati selezionati per mostrare la complessità di analisi e di intervento sul patrimonio tutelato. I tre casi studio sono ubicati nel Comune di Napoli, zona climatica C ai sensi del D.P.R. 412/1993.

Inquadrando genericamente il Comune di Napoli dal punto di vista della tutela del paesaggio l'archivio digitale *vincolinrete.it* riporta circa 2.500 beni architettonici tutelati, di cui circa il 50% sono edifici residenziali; se si considerano i dati del Censimento Comunale del 2001, gli edifici residenziali nel territorio comunale sono 34206 e quindi i beni tutelati, con vincolo diretto, rappresentano circa il 4%.

Il primo caso studio è un edificio storico residenziale *Palazzo Cellamare*, con decreto di vincolo 'diretto', ubicato nel quartiere Chiaia del Comune di Napoli (fig. 2).

La fondazione del Palazzo risale al primo decennio del XVI secolo per la volontà dell'abate di Sant'Angelo di Atella, Giovanni Francesco Carafa. Succedutogli il nipote Luigi Carafa nel 1531, questi incaricò Ferdinando Manlio di restaurare completamente l'edificio secondo i più tipici gusti cinquecenteschi.

Nel XVII secolo, il palazzo fu assalito dal popolo durante la rivolta di Masaniello e fu adibito a lazzaretto durante l'epidemia di peste del 1656. Nel 1689, poi, morto l'ultimo principe di Stigliano (Nicola Maria de Guzmàn Carafa), l'edificio divenne proprietà dello Stato. Nel XVIII secolo fu acquistato dal duca genovese Antonio del Giudice, principe di Cellamare e duca di Giovinazzo. Fu poi dimora del principe di Francavilla Michele Imperiali. Nel corso del XIX secolo, con la forte urbanizzazione dell'area sulla quale insiste il palazzo, alcuni lavori hanno ridotto in grande misura la vista panoramica della villa.

La parte del Palazzo esposta a nord verso il grande giardino posteriore fu oggetto di bombardamento nel secondo conflitto bellico e successiva ricostruzione.

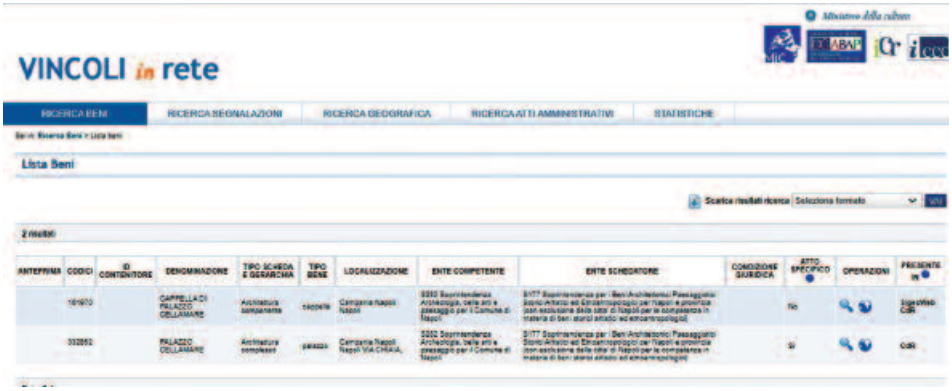
Il palazzo dispone sul retro anche di un vasto giardino, presente sin dalla metà del XVI secolo. Al centro del quale vi sono alcuni frammenti di una fontana realizzata da Giovanni da Nola.

I saloni di rappresentanza, infine, sono stati affrescati da pittori locali come Giacomo del Pò, Pietro Bardellino, Giacinto Diano, Fedele e Alessandro Fischetti.

Nel 1948 è stato aperto in alcune cave di tufo al di sotto del palazzo (usate a suo tempo per reperire i materiali di costruzione dell'edificio) il cine-teatro *Metropolitan*, su progetto dell'architetto Stefania Filo Speziale.

Nel settembre del 2021 sono cominciati i lavori di restauro di tutti i prospetti esterni e interni dell'edificio. Attualmente (aprile 2023) l'edificio è in fase avanzata di restauro (fig. 3).

Tanto premesso, circa il valore storico-artistico ed architettonico del complesso edilizio la Committenza, insieme di soggetti privati per circa 57 unità

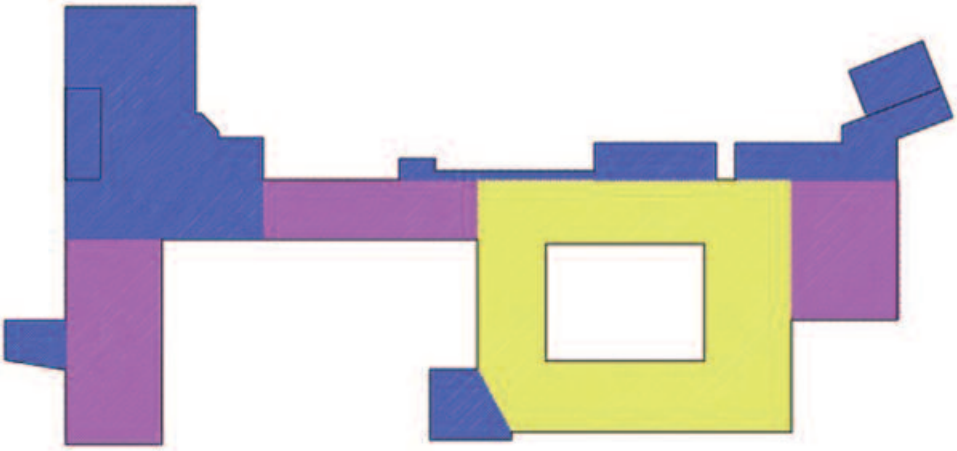


2. Visura portale VincoliinRete Mibact -Palazzo Cellamare.

3. Vista Palazzo Cellamare da Google Maps.

immobiliari censite nel 2018 decide da valutare la possibilità di ricorrere ad alcuni bonus allora vigenti, come l'Ecobonus per le parti comuni ed il Sismabonus, per intervenire su alcune porzioni dell'edificio.

Dal punto di vista dei componenti energetici dell'edificio, l'edificio può essere suddiviso in tre blocchi: un primo edificato nel 1500, un successivo ampliamento del '700 ed, infine, una ricostruzione post-bellica, come già precedentemente scritto (fig. 4). Si tratta di un edificio in muratura portante in



4. Suddivisione schematica di Palazzo Cellamare per epoca costruttiva (in giallo il blocco del 1500, in viola l'ampliamento del 1700 ed in blu la ricostruzione del 1900).

tufo giallo napoletano con spessori variabili da un minimo di 30 cm., per la parte oggetto di ricostruzione nel '900, ad un massimo di 150 cm., con solai prevalentemente lignei, putrelle e voltine e solai latero-cementizi per alcune coperture piane e/o ricostruite. Per i serramenti c'è una enorme eterogeneità, sia materica dei telai, che di colore degli stessi avendo molti proprietari delle unità immobiliari provveduto negli anni alla sostituzione. Infine in merito agli impianti termici molte unità sono sprovviste di impianto termico fisso o dotate di caldaie a gas tradizionali.

Per la parte energetica gli interventi richiesti riguardavano genericamente la sostituzione dei serramenti e relativi sistemi schermanti e l'isolamento termico dei sottotetti e di alcune coperture piane.

Prima di valutare la fattibilità degli interventi richiesti sono stati effettuati molti sopralluoghi in situ, sia all'esterno che in ciascuna unità immobiliare, finalizzati a rilevare le peculiarità e le criticità degli interventi sia sismici che energetici, oltre che necessari ad effettuare un rilievo geometrico, materico ed a mappare il degrado degli intonaci esterni.

Sono stati esclusi dall'intervento i solai delimitanti il salone centrale affrescato per preservare le condizioni termo-igrometriche che hanno consentito la conservazione di tali opere d'arte.

In merito ai serramenti spesso quelli presenti negli edifici presentano diverse criticità quali le dimensioni cospicue, la mancata tenuta all'aria e all'acqua, il degrado della finitura superficiale esterna e sistemi di chiusure esterni/interni specifici oltre a problemi di isolamento acustico.

Tuttavia le attuali tecnologie disponibili sul mercato prevedono linee di prodotto specifiche, come infissi in legno-alluminio che rispettano le geometrie

ed il fasto dei serramenti antichi con una vastissima gamma dei profili e dei colori che sono in grado di soddisfare ogni esigenza e con sistemi oscuranti interni ed esterni che rimandano, per forme e materiali, ad elementi architettonici da sostituire e valorizzare, con possibilità di integrare anche componenti per la ventilazione. In alternativa è possibile anche la sostituzione della sola componente vetrata.

Nel caso in esame è stato possibile individuare serramenti in alluminio con finitura interna lignea, dotati di vetrocamera e modanature quasi similari a quelli originali ma tale proposta progettuale è risultata molto onerosa per le grandi superfici vetrate del salone centrale, anche dotate di scuri interni.

Non risultano impattanti sul valore storico artistico del bene l'isolamento dei sottotetti non abitabili lato estradosso ed anche l'isolamento dei solai di copertura distribuiti su diversi livelli, utilizzando materiali isolanti in grado di contenere quanto più possibile lo spessore e conservare pertanto le quote di calpestio esistenti.

Infine, durante le valutazioni preliminari è emersa la volontà di esaminare la possibilità di isolare dall'esterno il blocco edilizio post bellico, maggiormente disperdente per esposizione e caratteristica costruttiva. Sono state effettuate delle prove di strappo degli intonaci per la posa di pannelli isolanti con sistema a cappotto prevedendo il rifacimento anche di tutti gli elementi decorativi di facciata con cornice realizzate con stampanti 3d in materiale alleggerito e compatibile con il sottostante sistema a cappotto. Sempre con riferimento agli interventi passivi di riduzione dei consumi energetici si è anche proposto l'utilizzo di termointonaci naturali a basi di sughero nelle parti di edificio dove l'intonaco è distaccato, fortemente degradato e soprattutto oggetto di rifacimenti negli anni spesso poco coerenti con i principi di restauro delle facciate.

Circa gli interventi attivi è possibile la sostituzione delle caldaie autonome obsolete con caldaie a condensazione, la sostituzione degli scaldabagni elettrici con scaldacqua a pompa di calore senza unità motocondensante esterna per non impattare sui prospetti, e in alcuni casi l'installazione di nuovi impianti di riscaldamento/raffrescamento mediante sistemi a pompa di calore privi di unità esterna motocondensante per garantire le minime condizioni di comfort termoigrometrico *indoor* in alcuni vani. Infine, si è anche valutata la possibilità di installare degli impianti da f.e.r. da fonte solare, del tipo tegole fotovoltaiche, almeno su quelle coperture di recente rifacimento; tale tipologia di impianto ha una bassa efficienza ed un elevato costo specifico ma consente di limitare l'impatto sul valore del bene tutelato.

Il complesso edilizio opportunamente modellato energeticamente ha una classe energetica F, compatibile con l'edilizia storica avente similari caratteristiche costruttive, e raggiungerebbe con gli interventi passivi sopracitati una classe energetica E, con una riduzione di circa il 20% dell'indice di prestazione energetica globale.

	Trasmittanza termica attuale U (W/mqK)	Trasmittanza termica progetto U (W/mqK) D.M. 26.6.15 APP. B (comprensiva di ponti termici)
Pareti perimetrali nord (sp. min 50 cm.)	0,96	0,36
Pareti cassa scala	0,96	0,80
Solaio di primo impalcato	1,90	0,38
Solaio di copertura	0,70	0,32
Serramenti	4,00	2,10

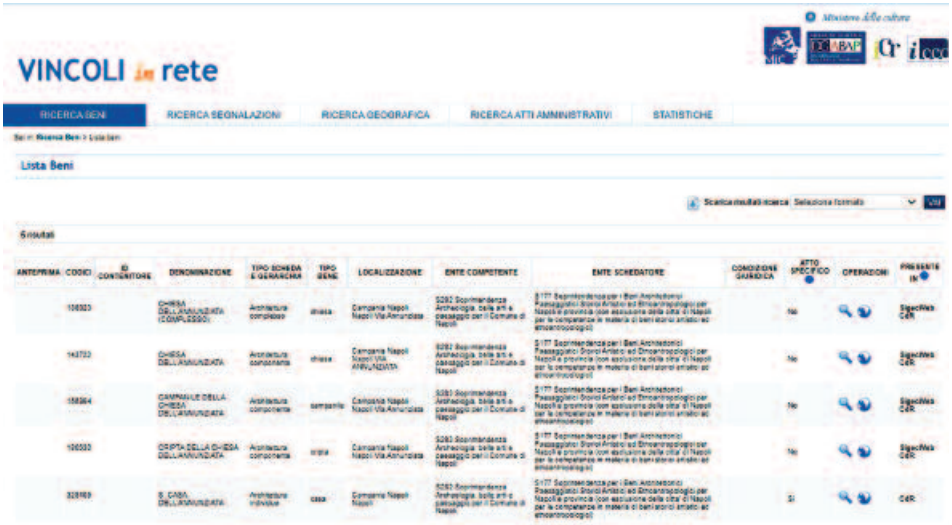
Tabella 1. Caratteristiche termiche delle principali componenti di involucro di Palazzo Cellamare

Per procedere alla messa in sicurezza, miglioramento strutturale e restauro dell'edificio dopo oltre un anno di rilievi, indagini e valutazioni congiunte multicriterio tra i diversi soggetti tecnici, le imprese esecutrici e gli Enti locali si è rinunciato agli interventi energetici, costosi e complessivamente con ridotta efficacia.

Il secondo caso studio è un edificio storico vincolato del centro storico di Napoli a destinazione d'uso non residenziale, trattasi del complesso della SS. Annunziata ospitante l'omonimo Ospedale (fig. 5).

Il complesso monumentale si compone di diversi beni architettonici oggetto di tutela, come sopra indicato, risalenti al XIV secolo. Esso sorge nel centro storico della città di Napoli, nel quartiere Pendino a Forcella. L'imponente struttura, definita da molti un capolavoro di Vanvitelli, è posizionata tra Spaccanapoli e corso Umberto I. La prima chiesa fu realizzata nel XIII secolo dagli Angioini e nel Cinquecento venne poi ricostruita ed ampliata grazie a Ferdinando Manlio. La struttura, dopo essere stata colpita da un incendio, fu affidata all'architetto Luigi Vanvitelli e al figlio Carlo che la ristrutturarono conferendole un aspetto tardo-barocco. La facciata esterna è costituita da colonne classiche, mentre sulla sinistra della chiesa è posto il campanile cinquecentesco. La chiesa nel '900 venne danneggiata durante la seconda guerra mondiale e fu necessario un restauro sia interno che esterno.

La basilica fa parte di un grande complesso monumentale che inizialmente era costituito anche da un ospedale, un convento, un ospizio per gli orfani e camerate per ragazze povere, prive di famiglia o illegittime. In origine la struttura, rappresentava una delle 'Sante Case dell'Annunziata', un'antica e importante istituzione presente nel regno di Napoli. Nate nel XIV secolo, le case co-



5. Visura portale Vincoliinrete Mibact - Complesso SS.Annunziata.

stituivano enti assistenziali per la cura dell'infanzia abbandonata ed erano governate dai laici.

La congregazione della Santissima Assunta nacque nel 1318 e riuscì a svolgere la propria funzione fino alla fine del '900, grazie ad una donazione offerta dalla regina Sancha d'Aragona, moglie di Roberto d'Angiò. L'attuale basilica dell'Annunziata Maggiore ha rappresentato, dunque, fino al 1875, uno dei collegi per trovatelli più importanti del Mezzogiorno. A rendere nota l'istituzione negli anni e oggi la basilica fu proprio questa drammatica storia, allo stesso tempo suggestiva, dei bambini abbandonati e della famosa 'Sacra Ruota degli Esposti' nella quale venivano lasciati. L'ospedale dell'Annunziata venne chiuso nel 1816, mentre la ruota, una delle più note d'Italia, fu chiusa nel 1875. Ad oggi la struttura ospita l'omonimo ospedale (fig. 6).

Dal punto di vista delle componenti del sistema energetico si tratta di un edificio in muratura di tufo di spessore variabile da 80 a 30 cm., con solai lignei e parzialmente sostituiti con orizzontamenti in putrelle e tavelle. Dal punto di vista impiantistico, considerata la destinazione d'uso, si tratta di un sistema complesso composto da caldaie per il riscaldamento e produzione a.c.s. ubicate in apposito locale tecnico al piano terraneo, alcuni *chiller* per il raffrescamento e diverse u.t.a. distribuite sulle coperture. Non sono presenti impianti di conversione da fonte energetica rinnovabile.

Gli interventi di efficientamento proposti nello studio realizzato riguardano componenti già oggetto di intervento e sono compatibili con l'utilizzo dell'edificio durante l'esecuzione delle opere stesse.

6. Complesso SS.Annunziata da Google Maps.

Come interventi passivi si è proposto l'isolamento termico di alcune coperture e di alcune murature perimetrali disperdenti verso l'esterno. Le coperture piane sono già oggetto di interventi progettuali finalizzati alla messa in opera di piastroni strutturali e si propone in aggiunta un intervento di isolamento termico con pannello in lana di roccia ad alta densità dello spessore di 14 cm., posto in opera sotto il masso di allettamento con una vernice di finitura antisolare colorata per ridurre il surriscaldamento estivo dei locali sottostanti; a tal riguardo il D.M. 23.6.15 prevede una riflettanza per le coperture piane >0,65 ed il D.M. 23.6.2022 (Criteri Ambientali Minimi in edilizia) prevende un SRI (*solar reflex index*) di almeno 76 per le coperture con pendenza minore o uguale al 15%. Una tradizionale guaina bituminosa scura ha una riflettanza inferiore a 10 mentre l'utilizzo di pitture protettive colorate monocomponente a base acqua, tipo *Indecolor Cool Reflex*, colore rosso cotto, consente un miglioramento della prestazione, portandola ad un valore di riflettanza 0,40 con un SRI maggiore di 29, rispettando gli aspetti prevalenti del paesaggio urbano. Lo spessore di isolante termico proposto consente di soddisfare i requisiti previsti dal D.M. 26.6.2015 in termini di trasmittanza termica stazionaria, senza incidere eccessivamente sull'incremento complessivo dello spessore del solaio esistente e senza richiedere opere di demolizione per la posa in opera.

L'intervento migliorativo sulle coperture riduce il carico termico sia invernale che estivo degli ambienti sottostanti ed al contempo riduce il riscaldamento superficiale della copertura con conseguente maggiore durabilità del manto impermeabile ed anche migliore *performance* delle unità di climatizzazione collocate su di esso. Con riferimento al D.P.R. 31/2017 l'intervento ricade tra quelli soggetti ad autorizzazione paesaggistica semplificata: «…B.4. interventi sulle coperture, diversi da quelli di cui alla voce B.2, comportanti alterazione dell'aspetto esteriore degli edifici mediante modifica delle caratteristiche architettoniche, morfotipologiche, dei materiali o delle finiture esistenti, ...». Con riferimento alle indicazioni pubblicate sul sito istituzionale della Soprintendenza archeologia, belle arti e paesaggio del Comune di Napoli, gli interventi di isolamento termico delle coperture sono consentiti purchè garantiscano, come nel caso in questione, un impatto visivo nullo ed una perfetta integrazione con l'intorno architettonico.

Per quanto riguarda il secondo intervento passivo sopra indicato, si propone di isolare dal lato interno parte delle pareti perimetrali esterne. Ciò riguarderà principalmente i locali adibiti a degenze, ambulatori ed uffici dove è necessario garantire un ottimale livello di benessere termoigrometrico.

Oggi le murature sono di spessore variabile, mediamente 80 cm., in paramento singolo o doppio di tufo giallo. L'intervento di isolamento dall'interno è compatibile con l'esecuzione delle altre lavorazioni e può essere realizzato attraverso una leggera e sottile controparete a secco autoportante in modo da non impattare sulla struttura muraria esistente. La stratigrafia aggiuntiva ipotizzata prevede un pannello di lana minerale da 5 cm, una finitura con pannello di cartongesso di 1,25 cm. (fino a 2,4) o 2,5 cm. (fino a 2,7 m. di altezza interna), per complessivi 8 cm. Tale intervento mediamente comporta riduzioni di superficie utile dei singoli vani, molto contenute, dell'ordine 1-2%. Lo strato d'aria, dietro la controparete può anche essere incrementato per facilitare il passaggio di cablaggi e tubazioni. Lo spessore di isolante termico proposto consente di soddisfare i requisiti previsti dal D.M. 26.6.2015 in termini di trasmittanza termica stazionaria, con l'incremento del 30% della trasmittanza termica limite pur non risolvendo i ponti termici ed i relativi effetti, non solo energetici, che ne derivano. Il pannello in lana minerale di vetro rivestito su un lato con carta *kraft*, prodotto con materie prime riciclate, combina l'isolamento termico e acustico, il controllo del vapore acqueo grazie al rivestimento in carta *kraft* su un lato e la qualità ambientale interne, conformemente ai C.A.M. (Criteri Ambientali Minimi in edilizia) relativamente al contenuto di materia riciclata/recuperata ed al rilascio di inquinanti.

Entrambi gli interventi, isolamento delle coperture e delle pareti esterne, riguarderebbero meno del 50% della superficie lorda disperdente, configurando l'intervento complessivo come intervento di ristrutturazione importante di secondo livello come definito dal D.M. 26.6.2015 e consentirebbero una riduzione del fabbisogno termico di almeno il 30% con tempo di ritorno inferiore ai 15 anni.

Questa riduzione produce sia la diminuzione dei costi di investimento, relativamente ai dispositivi degli impianti termici, sia dei costi di esercizio; nello specifico si ha la riduzione della potenza dei generatori previsti in progetto (caldaie a basamento a condensazione e gruppi frigo) ed anche la riduzione dei consumi energetici, di gas naturale per il riscaldamento e di energia elettrica per il raffrescamento.

Sono state proposte, inoltre, delle soluzioni migliorative che riguardano le altre due leve dell'efficienza energetica, quali l'efficientamento degli impianti termici e l'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili. Si prevede di realizzare una pompa di calore aria/acqua a compressione di vapore, dedicata alla produzione di a.c.s al posto del generatore a combustione: questa tecnologia ha un'efficienza maggiore, non richiede particolari modifiche impiantistiche rispetto a quanto previsto, può essere installata sulla copertura del locale tecnico del cortile in adiacenza ai gruppi frigo o anche in ambiente interno, prevedendo opportuna canalizzazione. Si tratta inoltre di tecnologie impiantistiche affidabili che, soprattutto, consentono di evitare l'emissione in ambiente di sostante climalteranti e di polveri sottili, responsabili quest'ultime di fenomeni di inquinamento locale da non sottovalutare, collocandosi l'edificio in centro urbano.

La proposta è migliorativa in termini di costo di esercizio solo se in abbinamento con impianto di produzione in sito di energia elettrica, tipo l'impianto fotovoltaico proposto nel seguito. L'extracosto di investimento, rispetto alla soluzione in progetto, viene velocemente recuperato grazie ad un minor costo di gestione, in cinque anni.

In alternativa sarebbe anche possibile installare un impianto di micro-cogenerazione a motore endotermico tipo *Viesmann Vitoblock 200 EM80/50*, con una potenza elettrica di 50 kW e una potenza termica di 83 kW e rendimenti a pieno carico, 34,5% elettrico, 57,2% termico e 91,7% complessivo. L'extracosto di investimento, rispetto all'utilizzo di una caldaia a condensazione, viene recuperato in circa 2 anni. In entrambi i casi si interverrebbe principalmente sul sottosistema di generazione termica limitando gli interventi sulla distribuzione interna e quindi l'invasività della lavorazione aggiuntiva proposta.

Quali interventi impiantistici minori, si propone un sistema di trasporto persone ad azionamento elettrico senza locale macchine, caratterizzato da dispositivi di recupero di energia che recuperano energia nelle fasi in cui la cabina si muove per gravità ed il motore funge da freno. La macchina raggiunge un'efficienza energetica dell'85-90%: inoltre, questo tipo di impianto elevatore ha una potenza elettrica ridotta di 3kW e pertanto consente la riduzione dei costi di esercizio, in termini di energia elettrica ma anche di manutenzione.

Inoltre, si è proposta l'installazione di un impianto solare fotovoltaico per la produzione di energia elettrica. Tale impianto da fonte energetica rinnovabile è l'unico compatibile con la tipologia di edificio e con il suo contesto. L'impianto può essere installato sulla copertura piana a quota lievemente inferiore rispetto

alle coperture circostanti. L'impianto può essere collocato su una struttura in alluminio leggera zavorrata, inclinata tanto quanto basta a consentire il deflusso delle acque meteoriche (2%). L'altezza massima dei moduli è inferiore a quella di eventuali parapetti esistenti, rendendolo non visibile dalla strada. Si potrebbero impiegare moduli in silicio ad alta efficienza (21,5%) da 545W cadauno (tipo *Canadian HiKu6*), colore grigio scuro oppure moduli color cotto meno efficienti (15,6%) da 310 Wp cadauno (tipo *VGS Maple Red*) ma con un migliore inserimento visivo rispetto alle coperture circostanti. Con i moduli tipo *VGS Maple Red* si realizzerebbe una potenza elettrica di circa 50 kW mentre con i moduli tipo Canadian una potenza elettrica di ca 70 kW. In entrambi i casi la produzione di energia elettrica sarebbe di gran lunga inferiore al fabbisogno di energia elettrica diurno della struttura e, pertanto, non sono necessari dispositivi di accumulo elettrico. Considerando il costo medio di mercato per questa tipologia di impianti, si avrebbe un tempo di ritorno dell'investimento inferiore ai cinque anni.

Ai sensi del D.P.R. 31/2017, l'intervento ricadrebbe in quelli soggetti ad autorizzazione paesaggistica almeno semplificata: «…B.8. installazione di pannelli solari (termici o fotovoltaici) a servizio di singoli edifici, purché integrati nella configurazione delle coperture, o posti in aderenza ai tetti degli edifici con la stessa inclinazione e lo stesso orientamento della falda degli edifici ricadenti fra quelli di cui all'art. 136, comma 1, lettere b) e c), del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42; installazione di pannelli solari (termici o fotovoltaici) a servizio di singoli edifici su coperture piane in posizioni visibili dagli spazi pubblici esterni…*».*

Infine, sempre con riferimento agli impianti si è valutata la realizzazione di un Sistema Generale di Supervisione, Controllo e Gestione degli Impianti Tecnologici con l'obiettivo di poter ottimizzare il funzionamento degli stessi impianti e l'utilizzo dell'energia complessivamente assorbita dal complesso ospedaliero. Dati di letteratura riportano che l'implementazione di questi sistemi comporta un risparmio di almeno il 10% nei costi di esercizio energetici, con tempo di ritorno inferiore ad un anno.

Sempre con riferimento al Comune di Napoli, se si considerano i vincoli ministeriali d'area, come quelli paesaggistici (art. 136 del D.Lgs. 42/2004), questi coprono circa il 35% del territorio comunale e tale percentuale aumenta se si considera anche l'art. 142; quindi, gran parte degli edifici ricade nella perimetrazione del vincolo, ed il terzo caso studio è un edificio condominiale ricadente in tale perimetrazione a destinazione d'uso residenziale plurifamiliare, di proprietà privata e ricade altresì nella perimetrazione dello strumento urbanistico vigente (P.R.G. del 2004) e della Disposizione dirigenziale n.14 del 30/12/21, di cui si dirà nel seguito (fig. 7).

L'edificio è un edificio in muratura di tufo giallo napoletano di spessore variabile da 30 a 100 cm., con solai latero-cementizi, infissi in legno a vetro singolo e impianti

7. Edificio condominiale privato in Napoli da Google Maps.

termici autonomi prevalentemente con caldaie a gas e radiatori per complessive 46 unità immobiliare distribuite su sei livelli fuori terra. Il Condominio affida ad un team multidisciplinare di professionisti l'incarico di valutare gli interventi necessari ad accedere all'Ecobonus condomini, abbinato anche al Sismabonus.

	Trasmittanza termica attuale U (W/mqK)	Trasmittanza termica progetto U (W/mqK)	Trasmittanza termica Limite U (W/mqK) D.M. 26.6.15 APP. B (comprensiva di ponti termici)
Pareti perimetrali edificio '900 (sp. 80-30 cm.)	0,59 1,29	0,26 0,30	0,36
Pareti perimetrali cortile '500 (sp. 80-130 cm.)	0,38 0,59	0,31 0,33	0,36
Solaio di copertura piano	1,71	0,31	0,32
Serramenti	4,00	2,00	2,10

Tabella 2 – Caratteristiche termiche delle principali componenti di involucro dell'edificio.

A seguito delle attività di rilievo metrico, materico, strutturale e dei dati energetici e dei relativi piani di indagine di ciascuna unità si è ipotizzato, in prima istanza:

- isolamento pareti esterne attico (sp. 7 cm.)
- isolamento termico a cappotto della facciata a nord (sp. 5-6 cm.)
- isolamento termico delle pareti interne disperdenti verso la cassa scala (sp. 6 cm.)
- isolamento termico parziale dei solai verso le cantine (sp. 6-7 cm.)
- isolamento termico della copertura ad uso esclusivo (sp. 4 e 6 cm.)

Gli spessori inferiori per lo strato coibente si ottengono considerando isolanti tipo schiume *polyiso*.

Le valutazioni multidisciplinari richieste e soprattutto le difficoltà di accesso al credito da parte dei condomini e l'eterogeneità delle esigenze dei singoli condomini hanno allungato le tempistiche fino all'entrata in vigore del Superbonus richiedendo quindi un nuovo studio di fattibilità per accedere a questo nuovo meccanismo di detrazione.

La classe energetica dell'edificio allo stato attuale, intesa quale classe energetica convenzionale è F e realizzando degli interventi parziali sull'involucro edilizio si riesce a migliorare di un'unica classe energetica. L'incompatibilità degli interventi di isolamento dall'esterno proposti con la Disposizione dirigenziale n.14/2021 del Comune di Napoli, ha comportato l'eliminazione dalle soluzioni progettuali dell'isolamento dall'esterno della facciata nord riducendo ulteriormente la riduzione di indice di prestazione energetica globale non rinnovabile conseguibile. La citata Disposizione dirigenziale n.14 del 31.12.2021 prevede che: «Relativamente alle tipologie preottocentesche e ottocentesche (artt. da 64 a 85 e da 102 a 109 del P.R.G.), date le caratteristiche storiche, tipologiche, formali, strutturali di tali edifici, i richiami normativi sopra riportati escludono la possibilità di eliminare dalle facciate l'intonaco dell'unità edilizia e di realizzare il rivestimento 'a cappotto' o apporre materiali isolanti che producano un accrescimento apprezzabile dello spessore murario con significativa modifica delle caratteristiche materiche originarie, operazione che, come è facile intuire, determinerebbe la perdita delle superfici storiche di facciata del patrimonio edilizio storico della città. L'intervento di isolamento termico della muratura, va dunque ritenuto sostanzialmente significativo e modificativo degli assetti storici esistenti. Per quanto sopra, si ritiene che un intervento modificativo dei prospetti e più in generale delle stratigrafie, attraverso la sostituzione dell'intonaco originario e l'incremento di spessore, inevitabilmente oblitera i segni della storia, gli apparati decorativi, gli aspetti materici originari e quindi non è ammissibile alla luce della vigente disciplina urbanistica per le tipologie edilizie citate».

L'eventuale intervento sugli impianti termici autonomi consistente nella sostituzione delle caldaie a metano con pompe di calore elettriche o sistemi ibridi

a pompa di calore non è perseguibile in tutte le unità immobiliari senza che vengano effettuate lavorazioni invasive, sia per collocare le unità motocondensanti delle pompe di calore all'esterno sia per problemi di acustica, laddove tutti gli appartamenti collocassero all'esterno (magari lungo la stessa verticale) tali generatori a compressione.

Altresì non è percorribile la realizzazione di impianti termici centralizzati per la mancanza di cavedi, di locali idonei da adibire a centrali termiche ed anche per le invasive lavorazioni da prevedersi sul sottosistema di distribuzione del fluido termovettore.

Considerazioni finali

Da quanto sin qui illustrato emerge che il patrimonio edilizio tutelato - quale insieme degli edifici prevalentemente, ma non solo, realizzati prima del 1945 - non può escluso a priori da interventi di miglioramento strutturali ed energetici se si vogliono realizzare benefici energetici, ambientali ed economici, per il singolo cittadino e per l'intera collettività. Tale patrimonio edilizio ha peculiarità costruttive che spesso influenzano la tipologia di interventi di efficientamento energetico eseguibili, che gli conferiscono comportamenti più o meno performanti in funzione delle stagioni e della zona climatica, oltre che del contesto urbano. Le criticità maggiori riguardano tutte le leve dell'efficientamento energetico, in particolare la realizzazione di impianti termici centralizzati o la sostituzione dei generatori termici con generatori a pompa di calore elettrica ed ancor di più l'integrazione sull'edificio di sistemi di conversione da fonte rinnovabile.

Tuttavia, la complessità di ciascun caso e la molteplicità di soggetti coinvolti il più delle volte portano all'abbandono dell'idea progettuale di valorizzazione anche del criterio di risparmio energetico ed all'esecuzione di meri e dubbi interventi di manutenzione ordinaria.

Ciascun intervento proposto per la riduzione dei consumi energetici è il frutto di un approccio multidisciplinare e multicriteriale che comporta necessariamente una mediazione dal punto di vista tecnico sulla scelta della soluzione non sempre più efficiente ed economica sul risparmio realmente conseguibile a valle della realizzazione dell'intervento stesso.

Per facilitare tale approccio e trasformare i progetti in opere sarebbero utili Commissioni di Coordinamento a differenti livelli sia centrale che regionale, costituite da esperti degli Enti Locali, dalle più avanzate competenze delle professioni tecniche, da esponenti del mondo della ricerca applicata e di quello imprenditoriale, al fine di definire limiti legislativi in deroga a quelli previsti dal D.M. 26.6.2015, individuare interventi 'tipo' per caratteristiche tecniche e di-

mensionali eseguibili con iter autorizzativi semplificati, costruire strumenti di supporto ed agevolazione fiscale specifici e proporzionali anche agli extracosti di investimento che spesso si verificano in questi edifici.

Riferimenti bibliografici

Rapporto Annuale sull'efficienza energetica 2022, www.efficienzaenergetica.enea.it/pubblicazioni/raee-rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica/rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica-2022.html

Patrimonio culturale e naturale della Campania. Rigenerazione urbana, a cura di A. Aveta e A. Castagnaro, Editori Paparo, Napoli 2023

Ingegneria Geotecnica e patrimonio culturale: la Torre di Pisa

Carlo Viggiani

Introduzione

I monumenti della Piazza dei Miracoli a Pisa (oltre al campanile, la cattedrale, il battistero e il cimitero monumentale (fig. 1) furono eretti nel medioevo, nel periodo di massimo splendore e potenza della Repubblica Pisana. La Piazza è la stupenda manifestazione dell'unità ideale fra i poteri religiosi, spirituali e politici; nei monumenti che la adornano si intrecciano storia artistica e storia civile, conferendo loro il carattere di segno e simbolo della città.

Una foto della Torre, ripresa da ovest normalmente al suo piano di massima pendenza (molto prossimo al nord-sud), e affiancata da una sezione con lo stesso piano, è riportata in figura 2.

I problemi geotecnici della Torre sono ben noti e anzi il carattere peculiare di questo monumento, la sua singolare e incredibile inclinazione, è dovuto proprio alla sua interazione con il sottosuolo.

A partire dall'inizio del XIX secolo, quando ci si è resi conto che l'inclinazione della Torre continuava ad aumentare, le condizioni di sicurezza del monumento hanno destato viva preoccupazione e una nutrita serie di commissioni, di studi, di progetti, di interventi si sono succeduti, con alterne fortune, nel tentativo di stabilizzare la Torre.

Nel 1990 venne insediato un Comitato Internazionale per la Salvaguardia della Torre di Pisa, presieduto dal prof. M. Jamiolkowski, con una composizione multidisciplinare e il compito di concepire, progettare e attuare i provvedimenti necessari per la stabilizzazione. In undici anni di lavoro il Comitato ha individuato quali fossero i meccanismi di interazione con il sottosuolo che mettevano a repentaglio la stabilità del monumento; ha potuto quindi concepire, progettare e attuare un intervento di stabilizzazione, efficace e totalmente rispettoso dell'integrità.

Nella presente nota vengono brevemente esposti gli studi di carattere geotecnico svolti dal Comitato e gli interventi, sempre relativi ai problemi geotecnici, portati a termine nel 2001.

1. La diagnosi

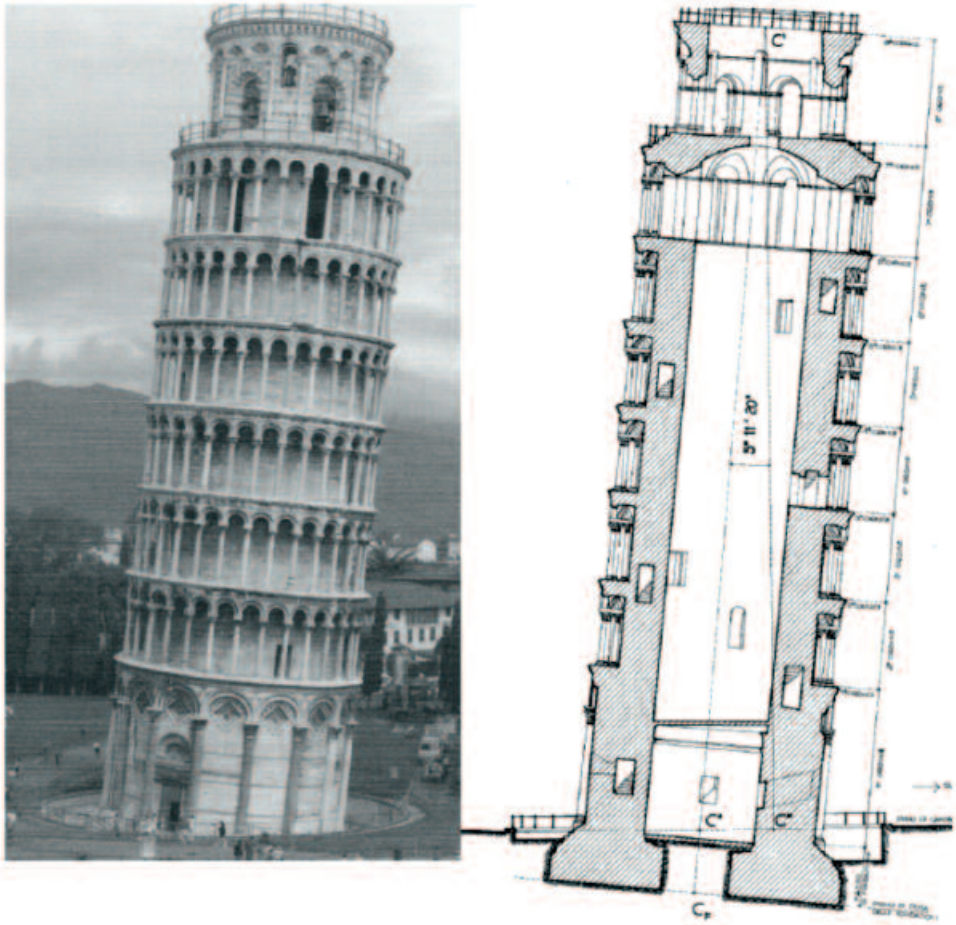
I componenti del Comitato Internazionale per la Salvaguardia della Torre di Pisa si sono trovati in una situazione simile a quella di un gruppo di medici specialisti, chiamati al capezzale di un malato grave: una vecchia Torre, dell'età di oltre 800 anni, con uno strapiombo di oltre 5 metri ed un cedimento di oltre 3 metri. Il primo passo, dunque,

1. La Piazza dei Miracoli.

non poteva che essere quello di formulare una diagnosi, onde poter concepire e attuare un'efficace terapia.

Gli strumenti a disposizione del medico per una diagnosi sono essenzialmente tre: l'anamnesi, l'esame obiettivo e l'esame strumentale del malato.

L''anamnesi' consiste nella raccolta, dalla voce diretta del paziente e/o dei suoi familiari, di tutte le informazioni, notizie e sensazioni disponibili. Nel nostro caso, essa è

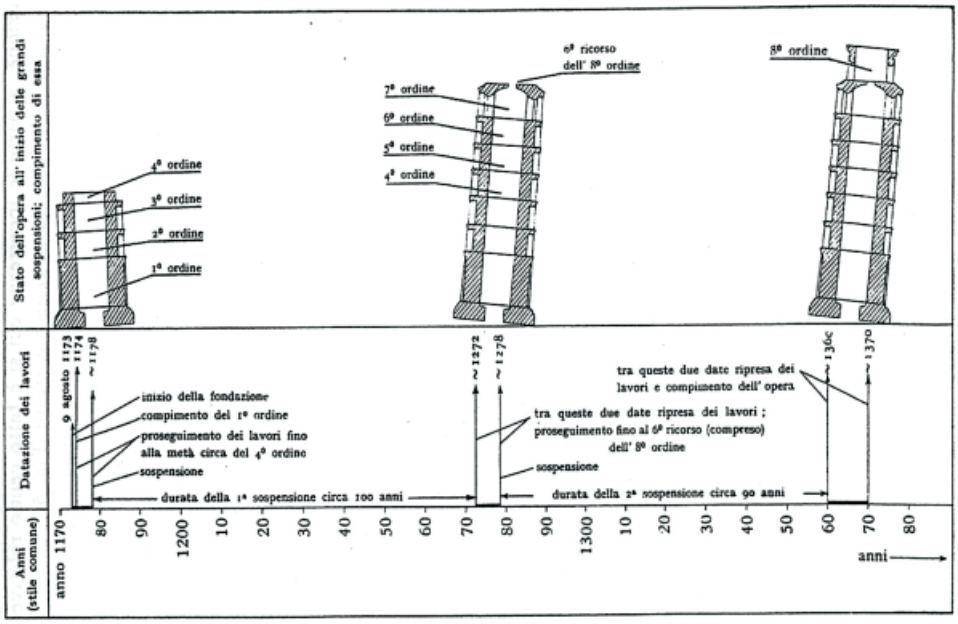


2. Foto e sezione della Torre nel piano Nord - Sud, praticamente coincidente con il piano di massima pendenza. Il monumento è alto 58,4 m. sul suo piano di fondazione e oltre 55 m. fuori terra. Il suo peso è di 14.500 t. (142 MN); il baricentro si trova 22,6 m. al di sopra del piano di fondazione. La fondazione anulare ha un diametro esterno di 19,6 m.; il foro centrale di 4,5 m. L'area della fondazione è di 285 m^2; la pressione media sul terreno di 50,7 t/m^2 (497 kPa).

consistita nella ricostruzione, sulla base di immagini e fonti documentali, della storia della costruzione della Torre e dell'insorgere e progredire della sua pendenza.

La storia della costruzione è sintetizzata nella figura 3. Come si vede, la costruzione è durata due secoli, con due interruzioni: di circa 100 anni la prima, di 90 anni la seconda. In entrambi i casi, se la costruzione fosse proseguita senza interruzioni, la Torre sarebbe probabilmente collassata per rottura dei terreni di fondazione.

Notizie circa la pendenza del monumento tra il termine della costruzione e il XX secolo sono reperibili in immagini (ad esempio, un affresco di Antonio Veneziano nel Camposanto, databile a circa un decennio dopo il termine della costruzione) o in documenti,



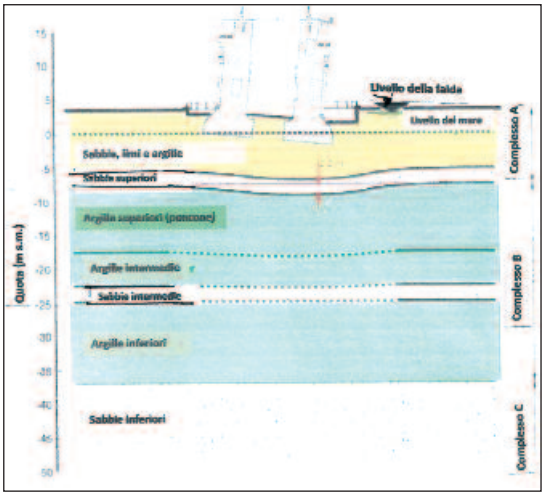
3. Storia della costruzione della Torre. Nella prima fase (1173 – 1178) l'architetto è Bonanno Pisano, coadiuvato da Guglielmo da Innsbruck; nella seconda fase (1272 – 1278) l'architetto è Giovanni Pisano. La cella campanaria fu costruita da Tommaso di Andrea Pisano fra il 1360 e il 1370.

come il dato (un fuori piombo di sei braccia e mezzo) riportato dal Vasari (1550) nella sua Vita di Arnolfo. A partire dall'inizio del XIX secolo, poi, cominciano a essere disponibili rilievi accurati, come quelli di Cresy e Taylor (1829) del 1819, di Rouhault de Fleury (1859) e poi, a partire dal 1907, le misure d'inclinazione eseguite sistematicamente con rilievi geodetici. Tutti questi elementi sono raccolti, fra l'altro, nei preziosi volumi di Atti della Commissione Polvani (Ministero LL.PP., 1971).

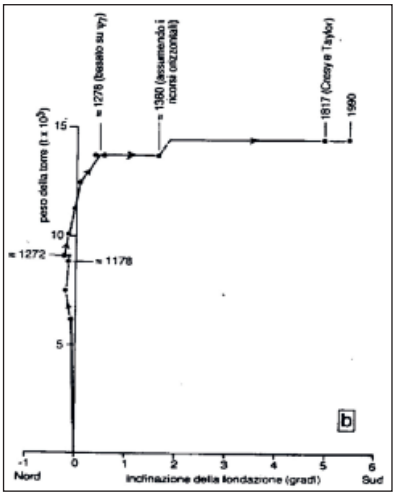
L''esame obiettivo' ha riguardato la costituzione del sottosuolo, il cedimento della Torre e la cosiddetta 'forma a banana' del monumento.

Il sottosuolo della Piazza dei Miracoli è costituito da depositi geologicamente recenti (Pleistocene – Olocene) di ambiente marino, lagunare e palustre: limi, argille, sabbie fini intercalati a sabbie eoliche di antiche fasce dunali. Una sezione schematica dei terreni di fondazione della Torre è riportata in figura 4. Le stratificazioni sono marcatamente orizzontali, salvo che per la depressione del tetto del Pancone che si riconosce al di sotto della Torre e che ha una profondità di circa 2,2 m. Questo consente una stima molto attendibile del cedimento della Torre stessa, che deve essere pari a 2, 2 m. più la compressione dei terreni compresi fra la fondazione della Torre e il tetto del Pancone. Si giunge, per questa via, a stimare un valore del cedimento di almeno 3 m.

La forma a banana, e cioè un asse curvilineo con la concavità verso Nord, è la conseguenza delle correzioni apportate durante la costruzione per correggere la pendenza che



4. Sezione schematica del sottosuolo della Torre.



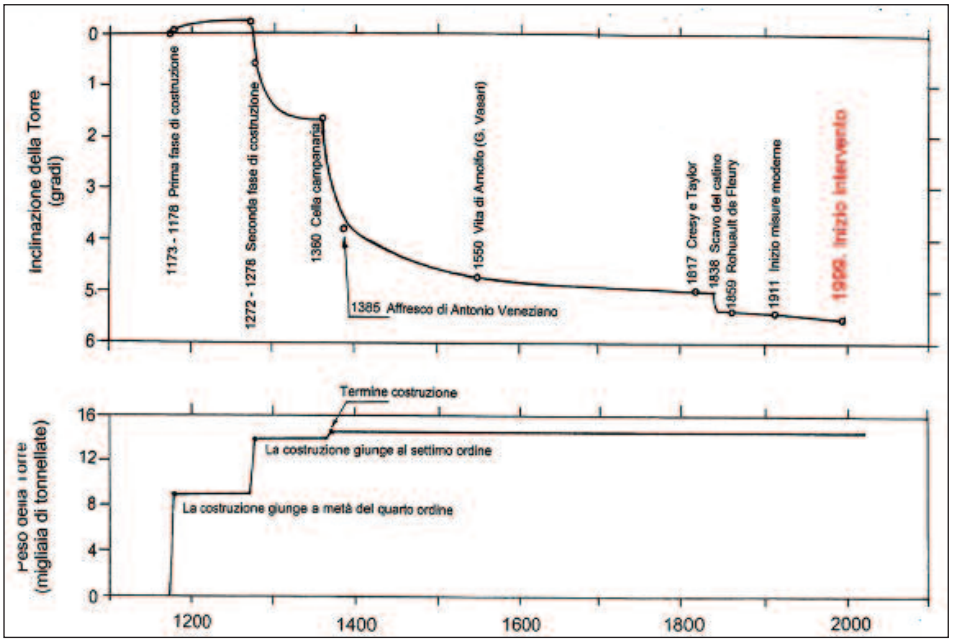
5. Inclinazione della Torre in funzione del peso via via crescente durante la costruzione.

andava via via manifestandosi; essa permette di dedurre, anche qui in modo assai attendibile, i valori della pendenza durante la costruzione.

Mettendo insieme tutti i dati sull'inclinazione si ottengono i diagrammi delle figure 5 e 6. In figura 5 la pendenza è diagrammata in funzione del peso della Torre, che andava via via crescendo durante la costruzione. Si riconosce un fenomeno di instabilità dell'equilibrio; la Torre è rimasta praticamente verticale fino al termine della costruzione, per poi inclinarsi bruscamente.

In figura 6 gli stessi dati sono riportati in un diagramma cronologico, assieme alla storia della costruzione. Nel 1360, appena prima della costruzione della cella campanaria, l'inclinazione era già di quasi due gradi. Nel 1550, ai tempi di Vasari, era prossima ai cinque gradi; appare quindi giustificato scrivere che essa doveva «… far stare altrui meravigliato come possa essere come non sia rovinata ...»!

Agli inizi del XIX secolo la Torre era probabilmente ferma, o comunque la pendenza aumentava con un moto assai lento e ritardato, tendente a una condizione di equilibrio. Ma i contemporanei soffrivano del fatto che, a causa del cedimento di cui si è detto, la parte basamentale del monumento fosse nascosta nel terreno. Scrive l'architetto Alessandro Gherardesca (1838): «Sembra che questo sinistro (il cedimento di oltre tre metri, appunto) sgomentasse i nostri Avi, o che non sapessero opporvi altro provvedimento di quello del riempimento con terra … venendo così a nascondersi, dal lato inclinazione, non solo la gradinata ma gli scamilli, le basi e parte ancora del fusto delle grandi colonne del primo ordine. Ma, la Dio mercé, viviamo in giorni che l'amore alla conservazione delle cose che rammentano l'avita patria grandezza energicamente si risveglia...» e quindi, prosegue Gherardesca: «… fui incaricato da questa inclita Magistratura Civica e dal benemerito



6. Storia dell'inclinazione della Torre dall'inizio della costruzione al 1999.

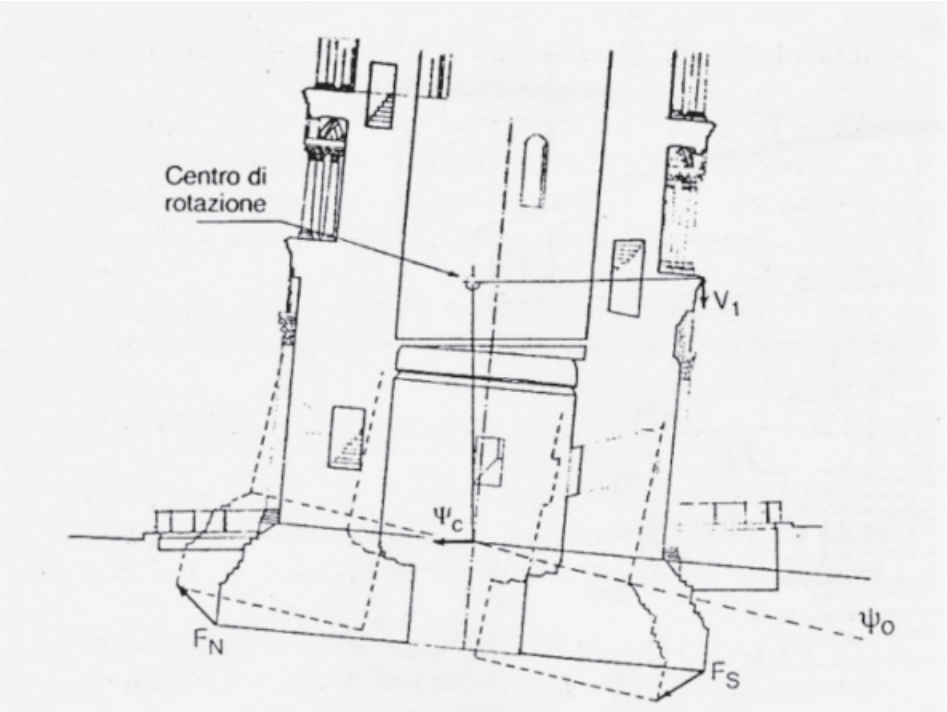
cavaliere Operaio Scorzi di procedere al totale scuoprimento del nobile imbasamento, ingrandendo il bacino da cui sorge, rivestendolo di marmo, e così ridurre al suo intiero lustro un'opera sì leggiadra e interessante».

Oggi una conoscenza anche elementare della Geotecnica ci insegna che il riempimento con terra era un provvedimento benefico, mentre lo scavo attorno alla base della Torre (chiamato a Pisa il catino) era un intervento assai rischioso. E in realtà la figura 6 mostra chiaramente i danni che esso ha provocato: un brusco incremento dell'inclinazione ma, soprattutto, una ripresa del moto con una maggior velocità e con andamento accelerato, destinato inesorabilmente a sfociare in un crollo.

Come recita un vecchio adagio, la via dell'inferno è lastricata di buone intenzioni!

L''esame strumentale' è consistito in un'attenta analisi dei dati del monitoraggio, progressivamente arricchito con nuovi strumenti e che rivela una serie di fenomeni anche inattesi (Burland, Viggiani, 1994). Per quello che qui interessa, in figura 7 è riportato il cinematismo di moto della Torre nel piano Nord – Sud, nei periodi nei quali non agiscono azioni esterne tendenti a modificarlo.

Finora si era sempre ritenuto che il progressivo aumento dell'inclinazione della Torre nel tempo fosse dovuto ad un cedimento differenziale per effetto di creep nelle argille cedevoli, presenti nel sottosuolo fra le profondità di 10 e 40 m. al di sotto della superficie del terreno. La figura 7, invece, mette in evidenza un cinematismo completamente diverso, e cioè una rotazione attorno ad un punto senza che vi sia un cedimento.



7. Cinematismo del moto della torre in assenza di perturbazioni. Durante una tale fase stazionaria il punto V_1 si muove verticalmente e il punto ψ_C orizzontalmente; è quindi possibile individuare il centro di rotazione.

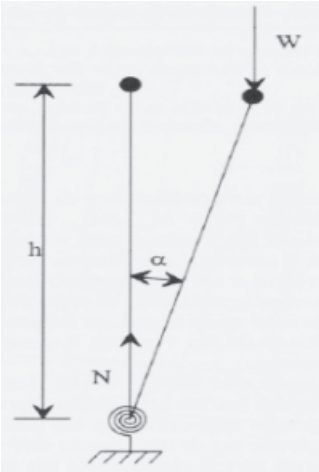
I risultati riportati nelle figure 5 e 7 mostrano che la Torre è affetta da un fenomeno di instabilità dell'equilibrio, noto come *leaning instability.*

Per comprendere il fenomeno, è utile far riferimento al semplice modello di pendolo inverso, rappresentato in figura 8 e consistente in un'asta rigida e priva di peso vincolata alla base ad una cerniera dotata di molle rotazionale e traslazionale e disposta verticalmente; alla sommità dell'asta vi è una massa concentrata di peso *W.*

Se si imprime all'asta una piccola rotazione α, si genera un momento ribaltante $M_{rib} = Whsen\alpha \approx Wh\alpha$ e un momento stabilizzante $M_{stab} = k_\alpha \alpha$, dove con k_α si indica la rigidezza rotazionale della molla. Se $M_{stab} > M_{rib}$ l'equilibrio è stabile, e l'asta ritorna nella posizione iniziale; se invece $M_{stab} < M_{rib}$ l'equilibrio è instabile, e l'asta collassa. Se infine $M_{stab} = M_{rib}$ l'equilibrio è indifferente, e l'asta rimane nella posizione perturbata.

Il coefficiente di sicurezza contro l'instabilità dell'equilibrio può essere espresso come:

$$FS = \frac{M_{stab}}{M_{rib}} = \frac{k_\alpha}{Wh}$$



8. Il modello di pendolo inverso.

9. L'intervento provvisorio con contrappeso. Dall'alto, in senso orario: la costruzione della trave anulare; la posa del primo lingotto; la catasta di lingotti ultimata nel gennaio 1994..

Si può passare dal modello alla Torre assimilando l'altezza del suo baricentro ad *h*, il suo peso a *W* e sostituendo alla cerniera a molla una fondazione poggiante su di un mezzo deformabile. Se assumiamo per il sottosuolo il modello di semispazio elastico, dalla conoscenza del cedimento si può risalire al valore della rigidezza rotazionale k_α e quindi del coefficiente di sicurezza. Con i dati relativi alla Torre, si ottiene un valore del coefficiente di sicurezza FS ≈ 1.

Il modello di semispazio elastico, per quanto sicuramente semplicistico, ci indica quindi che la Torre si trovava molto prossimamente in una condizione di equilibrio indifferente, e quindi certamente in uno stato assai precario.

2. Il pronto soccorso

Fu subito chiaro che la concezione, la progettazione e l'attuazione degli interventi di stabilizzazione avrebbero richiesto tempi non brevi. Il Comitato si orientò quindi ad attuare prioritariamente interventi provvisori, che consentissero di condurre con il necessario approfondimento le indagini e gli studi per concepire, progettare e attuare gli interventi definitivi.

Il primo intervento provvisorio consistette nell'applicazione di un contrappeso sul bordo nord della fondazione, che esercitasse sulla Torre un momento stabilizzante. Il contrappeso fu realizzato con una catasta di lingotti di piombo del peso complessivo di 700 t, poggiante su una trave anulare costituita da conci serrati contro il corpo della Torre da cavi pretesi (fig. 9).

L'applicazione del contrappeso ha provocato una rotazione della Torre verso Nord di circa 50", con un cedimento di 2,3 mm.

3. La terapia

Secondo il semplice modello linearmente elastico illustrato al paragrafo 2, il coefficiente di sicurezza della Torre rispetto al ribaltamento è una funzione delle caratteristiche del sistema (il peso W, l'altezza del baricentro h, la rigidezza rotazionale k_α) ed è indipendente dal valore dell'inclinazione; un qualsiasi intervento volto a far diminuire l'inclinazione sarebbe stato quindi inutile. Fra l'altro, questa argomentazione è stata spesso usata dai sostenitori di una soluzione basata su una sottofondazione, ad esempio con micropali.

In effetti, il comportamento del sistema Torre – terreno di fondazione è marcatamente non lineare e non reversibile; un modello più appropriato è quello di mezzo elastico non lineare – plastico con incrudimento. Senza entrare nei dettagli, si può mostrare che con un modello siffatto una riduzione della pendenza, anche piccola, produce un sostanziale irrigidimento del sistema e quindi un corrispondente aumento del coefficiente di sicurezza rispetto all'instabilità dell'equilibrio. Il Comitato decise pertanto, non senza lunghe e accese discussioni, di adottare questa strategia; fra l'altro, la diminuzione di pendenza sarebbe stata ottenuta agendo sul terreno di fondazione, senza nemmeno toccare la Torre e quindi realizzando un intervento totalmente rispettoso della sua integrità.

Furono presi in esame diversi possibili mezzi per ottenere la riduzione di pendenza: un sovraccarico applicato in superficie a nord della Torre; una contrazione volumetrica delle argille del pancone al di sotto del bordo nord della fondazione, da indurre con pompaggio sotto vuoto o con elettroosmosi; la rimozione controllata di piccoli volumi di terreno, sempre a nord della fondazione e al di sotto di essa; quest'ultima soluzione venne battezzata sottoescavazione.

Tutte queste possibili metodologie di intervento furono indagate a fondo con modelli in piccola scala, anche in centrifuga; con approfondite analisi numeriche; e infine, per l'elettroosmosi e la sottoescavazione, con campi sperimentali in vera grandezza nella Piazza (fig. 10).

Il risultato di queste lunghe e laboriose indagini orientò la scelta sulla sottoescavazione, e permise di mettere a punto la relativa tecnologia, basata sull'impiego di trivelle a elica.

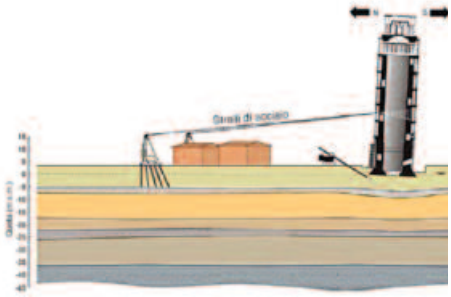
Si decise di partire con un cauto esperimento di sottoescavazione preliminare, e solo dopo aver realizzato una struttura provvisoria di presidio (fig. 11). La sottoescavazione preliminare fu condotta operando su 12 fori, da febbraio a giugno del 1999, con risultati del tutto soddisfacenti. Venne indotta una rotazione verso nord di circa 130", con un cedimento del bordo nord della fondazione pari a 12 mm., mentre al bordo sud lo spostamento fu nullo.

Fu quindi deciso di passare alla sottoescavazione definitiva, con 41 fori, che fu condotta fra il febbraio 2000 ed il gennaio 2001 (fig. 12); contemporaneamente furono rimossi i lingotti di piombo e la trave anulare che li reggeva.

I risultati ottenuti sono riportati in figura 13.

Ci si era dati l'obiettivo di ridurre l'inclinazione della torre di mezzo grado, e cioè di 1800"; come si vede, l'obiettivo è stato pienamente raggiunto, con un cedimento del

10. A sinistra: il campo sperimentale per l'elettroosmosi; a destra: il campo sperimentale per la sottoescavazione..

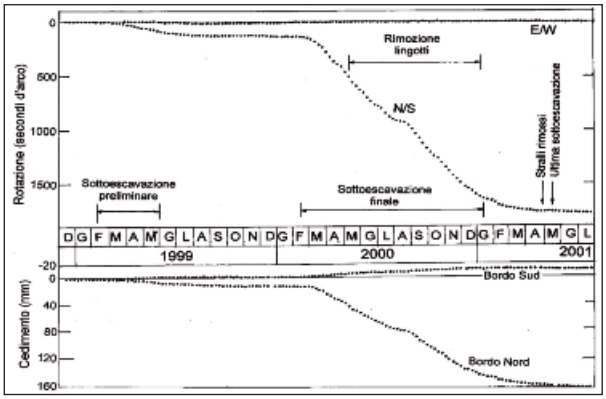


11. Schema della sottoescavazione e della strallatura di presidio.

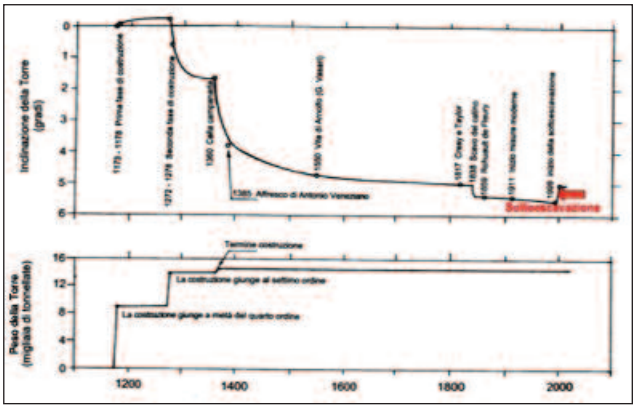
12. I quarantuno fori della sottoescavazione definitiva visti dalla Torre, Sono anche visibili gli stralli dell'opera di presidio.

bordo nord della fondazione pari a 16 cm ed un sollevamento del bordo sud di 1 cm.

Nella figura 14 gli stessi risultati sono inquadrati nel più ampio arco temporale dell'intera vita della Torre. In questa prospettiva, appare abbastanza evidente come l'intervento del Comitato abbia in sostanza posto rimedio agli effetti dell'incauto scavo ottocentesco del catino. E certamente si può trovare una sorta di giustizia poetica nel fatto che gli effetti nefasti di uno scavo malaccorto siano stati eliminati con un altro scavo, ma stavolta ben concepito ed eseguito.



13. I risultati della sottoescavazione definitiva.



14. I risultati della sottoescavazione nel quadro della storia della Torre..

15. Il Grifo, quell'altera e misteriosa straniera..

4. Considerazioni conclusive

Molte sono le lezioni che si possono apprendere e le conclusioni che si possono trarre da un'esperienza come quella della Torre di Pisa.

Gli antichi *magistri lapidum* hanno impiegato due secoli a costruire la Torre, perseverando nel portarla a compimento malgrado mille difficoltà e con la pendenza che andava vistosamente manifestandosi. Il risultato del Comitato Internazionale nello stabilizzare il monumento, dal canto suo, deve essere visto come il compimento di quasi due secoli di studi, ricerche, tentativi ed errori, perseguendo un difficile equilibrio fra le esigenze della statica e quelle della conservazione. La prima lezione, dunque, è quella di perseverare: lo studio attento, la collaborazione di discipline diverse, soprattutto la comprensione del comportamento hanno consentito un risultato che era tutt'altro che scontato.

Molto probabilmente questo risultato non sarebbe stato raggiunto se il Comitato non avesse potuto usufruire di uno speciale carattere di *Authority,* con ampia libertà di azione. Lacci e lacciuoli burocratici, dei quali il nostro Paese è indiscusso maestro, possono costituire un freno inesorabile; questa è la seconda lezione.

In conclusione, però, lasciatemi ricordare quegli straordinari anni di lavoro con quegli straordinari colleghi. Sono nate e si sono cementate profonde amicizie, a partire da quella con Michele Jamiolkowski, coordinatore del Comitato, che recentemente ci ha lasciato. Lasciatemi ricordare le tante giornate trascorse sulla Piazza, all'ombra della statua del grifone sull'abside della Cattedrale (fig. 15). Quella altera e misteriosa straniera giunse un giorno lontano dall'oriente, su quel mare che tremola in lontananza alle sue spalle, ed ha trascorso i suoi giorni osservando imperturbabile, da pochi metri e molti secoli di distanza, le strane attività che si sono svolte ai suoi piedi. E noi non potremo dimenticarla.

Riferimenti bibliografici

BURLAND J.B., VIGGIANI C.

- *L'osservazione del comportamento della Torre di Pisa.* RIG 28, n. 3, 1994

CRESY E., TAYLOR G.L.

- *Architecture of the Middle Age in Italy*, London 1829

GHERARDESCA A.

- *Appendice alle considerazioni sulla pendenza del campanile della Primaziale Pisana,* Miscellanee Artistiche, 4, Nistri, Pisa 1838

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI

- *Ricerche e studi sulla Torre di Pisa e i fenomeni connessi alle condizioni di ambiente*, 3 voll., IGM Firenze 1971

MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI

- *La Torre restituita. Gli studi e gli interventi che hanno consentito la stabilizzazione della Torre di Pisa,* Bollettino d'Arte, n. 4 volumi speciali, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma 2005

ROHAULT DE FLEURY G.

- *Le campanile de Pise*, in 'Encyclopédie de l'Architecture', Bance, Paris 1859

VASARI G.

- *Le vite de' più eccellenti architetti, pittori e scultori italiani.* Torrentino, Firenze 1550, 2 volumi

VIGGIANI C.

- *Senza neanche toccarla. La stabilizzazione della Torre di Pisa.* Hevelius, Benevento 2019

Aspetti geotecnici nella tutela di alcuni siti storici e archeologici della Campania

Stefano Aversa, Alessandro Flora

Introduzione

...Mira queste ruine
e le carte e le tele e i marmi e i templi;
pensa qual terra premi...

Ci piace iniziare questa breve nota sul contributo della Geotecnica nella tutela dei siti storici e archeologici della Campania con questa famosissima citazione, nella quale Leopardi (1831) invitava gli Italiani a trarre vantaggio dalla loro antica e rilevantissima storia, ben rappresentata dalle testimonianze archeologiche, architettoniche e artistiche, per una rinascita culturale del nostro Paese. È suggestiva questa citazione sia per il forte legame di Leopardi con la nostra città, sia perché tale brano, anche se con un senso lievemente diverso, collega il patrimonio architettonico e archeologico alla terra sulla quale esso è fondato, o all'interno della quale esso è realizzato, o dalla quale esso è sepolto.

Di questo stretto legame tra beni e siti storici e sottosuolo si occupa da diversi decenni un Comitato Tecnico Internazionale (TC 301 - *Preservation of Historic Sites*) dell'Associazione Internazionale di Geotecnica (ISSMGE-*International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*), attualmente presieduto dal più giovane dei due estensori di questo articolo. Nell'ambito dei lavori di questo Comitato, soprattutto grazie al contributo fondamentale della componente italiana del Comitato, da sempre sensibile al tema della Conservazione dei Monumenti e dei Siti Storici, si è lavorato alla definizione del cosiddetto *Ground-Monument System*, che ingloba nel monumento da preservare anche il sottosuolo che interagisce direttamente con esso, declinando negli anni diverse applicazioni pratiche di corretta applicazione di tale concetto negli interventi sul patrimonio architettonico e archeologico. Considerare il sottosuolo come parte del monumento stesso impone di estendere la richiesta di preservare l'integrità materiale e strutturale anche al terreno e alle parti strutturali (fondazioni e altro) che interagiscono con esso. Per fare ciò è richiesta sia una maggiore conoscenza dello stato e delle proprietà strutturali e geotecniche (ricavabile da approfondite indagini non solo geotecniche, ma anche strutturali, storiche, archeologiche, ecc.), sia una notevole competenza geotecnica, che possa permettere di ricostruire il più fedelmente pos-

sibile lo stato in cui versa la struttura da tutelare e il sottosuolo che interagisce con essa, e che dia al progettista la sicurezza necessaria per progettare interventi i meno invasivi possibile. Esemplari, in tal senso, sono gli interventi messi in campo per la Salvaguardia della Torre di Pisa, descritti in tantissimi articoli (Burland & Viggiani, 1994; Burland et al., 2000; 2002; 2003; 2009; 2013; Jamiolkowski, 2001; MIBAC, 2006) e sintetizzati anche in questo volume da C.Viggiani (2023).

Per la brevità della presente nota, conviene non dilungarsi ulteriormente su tale concetto, invitando chi fosse interessato ad approfondirlo a consultare l'amplissima bibliografia sull'argomento (AGI, 1991; Aversa, 2007; Burland & Standing, 1997; Calabresi & D'Agostino, 1997; Calabresi, 2011; 2013; Croce, 1985; Flora, 2022; Jappelli, 1997; Jappelli & Marconi, 1997; Lancellotta, 2013; Tsatsanifos, 2007; Viggiani, 1997; 2013; 2017), tra l'altro già ripresa e sintetizzata in un contributo (Aversa et al., 2012a) in un altro volume sempre a cura del prof. Aldo Aveta, il quale ha sempre manifestato grande interesse per gli aspetti geotecnici della tutela del nostro patrimonio.

Vale però la pena solo di soffermarsi su alcuni aspetti contrastanti che si evidenziano quando dalla declinazione dei principi di integrità materiale e strutturale si passa alla pratica applicazione degli stessi, soprattutto nei casi nei quali si chiede al tempo stesso la garanzia della funzionalità dei beni storici e monumentali e la sicurezza per chi li utilizza. Recentemente, questo tema è stato affrontato da Flora (2022), nella sua *Kerisel Lecture*, che ha ricordato che la Geotecnica è spesso coinvolta in interventi conservativi di beni monumentali quando le strutture o il sito sono molto prossimi a condizioni critiche o di collasso. La possibilità di mettere in atto interventi poco invasivi è più facile quando vi è la possibilità di concentrarli esclusivamente nel sottosuolo. È il caso, tra gli altri, del già citato intervento con sottoescavazione al di sotto della Torre di Pisa. Va però detto che questo caso, proprio per il grandissimo impegno economico e di tempo che ha comportato, non può essere considerato come riferimento per situazioni più comuni, sebbene rappresenti in modo paradigmatico un intervento perfettamente efficace dal punto di vista meccanico e completamente rispettoso di tutte le forme di integrità allo stesso tempo. Non sempre una soluzione così elegante e soddisfacente è però alla portata dei professionisti incaricati della tutela. In tantissimi casi, ad esempio, alla richiesta di conservazione si affianca quella di rifunzionalizzazione in sicurezza delle strutture o dei siti monumentali, con ovvie concessioni da farsi in termini di interventi più invasivi. Vi sono poi dei casi, come già ricordato da Aversa (2007), nei quali elementi di fondazione (ad esempio, fondazioni su pali di legno) possono essere irrimediabilmente danneggiati e praticamente non più esistenti. È il caso, ad esempio, di molte fondazioni di edifici a Venezia, ma anche dell'edificio del Parlamento a Stoccolma (Holm et al., 2007). In tutti questi casi, estendendo quanto affermato da Flora (2022), il rinforzo delle fonda-

zioni con nuove tecnologie (le più possibili rispettose delle strutture esistenti) non deve essere escluso a priori, anche se il primo tentativo di progetto deve essere quello di utilizzare soluzioni tecnologiche coerenti con la struttura originaria, di cui dovrebbero essere conosciute le caratteristiche. Lo stesso vale per altre situazioni nelle quali il bene da preservare non è un edificio, ma – ad esempio – un costone roccioso, una cavità sotterranea, e così via. In tutti questi casi, applicando conoscenza e competenza, si deve cercare innanzitutto di intervenire il meno possibile e con tecniche poco invasive e reversibili, non escludendo però – a priori – interventi più rilevanti, quando prevalga l'attenzione alla funzionalità e alla sicurezza. Di tale tematica, con riferimento ai costoni rocciosi dell'isola di Capri, ne avevano già discusso Aversa e Nocilla (2017) in un altro Convegno organizzato nel 2017 dal prof. Aldo Aveta, dedicato alla Baia di Napoli.

La varietà delle situazioni, dei vincoli e delle richieste non permette di definire univocamente le migliori soluzioni ingegneristiche, in generale, e geotecniche, in particolare, per preservare il patrimonio costruito. Si può solo affermare che, quando si ha a che fare con tali situazioni e soprattutto con i beni monumentali, si deve essere estremamente più cauti di quanto si faccia solitamente nel caso delle nuove costruzioni, e che la convenienza tecnica o l'economicità non devono essere gli obiettivi primari da raggiungere in questi casi. Gli ingegneri (strutturisti e geotecnici) devono confrontarsi con valori immateriali solitamente al di fuori delle loro competenze, uscendo dalla loro *comfort zone*, e devono concordare soluzioni tecniche con archeologi, architetti, storici dell'arte e funzionari incaricati della conservazione dei monumenti. Infatti, solo «un equilibrio soddisfacente tra sicurezza e conservazione, tra ingegneri e restauratori, può essere trovato solo nello sviluppo di una cultura condivisa» (Viggiani, 2013).

Anche il tema del ruolo del Sottosuolo nella storia e nello sviluppo della città di Napoli è stato oggetto nel passato di diversi studi, sintetizzati in svariate relazioni in Convegni nazionali e internazionali (Evangelista et al., 2000; Aversa et al., 2012b; 2013), alcuni dei quali anche a firma degli autori della presente nota. Per evitare ripetizioni e per mostrare che vi è tuttora un ampio interesse di ricerca scientifica sul tema, con riferimento alla nostra Regione, si è deciso di concentrarsi, sia in questo testo sia nella presentazione dell'intervento al Seminario del 23 giugno u.s. che ne ha preceduto l'estensione, su due tematiche che hanno coinvolto e che stanno tuttora coinvolgendo gli autori del presente articolo.

È ben noto che l'evoluzione geologica del sottosuolo della città di Napoli e anche di parte della Regione Campania è legata all'attività vulcanica e ai relativi prodotti (soprattutto quelli piroclastici) dei due centri vulcanici posti a est (Vesuvio) e a ovest (Campi Flegrei) della città. Ai fini della presente nota conviene distinguere tra rocce piroclastiche (ad esempio, Tufo Giallo Napoletano) e terreni piroclastici (ad esempio, Pozzolane). Le prime sono dotate di una reale coesione tra le particelle che le hanno formate; le secondo sono essenzialmente

incoerenti o caratterizzate da modestissima coesione (a volte detta apparente, in quanto legata alla presenza di un regime di pressioni relative negative dell'acqua all'interno dei pori).

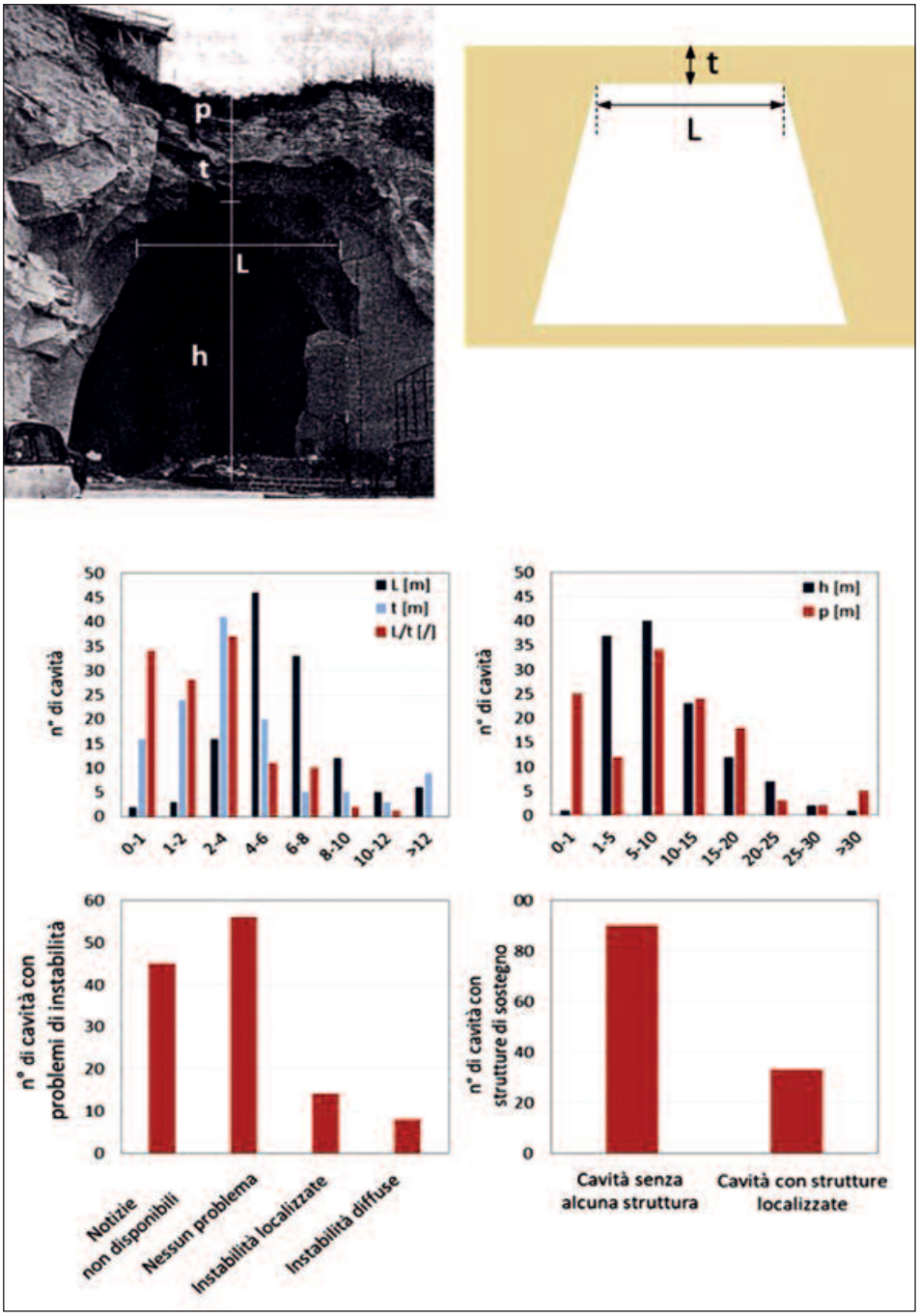
Ovviamente, i problemi geotecnici che si pongono passando da rocce piroclastiche a terreni piroclastici sono generalmente diversi, con problemi di stabilità di cavità e di falesie (o fronti di scavo) per le prime e problemi di spinta su opere di sostegno, stabilità dei pendii, problemi di fondazione e di risposta sismica locale per i secondi.

Nel seguito, come già detto, si illustrano due casi, uno relativo a cavità in rocce piroclastiche, con particolare attenzione alla *Crypta Neapolitana*, e uno su varie problematiche geotecniche nel sito archeologico più famoso al mondo, quello di Pompei.

1. Problemi geotecnici delle cavità in Tufo Giallo Napoletano

Il sottosuolo di Napoli è interessato da una fitta rete di cavità sotterranee di origine antropica (fig. 1), in gran parte scavate nella formazione del Tufo Giallo Napoletano. Si tratta di acquedotti e cisterne, antiche cave in sotterraneo, gallerie stradali e ferroviarie, sepolture, cunicoli vari. Di molte cavità è presumibilmente

1. Mappa delle principali cavità censite nel sottosuolo della città di Napoli, con dettaglio sul centro storico.



2. Informazioni statistiche sulle condizioni di stabilità di alcune cavità napoletane.

ancora sconosciuta l'esistenza (e talvolta la si scopre solo in occasione di crolli della loro copertura con apertura di cosiddetti 'fornelli' al di sotto di strade o fabbricati), di altre sono noti solo gli accessi, altre infine sono completamente rilevate.

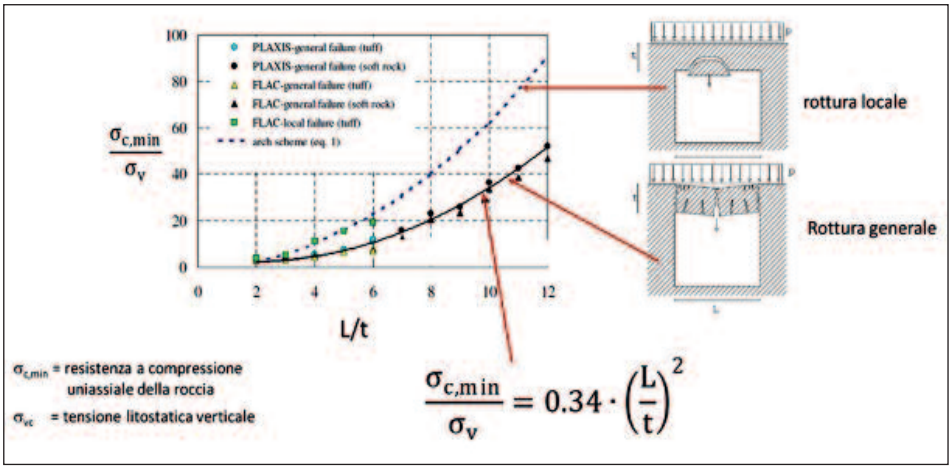
Attualmente sono state censite circa 900 cavità, con un volume di circa sette milioni di metri cubi. Le cavità pongono una notevole varietà di problemi, fino al collasso delle volte e alla formazione di voragini, spesso con gravi conseguenze sugli edifici e le infrastrutture e talvolta con perdita di vite umane.

Da vari decenni, prevalentemente presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Napoli Federico II, sono in corso ricerche sulle condizioni di stabilità di tali cavità. Tali ricerche hanno permesso di censire 123 cavità esistenti, caratterizzate prevalentemente da una sezione trapezia, con intradosso piano, all'interno della formazione tufacea e, generalmente, ricoperte anche da uno strato di terreni incoerenti (Pozzolana). In figura 2 si riporta un'analisi statistica sulle caratteristiche geometriche di tali cavità (altezza della cavità, *h*; larghezza della copertura, *L*; spessore dello strato di Tufo al di sopra della cavità, *t*; spessore della copertura pozzolanica, *p*; e così via), sulla presenza in esse di tracce di crolli dalla copertura e sull'esistenza in esse di strutture di sostegno e rinforzo. Da essa si nota che vi sono cavità molto diverse tra loro per condizioni geometriche, alcune delle quali caratterizzate da notevoli dimensioni in sezione ed alcune anche da una discreta snellezza della volta di copertura (espressa dal rapporto *L/t*). Il numero di crolli, nelle cavità in cui questo rilievo è stato effettuato, è relativamente basso, anche se non trascurabile. In circa 35 casi sono già stati eseguiti interventi di sostegno localizzati.

In considerazione del numero elevato di cavità e della indisponibilità di una caratterizzazione geometrica e fisico-meccanica sulla base della quale poter condurre analisi numeriche, si è proceduto innanzitutto con un approccio semplificato che ha permesso di individuare i casi più critici, sui quali operare con approcci più sofisticati. Si è seguito cioè un classico approccio della Geotecnica di area vasta che utilizza pur sempre gli strumenti propri della Meccanica (delle Terre e delle Rocce), ma in modo semplificato e su geometrie semplificate, permettendo così di concentrare gli sforzi di indagini e simulazioni solo su pochi casi, caratterizzati da maggiore problematicità.

Lo studio semplificato è stato condotto prima utilizzando un approccio deterministico (Evangelista et al., 2000) che, interpolando i risultati numerici ottenuti da modellazione numerica agli elementi finiti su uno schema semplificato (fig.3) in condizioni piane di deformazione con due possibili meccanismi di collasso, ha permesso di ricavare una equazione speditiva da applicare ai casi reali per la stima delle condizioni di sicurezza:

$$\frac{\sigma_{c,min}}{\sigma_v} = 0.34 \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^2$$



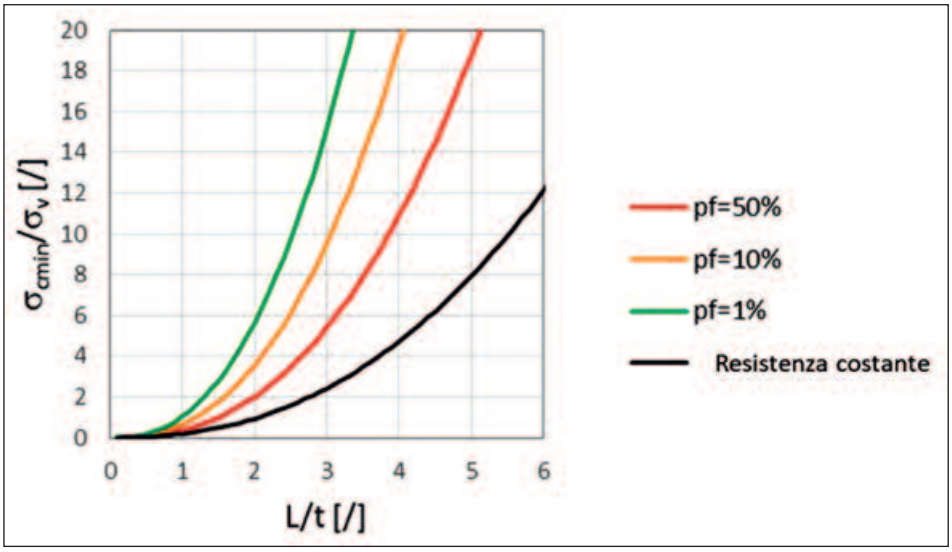
3. Abaco per la verifica speditiva delle condizioni di stabilità di cavità: analisi deterministica in assenza di fratture e con roccia omogenea.

Questa equazione permette infatti di definire la resistenza a compressione uniassiale minima, $s_{c,min}$, richiesta per garantire la stabilità della cavità con coefficiente di sicurezza unitario a partire dalla tensione verticale agente sul tetto della cavità, s_V, e dai parametri geometrici t e L. Il coefficiente di sicurezza può essere poi valutato come rapporto tra la resistenza a compressione uniassiale disponibile nel caso in esame e quella minima richiesta.

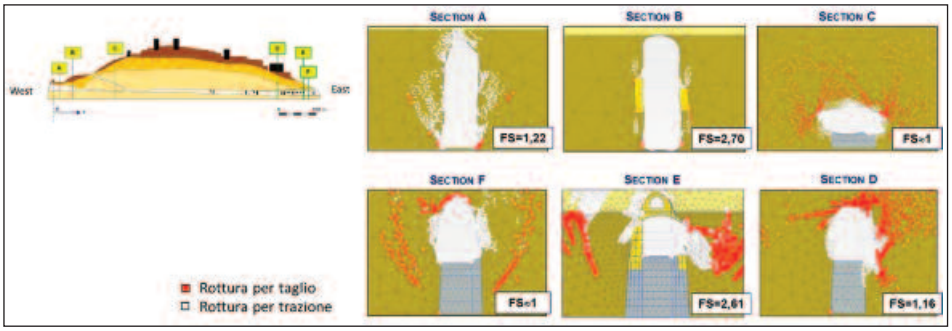
Si è poi proceduto con un approccio probabilistico, tenendo conto della dispersione probabilistica della resistenza a compressione del tufo. Tale approccio è stato proposto da de Silva et al. (2023) che hanno ricavato l'abaco di stabilità riportato in figura 4.

Quando dall'analisi territoriale di area vasta si passa a casi particolari di grande rilevanza, lo studio richiede approcci dedicati. È stato il caso della grotta di Cocceio, studiata da Amato et al. (2001) e della *Crypta Neapolitana* (Ferrari & Lamagna, 2015). La *Crypta Neapolitana* è la prima galleria realizzata per collegare Fuorigrotta con Piedigrotta (d'altronde i toponimi derivano proprio dalla presenza di questo collegamento), per la quale sono state condotte analisi di stabilità in diverse sezioni utilizzando una modellazione ad elementi finiti e ricavando i coefficienti di sicurezza riportati in figura 5.

Tale analisi ne esclude la rifunzionalizzazione per transito pedonale senza interventi di messa in sicurezza, che possono essere definiti con un approccio multidisciplinare, cercando di non snaturare la valenza storico-architettonica del bene e di salvaguardare quanto più possibile l'integrità materica e strutturale (geotecnica) dell'opera. Gli interventi che sembrano necessari sulla base delle informazioni attualmente disponibili sono:



4. Curve di stabilità probabilistiche (colorate, per diverse probabilità di insuccesso pf) insieme a quella deterministica di figura 3 (in nero), che tengono conto della variabilità casuale della resistenza della roccia e della presenza di discontinuità orizzontali in volta in posizione casuale.



5. Risultati di analisi FEM elasto-plastiche condotte su alcune sezioni della *Crypta Neapolitana*, con indicazione dei coefficienti di sicurezza calcolati.

- Rimozione di piccoli blocchi instabili;
- Chiodatura di blocchi instabili di grandi dimensioni, meglio se con chiodi in acciaio inox o VTR (se orientati per essere soggetti prevalentemente a trazione);
- Risagomatura parziale e inserimento (dove necessario) di un nuovo rivestimento, meglio se realizzato con muratura, in ragione della maggiore compatibilità con l'esistente;
- Rinforzo degli archi di rinforzo realizzati a suo tempo nel periodo borbonico.

2. Problemi geotecnici del Parco Archeologico di Pompei

Il Parco Archeologico di Pompei è probabilmente il sito archeologico più famoso del mondo, visitato da circa 3 milioni di persone all'anno (dato 2022). L'antica città romana di Pompei, che fa parte della lista degli *UNESCO World Heritage Sites*, è stata seppellita sotto 4-6 m. di ceneri e pomici prodotti dalla ben nota eruzione del Vesuvio del 79 d.C.

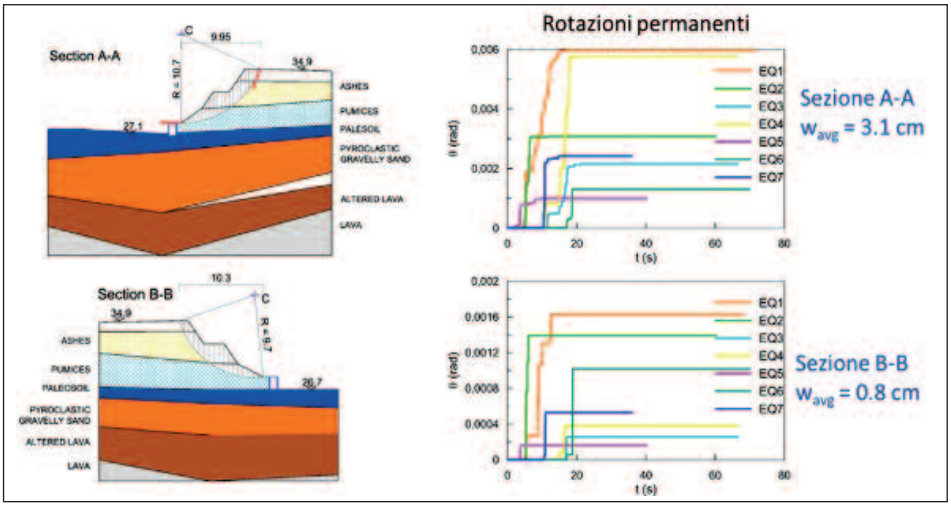
Questo evento catastrofico distrusse la città, uccidendo circa duemila abitanti, ma, al tempo stesso e paradossalmente, ne ha preservato gli edifici, con quanto contenevano all'epoca dell'eruzione, fino agli scavi archeologici iniziati nel 1748 sotto il regno di Carlo III di Borbone e tuttora in corso. Poiché in questo stesso volume, è presente un contributo (Calvanese, 2023) che – molto più autorevolmente – tratta della città antica di Pompei e delle problematiche di carattere generale legate alla conservazione degli edifici messi in luce dagli scavi, si ritiene opportuno concentrarsi su alcuni aspetti geotecnici del sito archeologico, nei quali gli scriventi sono stati coinvolti per il tramite di Convenzioni di ricerca tra i propri Dipartimenti e l'ente Parco.

Per brevità di trattazione, ci si concentrerà esclusivamente sugli studi di Risposta Sismica Locale per le verifiche degli scavi e delle strutture nella cosiddetta *Insula dei Casti Amanti*, tralasciando altri problemi geotecnici del sito, dei quali si è invece discusso nell'intervento orale al convegno del giugno 2023.

Un attento studio della Risposta Sismica Locale in condizioni 2D (de Sanctis et al. 2019, 2020, 2022), condotto sulla scorta di un discreto numero di indagini in sito e laboratorio, ha permesso di ricavare le accelerazioni di progetto sia nell'analisi delle condizioni di stabilità dei fronti di scavo sia nella progettazione delle nuove coperture di protezione dell'Insula dei Casti Amanti. Per quanto riguarda il primo tema, sulla base di tali risultati, si è poi proceduto con una verifica dei fronti di scavo utilizzando un approccio agli spostamenti di Newmark (1965), i cui risultati sono sinteticamente illustrati nella figura 6, mentre si rinvia alle pubblicazioni citate per ulteriori approfondimenti.

Tali studi, più approfonditi di quanto si fa usualmente, hanno permesso di ottimizzare gli scavi e di progettare con consapevolezza e sicurezza fondazioni innovative per la nuova copertura dell'Insula, ribadendo anche in questo caso che competenza e conoscenza, in un approccio necessariamente multidisciplinare, sono gli strumenti essenziali per permettere di raggiungere il miglior compromesso tra tutela e sicurezza, minimizzando gli interventi (e quindi massimizzando, di conseguenza, il rispetto dell'integrità dei manufatti).

Lo studio della Risposta Sismica Locale è utile anche quando si devono ricostruire i danni prodotti in siti storici e su monumenti da terremoti, come fatto da Flora et al. (2022) e da Somma et al. (2022) nel caso delle mura Teodosiane di Costantinopoli.



6. Effetti di sito e stabilità sismica dei fronti di scavo per i pendii artificiali dell'*Insula dei Casti Amanti*.

Conclusioni

Questa nota ha brevemente accennato ad alcune attività di carattere geotecnico in cui gli scriventi sono attualmente coinvolti per la tutela di siti archeologici di straordinaria importanza del nostro territorio, quali possono essere le cavità storiche di origine antropica scavate nel tufo, oppure il sito di Pompei. Gli esempi mostrati indicano che è possibile, anche in condizioni di conoscenza solo parziale (esempio delle cavità), affrontare i problemi geotecnici di tutela in modo razionale, imboccando quindi la strada maestra della competenza e della razionalità per supportare e progettare eventuali interventi di conservazione e tutela. E' evidente che in alcuni casi, come ad esempio quello della *Crypta Neapolitana*, la criticità delle condizioni statiche rende impossibile un rispetto rigoroso dell'integrità materica e iconica del sito. A parere degli scriventi, però, questo è un classico caso in cui si potrebbe invocare il concetto di 'integrità funzionale' (Flora, 2022), secondo il quale il massimo valore del sito non è tanto nella materia in sé di cui esso è costituito, ma nella funzione che esso ha svolto e può continuare a svolgere. Importanti interventi di consolidamento nella *Crypta Neapolitana* permetterebbero infatti di ripristinarne la funzione di collegamento tra due parti della città (che per inciso prendono il nome dalla *Crypta*, definita nel passato 'Grotta'), restituendo alla vita un sito che sta invece sparendo dalla memoria dei cittadini. L'integrità funzionale, in altre parole, presuppone il rispetto dello *spiritus loci* piuttosto che dei suoi aspetti materici, ed ha importanti esempi nel lontano Oriente (ad esempio, nella ricostruzione periodica rituali di alcuni templi in Giappone).

Qualsiasi scelta di intervento deve quindi partire da un'analisi razionale dei problemi e delle possibili soluzioni, cercando di ridurre al minimo considerazioni di carattere economico come vincoli nella tutela di luoghi ed opere che sono portatori sani della nostra cultura, di cui devono garantire la continuità nel tempo. La scelta finale dell'intervento, ovviamente, deve essere deputata a concertazioni multidisciplinari, che tengano conto di tutti gli elementi e le cause possibili, non ultimi i terreni e le rocce in cui o con cui le opere sono realizzate.

Riferimenti bibliografici

AGI

- *The contribution of Geotechnical Engineering to the preservation of Italian historic sites*. AGI Associazione Geotecnica Italiana, 1991

AMATO L., EVANGELISTA A., NICOTERA M.V., VIGGIANI C.

- *The tunnels of Cocceius in Napoli: an example of Roman engineering of the early imperial age.* Proc. of AITES/ITA World Tunnel Congress 2001, Progress in Tunneling after 2000, Milan 10 – 13 June 2001, vol.1, pp.15-26, Pàtron, Bologna 2001

AVERSA S.

- *Preserving cities and monuments,* In 'Geotechnical Engineering in Urban Environments', Madrid, 24-27 september 2007, vol. 5, p. 453-462, Millpress, Rotterdam 2007

AVERSA S., EVANGELISTA A., SCOTTO DI SANTOLO A.

- *Influence of the subsoil on the urban development of Napoli*, in 'Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites' (Bilotta, Flora, Lirer, Viggiani Eds), pp. 15-43, Taylor & Francis Group, London 2013

AVERSA S., FLORA A., VIGGIANI C.

- *Il ruolo della Geotecnica nella conservazione del patrimonio architettonico e ambientale*, in 'Restauro e riqualificazione del centro storico di Napoli patrimonio dell'UNESCO tra conservazione e progetto', a cura di A. Aveta e B. G. Marino, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli 2012, pp. 159-169

AVERSA S., FLORA A., VIGGIANI C.

- *Il sottosuolo di Napoli: pericolo o risorsa?* In 'Restauro e riqualificazione del centro storico di Napoli patrimonio dell'UNESCO tra conservazione e progetto', a cura di A. Aveta, B.G. Marino, Edizioni Scientifiche Italiane. Napoli 2012, pp. 145-158

AVERSA S., NICOTERA M.V.

- *On the effect of suction on the stability of ancient retaining walls,* Proc. 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Geotechnics of Hard Soils – Weak Rock (Anagnostopoulos, Pachakis & Tsatsanifos Eds). IOS Press BV. Amsterdam 2013, vol. 4, pp. 498-505

AVERSA S., NOCILLA N.

- *Difficile equilibrio tra esigenze di sicurezza e di tutela ambientale nei problemi di stabilità di costoni rocciosi in ambiti di grande rilevanza ambientale: il caso di Capri.* In 'La Baia di Napoli.

Strategie integrate per la conservazione e la fruizione del paesaggio culturale', a cura di A. Aveta, R. Amore, B. G. Marino, Artstudiopaparo, Napoli 2017, vol. I, pp. 94-98

BURLAND J.B., JAMIOLKOWSKI M., SQUEGLIA N., VIGGIANI C.

- *The Leaning Tower of Pisa*, *in* 'Geotechnics and Heritage', Bilotta, Flora, Lirer & Viggiani Ed., Taylor & Francis Group, London 2013

BURLAND J.B., STANDING J.R.

- *Geotechnical monitoring of historic monuments,* Proc. of the Arrigo Croce Memorial Symposium – Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites, Napoli 1996, A.A. Balkema, Rotterdam 1997

BURLAND J.B., JAMIOLKOWSKI M., VIGGIANI C.

- *Preserving Pisa's treasure*. CIVIL ENG, 2002, vol. 72

BURLAND J.B., VIGGIANI C.

- *Osservazioni del comportamento della Torre di Pisa*, in Rivista Italiana di Geotecnica, 1994, vol. 28, 3, pp. 179-200

BURLAND J.B., JAMIOLKOWSKI M.B., VIGGIANI C.

- *Underexcavating the Tower of Pisa: Back to the future, GEOTECH-YEAR 2000,* 'Developments in Geotechnical Engineering', Bangkok, Thailand, Balasubramaniam, A.S. et al. Eds, 2000, pp. 273-282

BURLAND J.B., JAMIOLKOWSKI M.B., VIGGIANI C.

- *The stabilisation of the Leaning Tower of Pisa*. In Soils and Foundations, 2003, vol. 43, 5, pp. 63-80

BURLAND J.B., JAMIOLKOWSKI M.B., VIGGIANI C.

- *Leaning Tower of Pisa: Behaviour after Stabilization Operations*, in International Journal of Geoengineering Case Histories ©, 2009, vol. 1, issue 3, pp. 156-169

CALABRESI G.

- *The soft approach to saving Monuments and Historic Sites*, In Proc. Of the 15th European Conf. of ISSMGE, Athens 2011

CALABRESI G.

- 1st Kerisel Lecture: *The role of Geotechnical Engineering in saving monuments and historic sites*, Proc. 18th Int. Conf. of ISSMGE. Presse des Pontes, Paris 2013

CALABRESI G., D'AGOSTINO S.

- *Monuments and historic sites: Intervention techniques*, Proc. Arrigo Croce Memorial Symposium – Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites, Napoli, Viggiani ed., Balkema, A.A. Balkema, Rotterdam 1997, pp. 409–425

CALVANESE V.

- *Strategie di tutela, conservazione, restauro e fruizione nel Parco Archeologico di Pompei: il contributo dell'ingegneria ad un approccio multidisciplinare,* in 'La Cultura dell'Ingegneria per la conservazione del Patrimonio e del Paesaggio', a cura di A. Aveta, Editori Paparo, Napoli 2023, pp. 32-44

CROCE A.

- *Old monuments and cities. Research and preservation,* in 'Geotechnical Engineering in Italy: An overview', Special volume for ISSMFE – Golden Jubilee, Associazione Geotecnica Italiana ed., 1985, pp. 361–415

DE SANCTIS L., IOVINO M., MAIORANO R.M.S., AVERSA S.

- *Seismic stability of the excavation fronts in the ancient Roman city of Pompeii*, Soils and Foundations, 2020, 60(4), pp. 856-870

DE SANCTIS L., IOVINO M., MAIORANO R.M.S., AVERSA S.

- *Site effects and intervention criteria for seismic risk mitigation in the ancient city of Pompeii: The case of the Insula dei Casti Amanti*, in 'Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III', (Lancellotta, Viggiani, Flora, de Silva & Mele Eds). CRC Press. London, 2022, pp. 214-233

DE SANCTIS L., MAIORANO R.M.S., BRANCACCIO U., AVERSA S.

- *Geotechnical aspects in the restoration of Insula dei Casti Amanti in Pompeii,* in 'Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering' 172 (2), 2019, pp. 121–130

DE SILVA F., LUSI T., RUOTOLO M., RAMONDINI M., FLORA A.

- *Reliability-based roof stability charts for cavities in heterogeneous jointed rock masses*, in Rivista Italiana di Geotecnica, 2023, volume 57, n. 2, pp.16-32

EVANGELISTA A., FEOLA A., FLORA A., LIRER S., MAIORANO R.

- *Numerical analysis of roof failure mechanisms of cavities in a soft rock, GEOENG* International Symposium, Melbourne, Australia, 2000

EVANGELISTA A., PESCATORE T.S., AVERSA S., PINTO F.

- *The role of soft rocks in the urbanisation of Naples (introductory report),* in 'Proceedings of the Second International Symposium on the Geotechnics of Hard Soils and Soft Rocks', Napoli, Balkema, Rotterdam 2000

FERRARI G.W., LAMAGNA R.

- *Crypta Neapolitana: non solo un tunnel*. In Trasporti e Cultura, Rivista di architettura delle infrastrutture nel paesaggio, 40, 2015, pp. 88-93

FLORA A.

- *Monuments, historic sites and case histories. General Report*, Proc. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013, pp. 3087–3094

- *Taking care of heritage, a challenge for geotechnical engineers. Third Kerisel Lecture*, in Proc. of the 3rd International Symposium on the Preservation of Monuments and Historic Sites, IS Napoli 2022, Open Access, pp. 19-54

FLORA A., CHIARADONNA A., DE SANCTIS L., LIGNOLA G.P., OZTOPRAK S., RAMAGLIA G., SARGIN S.

- *Understanding the Damages Caused by the 1999 Kocaeli Earthquake on One of the Towers of the Theodosian Walls of Constantinople*, in Int. Journal of Architectural Heritage, Taylor & Francis, 2021

Geotechnical earthquake engineering related to monuments and historic sites, Tsatsanifos C. (Ed.), in Proc. of the Workshop n. 2, 4 ICEGE, Thessaloniki 2007

HOLM G., HALLGREN L., ROSEN R., WIKSTROM R., EHNSTROM H.

- *A jet grouted cut-off wall at Parliament Buildings*, Stockholm. Proceedings of the XIV ECSMGE, Madrid 2007

JAMIOLKOWSKI M.B.

- *The Leaning Tower of Pisa: End of an Odyssey*, 15th Int. Conf. on SMGE, Third *Millenium, Terzaghi Oration*, Istanbul, Turkey, 2001, vol. 4, pp. 2979-2996

JAPPELLI R.

- *An integrated approach to the safeguard of monuments: the contribution of Arrigo Croce*, in Proc. of the Arrigo Croce Memorial Symposium – Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites, Napoli 1996., A.A. Balkema, Rotterdam 1997

JAPPELLI R., MARCONI N.

- *Recommendations and prejudices in the realm of foundation engineering in Italy: A historical review*, in C. Viggiani (ed.), 'Geotechnical engineering for the preservation of monuments and historical sites', Proc. Intern. Symp., Napoli, 3-4 October 1996, Balkema, Rotterdam 1997

LANCELLOTTA R.

- *11th Croce Lecture: La Torre Ghirlandina: una storia di interazione struttura-terreno*, in 'Rivista Italiana di Geotecnica', 47(2), Patròn, Bologna 2013

LEOPARDI G.

- *Canti*, Piatti editore. Firenze 1831, (l'edizione completa è stata pubblicata da Antonio Ranieri nel 1845)

MIBAC

- *Torre Restituita*, Ministero per i Beni e le Attività Culturali,Bollettino d'Arte, voll. 1,2 and 3, 2006

NEWMARK N. W.

- *Effects of earthquakes on dam and embankments*, in Géotechnique 15(2) 1965, pp. 139–159

SOMMA F., LIGNOLA G., RAMAGLIA G., DE SANCTIS L., IOVINO M., OZTOPRAK S., FLORA A.

- *Earthquake damages to an historic tower: back analysis and possible mitigation measures,* in Bullettin of Earthquake Engineering, 2022

VIGGIANI C.

- Opening address*, Proc. of the Arrigo Croce Memorial Symposium – Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic sites*, Balkema, Rotterdam 1997

- *Cultural Heritage and Geotechnical Engineering: an introduction*, in 'Geotechnichs and Heritage', Bilotta, Flora, Lirer & Viggiani Ed., Taylor & Francis Group, London 2013

Cultural heritage and geotechnical engineering: An introduction, in Proc. 2nd International Symposium on Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites, CRC Press/Balkema, Napoli, Italy, 2013, pp. 3–12

- *2nd Kerisel Lecture: Geotechnics and Heritage,* in Proc. Of the 19th Int. Conf. of, Seoul 2017 ISSMGE

- *Ingegneria Geotecnica e patrimonio culturale: la Torre di Pisa*, in 'La Cultura dell'Ingegneria per la conservazione del Patrimonio e del Paesaggio', a cura di A. Aveta, Editori Paparo, Napoli 2023, pp. 100-111

3.
Difesa dei paesaggi costieri

Trade-off nella protezione strutturale delle spiagge

Mario Calabrese, Mariano Buccino, Margherita Carmen Ciccaglione, Sara Tuozzo

Premessa

La costa, quella zona di margine in cui l'ecosistema terrestre incontra quello marino, è da sempre considerata una porzione di territorio di strategica importanza; essa è infatti fra le zone più densamente popolate e costituisce un *asset* economico particolarmente remunerativo, legato principalmente all'insediamento urbano, portuale, industriale e turistico. Il nostro paese vanta innumerevoli chilometri di litorali, che custodiscono inestimabili patrimoni naturali, teatro di culture e storie mediterranee susseguitesi nel corso dei secoli. Di qui, anche l'importante ruolo sociale della spiaggia, che ha contribuito all'aggregazione tra le persone e all'esaltazione dell'identità comunitaria.

Dunque, risulta evidente come l'uomo abbia esercitato (ed eserciti tuttora) una considerevole pressione che segna profondamente le aree costiere, e attualmente ne minaccia la loro integrità. Di conseguenza, la tutela e la salvaguardia delle zone di mare sono diventate sempre più prioritarie per le politiche territoriali, e a tal riguardo l'opera dell'Ingegnere risulta essere essenziale. Ad ogni modo, essa diviene particolarmente ardua quando la costa prende le forme della spiaggia, la cosiddetta costa bassa, costituita da materiali incoerenti. I litorali sabbiosi sono, infatti, considerati i più vulnerabili all'azione del mare, e se in disequilibrio con esso, la progressiva erosione che ne consegue determina la perdita di aree di spiaggia che rappresentano sì una risorsa economica, sociale o ambientale, ma soprattutto una difesa costiera naturale, con il conseguente incremento del potenziale rischio di *flooding* dei territori retrostanti.

Storicamente, per recuperare e proteggere le spiagge dall'erosione, si è fatto ricorso a opere rigide di difesa costiera. Tuttavia, è importante notare che tali interventi, se non adeguatamente progettati, possono avere effetti negativi sulla costa, portando a conseguenze indesiderate sia dal punto di vista ambientale che paesaggistico. Nel panorama attuale, l'approccio di irrigidimento della costa sta cedendo il passo a soluzioni e tecnologie che mirino a contrastare l'erosione costiera, ma con una maggiore attenzione alla salvaguardia dell'ambiente e alla conservazione del patrimonio paesaggistico.

In quest'ottica, questo lavoro fornisce un riepilogo dei processi che influenzano l'evoluzione di una spiaggia su diverse scale temporali, dimostrando come la

comprensione di tali processi possa portare a soluzioni di compromesso tra la protezione della costa e la conservazione del paesaggio. A titolo esemplificativo, si farà riferimento agli studi condotti su alcuni siti costieri campani, svolti presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

1. Caratteri generali del trasporto litoraneo

Il moto dei sedimenti risulta essere confinato all'interno dell'‘unità fisiografica', una porzione di territorio che si estende talvolta per diversi chilometri, delimitata lateralmente da promontori, opere portuali o foci fluviali, che bloccano lo scambio di sedimenti con i tratti di costa adiacenti. Trasversalmente, invece, il moto dei sedimenti è limitato dalla ‘profondità di chiusura stagionale' (Hallermeier, 1981), oltre la quale il trasporto solido può considerarsi trascurabile, sebbene non nullo.

Il responsabile della movimentazione dei sedimenti all'interno dell'unità fisiografica è il moto ondoso, che nella sua evoluzione verso costa induce sforzi via via crescenti sul fondo sino a determinare, al frangimento, la messa in sospensione delle particelle. Allo stesso tempo, la dissipazione energetica e la riduzione della quantità di moto dell'onda determinano gradienti di spinta idraulica che possono considerarsi le *driving forces* delle correnti litoranee. Queste ultime poi esercitano l'azione di trasporto dei sedimenti.

I caratteri macroscopici e la scala temporale del fenomeno dipendono soprattutto dalla direzione del trasporto e, in misura più marginale, dalla granulometria del materiale di fondo.

Il trasporto in direzione trasversale alla linea di riva (*cross-shore*) è soprattutto legato all'azione delle mareggiate, che determina una profonda alterazione del profilo di spiaggia.

Nelle spiagge sabbiose i sedimenti vengono prelevati dalle onde nella parte più interna della zona dei frangenti e sulla spiaggia emersa (*backshore*), i cui meati vengono progressivamente saturati a causa dell'alta frequenza dei marosi. Il materiale viene, poi, trasportato verso il largo riducendo la pendenza del profilo di spiaggia (‘profilo dissipativo o invernale') e favorendo la costruzione di una barra protettiva in prossimità della linea dei frangenti. Tale processo è tuttavia reversibile, in quanto il flusso sedimentario si inverte per effetto delle onde estive o ‘di bel tempo'.

La maggiore permeabilità delle spiagge ghiaiose induce, d'altra parte, un progressivo accumulo di materiale sul *backshore*, con la formazione di berme di tempesta che limitano, di fatto, il *flooding* del territorio retrostante. Tale processo, generalmente non reversibile, conduce ad un incremento della pendenza di spiaggia *post-storm*.

Il trasporto solido lungo costa (*long-shore*) è associato alle caratteristiche del clima ondoso medio del paraggio, ed è causa delle variazioni planimetriche irreversibili della linea di riva nel medio e lungo periodo. Esso è principalmente determinato dalla mutua inclinazione tra spiaggia e fronti d'onda, che dà luogo al *littoral drift* nei litorali sabbiosi (trasporto solido prevalentemente in sospensione che si svolge nella zona dei frangenti) ed al *beach drifting* nelle spiagge ghiaiose (movimento a dente di sega che si svolge nella zona di risacca o *swash zone*).

La presenza di strutture diffrattive, poi, induce variazioni rilevanti della curvatura dei fronti e dell'altezza dell'onda in senso longitudinale, innescando in tal modo correnti di diffrazione (*diffraction currents*), responsabili, in grande misura, dell'assetto delle numerose baie presenti nei nostri mari (anche dette *pocket beaches*).

La conoscenza dettagliata delle diverse forzanti di trasporto, delle scale temporali del processo, nonché della differente risposta di materiali fini e di materiali grossolani (e cioè i meccanismi di autodifesa dalle mareggiate) è dunque un prerequisito indispensabile alla ricerca di condizioni di un compromesso tra protezione della costa e la conservazione del paesaggio. A ciò si accompagnano i fondamenti di base relativi alle condizioni di equilibrio planimetriche raggiungibili da un tratto di costa a lungo termine, di cui si discuterà nel prossimo paragrafo.

2. Equilibrio statico ed equilibrio dinamico delle spiagge

Come precedentemente osservato, l'evoluzione della linea di costa nel medio e lungo termine è influenzata dal segno del *budget* sedimentario, in cui giocano un ruolo significativo le onde e i sedimenti provenienti dal bacino idrografico che le sottende. L'equilibrio, e quindi la stabilità della linea costiera, si verifica allorquando il bilancio sedimentario si annulla.

Una condizione di equilibrio associata ad un valore non nullo del trasporto *longshore* si dirà 'dinamica'; in tal caso o il flusso sedimentario lungoriva è uniforme (assenza di gradienti di trasporto), o la rete idrografica è in grado di compensare completamente lo sbilanciamento indotto dai gradienti di trasporto. D'altro canto, lì dove il flusso sedimentario è nullo l'equilibrio raggiunto verrà detto 'statico'. Tale assetto è ottenuto asintoticamente in alcune baie prive di foci (ad esempio sulle isole) dove le sorgenti diffrattive, di origine naturale o antropica (promontori, barriere), determinano una particolare espansione del fronte, tale che il frangimento sia approssimativamente sincrono lungo il profilo planimetrico della spiaggia (*pocket beaches*, Hsu et al., 1989).

La progressiva urbanizzazione del territorio altera significativamente il bacino idrografico naturale, portando a una progressiva riduzione del flusso di sedimenti verso la costa, fino a raggiungere valori quasi nulli. Pertanto, l'equilibrio dinamico

di una spiaggia in un'area urbanizzata può essere mantenuto solo se lo squilibrio sedimentario dovuto al moto ondoso è compensato antropicamente. Questo si ottiene o attraverso operazioni periodiche di ricarica (ripascimenti) o tramite il recupero e la redistribuzione dei sedimenti all'interno dell'unità fisiografica (attività di manutenzione).

In alternativa, è possibile tendere alle condizioni di equilibrio statico introducendo opportune strutture diffrattive, o di controllo, tali da deviare la direzione dei fronti d'onda incidenti così da soddisfare la condizione di annullamento del trasporto di sedimenti in direzione longitudinale. Tuttavia, quest'ultima condizione può essere raggiunta solo attraverso l'impiego di strutture con una rigidità molto superiore rispetto al materiale sabbioso.

3. Il concetto di trade-off applicato ad alcuni siti costieri campani

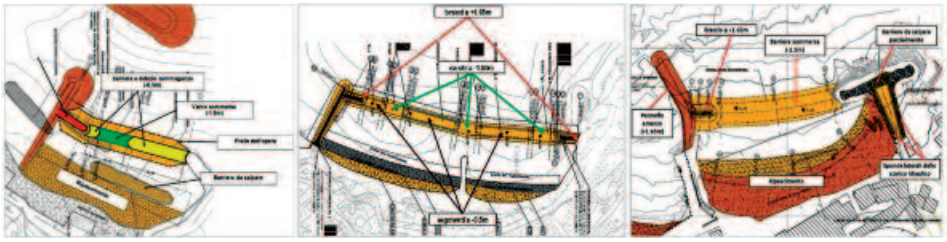
Alla luce dei concetti di base dell'Ingegneria Costiera esposti nei precedenti paragrafi, si può beneficiare della spiaggia non solo per scopi ricreativi, ma anche per la sua naturale genesi difensiva. Inoltre, se accompagnata da soluzioni rigide attentamente progettate o 'puntuali', essa può costituire un valido approccio alternativo all'irrigidimento completo di un tratto di costa da difendere. Il concetto di compromesso, dunque, centrale in questo studio, si manifesta attraverso la spiaggia stessa e la sua doppia funzione sia di protezione che di riqualificazione.

A questo proposito, si possono considerare esempi chiari dell'applicazione del concetto di *trade-off* nella protezione delle spiagge, attraverso alcuni studi condotti presso il DICEA dell'Università di Napoli Federico II. Questi studi propongono soluzioni valide per la protezione, la valorizzazione e la riqualificazione di diverse porzioni di costa nella regione campana.

Gli esempi che si riporteranno nel seguito contemplano, da un lato, l'idea di introdurre un ripascimento artificiale in corrispondenza del lungomare Caracciolo, come alternativa alle attuali barriere radenti. Dall'altro lato, vengono esaminate le soluzioni di difesa poco invasive per tre famose *pocket beach* della Penisola Sorrentina, presentate come alternative alle opzioni più rigide e costose del progetto *Costa Sicura*.

3.1. Le marine della Penisola Sorrentina

Per far fronte alle crescenti problematiche di erosione che affliggevano la Penisola Sorrentina, prese forma, agli inizi degli anni 2000, il Protocollo d'Intesa denominato *Costa Sicura*, che subito ottenne l'approvazione unanime dalla Giunta regionale come «un intervento complessivo per la messa in sicurezza rispetto al rischio idrogeologico e all'erosione costiera di un tratto di litorale tra i più belli d'Italia». In particolare, proprio le tre incantevoli marine di Alimuri, Puolo e



1. Opere di difesa previste per le tre pocket beach nell'ambito del Protocollo d'Intesa *Costa Sicura*. I pannelli (a), (b) e (c) raffigurano, rispettivamente, le soluzioni progettuali per la Marina di Puolo, la Marina di Cassano e la Marina di Alimuri. (fonte Progetto Definitivo *Costa Sicura*).

Cassano rientravano tra quelle zone fortemente danneggiate dagli eventi di mareggiata avvenuti nel dicembre 2004 e nel successivo evento del marzo 2005. I danni ripetuti peggioravano, tra l'altro, le situazioni di erosione già compromesse dagli effetti delle mareggiate risalenti al dicembre 1999 e causavano ulteriori danni diffusi alle strutture retrostanti le linee di costa.

Per questi motivi, il progetto mirava a rafforzare le tre baie, migliorandone il livello di sicurezza tramite l'attuazione di un intervento di ripascimento artificiale protetto verso largo da una barriera *low crested* e confinato ai lati da pennelli o promontori naturali.

Dalla figura 1, emergono immediatamente le criticità di questi interventi: si nota infatti come essi introducano un notevole carico strutturale alle baie, e chiudano irrimediabilmente lo specchio acqueo antistante la linea di riva, non favorendo il ricambio idrico.

È proprio dalle problematiche emerse riguardo agli interventi proposti in *Costa Sicura*, che il nostro gruppo di Ingegneria Costiera è stato incaricato dal Comune di Piano di Sorrento di svolgere una consulenza tecnico-scientifica a supporto del progetto. Lo studio comprendeva una prima un'analisi critica delle soluzioni progettuali proposte e la successiva individuazione di alternative che riuscissero a trovare un giusto compromesso tra la protezione della costa e un impatto ambientale e paesaggistico ridotto. Nelle sezioni successive si riporta una sintesi delle analisi.

La Marina di Puolo

La Marina di Puolo, situata nel Comune di Massa Lubrense, si estende per circa 150 m. tra il porticciolo a bacino situato ad Ovest e la falesia calcarea ad Est. Un *seawall* – manufatto in calcestruzzo con quota media approssimativa di 2 m. sul livello medio del mare – funge da contenimento della berma, separando la spiaggia emersa dai diversi edifici retrostanti destinati ad attività turistico-balneari-ricreative (fig. 2). Il litorale presenta una giacitura media avente normale esterna orientata a 340°N e risulta quindi esposto ai quadranti nord-occidentali. Il Settore di Traversia Geografico (settore polare comprendente le possibili direzioni

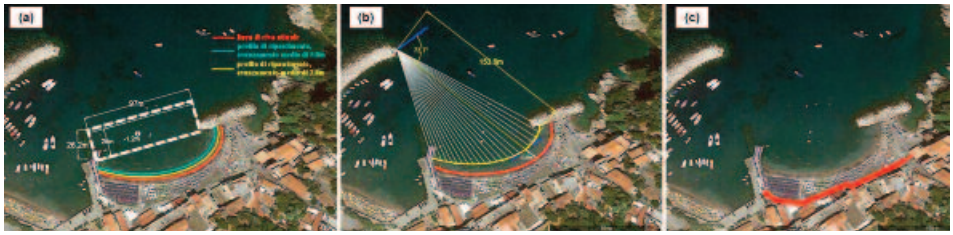
2. La Marina di Puolo.

di attacco del moto ondoso di largo) è naturalmente compreso tra 284°N e 22°N; tuttavia, la presenza del molo di sopraflutto limita il Settore occidentale a 302°N.

La spiaggia assume la tipica configurazione delle *headland bay*, in cui la linea di riva si trova in condizioni di equilibrio e deve la sua tipica forma concava a uno o più punti di diffrazione. In particolare, la spiaggia appare governata dal molo di sopraflutto ad Ovest ed influenzata da un punto di diffrazione secondario ad Est, ossia dalla barriera emersa aderente la linea di riva, dove è riconoscibile un caratteristico tombolo (fig. 2). Dall'analisi diacronica della linea di riva nel medio termine, condotta adoperando le immagini satellitari di Google Earth, risulta che nel periodo di riferimento 2014-2019 la spiaggia si trovi in condizioni equilibrio statico. Ulteriore conferma è stata ottenuta confrontando i rilievi della linea di riva con il profilo parabolico suggerito da Hsu et al. (1989) per baie in equilibrio statico controllate da una singola *headland*, generalizzato ad un polinomio di terzo grado per tener conto della presenza di due punti di diffrazione, utilizzando la direzione di modellamento della baia pari a 324°N.

In questo lavoro sono state analizzate le diverse soluzioni progettuali (fig. 3) pensate per difendere la Marina di Puolo dai frequenti attacchi ondosi che interessano l'area, dando luogo a fenomeni di *flooding* in grado di indurre danneggiamenti significativi agli edifici retrostanti.

Nello specifico, le soluzioni confrontate sono le seguenti:



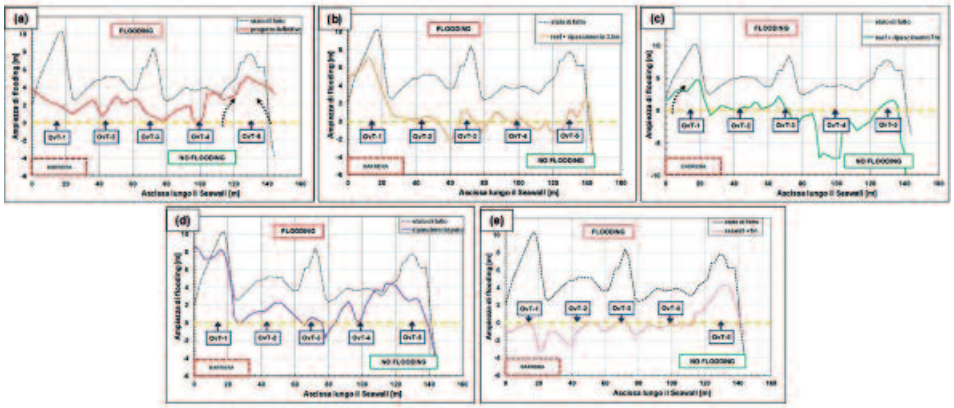
3. Planimetria delle soluzioni progettuali alternative. Pannello (a): ripascimento sabbioso protetto da un *reef breakwater*; pannello (b): ripascimento puro; pannello (c): innalzamento di 1.0 m. della quota di cresta del *seawall* di contenimento.

1) Ripascimento sabbioso protetto da una barriera sommersa. L'opera rappresenta la soluzione progettuale esistente (fig. 1a) e prevede un ripascimento in sabbia (d_{50} = 0.4 – 1 mm.) con un avanzamento medio della linea di riva di 7.8 m., protetto a largo da una barriera sommersa a gettata di massi caratterizzata da una sommergenza di 1.5 m., e una larghezza in cresta pari a 12 m. La barriera è radicata a Nord-Est alla barriera emersa esistente e a Nord-Ovest ad un pennello emerso (da costruire) che funge da prolungamento del molo di sottoflutto;
2) *Reef breakwater* accompagnato da un ripascimento di volume contenuto. Simile alla soluzione precedente, questa soluzione prevede una barriera sommersa con una maggiore larghezza in cresta, 25 m., così da migliorarne l'efficienza idraulica e due ipotesi di ripascimento in sabbia grossa (d_{50} 1mm.) che prevedono un avanzamento medio della linea di riva di 5.8 m. e 2.8 m. La planimetria del ripascimento è descritta dal polinomio di terzo grado sopracitato, supponendo dunque una configurazione di equilibrio (fig. 3a);
3) Ripascimento puro. Un ripascimento in sabbia grossa, d_{50} 1mm., che determina un avanzamento medio della linea di riva di 11m. (fig. 3b);
4) Incremento della quota del *seawall* di contenimento.

L'ultima soluzione consiste nel semplice innalzamento di 1m. della quota di cresta del *seawall* retrostante la spiaggia emersa (fig. 3c).

Le tre soluzioni alternative si propongono di ridurre il rischio legato alle frequenti inondazioni e contemporaneamente di limitare l'impatto ambientale e paesaggistico legato alla prima soluzione. Quest'ultima, infatti, introduce un notevole carico strutturale e limita eccessivamente lo specchio acqueo disponibile per la balneazione.

L'efficienza delle varie soluzioni in termini di riduzione dell'area inondata e della portata tracimante il *seawall* di contenimento è stata verificata a mezzo del *software open-source* CELERIS (Tavakkol & Lynett, 2017), una *suite* numerica che integra le equazioni di Boussinesq.



4. Confronto tra le aree di massima inondazione ottenute per lo stato di fatto (linea nera tratteggiata) e le diverse soluzioni progettuali (linea continua). Pannello (a): soluzione progetto esistente; pannelli(b) e (c): ripascimento con avanzamento medio di 2.8 m. e 5.8 m., rispettivamente, protetto a largo da un *reef breakwater*; pannello (d): ripascimento puro; pannello (e): innalzamento di 1.0 m. della quota di cresta del *seawall*.

Le simulazioni sono state eseguite riproducendo il picco di una mareggiata avente periodo di ritorno di 10 anni; proveniente dalla direzione 282°N; esso è caratterizzato da un'altezza d'onda significativa pari a 5.2 m. e da un periodo di picco di 9.7 s. È bene specificare che CELERIS simula soltanto l'idrodinamica del processo, e quindi i risultati non tengono conto della risposta morfodinamica del ripascimento all'attacco ondoso.

I risultati sono mostrati in termini di area inondata nella figura 4. Ogni pannello in tale figura confronta l'area di massima inondazione ottenuta per lo stato di fatto (linea nera tratteggiata) e per la soluzione progettuale in esame.

Le soluzioni progettuali analizzate mostrano tutte una notevole capacità di ridurre il rischio di *flooding* che incide sulla Marina di Puolo. Tuttavia, la soluzione che prevede il semplice innalzamento della quota di cresta del *seawall* appare sia la più efficiente che la meno impattante sull'ecosistema marino. Ricordando, tra l'altro, che i valori limite, suggeriti dall'EurOtop Manual 2018, necessari a garantire la stabilità strutturale degli edifici sono pari a 1 litro/s/m per la portata media tracimante e 1000 l/m per il volume massimo individuale, la soluzione con il solo *seawall* risulta essere la più efficiente.

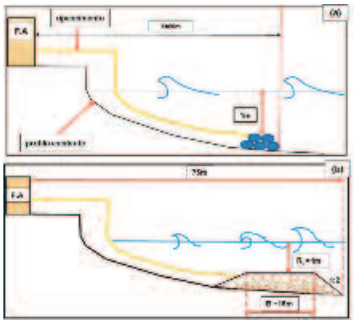
La Marina di Cassano

La Marina di Cassano, situata nel Comune di Piano di Sorrento, si presenta come una *pocket beach* protetta dalla falesia retrostante e confinata ad Ovest dall'omonimo porto. A partire da quest'ultimo, la Marina si estende per circa 130 m. in direzione Nord-Est, presenta una giacitura con normale esterna pari a 302°N e risulta esposta ad attacchi ondosi nord-occidentali (fig. 5).

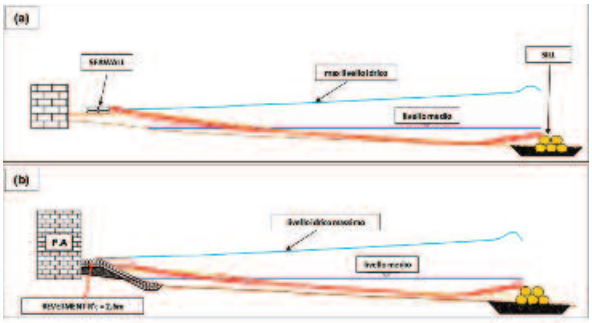
5. La Marina di Cassano.

La spiaggia è protetta al largo da una barriera a gettata di massi, emersa rispetto al livello medio mare di 1.5 m., che ha il compito di proteggere i due corpi di fabbrica presenti sulla spiaggia emersa dagli attacchi ondosi estremi. Alla presenza della barriera si deve l'andamento planimetrico della linea di riva, caratterizzato da un saliente nella zona d'ombra geometrica e un conseguente arretramento nel varco non protetto, dove l'andamento curvilineo della costa è compatibile con gli effetti di diffrazione della testata dell'opera (fig. 5). Inoltre, nell'estremo settentrionale della spiaggia è presente un pennello trasversale emerso a gettata di massi, che si estende verso largo per una lunghezza di circa 10 m.

Nell'ambito del Progetto *Costa Sicura*, la soluzione prevede la realizzazione di una barriera a sezione composita, in luogo dell'attuale barriera emergente, impostata a Sud sul molo di sottoflutto del porto ed a Nord sulla gettata esistente in corrispondenza del costone (fig. 1b). Nello specifico, si tratta di una barriera



6. Schematizzazione profilo trasversale delle soluzioni progettuali esaminate. Pannello (a): ripascimento puro; pannello (b): ripascimento protetto da *reefbreakwater*.



7. Risultato dei profili post storm (linee in rosso) per le sette mareggiate esaminate e del massimo livello idrico ottenuto per la soluzione di ripascimento puro in sabbia grossa accompagnato da opere rigide puntuali in corrispondenza degli edifici.

sommersa (-0.5m s.l.m.m.), con un varco centrale a maggiore sommergenza (-1.5 m. s.l.m.m.), posta a protezione di un ripascimento in sabbia (d_{50} 0.4mm-1mm) con avanzamento atteso della linea di riva di circa 30 m. Come sottolineato precedentemente, tale soluzione apporta un carico strutturale eccessivo e una chiusura dello specchio acqueo, con un importante impatto paesaggistico ed ambientale.

Sono state quindi studiate due tipologie di soluzioni alternative, con l'obiettivo di proteggere gli edifici presenti dalle frequenti inondazioni salvaguardando, contemporaneamente, il paesaggio costiero. La prima soluzione prevede un ripascimento puro in sabbia grossa o media confinato a largo da un *sill* di chiusura (fig. 6a), mentre la seconda consiste in un ripascimento in sabbia protetto da un *reefbreakwater* avente sommergenza pari a 1.0 m. s.l.m.m (fig. 6b) e caratterizzato da un coefficiente di trasmissione pari a 0.45, determinato secondo la formula di Buccino e Calabrese (2007). Lo sviluppo planimetrico del ripascimento in entrambe le soluzioni è stato ottenuto a mezzo del software ad una linea GENESIS e rappresenta una configurazione di equilibrio statico.

L'efficacia delle due tipologie di intervento è stata analizzata avvalendosi del software SBEACH che, grazie alla presenza di un *wave driver*, un modulo idrodinamico, morfo-dinamico e di *overwash*, ha permesso di verificare la capacità delle soluzioni di difendere gli edifici dalle inondazioni. In particolare, sono state studiate quattro mareggiate con storia triangolare provenienti dalla direzione di 281°N e caratterizzate da periodo di ritorno pari a 10, 25, 50 e 75 anni e tre mareggiate con storia rettangolare, provenienti dalla direzione di 290°N, con periodo di ritorno pari a 10, 25 e 50 anni.

La seconda soluzione si dimostra efficace nel proteggere gli edifici dalle inondazioni per le diverse mareggiate sudiate, mentre la prima tipologia di soluzione appare inefficace. Da un lato, il ripascimento in sabbia media non riesce a contenere

il fenomeno di *flooding*, dall'altro quello in sabbia grossa presenta un accrescimento della berma tale da determinare accumulo di significativi volumi sabbiosi sulle pareti dei corpi di fabbrica. Per ovviare alla suddetta criticità, si è immaginato di inserire delle opere rigide puntuali in corrispondenza degli edifici, così da evitare l'accumulo di materiale sabbioso e garantire che la portata media tracimante la struttura sia inferiore al limite di danneggiamento strutturale suggerito dal manuale EurOtop 2018 (1 l/s/m). L'opera può essere di natura reversibile, come ad esempio con *sandbag* da usare durante la stagione invernale, o fissa, un *revetment* in massi naturali. Nel caso specifico, sono state considerate due quote di cresta dell'opera pari rispettivamente a +2.6 e +3.0 m. s.l.m.m, con il piede esterno della struttura distante 6.0 m. dalla parete degli edifici. I risultati in figura 7 dimostrano che il ripascimento puro in sabbia grossa accompagnato da opere rigide puntuali è in grado di difendere gli edifici dalle inondazioni. Inoltre, il *revetment* con quota di cresta pari a 3.0m garantisce una portata media di *overtopping*, calcolata mediante formule EurOtop, sempre inferiore al limite sopraindicato per qualsiasi mareggiata esaminata.

Lo studio per la difesa della Marina di Cassano ha permesso quindi di evidenziare come soluzioni ragionate permettono di garantire la funzionalità dell'opera di difesa senza impattare significativamente sul paesaggio costiero.

La Marina di Alimuri

La spiaggia di Alimuri si distende per circa 300 m. tra la *Marina di Meta* a Sud, e le falesie calcaree a Nord (fig. 8). La linea di riva è orientata mediamente in direzione Nord-Sud, ed è esposta agli attacchi ondosi provenienti dal quadrante occidentale (tra le direzioni 250°N e 330°N). L'area in esame è significativamente edificata e comprende alcune attività turistico-balneari-ricreative ad elevato valore aggiunto, i cui corpi di fabbrica si trovano ad una quota media approssimativa di 2.50 m. sul livello medio mare, serviti da camminamenti e piccoli tratti carrabili, che fungono anche da strutture di contenimento della berma. Tra l'altro, elemento caratterizzante le spiagge del Comune di Meta e che risulterà essenziale per la scelta dell'alternativa di progetto, è la eterogeneità granulometrica. Infatti, i sedimenti sabbiosi di *Marina di Meta* affiancano infatti quelli più grossolani di *Marina di Alimuri*. Qui, la presenza di ghiaia e ciottoli è probabilmente connessa all'attività di sfruttamento delle falesie calcaree, mentre la frazione sabbiosa è stata progressivamente sottratta alla spiaggia a seguito dell'impianto del molo di sovraflutto del porto (anni '70-'80 del secolo scorso), che ha mutato l'assetto planimetrico della costa.

A difesa delle mareggiate più intense che determinano il *flooding* delle aree retrostanti compromettendo la sicurezza dei fabbricati, il progetto definitivo di *Costa Sicura* prevedeva per la *Marina di Alimuri* un intervento di ripascimento sabbioso, protetto da una barriera distaccata sommersa, a soli 65 m. dalla linea di costa, e confinato lateralmente da un pennello emerso (fig.1c). La soluzione progettuale offre un

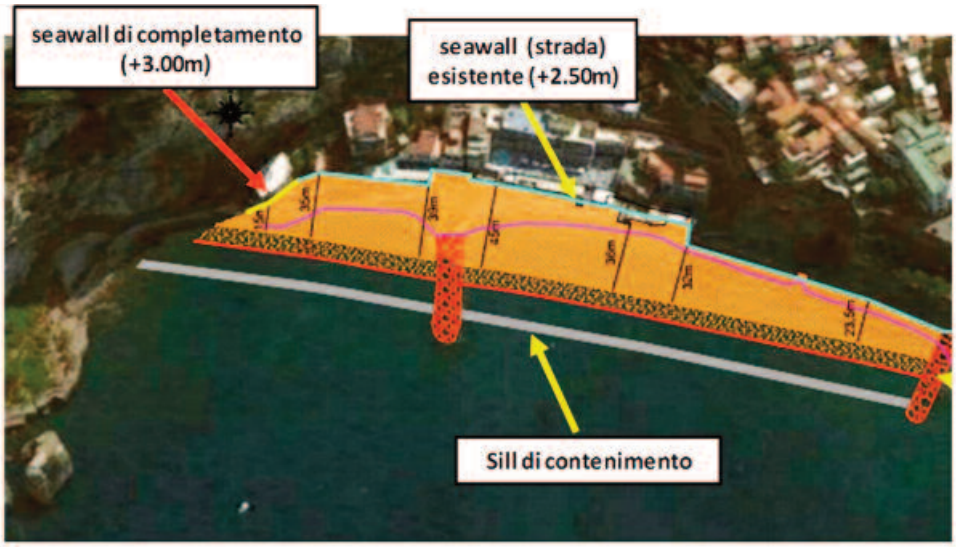
8. La Marina di Alimuri.

considerevole grado di protezione al paraggio, ma determina al contempo un significativo confinamento dello specchio acqueo, con possibile riduzione del tasso di ricambio idrico. Ciò in considerazione del fatto che dei 500 m. di strutture rigide complessivamente previste, 416 sono emergenti o a debole sommergenza.

Tuttavia, in virtù dell'intensità degli attacchi ondosi che sollecitano l'area, la riduzione del carico strutturale 'rigido' richiede inevitabilmente un incremento della 'resistenza' del ripascimento, ovvero della dimensione dei sedimenti di apporto.

Pertanto, come alternativa, è stata avanzata la proposta di un ripascimento in ghiaia grossa (d_{50}=50mm), che si dimostra assolutamente idonea essendo sia compatibile con le caratteristiche sedimentologiche del sito, sia capace di resistere naturalmente agli attacchi ondosi, come descritto in precedenza. Inoltre, come mostrato in figura 9, il ripascimento presenta una quota di berma di 1.5 m. s.l.m.m. e un avanzamento medio di 30.5 m., praticamente coincidente col progetto definitivo, senza la necessità di realizzare un'opera rigida di protezione. Questa decisione non solo preserva l'aspetto naturale della spiaggia, ma contribuisce anche a creare una maggiore attrattiva per i turisti e a promuovere l'uso ricreativo della spiaggia.

In primo luogo, si è analizzata la risposta trasversale della spiaggia a mezzo del software Xbeach-G (Mc Call et al., 2014) sviluppato specificamente per va-



9. Planimetria della soluzione progettuale alternativa.

lutare la risposta morfologica di spiagge in ghiaia. Le condizioni di carico di riferimento, tutte supposte ortogonali al paraggio, sono rappresentative di condizioni 'ordinarie', con altezze d'onda non superiori ai 2 m., e a condizioni 'estreme' (periodo di ritorno fino a 50 anni) con picchi anche oltre i 6 m. Le simulazioni hanno interessato due delle sezioni più critiche della Marina di Alimuri e hanno confermato come la risposta del profilo *post-storm* fosse sempre soddisfacente, essendo livello della ghiaia mai al di sopra la quota di cresta del *seawall*, scongiurando quindi qualsiasi condizione di non accessibilità della spiaggia.

Inoltre, il profilo *post-storm* del ripascimento ghiaioso si è dimostrato in grado di offrire protezione da eventuali fenomeni di inondazione. Calcolando la portata tracimante con la ben nota formula per muri verticali proposta dal manuale EurOtop 2018, si è verificato come il ripascimento assicuri che il limite raccomandato per il danneggiamento strutturale (1 l/s/m) non venga superato, almeno nelle condizioni 'normali'. Tuttavia, ciò non vale per le mareggiate più intense, soprattutto quelle con un periodo di ritorno di cinquant'anni.

In tal caso, è stato riscontrato che l'efficacia della difesa anche durante eventi più intensi è garantita con un aumento di soli 50 cm. della quota di cresta del *seawall* nei punti più vulnerabili. Questo adeguamento è necessario solo in punti specifici e può essere realizzato anche con elementi rimovibili anziché fissi, che possono essere utilizzati solo quando necessario.

In sintesi, la soluzione proposta si dimostra efficace per prevenire inondazioni, si adatta alle attuali caratteristiche del luogo e ha un impatto paesaggistico minore rispetto alla soluzione del citato progetto definitivo.

10. Napoli dalla collina di Posillipo. Tommaso Ruiz I, XVIII secolo, Fonte Alisio.

3.2. L'esempio della *Chiaja* di Napoli

Un ulteriore esempio significativo del concetto di *trade-off* è evidente nel caso del lungomare Caracciolo di Napoli. Qui, l'idea di introdurre un ripascimento artificiale per ripristinare l'antica 'spiaggia di Chiaja' potrebbe costituire un'alternativa valida alle attuali barriere radenti che difendono la colmata a mare dagli attacchi delle violente mareggiate.

La *Chiaja* di Napoli ha, infatti, protetto la Città per un periodo presumibilmente molto lungo, raggiungendo un'estensione trasversale ragguardevole (fig. 10), probabilmente in virtù di periodici eventi alluvionali in cui i sedimenti provenienti dalla zona collinare hanno contribuito a creare un notevole e duraturo accumulo di sedimenti. Infatti, la pianta del duca di Noja, e gli innumerevoli dipinti e incisioni risalenti al Settecento, ci presentano il quadro visivo di una spiaggia molto ampia, confinata alle spalle da una fila continua di edifici estesa da piazza Vittoria fino a Mergellina. La spiaggia era mediamente orientata intorno ai 190°N e dunque in disequilibrio rispetto agli attacchi ondosi dominanti, che provengono da una direzione approssimativamente pari a 205°N. Pertanto, il flusso sedimentario proveniente dai bacini di monte risultava vitale per il mantenimento della posizione di equilibrio della spiaggia.

G. Alisio (2003), nel suo bel libro sul lungomare di Napoli, testimonia come dopo l'Unità d'Italia «si attuò la variazione dell'originaria linea costiera di Napoli mediante colmate a mare, fondamentalmente per sopperire alla carenza di aree

11. La colmata della spiaggia di Chiaia ed il muro di contenimento del lungomare. Gaetano Bruno, 1885. Fonte Alisio.

fabbricabili». E infatti, tra le diverse sistemazioni proposte dai professionisti napoletani dell'Ottocento, furono costruite, attraverso una serie di colmate, due tratti di litoranea, una tra la *Panatica* e *il Largo della Vittoria* – l'attuale via Partenope – e una per il tratto da quest'ultimo a *Mergellina* (fig. 11).

Con la costruzione delle opere di riempimento, sono stati sottratti alla spiaggia e al mare complessivamente trecentomila metri quadri. L'edificazione, poi, dei nuovi quartieri prospicienti la costa ha praticamente annullato qualsiasi apporto di sedimenti alla spiaggia, la quale ha progressivamente ridotto la propria ampiezza fino a scomparire completamente (fig. 12). Successivamente si rese necessaria la costruzione di un sistema di scogliere frangiflutto per proteggere il muro di contenimento della colmata, noto come *muro borbonico*), che ha contribuito ad alterare ulteriormente l'immagine storica del lungomare napoletano (fig. 13).

Negli ultimi tempi, il desiderio, forse mai del tutto svanito, di restituire alla città la sua *Chiaja* è riemerso attraverso diverse e interessanti proposte progettuali, che però hanno privilegiato il semplice *restyling* del profilo costiero e il suo conseguente impatto sociale. L'occasione del Seminario del 23 giugno 2023 ci ha consentito di contribuire al processo di analisi, esaminando in modo sintetico e prevalentemente qualitativo il contesto ingegneristico in cui potrebbe essere realizzata l'ipotesi di ripristino della spiaggia.

12. Via Caracciolo dalla Rotonda del lungomare. Fonte Alisio.

I risultati presentati di seguito presuppongono dei concetti di equilibrio statico e dinamico precedentemente introdotti, e sono stati ottenuti mediante modellazione numerica al fine, soprattutto, di rendere più immediate le conclusioni.

L'analisi della configurazione planimetrica della *Chiaja*

Immaginiamo dunque di posizionare un ripascimento artificiale dinanzi al *muro borbonico* in sostituzione delle attuali barriere radenti (fig. 14a). La spiaggia si estende per circa 700 m., dalla rotonda Diaz fino all'arco Borbonico, ed ha uno sviluppo che potremmo definire genericamente 'a baia'. La spiaggia, caratterizzata da un diametro mediano dei granuli di 0.55 mm., si appoggia verso est all'attuale barriera distaccata a difesa dello scarico a mare ed ha una larghezza minima di circa 25 m. rispetto all'attuale *muro borbonico*. Siccome l'ipotesi in questione non prevede il determinarsi di condizioni di equilibrio statico, il profilo di spiaggia subirà un'evoluzione nel medio-lungo periodo per effetto degli attacchi ondosi.

Lo studio di evoluzione è stato effettuato adoperando il software 'a una linea' GENESIS (Hanson & Kraus, 1989), che permette di analizzare l'evoluzione di medio-lungo periodo di un tratto di costa supponendo che l'effetto stagionale delle mareggiate possa essere trascurato in un lasso di tempo dell'ordine dell'anno o più. Il dominio di calcolo (fig. 15a) è limitato a destra dalla scogliera distaccata dinanzi la rotonda Diaz, che si suppone blocchi completamente il flusso sedimentario prove-

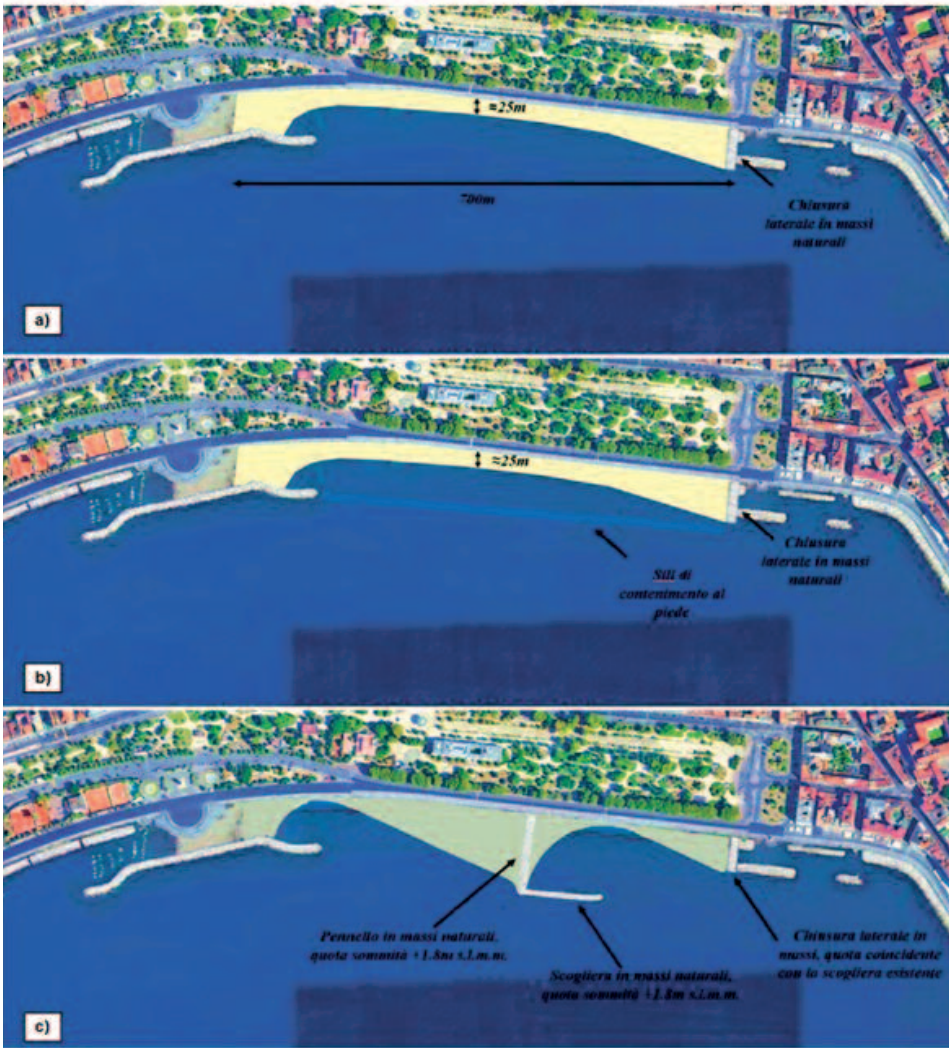
13. Via Caracciolo. Fonte Google Earth.

niente da Mergellina. A sinistra il dominio è aperto, e la condizione al bordo è rappresentata da un punto inerodibile (*pinned point*), posto in corrispondenza della barriera distaccata dinanzi allo scarico a mare, sulla quale si appoggia il ripascimento. In aggiunta, l'attuale posizione del muro Borbonico è stata riprodotta mediante un *seawall*. L'attacco ondoso medio, ovvero l'onda di modellamento, che per l'area in esame proviene dai 205°N, si è riprodotto per un intervallo di tempo di 30 anni.

Chiaramente, l'assenza delle condizioni di equilibrio dinamico di un tempo, determina l'arretramento di tutta la spiaggia (fig. 15a). L'onda, incidendo sulla costa con un angolo di circa 20°, determina, infatti, un trasporto di sedimenti da ovest verso est, inducendo una rotazione della linea di riva e l'asportazione del materiale nella zona centrale del ripascimento; solo un piccolo volume si conserva disponendosi in equilibrio a 205°N.

L'equilibrio dinamico può essere garantito solo emulando l'antico apporto naturale di sedimenti, ottenibile mediante una gestione del ripascimento. Nota, infatti, la quantità media annua di perdita di sedimento, dovuta all'erosione strutturale delle onde medie che muovono il materiale verso est (circa il 50% del volume iniziale, supponendo vero il risultato della simulazione) è possibile pianificare una reintroduzione artificiale del materiale perso mediante ricariche periodiche. In questo modo la linea di riva verrebbe rimodellata sistematicamente secondo la sua configurazione originale.

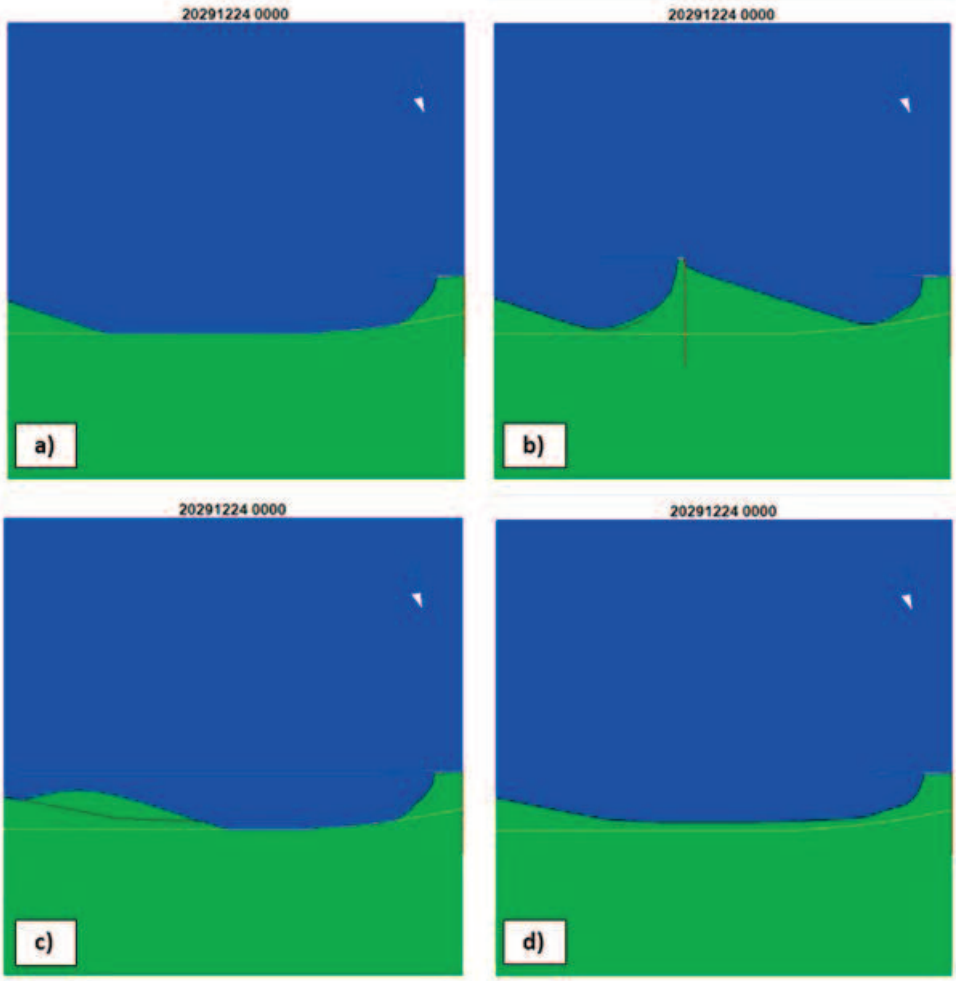
Alternativamente, si è tentato di definire un profilo di ripascimento a granulometria fine in equilibrio statico nel lungo periodo. In questo caso, si è reso necessario intro-



14a. Opera di ripascimento puro; b) opera di ripascimento confinato a largo da un *sill* di contenimento; c) opera di ripascimento a controllo strutturale: *pocket beach* in equilibrio statico.

durre dei punti di controllo strutturale, o punti di diffrazione, atti a modificare la direzione dell'attacco ondoso, ricreando dunque una configurazione di *pocket beach*.

Per ricreare delle piccole baie a difesa del lungomare Caracciolo, si è sconnesso il ripascimento nella parte centrale, inserendo una struttura 'a L', come mostrato in figura 14c. In questo modo si ricreano due piccole baie, controllate rispettivamente dalla testata della scogliera distaccata della rotonda Diaz e dalla testata della scogliera 'a L'. Le baie si incurvano nella zona d'ombra delle scogliere, e si orientano a 205°N nella zona illuminata.



15. Evoluzione di lungo periodo (30 anni) delle configurazioni analizzate, a) ripascimento non protetto b) ripascimento in equilibrio statico; c) ripascimento protetto da barriera sommersa; d) ripascimento in ghiaia.

Il profilo di ripascimento così disegnato risulta essere in equilibrio statico, come corroborato dalla modellazione numerica in GENESIS: i risultati della simulazione evidenziano che la posizione finale della linea di riva (dopo 30 anni) è pressoché coincidente con la posizione iniziale (fig. 15b).

Si possono, infine, ottenere delle configurazioni intermedie, andando a limitare le perdite di materiale lungo riva dovute all'azione strutturale del clima medio (configurazioni di equilibrio dinamico 'protetto').

Da un lato si può intervenire con una struttura in roccia naturale, posta al piede del ripascimento, caratterizzata da una grande sommergenza (fig. 14b), che

sarebbe in grado di intercettare il clima medio della baia di Chiaia, rallentando il processo di erosione con la formazione di un saliente (fig. 15c). In questo modo si avrebbe il duplice vantaggio di ridurre i volumi periodici di ricarica ma anche di laminare le mareggiate più intense, offrendo un ulteriore protezione nei riguardi delle perdite trasversali.

Come ulteriore ipotesi, il tasso di trasporto lungo-riva potrebbe essere ridotto agendo sulla granulometria, mettendo in opera ciottoli, o ghiaia. Una granulometria maggiore è, infatti, meno vulnerabile al trasporto solido *longshore*, e l'erosione strutturale dovuta all'onda di modellamento resta confinata all'interno della *swash zone*, come confermato dalla figura 15d. In aggiunta, l'utilizzo della ghiaia offrirebbe una maggiore protezione dal *flooding* delle aree retrostanti, per effetto dell'innalzamento della quota di cresta della berma in risposta alle mareggiate invernali. A tal riguardo, è necessario pianificare un rimodellamento del profilo trasversale, per facilitarne l'accessibilità durante la stagione estiva.

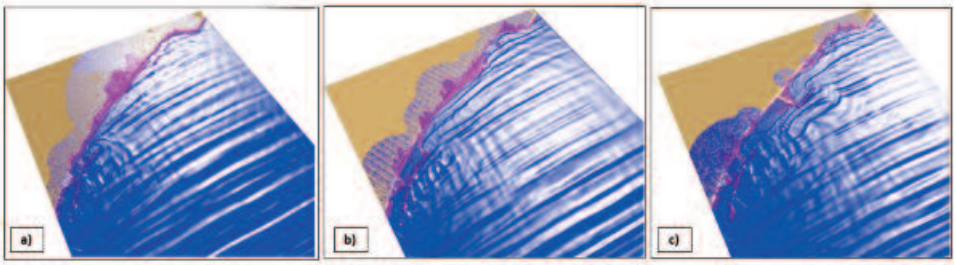
La risposta alle mareggiate

In ultima analisi è stata studiata la capacità del ripascimento di ridurre o meno i volumi d'acqua tracimanti su via Caracciolo rispetto all'azione esplicata dalle attuali barriere radenti che lo costeggiano. L'analisi è stata eseguita modellando la situazione attuale e l'opera di ripascimento prevista a mezzo del software CELERIS (Tavakkol & Lynett, 2017). La *suite* numerica integra le equazioni di Boussinesq, permettendo così di modellare sia la propagazione verso riva del moto ondoso che i fenomeni di interazione onda-struttura, tra cui la tracimazione delle strutture (*overtopping*). Il modello numerico riproduce il tratto di costa che si estende dalla Rotonda Diaz fino a Castel dell'Ovo, e si prolunga verso mare fino ad una profondità di 30 m. circa, posizionando ai bordi una condizione di assorbimento per scongiurare interferenze di fenomeni riflessivi.

Nella configurazione dello stato di fatto vengono riprodotte fedelmente le opere che attualmente proteggono il lungomare della città, ossia le barriere distaccate, il muro borbonico e le scogliere radenti. Alle spalle del muro, invece, si è scelto di non riprodurre gli edifici né la Villa Comunale retrostante, così da poter meglio visualizzare l'estensione delle eventuali inondazioni. Insieme allo stato di fatto vengono riprodotte in CELERIS le due ipotesi di ripascimento non protetto e di ripascimento in equilibrio statico.

Le simulazioni sono state eseguite riproducendo il picco della mareggiata di Libeccio (220°N) che ha impattato su Napoli nel dicembre del 2020. È bene specificare che CELERIS simula solo l'idrodinamica, trascurando quindi la risposta morfodinamica del ripascimento all'attacco ondoso.

Dall'analisi comparativa dell'estensione delle aree di inondazione, sembrerebbe che la spiaggia in equilibrio dinamico abbia un effetto benefico nei confronti



16. Risposta alle mareggiate delle configurazioni di ripascimento e confronto con la situazione attuale: a) situazione attuale; b) ripascimento puro; c) ripascimento a controllo strutturale.

della tracimazione, come si evince dalla figura 16b: le aree di inondazione sono, infatti, meno estese, soprattutto nella zona orientale.

Per quanto concerne invece la capacità di difesa dalle inondazioni del lungomare retrostante, la baia in equilibrio statico presenta le migliori *performance*, come emerge dal confronto delle aree di inondazione riportato in figura 16c. Tuttavia, è bene precisare che questa soluzione esplica una capacità di riduzione dei volumi lungo tutto il tratto di costa analizzato, eccetto la zona adiacente la rotonda Diaz. In questo punto, infatti, la linea di riva è pressoché tangente al *muro borbonico*.

Un aumento dei volumi di tracimazione è stato inaspettatamente osservato anche per le altre configurazioni investigate. Ma questo risultato necessita di ulteriori approfondimenti in grado di chiarire se esso sia dovuto o meno a problemi di modellazione.

Conclusioni

Il gruppo di Ingegneria Costiera dell'Università di Napoli Federico II ha colto l'occasione del Seminario dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli *La cultura dell'ingegneria per la conservazione del patrimonio e del paesaggio: aspetti di metodo e prassi* del 23 giugno 2023, per mettere in rilievo la valenza dell'opera dell'Ingegnere e per illustrare buone pratiche nel settore, nell'ambito dei complessi processi di conservazione e valorizzazione del nostro patrimonio culturale e paesaggistico. Questo contributo rimane saldamente all'interno del contesto dell'ingegneria e mira a mettere in evidenza la possibilità di raggiungere un adeguato compromesso tra protezione costiera e conservazione del paesaggio, sfruttando esclusivamente le caratteristiche naturali della spiaggia e la conoscenza dei principali processi che ne influenzano l'evoluzione. In tal senso, sono stati considerati alcuni esempi chiari dell'applicazione del concetto di *trade-off*, relativi da un lato all'introduzione di un ripascimento artificiale lungo il lungomare Caracciolo, come alternativa alle attuali barriere radenti, e dall'altro lato, alle soluzioni

di difesa poco invasive per tre famose *pocket beaches* della Penisola Sorrentina. Nello specifico si è voluto sottolineare come lo sviluppo di alternative virtuose all'utilizzo di opere rigide di protezione della costa è possibile, agendo in modo tangibile per valorizzare e godere appieno del territorio costiero.

Riferimentio bibliografici

ALISIO G.

- *Il lungomare*, Electa Napoli, 2003

BUCCINO M., CALABRESE M., BUCCINO M.

- *Conceptual Approach for the Prediction of Wave Transmission at Low Crested Breakwaters*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering 133(3), 2007, pp. 213-224

EurOtop

- *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*, 2008

HALLERMEIER R.J.

- *A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate*. Coastal Engineering, 4, 1981, pp. 253-277

HSU J.R., SILVESTER R., XIA Y.M.

- *Generalities on static equilibrium bays*. Coastal Engineering, 12, 1989, pp. 353-369

HANSON H.N.C., KRAUS N.C.

- *GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change*, Report 1, Technical reference, U.S. Army Eng. Waterw. Exp. Stn., Coastal Eng. Res. Cent, Vicksburg, 1989

McCALL R.T., POATE T.G., MASSELINK G., ROELVINK J.A., ALMEIDA L.P., DAVIDSON M, RUSSELL P.E.

- *Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G*. Coastal Engineering, 91, 2014, pp. 231-250

Patrimonio culturale e naturale della Campania. Rigenerazione urbana, a cura di A. Aveta e A. Castagnaro, Editori Paparo e fedOAPress, Napoli 2023

Progetto ABBaCo, *Sperimentazioni pilota finalizzate al restauro ambientale e balneabilità del SIN Bagnoli-Coroglio*, 2018. Unità operativa Federico II, 'Individuazione di possibili configurazioni di equilibrio planimetriche a seguito degli interventi di risanamento del SIN Bagnoli-Coroglio', Progressive report FII.2

Progetto Definitivo *Opere di difesa delle coste, ripascimento degli arenili, consolidamento costoni retrostanti nei Comuni di meta, Piano di Sorrento, Sant'Agnello e Massalubrense*, (Regione Campania, Accordo di programma quadro difesa suolo, D.G.R. n. 1001 del 28.07.2005)

TAVAKKOL S., LYNETT P.,

- *CELERIS: A GPU-accelerated open source software with a Boussinesq-type wave solver for real-time interactive simulation and visualization*, Computer Physics Communications 217, 2017, pp. 117-127

Recupero e ripristino della viabilità nel territorio di Amalfi, di alto valore paesaggistico

Pietro Moretti

Il Comune di Amalfi e la sua costiera rientrano tra i siti culturali che sono stati considerati Patrimonio dell'Umanità da parte dell'Unesco sin dal 1997. Esso costituisce un particolare esempio di sviluppo antropico del territorio nel rispetto del paesaggio naturale, che presenta eccezionale bellezza e rarità.

È noto anche che l'area costiera, per la sua particolare orografia e per le caratteristiche geomorfologiche, è caratterizzata da una notevole fragilità che la espone, più di altri territori naturali, ad eventi calamitosi ed a dissesti dei versanti.

Tra gli ultimi più invasivi è quello verificatosi nelle prime ore della mattinata del 2 febbraio 2021 nel centro storico di Amalfi.

L'evento interessava la stradina pedonale denominata via Annunziatella, che si trova arroccata sull'ammasso di roccia calcarea subito a monte della strada statale amalfitana (S.S. 163).

Il volume di materiale distaccatosi dalla stradina pedonale crollava sulla sottostante strada statale ricavata a mezza costa su tre archi in muratura ed invadeva anche la strada comunale posta ancora al di sotto denominata lungomare dei Cavalieri, senza fortunatamente produrre alcuna vittima (figg. 1, 2).

Il crollo della statale si sviluppava per circa una ventina di metri e per metà della carreggiata, causando la totale rovina dell'arco più prossimo alla galleria ed isolando completamente la zona della costiera amalfitana in direzione nord.

In conseguenza del crollo la Regione Campania dichiarava lo stato di emergenza e si poneva dunque il duplice obiettivo di ripristinare con la massima urgenza la funzionalità della strada statale con intervento dell'ANAS, nonché di ridare accesso ai residenti di via Annunziatella ricostruendo la strada comunale con intervento del Comune di Amalfi.

Nei giorni seguenti all'evento franoso si procedeva alle prime attività di messa in sicurezza che prevedevano la pulizia e la rimozione di tutti i detriti ed alcune attività preliminari di disgaggio degli elementi rocciosi in incipiente distacco dal versante, con l'ausilio di rocciatori. La messa in sicurezza riguardava inizialmente la strada statale 163 per poi estendersi anche alle viabilità locali.

Le opere sono state suddivise in due distinti appalti gestiti rispettivamente dall'ANAS e dal Comune di Amalfi. Non potendosi intervenire contemporaneamente per le eccessive interferenze tra i due cantieri, veniva data priorità all'intervento dell'ANAS.

1-2. Foto aeree del crollo estratte dal rilievo con il drone.

Intervento che, a seguito dell'approvazione del progetto e dell'acquisizione del parere della Soprintendenza, ha avuto inizio circa un mese dopo l'evento calamitoso per essere completato entro la fine del mese di aprile.

Dunque dopo solo tre mesi, con una notevole intensa sinergia tra la stazione appaltante, la direzione lavori e l'impresa, lavorando notte e giorno, è stato possibile ripristinare la viabilità sulla strada statale[1].

Di seguito i dati più salienti dell'intervento dell'ANAS.

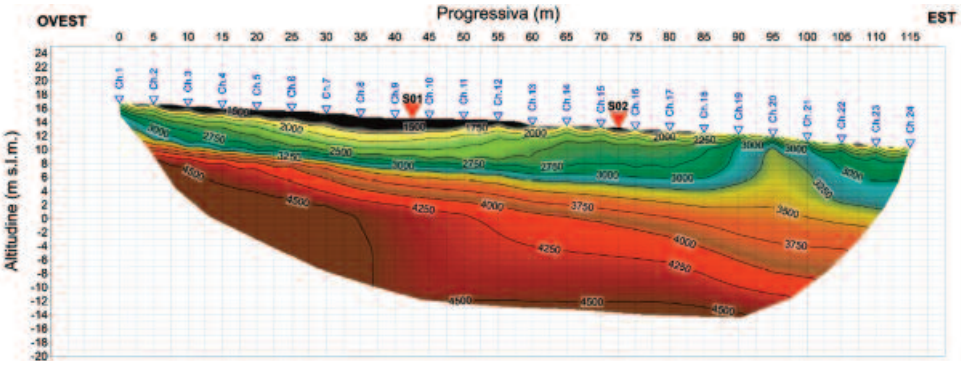
Nella foto aerea di figura 3 è evidenziato dettagliatamente il sinistro che ha interessato i tre ordini di arterie stradali sovrapposte. La comunale via Annunziatella, la Statale 163 in posizione intermedia e la sottostante comunale carrabile denominata *via lungomare dei Cavalieri*.

Nelle fasi preliminari della progettazione si è proceduto a valutare tutti i possibili scenari che avevano determinato l'evento catastrofico, per individuare la soluzione tecnica idonea per risolvere il problema nella maniera più semplice ed immediata. Ciò in considerazione dell'urgenza di limitare al massimo il danno socio economico che ricadeva su una vasta comunità della Costiera Amalfitana, cercando di sfruttare a pieno il periodo invernale, in modo da ripristinare lo status quo ante, prima che entrasse nel vivo la stagione turistica.

Nell'ambito della fase preliminare è stato disposto il rilievo plano-altimetrico di dettaglio mediante laser scanner e con l'ausilio di un drone. Contemporaneamente sono stati eseguiti alcuni sondaggi geognostici per una prima conoscenza dell'assetto stratigrafico, oltre ad un rilievo geomeccanico del versante con l'ausilio di geologi rocciatori. È stata eseguita, infine, un'indagine tomografica per la co-

[1] Si segnalano i principali soggetti che hanno gestito l'intervento: committente ANAS SpA, progettazione esecutiva CIDIEMME Engineering srl, direzione lavori ing. Fernando Mele (Anas SpA), impresa Rillo Costruzioni srl- E.MI strade e consolidamenti srl. Le opere sono state completate in 60 giorni.

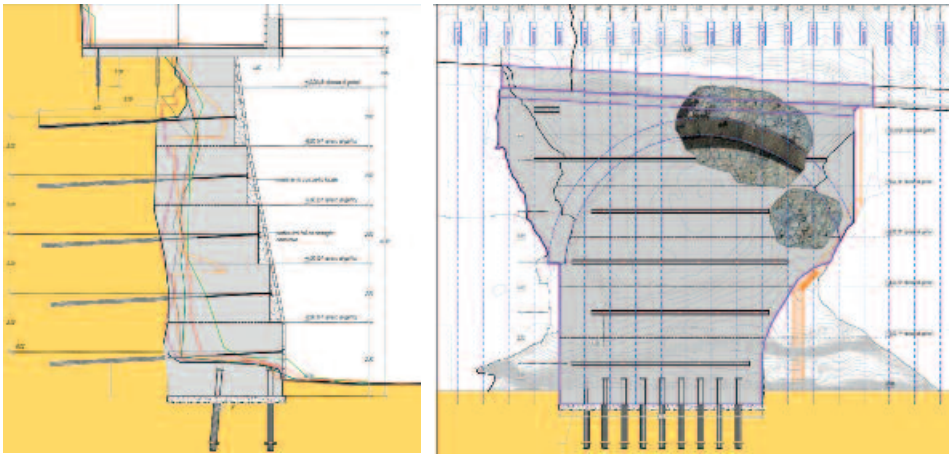
3. Foto aerea del crollo successivamente alla rimozione dei detriti.



4. Profilo sismico a rifrazione.

noscenza di dettaglio del sottosuolo e si è proceduto alla caratterizzazione sismica dei terreni fondali (fig. 4).

In prima analisi sono state prospettate diverse soluzioni, tra cui quella di inserire un impalcato metallico da poggiare su spalle fondate su micropali. Alcuni elementi di negatività hanno sconsigliato questa soluzione. Innanzitutto l'impossibilità di individuare una porzione regolare di strada dove poter inserire l'impalcato metallico senza procedere a significative demolizioni. L'impalcato metallico, dunque, sarebbe risultato a pianta fortemente irregolare, con il rischio di dover procedere a demolizioni della roccia per ricavare gli spazi necessari al montaggio della carpenteria.



5-6. Intervento di progetto.

Pertanto, tale soluzione fu presto scartata anche per le ripercussioni negative sul soprastante versante indotte dalle vibrazioni dei martelli demolitori e per i tempi di realizzazione.

Tra l'altro, anche la Soprintendenza aveva espresso forti dubbi sulla possibilità che l'inserimento del ponte metallico potesse essere compatibile con la bellezza e le caratteristiche antropiche del sito.

A seguito della pulizia dell'area dalle macerie si poté constatare che al di sotto della piattaforma stradale era presente una volumetria che si prestava - una volta messa in sicurezza la parete sub verticale con reti di protezione ancorate - ad eseguire una sottomurazione in calcestruzzo debolmente armato.

Dunque la scelta finale si orientò sulla realizzazione di un muro a semi gravità, che avrebbe consentito di raggiungere facilmente la quota della strada statale, completando la piattaforma con una soletta armata a sbalzo (figg. 5, 6).

La soluzione progettuale prevedeva il preventivo disgaggio di alcune porzioni delle sezioni di imposta dell'arco crollato e la posa in opera di una rete chiodata anche sul fronte posto al di sotto della statale 163, in modo da garantire condizioni di sicurezza alle maestranze per la realizzazione del cantiere.

Inoltre, al fine di assicurare un idoneo ancoraggio al versante della sottomurazione in calcestruzzo furono previsti tiranti passivi da eseguire con perforazioni a rotazione, inclinati sulla verticale di alcuni gradi per facilitare le operazioni di iniezione a debole pressione, una volta inserite le barre di armatura.

Queste ultime, attraverso collegamenti manicottati sulle porzioni opportunamente filettate, servivano anche come ancoraggio dei pannelli per il getto della sottomurazione, gradonata per agevolare le operazioni di avanzamento e per garantire un più gradevole inserimento nel contesto del paesaggio esistente.

7-8. . Fasi esecutive dell'opera

Nei punti più alti, dove il dislivello tra la statale e la sottostante via lungomare dei Cavalieri superava di poco i 10 metri si sarebbe proceduto con 5 gradonature, ognuna di 2 metri di altezza da gettare a fasi, l'una dopo l'altra, con intervalli limitati al tempo utile a che si procedesse alla realizzazione dei tiranti passivi ed alla posa dell'armatura in tondini (figg. 7, 8). Dunque, furono studiate miscele di calcestruzzo opportunamente additivate per poter far seguire i getti dei diversi gradoni a distanza di soli 4/5 giorni l'uno dall'altro.

Per migliorare l'inserimento nel contesto ambientale, senza alterazioni dello *status quo ante*, si sarebbe poi proceduto ad eseguire sui gradoni un rivestimento con pietra calcarea locale. Infine si sarebbe costruita nuovamente la sagoma dell'arco in pietra grigia trachitica, senza più alcuna funzione portante, in modo da consentire la preservazione paesaggistico-ambientale (fig. 9).

Il ripristino del tronco di strada statale consentiva poi di montare una struttura paramassi provvisoria a tubi e giunti, a protezione del versante soprastante su cui doveva essere eseguito l'intervento di sottomurazione a carico dell'Amministrazione comunale, in modo da garantire il funzionamento dell'arteria per tutto il periodo dei lavori sulla via Annunziatella posta al di sopra. L'intervento è stato realizzato a cura del Comune di Amalfi sulla via Annunziatella[2].

Questo secondo progetto è stato sviluppato in stretto collegamento con quello di competenza dell'A.N.A.S., con il duplice fine di ottenere risultati coerenti sia

[2] Circa la gestione dell'intervento si segnala: progettazione esecutiva prof. ing. Michele Brigante, consulenza alla progettazione CIDIEMME Engineering srl, prof. ing. Leonardo Cascini; direzione lavori prof. ing. Michele Brigante, ing. Pietro Moretti, impresa I.CO.STRA. srl. La durata dei lavori è stata di 300 giorni.

9. Foto post intervento.

10. Settori di intervento.

nelle scelte tecniche, sia nelle fasi operative, in considerazione anche dei ristretti spazi disponibili per la cantierizzazione delle opere.

L'intervento di progetto, per le motivazioni che sono emerse sia dalla dinamica del crollo sia dagli studi specialistici geologici e geotecnici, è stato suddiviso in settori di intervento sulla base delle caratteristiche peculiari del versante attentamente analizzato, come appresso descritti (fig. 10).

11. Foto storica nella quale si evidenziano i numerosi archi a sostegno della sede stradale.

La suddivisione in settori dell'intero versante ha consentito di analizzare singolarmente la varie porzioni, attribuendo delle priorità di intervento in funzione delle classi di rischio e di pericolosità che si sono determinate a valle della progettazione e delle indagini eseguite in *situ*.

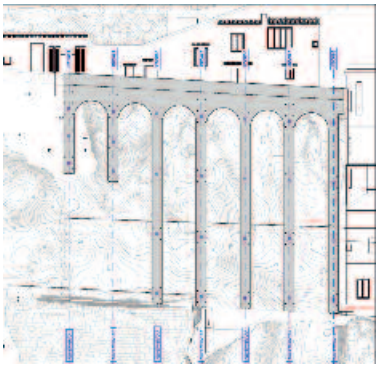
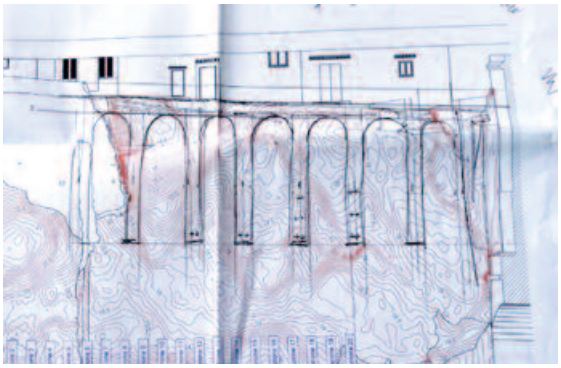
L'intervento principale è risultato, naturalmente, il manufatto deputato alla ricostruzione della via Annunziatella, mentre altri interventi succedanei hanno riguardato la messa in sicurezza di tutti i costoni censiti.

Per la definizione degli interventi progettuali è stato necessario sviluppare un'analisi storica preventiva, finalizzata a valutare l'antropizzazione di questo tratto di costa nel corso dei decenni.

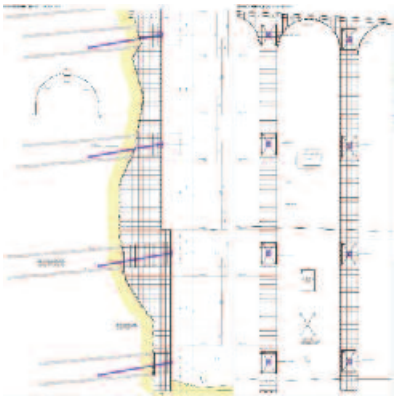
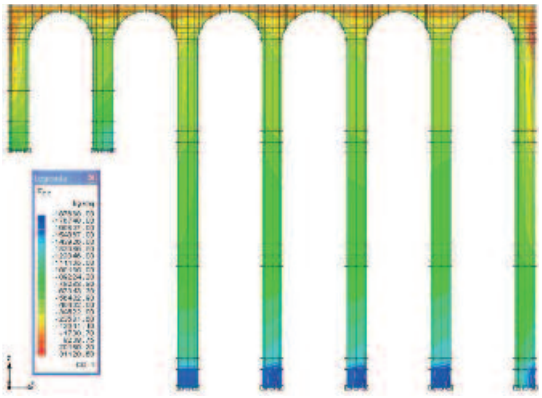
Il tutto al fine di individuare la soluzione che meglio si inserisse nel contesto in esame di elevato pregio storico e paesaggistico, condividendo le soluzioni finali con la Soprintendenza.

Considerando che nei tratti di strada comunale adiacenti a quello franato l'infrastruttura è sorretta da archi in muratura (fig. 11), tra le diverse soluzioni per la ricostruzione della stradina è stata scelta quella che prevedeva la realizzazione di un sistema di archi in calcestruzzo armato, in quanto più facilmente adattabili sulle spigolosità del versante, particolarmente frastagliato nel punto del crollo. (figg. 12-18).

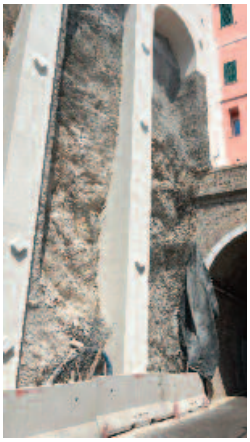
Gli archi sono stati studiati con forma dei piedritti, luce e freccia che potessero richiamare quelli esistenti posti più a sinistra nella figura 10, la cui epoca di costruzione è stata fatta risalire alla seconda metà del XIX secolo.

12-13. Intervento di progetto.

14-15.. Intervento di progetto.



16-18. Fasi realizzative

Tuttavia dovevano in qualche modo anche risaltare rispetto a questi ultimi e pertanto la scelta finale prevedeva che fossero intonacati di bianco, per distinguersi da quelli più antichi in muratura calcarea.

La forma particolarmente snella dei piedritti, la cui lunghezza variava per attestarsi sui diversi punti del versante ritenuti idonei per impiantare le fondazioni, ha comportato la necessità di prevedere un sistema di tiranti di ancoraggio sia attivi con trefoli inguainati e successivamente iniettati, sia passivi con barre in acciaio di grande diametro.

La struttura ad archi è stata calcolata con modellazione agli elementi finiti applicando i carichi previsti dalle NTC 2018. Il comportamento della struttura al sisma di progetto è stato valutato con un'analisi statica. L'accelerazione al suolo è risultata modesta per le caratteristiche geomorfologiche dell'area. I parametri geotecnici utilizzati nella modellazione sono stati desunti da prove in situ ed indagini di laboratorio. Nella modellazione si è tenuto conto delle varie fasi di costruzione e delle cantierizzazioni.

Al di sotto del piano viabile pedonale è stato ricavato un cavedio ispezionabile dove sono stati alloggiati i sottoservizi ed in particolare la rete acquedottistica e quella fognaria bianca e nera. Tale soluzione ha presentato il notevole vantaggio di poter ispezionare integralmente il percorso delle tubazioni evitando che incontrollate perdite idriche determinino infiltrazioni che nel tempo potrebbero causare l'erosione del calcare e distacchi lapidei sul fronte.

Per la ricostruzione della stradina pedonale è stato previsto un piano di lavorazione posto a quota sopraelevata di circa 6 metri rispetto alla strada statale, mediante la costruzione di una galleria artificiale costituita da un sistema di tubi e giunti (fig. 19).

19. Galleria artificiale in tubi e giunti.

20. Vista *waterfront* post intervento.

La soluzione progettuale ha permesso di garantire il transito veicolare a doppio senso di marcia per tutto il periodo di installazione del cantiere sospeso, che ha determinato ridotte interferenze con il traffico e solo con limitate chiusure notturne soprattutto nella fase di montaggio della struttura.

Per gli altri settori prima descritti ed individuati nel rilievo geo-meccanico nel progetto è stata previsto il disgaggio degli elementi di roccia instabili ed in incipiente distacco, nonché l'installazione di reti metalliche a doppia torsione opportunamente ancorate con tiranti in acciaio zincato.

L'intervento è perfettamente riuscito, nel rispetto delle stratificazioni storiche, dei valori estetico-ambientali, della sicurezza strutturale (fig. 20).

4.
Informatica e modellistica per il Patrimonio

PORBEC: la tecnologia a servizio dei beni culturali

Angelo Chianese, Alfredo Troiano, Mario Byron Coppola, Isabella Valente

Introduzione

Tecnologie e patrimonio storico artistico non hanno goduto sempre di un buon rapporto. In generale, il rapporto tra digitale e arte solo negli ultimi tempi sta vivendo una nuova fase caratterizzata da una ricchezza di esperienze e di sperimentazioni. Tre sono forse le cause di un fenomeno che tra l'altro è in rapida espansione. La prima, e sicuramente anche quella decisamente più scatenante, è stata indotta dal bisogno sociale di non perdere i contatti con il mondo delle emozioni suscitate dalla visita a un museo o a un parco archeologico nel periodo triste della pandemia che ha costretto la società a guardare il mondo tramite i servizi offerti dalla rete internet e dalle applicazioni web.

La seconda, non meno importante, è la trasformazione della società per il cambio generazionale che ha immesso nel quotidiano della vita sempre più soggetti cresciuti a contatto delle tecnologie e abituati a usare le applicazioni informatiche. Nel 2001 Marc Prensky[1], noto educatore e scrittore americano, per primo parlò di nativi digitali per sottolineare la differenza tra le generazioni che acquisiscono familiarità naturale con le tecnologie digitali sin da piccoli rispetto a quelle che imparano ad adattarsi a esse da adulti. Un fenomeno questo che induce nella realtà nuovi gusti, nuove modalità percettive, nuove mode che costringono tutti i settori della società a innovazioni e cambiamenti capaci di generare una crescente riduzione del digital divide così diffuso nella prima decade del nuovo secolo.

La terza è da individuare nei cambiamenti di questi ultimi anni delle tecnologie digitali che per rapidità e ampiezza non si erano mai verificati nella storia umana e che permettono oggi di poter dire che si sta assistendo a una vera e propria rivoluzione informatica. La potenza e la velocità di calcolo dei nuovi sistemi informatici e la velocità delle connessioni che consentono a più sistemi anche molto distanti di operare assieme, hanno attualizzato i processi dell'intelligenza artificiale, dell'Internet delle cose, della realtà virtuale e aumentata, della *blockchain* con forti ripercussioni nella vita di tutti influenzando profondamente molti settori, tra cui quello della medicina, dell'istruzione, dell'industria, dell'agricoltura, e anche

[1] M. Prensky, *La mente aumentata: Dai nativi digitali alla saggezza digitale*, Edizioni Centro Studi Erickson, 1 nov. 2013.

della cultura. L'informatica sta permeando tutti gli aspetti della società e dell'economia e l'innovazione tecnologica che viaggia a un ritmo esponenziale sta cambiando la nostra modalità di comunicazione, di relazione e di partecipazione sociale con forti implicazioni nella diffusione delle informazioni, nella formazione delle opinioni e nel modo in cui si affrontano questioni quali la privacy, la sicurezza e l'etica.

In tale scenario, quindi, il rapporto tra musei e tecnologie digitali dovrebbe essere diventato sempre più rilevante per la capacità di queste ultime di poter offrire nuove opportunità di coinvolgimento del pubblico, migliorando l'esperienza di visita o soltanto valorizzando le collezioni nell'universo del web. Purtroppo, fatta eccezione per poche realtà, si nota ancora una certa resistenza all'introduzione del digitale rimanendo fermi a una tradizionale e istituzionale attività di creazione, conservazione e diffusione della conoscenza relativa al proprio patrimonio materiale e immateriale.

Non è raro il caso di far visita a una esposizione di opere di rara bellezza dovendosi accontentare di una comunicazione basata solo sulla presenza di didascalie, il più delle volte poco leggibili, sul catalogo o sulle audioguide con testi da selezionare attraverso la digitazione del numero associato all'opera. In tutti quei casi nei quali l'importanza, la bellezza o la fama delle opere sono sufficienti a giustificare il costo del biglietto, si produce l'effetto di rendere la visita alquanto noiosa con un forte danno all'immagine della collezione esposta. Se poi il visitatore rientra in quelle fasce giovanili abituate a usare le tecnologie per comunicare e relazionarsi, allora il rischio di non farli ritornare nei musei assume dei livelli decisamente alti.

1. Tecnologie digitali ed esposizioni

L'Italia, si sa, è uno dei paesi con la più alta concentrazione di opere di interesse storico e artistico, purtroppo non pienamente conosciuta e comunicata. Tra i tanti motivi che costringono i musei e parchi archeologici a rimanere fermi sulle attività istituzionali, sicuramente quelli più determinanti sono la scarsità delle risorse effettivamente disponibili sia umane che finanziarie. Eppure, alla luce della rivoluzione informatica in atto che sta producendo cambiamenti notevoli nella società, non è più comprensibile questo stato inerziale. Tutte le attuali tecnologie così presenti nel nostro quotidiano possono decisamente migliorare l'efficacia dei processi di conservazione e valorizzazione delle collezioni ma soprattutto creare e coltivare un pubblico fedele, interessato e coinvolto. L'*audience development* è diventato un obiettivo importante perché un pubblico interessato e partecipativo può contribuire al successo e alla sostenibilità dell'azione museale. Nel visitare un museo l'individuo da sempre è stato spinto dal bisogno di soddisfare

la propria curiosità esplorando nuovi argomenti o scoprendo nuovi orizzonti capaci di stimolare la mente e l'immaginazione. Interagire con un'opera ascoltandone la storia mentre la si ammira e poterla interrogare per approfondirne la conoscenza è oggi possibile grazie alle nuove tecnologie. Inoltre, l'opera connessa a Internet può ottenere informazioni importanti sul suo interlocutore quali quelle relative al gradimento e alla soddisfazione o semplicemente al comportamento durante la visita. Si crea così un sistema interconnesso che producendo conoscenza trasforma il museo da statico a dinamico facendogli acquisire quell'etichetta di museo intelligente che si è andata affermando in questi ultimi anni.[2]

2. Le potenzialità delle tecnologie digitali per i beni culturali

Le tecnologie possono essere di grande aiuto nei processi che sovrintendono alla gestione e alla conservazione del patrimonio culturale producendo effetti importanti, quali ad esempio:

- una maggiore accessibilità e diffusione superando i confini fisici degli spazi espositivi per proiettarsi verso un pubblico più ampio: digitalizzazioni delle collezioni e creazione di contenuti resi disponibili online in modalità open, piattaforme digitali come i siti web di informazione, uso di mobile app e dei social media, consentono una diffusione ampia dell'immagine del museo che non solo possono invogliare alla visita ma sono soprattutto in grado di raggiungere coloro che per vari moti non possono farlo;
- l'interattività della visita fornendo al visitatore la possibilità di vivere un'esperienza coinvolgente;
- la possibilità di apprendere attraverso video didattici, guide audio, contenuti multimediali, quiz interattivi e altre risorse digitali, aiutando il visitatore a comprendere meglio il contesto storico, artistico o scientifico delle opere esposte;
- la conservazione nel tempo delle collezioni mediante la digitalizzazione delle opere d'arte, dei manufatti e dei documenti permettendo la condivisione e la ricerca su di esse;
- una maggiore partecipazione e coinvolgimento del pubblico che diventa un soggetto attivo capace di creare e condividere contenuti, interagire con altri visitatori, partecipare a sondaggi, contribuire a progetti collaborativi o lasciare commenti e recensioni digitali.

Se da un lato le tecnologie digitali possono offrire ai musei molte occasioni per arricchire l'esperienza di visita, coinvolgere il pubblico e ampliare la

[2] L. Solima, *Smart Museums. Sul prossimo avvento della Internet of Things e del dialogo tra gli oggetti nei luoghi della cultura*, Sinergie, Italian journal of management, vol. 34, n. 99, 2016.

portata delle loro collezioni e dei loro contenuti, dall'altro è necessario evitare che la loro presenza prenda il sopravvento alterando l'equilibrio che deve esistere tra l'interattività digitale e l'esperienza sensoriale del visitatore. Comunque, negli ultimi tempi, a causa della rivoluzione informatica in atto e dalla paura indotta dalla pandemia, si assiste a una vera e propria rincorsa a una digitalizzazione sfrenata in alcuni casi senza una e propria progettualità. Si dimentica che le tecnologie devono essere alimentate con informazioni per rendersi realmente utili alla società. Alla base di un qualsiasi processo di tutela, fruizione o di valorizzazione del patrimonio deve esistere una preliminare attività di studio e di ricerca che abbia prodotto una sua effettiva conoscenza.[3] Una conoscenza che non si fermi alla sola metadazione utile a inventariare le opere ma spinga nella direzione di un approfondimento della storia, dell'arte, della cultura e della società attraverso lo studio e l'analisi di oggetti, documenti, testimonianze orali, scritti e altre fonti di informazione, tutti elementi indispensabili per comprendere e apprezzare il valore e l'importanza del patrimonio culturale, in modo che le future generazioni possano apprezzare la propria eredità culturale, preservandola a loro volta per le generazioni future.

Raccontare il proprio patrimonio rimane ancora oggi la vera sfida per l'innovazione dei musei e dei territori: una sfida che si accompagna alla necessità di adeguare le forme espressive e i linguaggi ai nuovi strumenti dei social così diffusamente presenti tra noi, soprattutto tra le nuove generazioni. Solo così i musei potranno trasformarsi da meri contenitori, in cui sono custoditi, conservati e protetti oggetti e opere, in spazi di partecipazione inclusiva per diverse categorie di utenti.

Oggi i musei sono diventati imprese culturali, per cui le nuove tecnologie divengono un supporto fondamentale per la loro sopravvivenza e per il loro inserimento nel contesto territoriale, sia dal punto di vista sociale sia per l'impatto economico sullo stesso territorio su cui essi insistono. I musei devono pertanto essere capaci di offrire un prodotto che garantisca un'esperienza memorabile, perseguendo la qualità, la diversità, l'unicità del modo di presentarsi al grande pubblico.

In tale prospettiva, il museo è da molti considerato un sistema cognitivo che opera principalmente sull'utilizzo della conoscenza svolgendo differenti funzioni legate alla conoscenza, tra loro interrelate secondo una logica non sequenziale: la conservazione, la creazione e la diffusione del sapere[4].

[3] F. Bifulco, A. Chianese, F. Marulli, F. Piccialli, I. Valente, *La gestione della conoscenza per DATABENC*, in 'Archeologia e calcolatori', 7, 2015, pp. 117-129

[4] L. Solima, *I musei e la progettazione partecipata: l'esperienza dei musei nazionali di Lucca in un contesto multiculturale*, in 'Il Capitale culturale, Studies on the Value of Cultural Heritage', vol. 12, 2015

3. Da museo a spazi espositivi

Il nostro patrimonio culturale, tra i più belli e ricchi del mondo, si compone di beni materiali e immateriali che rappresentano la storia, l'identità e la ricchezza culturale delle comunità e dei territori, delle regioni e dell'intera nazione. Conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale sono asset importanti per preservare l'identità culturale di una comunità, favorire il turismo culturale, sostenere la ricerca storica e archeologica e promuovere lo sviluppo sostenibile.

Si è però in presenza di un patrimonio molto articolato per tipologia, struttura e storia ma anche per la numerosità di elementi. Molti di essi non hanno ancora una identità abbandonati come sono nei depositi dei musei da quali forse non usciranno mai. Per tutti è indispensabile mettere in essere almeno un lavoro preliminare di censimento al quale far seguire successivamente una attività conoscitiva per poterne comunicare la storia.

Per tali motivi nel lontano 2011 si cominciò a pensare a impostare la ricerca sulle applicazioni delle tecnologie digitali alla conoscenza, monitoraggio, fruizione e valorizzazione del patrimonio culturale materiale per individuare cosa potesse essere utile per la trasformazione di un museo da sistema cognitivo a sistema anche comunicativo. Dall'analisi della realtà maturò la convinzione che si dovesse partire sicuramente dai musei ma al contempo fosse necessario ampliare l'orizzonte di indagine ai tanti altri spazi che avevano come finalità comuni quella di esporre collezioni di opere per farle conoscere e fruire. Fu naturale indicare una tale entità di interesse con il nome di Spazio Espositivo e in modo altrettanto naturale attribuire l'acronimo SPES soprattutto confidando nella speranza (*spes* in latino) di chi lo aveva pensato di poterlo diffondere nel mondo degli studiosi e dei ricercatori impegnati sul fronte dei beni culturali. Gli SPES sono quindi tutte quelle realtà caratterizzate da uno spazio:

- contenente una raccolta di opere;
- che può quindi essere fisico e/o digitale; nel primo caso la raccolta può trovarsi in un ambito spazialmente contenuto come nel caso della sede di un museo o di una mostra ma può essere anche geograficamente esteso se si pensa all'insieme dei monumenti o dei palazzi storici di una città;
- che può trasformarsi da fisico in digitale come nel caso delle mostre temporanee che così possono continuare a essere visitate anche dopo la loro chiusura;
- che può essere solo virtuale così da presentare al grande pubblico le opere dimenticate nei depositi, quelle conservate nelle case dei collezionisti o i risultati delle ricerche di uno studioso di storia dell'arte.

Secondo questa definizione sono a pieno titolo SPES i musei sia grandi che piccoli, le gallerie d'arte, le collezioni private, gli atelier d'artista, le esposizioni temporanee di opere, i territori con i loro tesori sparsi per le strade. Tutte realtà

1. Interazione opera visitatore mediata dalle tecnologie.

accomunate dal destino di essere depositari di opere che devono farsi conoscere, essere fruite e valorizzate con la possibilità per quelli fisici di potervi accedere anche on site. Lo SPES per la sua stessa definizione consente di abbattere i vincoli imposti dallo spazio e dal tempo. Con PORBEC si è introdotta nel mondo dei Beni Culturali la novità del termine Spazio Espositivo al posto di quello ben più noto e consolidato di 'Museo'.

4. Il portale per i beni culturali

Una volta individuato l'ambito del lavoro di ricerca si è avviata una fase di studio per comprendere quali fossero le entità intorno a cui ritagliare il progetto e soprattutto quali dovessero essere le interazioni tra esse. È apparso subito evidente che il focus dovesse essere il rapporto tra opera e visitatore in quanto soggetti da mettere in condizione di interagire con l'obiettivo che ciascuno prendesse qualcosa dall'altro (fig. 1). Mentre è naturale affermare che l'uomo è in grado di parlare e non potendo dire lo stesso per le opere si sono pertanto studiate tutte le modalità che consentivano di inscenare una siffatta funzionalità. Un altro aspetto sul quale si è puntato molto è stato quello di realizzare un sistema informatico, o piattaforma come si è solito definirlo, che fosse basato sulla semplicità di uso per permettere anche al mondo dei non tecnologi di poter gestire uno SPES secondo le proprie conoscenze e abitudini. Alla luce di questi due principi fondanti è stata realizzata una piattaforma integrata che spazia sull'insieme di servizi oggi utili ad uno spazio espositivo che voglia usare le tecnologie per:

- farsi conoscere mediante il solito sito web o mediante un' App scaricabile dai principali store per dispositivi mobili;
- gestire, nel caso di spazi reali, l'installazione di sistemi IoT per la fruizione interattiva on site e per il controllo delle condizioni ambientali e la caratterizzazione dei flussi dei visitatori;
- addestrare il sistema perchè apprenda con gli algoritmi di Intelligenza Artificiale, basati sul *deep learning*, il modo di riconoscere un'opera mediante la semplice inquadratura della camera di un dispositivo mobile.

Con PORBEC si possono pertanto gestire spazi solo digitali e spazi reali con l'unica differenza che per questi ultimi sono state aggiunte tutte le funzionalità necessarie a creare l'interazione con le opere durante la visita e il monitoraggio delle condizioni ambientali e del gradimento delle collezioni da parte del visitatore. Nel caso di mostre reali, fornisce la creazione e gestione di una audioguida innovativa per accompagnare il visitatore.

4.1 La conoscenza del patrimonio storico-artistico

La conoscenza è l'asse portante di un qualsiasi processo che operi nella cultura: senza la ricerca, l'acquisizione e la gestione di informazioni non è possibile evitare l'oblio del patrimonio culturale. La conoscenza è fondamentale per conservare, tutelare, proteggere un'opera d'arte. Senza una solida base di conoscenza la fruizione e valorizzazione, intesi come sistemi strutturati di comunicazione del patrimonio culturale, non potrebbero esistere o essere efficaci. Tra l'altro mentre i processi di fruizione e valorizzazione possono trasformarsi nel tempo per adeguarsi ai linguaggi e alle tecnologie che mutano con l'evolversi della società, la conoscenza si preserva non soffrendo del male dell'obsolescenza. La scommessa più affascinante è pertanto individuare un giusto mix di conoscenza e soluzioni tecnologiche in grado di costruire una nuova percezione e una rinnovata fruizione del patrimonio culturale per offrire al visitatore, al turista, allo studioso esperienze uniche di scoperta e comprensione di un'opera d'arte. Un risultato che si raggiunge solo se si è in grado di definire e realizzare racconti delle opere basati sull'interattività o la narrazione emozionale partendo da una preliminare fase di analisi e caratterizzazione del contesto condotta da chi fa ricerca, seguita successivamente da una elaborazione dei materiali prodotti con le tecniche dello storytelling per poter raccontare attraverso la loro storia, l'aspetto o il significato. Per PORBEC sono considerate opere tutti quei manufatti che possono essere raccontati e di interesse culturale, quali ad esempio dipinti, sculture, fotografie, filmati, monumenti, palazzi storici, installazioni digitali, disegni, grafiche, solo per elencare quelli più noti.

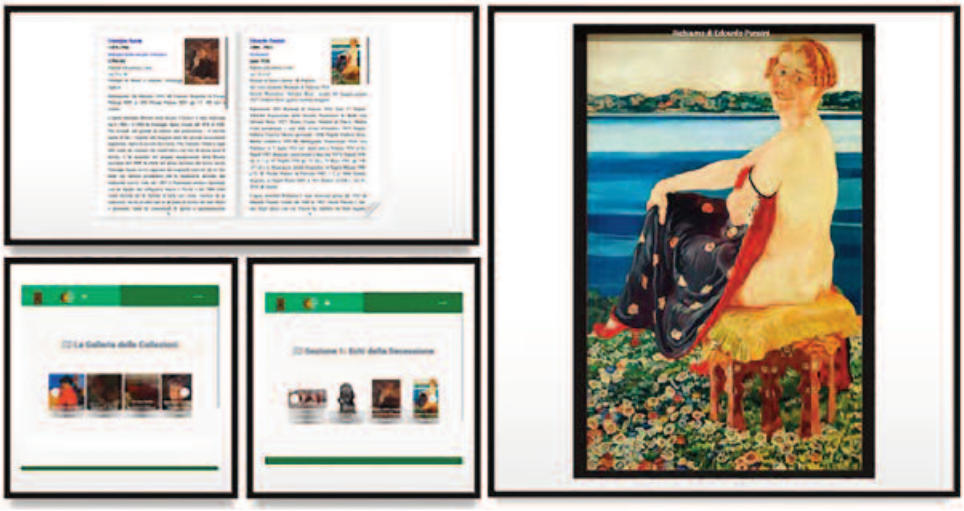
Uno SPES ha quindi motivo di esistere se ha opere da raccontare, per cui la funzione principale in PORBEC, su cui di fatto ruota tutta l'architettura di sistema, è quella con la quale si archiviano le informazioni. Da un punto di vista dello standard nazionale ICCD l'impostazione scelta per la catalogazione prevede una

2. I formati con i quali è rappresentata un'opera.

scheda semplificata con dati essenziali quali le informazioni anagrafiche, le caratteristiche fisiche, l'autore e una fotografia. A tali dati si devono obbligatoriamente collegare le narrazioni in formato testuale e audio realizzate al massimo in tre versioni differenti a seconda del pubblico che si vuole raggiungere: ragazzi, adulti ed esperti. Si possono anche inserire i racconti in diverse lingue. Infine, si possono anche aggiungere ulteriori immagini di repertorio e un video per far conoscere meglio la natura o la storia dell'opera (fig. 2). Per facilitare il lavoro del catalogatore PORBEC dà la possibilità di mostrare le informazioni archiviate non solo mostrandole al video ma producendo anche un documento word che può essere scaricato consentendo così un controllo più efficace o la trasmissione delle informazioni.

4.2 Le collezioni

L'archiviazione delle opere non è collegata con la loro presentazione al pubblico. Infatti, tutte le opere che sono state catalogate e archiviate diventano visibili solo se inserite in una specifica collezione, le quali diventano così lo strumento dello SPES per le pubblicazioni nel web e nell'app per dispositivi mobili. La collezione è composta da una immagine di copertina, una presentazione e un elenco di opere fruibile nelle modalità di galleria di immagini raccontate o di catalogo di testo nel formato PDF. Da questo punto di vista PORBEC è stato pensato anche come rivista scientifica (fig. 3). Con le collezioni lo SPES separa la fase di studio



3. La pubblicazione delle collezioni prevede la modalità galleria di immagini raccontate e catalogo tradizionale sfogliabile.

delle opere da quella della loro pubblicazione permettendo di mostrare i racconti solo quando sono ritenuti completati dal loro autore. Inoltre, permette di creare mostre diverse per tipologia o cronologia anche con opere che sono presenti in più collezioni. Si possono realizzare anche mostre che durano per un tempo limitato creando così un interesse nei confronti dello SPES che si rinnova di volta in volta non solo per l'attesa di un nuovo evento ma soprattutto per il piacere di scoprire qualcosa di nuovo. Con le collezioni lo SPES assume una certa dinamicità cambiando nel tempo la sua offerta senza però per questo perdere il proprio patrimonio di conoscenza.

4.3 L'autonomia degli SPES

Ogni SPES è un portale a sé con una sua completa autonomia di gestione. PORBEC si configura pertanto come una piattaforma di generazione di SPES tutti diversi tra loro per ciò che espongono e per le finalità che hanno. Nel momento in cui nasce, lo SPES procede indipendentemente da tutti gli altri gestito da un amministratore che ne determina i comportamenti nel tempo, quali quelli di fissare le modalità di pubblicazione sia a livello di singola opera che di specifica collezione. Nell'area riservata sono presenti tutti i servizi per la catalogazione delle opere, la definizione delle collezioni, la produzione di Open Data, la configurazione dei sistemi di fruizione e di monitoraggio. Lo SPES ha un proprio spazio cloud per la memorizzazione delle informazioni sulle opere e sulle collezioni e un URL[5] di identificazione nel mondo

[5] *Uniform Resource Locator*, ossia indirizzo Internet utile a connettersi con il sito a cui è stato assegnato.

4. Implementazione della realtà aumentata basata sul riconoscimento automatico di un'opera d'arte.

del web. Come ogni sito ha un'area pubblica e un'area di amministrazione a cui si accede attraverso autenticazione con *user name* (solitamente un indirizzo mail) e una password. All'atto della istanziazione del sito vi accede solo il primo utente amministratore che successivamente può attivare altre figure abilitate alla gestione come amministratori o semplici catalogatori. Non è un sito di *e-commerce* ma di valorizzazione di collezioni di opere d'arte e, nel caso di spazi reali, è un sistema per realizzare una modalità innovativa di interazione con le opere basata sull'aver dato loro la parola e per il monitoraggio degli ambienti per quanto attiene le condizioni atmosferiche e il controllo dei rischi antropici legati alla numerosità di persone che passano per le sale espositive. Gli SPES nell'area pubblica offrono al visitatore la possibilità di accedere alle collezioni sia con la modalità tipica delle gallerie sia con quella più tradizionale di un catalogo a stampa. Mentre le gallerie raccontano le opere in voce, i cataloghi si sfogliano con la modalità del *flipbook* e se abilitati possono essere anche scaricati.

4.4 Fruire per scoprire

PORBEC nasce per rispondere alla richiesta di musei e spazi espositivi che chiedono di essere messi nelle condizioni di attuare strategie di coinvolgimento attivo (engagement) del pubblico facendo leva su social media, siti web e applicazioni interattive. L'obiettivo è trasformare lo spazio in un luogo in cui valorizzare il proprio patrimonio coinvolgendo il pubblico in una partecipazione attiva trasformandolo da spettatore in coautore. Anche perché il concetto di pubblico si è

evoluto passando da pubblico d'élite alla visione dell'utente attivo che usa nel suo quotidiano applicazioni digitali senza molte difficoltà. Uno 'smart museum', ossia un museo 'intelligente', è uno spazio espositivo che adotta strategie di coinvolgimento attivo dei visitatori, ed è in grado di mediare con successo tra opera, artista e fruitore, e dunque di favorire e facilitare la comprensione dell'opera. Per raggiungere un tale coinvolgimento serve un ambiente nel quale quando il visitatore incontra l'opera gli sia data la possibilità di interagire con essa in modo personalizzato e adeguato alle proprie conoscenze, esperienze e interessi.

L'interattività può trovare declinazioni differenti e comprendere soluzioni di vario genere, più o meno tecnologiche ma sempre accomunate dal protagonismo dell'utente. Uno dei fattori chiave del successo delle strategie di coinvolgimento è l'applicazione ai processi comunicativi delle tecniche dello *storytelling* che, grazie alla capacità della narrazione e del racconto, sono in grado di mantenere acceso l'interesse nel visitatore. Nel caso di un percorso di visita di uno spazio espositivo una storia che coinvolge scatena quasi sempre nell'utente curiosità e il desiderio di scoprire come si sviluppa o come si conclude. Per questo motivo l'impostazione che è stata data agli SPES è fortemente utente-centrico orientandosi nella direzione dello sviluppo di narrative uniche in grado di coinvolgere e interagire con il pubblico. Infatti, nella catalogazione delle singole opere ci sono tutti gli ingredienti di base dello storytelling per inscenare racconti emotivamente coinvolgenti: testi, immagini, video, voce ed effetti sonori. In questo modo, per gli spazi espositivi presenti nel reale, si passa dalla semplice esposizione e presentazione delle collezioni alla creazione di esperienze che rispondono alle esigenze e alle aspettative dei visitatori.

La sfida, dal punto di vista della ricerca e dell'implementazione tecnologica, è duplice: da un lato il problema che riguarda l'area di ricerca della *tangible, embedded and embodied interaction*, ossia il settore che studia le modalità più adatte per offrire ai visitatori un nuovo tipo di interazione. Dall'altro, il problema è quello relativo alla creazione degli strumenti che consentano agli stessi curatori dello SPES di confezionare contenuti capaci di stimolare la curiosità e l'interesse del visitatore.

Operando su questa linea guida la piattaforma PORBEC si è posto l'obiettivo di creare un continuum tra la visita on-site e quella *off-site* al fine di risultare vicina alle esigenze dei visitatori in ogni fase:

1) pre-visita per mettere il visitatore nelle condizioni di potersi informare/formare sull'offerta espositiva per meglio prepararsi alla visita: la parte digitale o 'SPES virtuale' può quindi considerarsi come 'anticipazione' della visita nello spazio reale;
2) durante la visita effettiva on-site, lo SPES reale deve offrire strumenti per migliorare l'esperienza, per facilitare l'apprendimento ed 'espandere' le attività proposte in loco;

3) post-visita per 'consolidare' quanto appreso ritrovando nello SPES virtuale le opere su cui ha soffermato la sua attenzione durante la sua visita.

In PORBEC le distinzioni fra 'mondo digitale' e 'mondo fisico' si sfumano per diventare sempre più irrilevanti, poiché entrambi costituiscono, assieme, il mondo che il visitatore vuole crearsi. Nel caso della visita on-site uno SPES si avvale di un nuovo modello di interazione tra l'utente e l'ambiente espositivo grazie a una prima e sperimentata realizzazione di un'applicazione mobile che si interfaccia con tecnologie IoT.

Tra le diverse tecnologie abilitanti oggi presenti nel mercato si sono scelte la *Bluetooth Low Energy* (BLE) per l trasmissione dei segnali e i dispositivi *Beacon* come emettitori di segnali. Per gestire i *Beacon*[6] è stata sviluppata una architettura che nelle sue linee generali è composta da due parti ben distinte: il presentatore dell'opera (il dispositivo *Beacon*) e un ricevitore dei segnali (l'app per *smartphone*). Il presentatore ininterrottamente trasmette informazioni su di sé, mentre il ricevitore ha il compito di rilevarli e identificarli, eseguendo tutto ciò che è associato a ognuno di essi. Nello specifico dello SPES una funzione di configurazione predispone l'associazione tra l'identificativo del Beacon e quello di un'opera presente nel suo catalogo. L'applicazione esegue un originale algoritmo di prossimità che calcola come più prossimo quel *Beacon* che, tra tutti quelli rilevati, presenta un'intensità maggiore del segnale emesso. Una volta rilevato il dispositivo più vicino, si procede associando a esso i contenuti da presentare sulla base di una mappa di corrispondenza tra nomi dei dispositivi e riferimenti alle opere d'arte. L'applicazione in automatico propone quindi al visitatore il racconto della storia dell'opera mostrandola al video e attivando la registrazione audio.

Con il crescere del numero di utilizzatori del sistema di fruizione basato sulla prossimità, ci si è resi conto della necessità di dover superare diverse difficoltà operative in quanto non tutti i gestori degli SPES sono attrezzati per affrontarli. Per semplificare l'uso della piattaforma si è avviata la sperimentazione di un sistema di fruizione basato sugli algoritmi di Intelligenza Artificiale per il riconoscimento delle immagini. Tale approccio permette di evitare l'acquisto dei dispositivi *Beacon*, la loro configurazione in piattaforma, l'associazione a una o più opere, l'installazione negli spazi espositivi badando a tenerli lontani tra di loro, e infine di controllare continuamente la carica della batteria che alimenta il dispositivo che ha una durata di circa un anno. L'approccio di associare i contenuti all'opera mediante il suo riconoscimento visivi consente infatti:

[6] *Beacon* sono piccoli emettitori *Bluethooth* che trasmettono intorno a sé segnali radio a basso consumo e corto raggio, riuscendo a interagire con *smartphone* e *tablet* in un'area che può andare da pochi centimetri fino a 200 metri di distanza. Essi trasmettono un codice univoco che, appena rilevato, viene interpretato e associato automaticamente a una vasta gamma di informazioni. Ogni *Beacon* ha un suo proprio *Mac Address* che lo distingue da tutti gli altri.

5. Tabella di classificazione degli SPES presenti in PORBEC.

- di non dover procedere alla installazione dei dispositivi Beacon nelle vicinanze delle opere che tra l'altro pone problemi di invasività non sempre accettati dai musei;
- di confinare la configurazione al solo problema dell'apprendimento che può essere contestuale all'archiviazione delle informazioni dell'opera;
- di estendere le funzionalità ad altre applicazioni diverse quali l'editoria aumentata e la realtà aumentata più in generale.

Infatti, inquadrando il quadro in una sala, la foto dello stesso quadro presente nel catalogo della mostra, è possibile attivare tutto quello che è stato connesso ad esso, in termini di informazioni multimediali, nel momento in cui è stato riconosciuto. La funzione di fruizione permette in modo molto semplice di inquadrare una immagine, di metterla a fuoco, di far partire la realtà aumentata nel momento in cui l'immagine è stata riconosciuta, di poter scegliere tra le icone che si sovrappongono all'immagine inquadrata per vedere un video, leggere il testo, ascoltare l'audio del racconto o scorrere la galleria di immagini catalogate, di tornare a un'altra inquadratura.

5. Sviluppi futuri

Attualmente si sta lavorando a una nuova modalità di fruizione dell'opera per renderla capace di dialogare con il visitatore. Infatti, le ricerche sulla elaborazione del linguaggio naturale (NLP) hanno fatto passi avanti da gigante e oggi consentono di comprendere e analizzare il linguaggio umano, inclusa l'estrazione di entità, la classificazione dei sentimenti e la risoluzione delle intenzioni degli utenti. Lo scenario che si apre vede il visitatore porre domande all'opera per ottenere risposte accurate e aggiornate in tempo reale. Lo spettro di informazioni che l'opera può dare è ampio variando da notizie sulla sua stessa storia fino a fornire indicazioni sulla sede espositiva relativamente alla sua istituzione, all'arte e alla cultura che la caratterizzano. L'opera completa la sua informativa sottoponendo all'attenzione del visitatore contenuti multimediali, come video, immagini e file audio per soddisfare meglio la sua curiosità e per permettergli di vivere un'esperienza completa e coinvolgente. Infine, nel suo dialogare può fornire informazioni sulla cultura locale, come ad esempio la cucina tipica, le tradizioni e le festività, diventando di fatto il tramite verso il territorio per una immersione nella cultura locale e nelle usanze del luogo.

Considerazioni conclusive

La piattaforma PORBEC è stata sottoposta a test di correttezza e prestazionali per gli ultimi mesi del 2020 e a gennaio 2021 è entrata in esercizio. Inizialmente è stata usata da giovani studiosi di storia dell'arte con poca confidenza con applicazioni informatiche soprattutto per verificarne la semplicità d'uso. Infatti, dopo una breve presentazione delle sue funzionalità e la creazione dell'istanza dello SPES di cui erano amministratori, hanno lavorato da soli senza alcun intoppo.

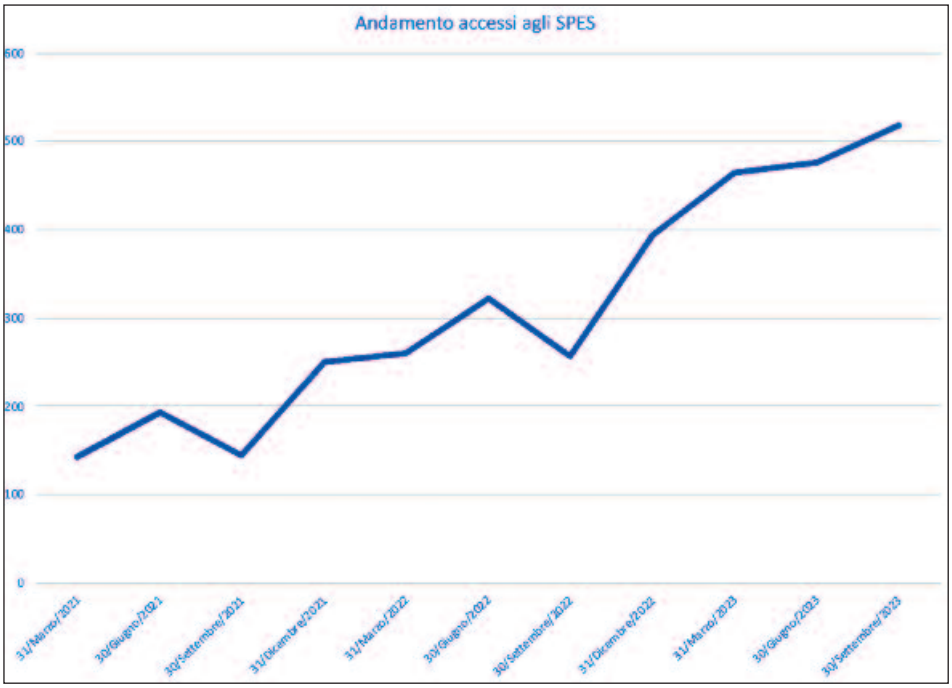
Molti sono gli SPES che oggi si presentano in PORBEC mostrando le loro collezioni liberamente. Il visitatore trova in essi un'offerta artistica ampia e diversificata potendo fruire dell'immagine e del racconto di opere di pittura, di scultura, fotografiche. Più del 40 per cento dei racconti sono in italiano e in inglese. L'offerta è ampia e diversificata dimostrando così l'ampio spettro di applicabilità della piattaforma (fig. 5). Diverse sono le mostre svoltosi in spazi espositivi reali, anche prestigiosi, che rivivono nella dimensione digitale. Molte sono ovviamente le mostre costruite solo digitalmente. È possibile visitare anche diversi atelier di artisti ancora viventi o ammirare le collezioni di importanti musei napoletani. Dal punto di vista della collocazione geografica degli SPES si ha una loro decisa concentrazione nell'area napoletana e campana, ma sono anche presenti SPES situati in Calabria, Puglia, Abruzzo e Valle d'Aosta (fig. 6).

Mostre reali	Mostre digitali	Atelier e gallerie	Musei	Libri
Edgardo Curcio. Echi della Secessione Viennese	L'icona di San Gennaro	Scuderie Sansevero. Atelier di Lello Esposito	Percorsi di visita del Museo Diocesano di Napoli	La storia delle pizzerie Centenarie di Napoli
La regola e il caso	Abruzzo e Abruzzesi nella pittura e nella scultura dell'Ottocento e del primo Novecento	L'atelier dello scultore Giuseppe Pirozzi	Una visita al Museo Civico Gaetano Filangieri di Napoli	
Giuseppe Verdecchia, pittore paesaggista del primo Novecento	Artisti francesi a Napoli tra Otto e Novecento	L'atelier di Clara Garesio	MUSAP - Museo Artistico Politecnico	
La Scuola di Posillipo. La luce di Napoli che conquistò il mondo	Carlo Verdecchia: l'humanitas di un pittore meridionale	L'atelier di Ellen G.		
Novecento a Napoli	Cd'AC - Collezione d'Arte Contemporanea Unisalento	L'atelier di Francesco Verio		
Federico II - Università dell'arte	Design Innovativo Gadget Aumentati	La Galleria Mediterranea: un secolo di storia dell'arte contemporanea		
Michele Lanzo in mostra da Netcom	Giovanni Maltese un grande scultore di Ischia	L'atelier di Rosaria Matarese		
	Gli amori degli Angeli di Thomas Moore nelle arti visive del secolo XIX			
	I capolavori di Castellammare di Stabia			
	Il gioiello d'artista			
	Il realismo della scultura di Giuseppe Franzese. Opere in mostra			
	La pittura di Francesco Netti come espressione dell'anima			
	Le mostre dell'archivio fotografico Parisio-Troncone			
	Mostra Archivio fotografico Riccardo Carbone			
	Napoli tra arte e letteratura. Luoghi e costumi napoletani raccontati attraverso la poesia e le raffigurazioni artistiche			
	Passeggiando per la Metropolitana di Napoli			
	Vincenzo Migliaro e il ventre di Napoli			
	Vitalità della Napoli contemporanea. Illuminismo e caffè			
	POLISTENart			

6. Distribuzione geografica degli SPES in Italia.

PORBEC registra il numero di accessi agli SPES e e alla data della scrittura del presente lavoro ne conta ben 3.224. Il grafico dell'andamento nel tempo degli accessi, registrati a partire dalla data di andata in esercizio, si dimostra crescente con una media di circa 300 visite a trimestre (fig. 7). I dati sono confortanti soprattutto alla luce del fatto che il numero di visitatori sta crescendo nell'ultimo periodo perché sempre più persone scoprono PORBEC per effetto del solo passa parola non avendo a disposizione mezzi e fondi per lanciare un piano di comunicazione. Altri dati interessanti sono il numero di opere catalogate e inserite in collezioni e la ricca offerta di cataloghi scientifici messi liberamente a disposizione della collettività (fig. 8).

PORBEC vuole quindi essere una piattaforma aperta a tutti, gratuitamente usabile, con l'ambizione di mostrare al grande pubblico il bello che ci circonda presentandolo con un linguaggio semplice ma al contempo scientificamente corretto.



7. Andamento del numero di accessi misurato a partire dal gennaio 2021 in undici trimestri.

Dato	Occorrenza
Spes	38
Opere catalogate	2.546
Collezioni	126
Cataloghi pubblicati	85
Racconti in italiano	2.546
Racconti in inglese	667
Racconti audio in italiano	1.693
Racconti audio in inglese	667
Video	29
Immagini	2.886

8. Dimensione dei diversi dati multimediali presenti in PORBEC.

Riferimenti bibliografici

AMATO F., CHIANESE A., MAZZEO A., MOSCATO V., PICARIELLO A., PICCIALLI F.

- *The Talking Museum Project*, EUSPN/ICTH 2013, pp. 114-121

CHIANESE A., MARULLI F., MOSCATO V., PICCIALLI F.

- *SmARTweet: A Location-Based Smart Application for Exhibits and Museums*, SITIS 2013, pp. 408-415

CHIANESE A, MARULLI F., PICCIALLI F., VALENTE I.

- *A Novel Challenge into Multimedia Cultural Heritage: An Integrated Approach to Support Cultural Information Enrichment*, SITIS 2013, pp. 217-224

CHIANESE A., RUSSILLO F., VALENTE I.

- *PORBEC. Portale Beni Culturali. Un ponte fra tecnologia e arte*, Guida Editori, Napoli 2022, pp. 1-288

PISCITELLI M.

- *Comunicazione e fruizione del patrimonio culturale. Percorsi integrati, interattivi, multisensoriali*, La Scuola di Pitagora editrice, Napoli 2017, pp. 8-107

SOLIMA L.

- *Nuove tecnologie della comunicazione, Economia della Cultura*, vol. 3, 2007, pp. 365-375

SOLIMA L.

- *Digital Resources and Approaches adopted by User-Centred Museums: the Growing Impact of the Internet and Social media*, in Aiello L., (ed.), 'Management of Cultural Products: E-Relationship Marketing and Accessibility Perspective', IGI Global, Londra 2014

SOLIMA L., DELLA PERUTA M.R., DEL GIUDICE M.

- *Object-Generated Content and Knowledge Sharing: the Forthcoming Impact of the Internet of Thin*gs, Journal of the Knowledge Economy, doi: 10.1007/s13132-015- 0243-x, 2015

VALENTE I.

- *Patrimonio artistico e mobile e progettualità. La rete delle collezioni pubbliche*, in 'Proposte per il futuro di Napoli e del suo hinterland', a cura di A. Aveta, Editori Paparo, Napoli 2019, pp. 187-192

ZANE M.

- *La valorizzazione culturale 4.0. Le tecnologie cross-mediali al servizio del patrimonio culturale*, Editoriale Scientifica, Napoli 2022, pp. 1-218

Additive Manufacturing e digitalizzazione per la conservazione dei Patrimoni

Gino Nicolais, Costantino Menna, Flavio Galdi

Introduzione

Il mondo dell'arte e del patrimonio culturale sta assistendo ad una vera e propria rinascita grazie all'avvento delle nuove tecnologie. La digitalizzazione, attraverso strumenti come la scansione 3D e la fotogrammetria, ha reso possibile l'archiviazione digitale di capolavori come la Cappella Sistina, permettendo ad esperti di tutto il mondo di studiare i suoi affreschi nei minimi dettagli senza doversi recare a Roma. Parallelamente, *l'additive manufacturing*, o stampa 3D, ha portato al restauro di opere antiche come la statua di Nefertiti, replicando con precisione le parti mancanti e restituendo loro l'antico splendore.

Ma non si tratta solo di grandi opere: pensiamo, ad esempio, ai manufatti archeologici di piccole dimensioni, spesso difficili da esporre o fragili al punto da rischiare la distruzione. La stampa 3D li può replicare in scala, consentendo al pubblico di 'toccare con mano' la Storia. Musei come il *British Museum* a Londra stanno già sperimentando questa tecnologia per rendere le loro collezioni più interattive ed accessibili.

In questo articolo saranno analizzate in dettaglio le suddette tecnologie applicate al patrimonio culturale, scoprendo come la combinazione di digitalizzazione e *additive manufacturing* stia non solo preservando, ma anche rivoluzionando, il modo in cui percepiamo e interagiamo con i tesori del nostro passato.

L'obiettivo di questo contributo è esplorare il potenziale di tali tecnologie nel campo del restauro e del recupero del patrimonio culturale. La crescente disponibilità di strumenti avanzati di digitalizzazione, insieme alle sempre più sofisticate tecnologie di stampa 3D, hanno aperto a nuove possibilità per preservare, riparare e ricreare manufatti storici e artistici.

Nel presente documento saranno esaminati i seguenti aspetti chiave relativi all'implementazione di siffatte tecnologie nell'ambito della conservazione dei patrimoni. In particolare, la prima parte riguarda la descrizione dei principali strumenti legati alla tecnologia di digitalizzazione discutendo i vantaggi che possono essere apportati al processo di catalogazione e documentazione del patrimonio. Le tecnologie di scansione 3D consentono di acquisire modelli virtuali dettagliati di opere d'arte, oggetti antichi e monumenti, preservando così la loro forma originale in un formato digitale accessibile a studiosi, ricercatori, progettisti e al pubblico.

Nella seconda parte del contributo, è descritto l'utilizzo della manifattura additiva nel restauro e nel recupero di manufatti. La capacità di creare repliche fedeli utilizzando materiali simili o compatibili con l'originale consente di sostituire parti danneggiate o mancanti – pur rispettando soluzioni che ne evidenzino la distinguibilità - ripristinando l'aspetto estetico e funzionale dei manufatti storici. Questa tecnologia rivoluzionaria può anche fornire modelli di prova (prototipi) per testare diverse soluzioni di restauro prima di intervenire direttamente sugli originali.

La parte conclusiva del contributo riguarda la presentazione di alcuni casi studio emblematici che illustrano l'efficacia delle descritte tecnologie discusse nell'ambito di interventi di restauro. Questi esempi sono utili per fornire una panoramica delle applicazioni attuali e future di queste tecnologie, evidenziando le opportunità che offrono per preservare e valorizzare il nostro patrimonio culturale.

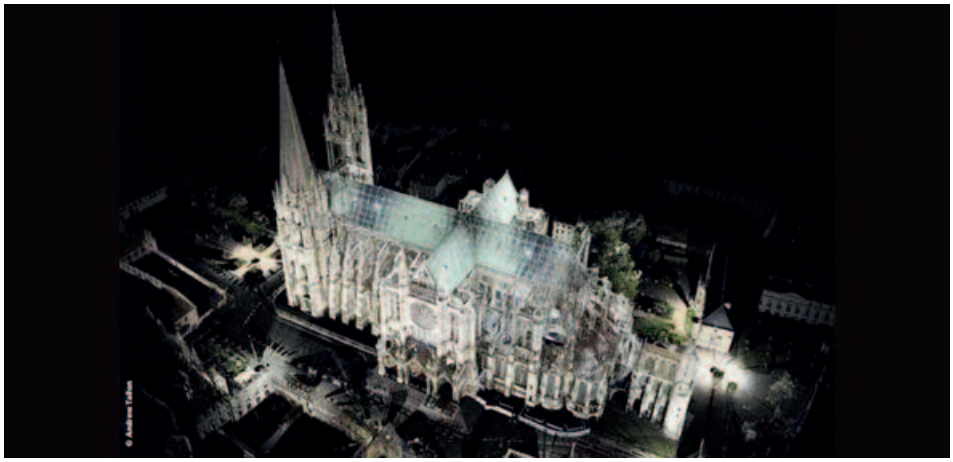
1. Digitalizzazione di una geometria tridimensionale

La scansione 3D è un processo utilizzato per acquisire le informazioni tridimensionali di un oggetto o di un ambiente fisico e creare una rappresentazione digitale precisa e dettagliata. In sostanza, la scansione 3D consente di 'catturare' le caratteristiche geometriche di un oggetto tridimensionale e trasformarle in un modello digitale che può essere visualizzato, analizzato o utilizzato per scopi specifici.

La scansione 3D è diventata una tecnologia preziosa nel campo del restauro, consentendo di acquisire informazioni dettagliate sugli oggetti d'arte, sui manufatti storici e sulle strutture architettoniche. Questi dati digitali possono essere utilizzati per una serie di applicazioni nel processo di restauro. Di seguito sono descritte le principali tecnologie di scansione 3D utilizzate nel campo del restauro:

- Scansione laser terrestre: è ampiamente utilizzata nel restauro per acquisire modelli 3D ad alta precisione di oggetti d'arte, sculture, affreschi, edifici storici e altro ancora. Questa tecnologia consente di catturare dettagli geometrici, rilievi, texture e deformazioni con grande precisione, fornendo una base solida per il restauro e la conservazione.
- Fotogrammetria: utilizza immagini fotografiche per creare modelli 3D ed è un'altra tecnologia comune nel restauro. Le immagini scattate da diverse angolazioni vengono elaborate e combinate per creare modelli tridimensionali dettagliati degli oggetti o delle strutture da restaurare. Questi modelli possono essere utilizzati per analizzare le deformazioni, ricostruire parti mancanti, guidare il processo di restauro e documentare il lavoro svolto.
- Scansione con tecnologie basate su luce strutturata: queste tecnologie, come la proiezione di luce strutturata o la riflessione di *pattern* luminosi sugli oggetti da scansionare, consentono di acquisire dettagli geometrici

1. Dispositivi per l'acquisizione digitale.



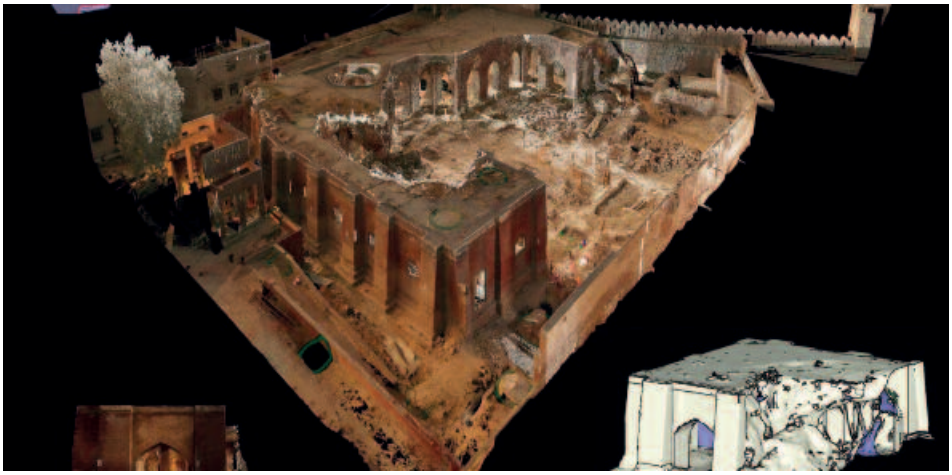
2. Rilievo digitale della cattedrale di Nôtre Dame.

con precisione. Sono utilizzate per il restauro di manufatti complessi, come statue, reliquie o manufatti architettonici, dove è richiesta una precisione elevata (fig. 1).

L'utilizzo di queste tecnologie di scansione 3D nel campo del restauro consente ai restauratori di ottenere una visione accurata degli oggetti o delle strutture da restaurare, facilitando l'analisi delle condizioni, la pianificazione delle azioni di restauro e la documentazione del processo. Inoltre, i modelli digitali 3D possono essere utilizzati per creare repliche fedeli degli oggetti o per consentire la fruizione virtuale dei beni culturali.

L'uso delle tecnologie di scansione 3D nel campo del restauro offre diversi vantaggi significativi:

- Documentazione accurata: tali tecnologie consentono, infatti, di acquisire dati altamente accurati e dettagliati degli oggetti o delle strutture da restaurare. Questi dati possono essere utilizzati come una forma di documentazione



3. Scansione laser 3D di Lahore Fort Royal Kitchens per comprendere la struttura per la sua conservazione.

precisa dello stato attuale dell'oggetto o dell'edificio, catturando anche i dettagli più minuti e le deformazioni nel corso del tempo. Ciò facilita la pianificazione del restauro e la valutazione dei progressi nel corso del tempo (fig. 2).

- Analisi approfondita: i modelli 3D generati dalle scansioni consentono agli esperti di effettuare analisi approfondite sugli oggetti o sulle strutture da restaurare. È possibile rilevare e studiare deformazioni, danni, usura, cambiamenti nel tempo e altre caratteristiche che potrebbero non essere visibili a occhio nudo. Queste informazioni aiutano a comprendere meglio lo stato attuale ed a sviluppare strategie di restauro mirate (fig. 3).
- Pianificazione e progettazione precisa: le scansioni 3D offrono una base solida per la pianificazione e la progettazione del restauro. I modelli digitali consentono ai restauratori di esplorare e testare diverse opzioni di intervento senza dover manipolare direttamente l'oggetto originale. Ciò consente di valutare le migliori strategie di restauro, anticipare le sfide potenziali e prendere decisioni informate prima di iniziare il lavoro effettivo.
- Conservazione e fruizione virtuale: i modelli 3D generati dalle scansioni consentono di conservare digitalmente l'aspetto e le caratteristiche originali degli oggetti o delle strutture da restaurare. Questi modelli possono essere utilizzati per creare repliche fedeli, preservando così l'integrità dell'originale. Inoltre, i modelli digitali rendono possibile anche la fruizione virtuale dei beni culturali, consentendo al pubblico di esplorarli in modo interattivo e dettagliato, anche a distanza.

4. Tecnologie di stampa 3D.

2. Additive manufacturing e Stampa 3D

Nel campo del restauro, vengono utilizzate diverse tecnologie di manifattura additiva per riparare o replicare parti di oggetti d'arte o manufatti storici. Di queste le più comuni impiegate nel restauro includono:

Stereolitografia (SLA): è una tecnologia di stampa 3D che utilizza un laser per solidificare strati di resina fotosensibile. E' particolarmente adatta per la creazione di parti con dettagli fini e superfici lisce, rendendola adeguata alla riproduzione di parti di oggetti d'arte o manufatti con elevato livello di dettaglio.

Sinterizzazione laser selettiva (SLS): è una tecnologia di stampa 3D che utilizza un laser per fondere e solidificare strati di polvere di materiale. E' adatta per la produzione di elementi robusti e resistenti, ed è utilizzata per la creazione di parti di grandi dimensioni o per la riparazione di manufatti che richiedono proprietà meccaniche solide.

Fused Deposition Modeling / *Liquid deposition modeling* (FDM): la modellazione per deposizione è una tecnologia di stampa 3D in cui il materiale di stampa viene depositato strato dopo strato per creare un oggetto. Sebbene questa tecnologia possa presentare una qualità di superficie inferiore rispetto ad altre tecnologie, è ampiamente utilizzata nel restauro per la creazione di parti di grandi dimensioni o per prototipazione rapida (fig. 4).

L'utilizzo di queste tecnologie di manifattura additiva nel restauro consente di riparare parti danneggiate o mancanti di oggetti d'arte o manufatti storici, preservando al contempo l'autenticità e l'integrità dell'originale.

Le tecnologie di stampa 3D offrono diversi vantaggi nel contesto del restauro:

- Riparazione precisa: la manifattura additiva consente di creare elementi personalizzati per sostituire parti danneggiate o mancanti di oggetti d'arte o manufatti storici. Utilizzando modelli 3D acquisiti attraverso scansioni o modellazione, è possibile creare repliche esatte delle parti da riparare o so-

stituire, assicurando una riparazione precisa e rispettosa dell'originale.

- Flessibilità e versatilità: la manifattura additiva offre una vasta gamma di materiali disponibili per la stampa 3D, inclusi materiali simili a quelli originali. Questo permette di scegliere il materiale più adatto per riparazioni specifiche, garantendo una combinazione di proprietà meccaniche, estetiche e chimiche che si adattano all'oggetto da restaurare.
- Riproduzione di parti mancanti: in alcuni casi, parti di un oggetto d'arte o di un manufatto storico possono essere completamente mancanti. Utilizzando la manifattura additiva, è possibile creare repliche precise di queste parti mancanti, basandosi su modelli 3D acquisiti o ricostruiti. Ciò consente di restituire all'oggetto la sua forma e funzionalità originali.
- Sperimentazione e prototipazione: la manifattura additiva consente di realizzare prototipi di parti o elementi che devono essere riparati o riprodotti prima di eseguire il restauro finale. Ciò offre la possibilità di testare diverse soluzioni, valutare l'idoneità estetica e funzionale prima di procedere con il restauro effettivo.

L'utilizzo della manifattura additiva nel campo del restauro offre, quindi, un'opzione versatile e precisa per riparare o replicare parti danneggiate o mancanti di oggetti d'arte e manufatti storici, preservando al contempo l'autenticità e l'integrità dell'originale.

3. Analisi dei casi studio

Vengono presentati diversi casi studio correlati alle tecnologie digitali oggetto di analisi. Il primo caso, denominato *Progetto RePAIR*, e il secondo caso, relativo al restauro del Palazzo Spada, offrono un esempio rappresentativo dell'applicazione della tecnologia di scansione tridimensionale per la creazione di modelli digitali nel primo caso, e dell'impiego della stampa 3D nel secondo.

Gli altri casi di studio, che comprendono i progetti *Modern Ornamental*, il restauro del Palazzo Ducale di Mantova e le attività svolte dall'Istituto delle Pietre Dure di Firenze si concentrano invece sull'integrazione sinergica di entrambe le tecnologie. Questo approccio mira a evidenziare le potenzialità di un'approfondita acquisizione dei dettagli dei beni da restaurare e della conseguente transizione fluida dalla fase progettuale alla produzione digitale nell'esecuzione dell'intervento di recupero.

3.1 Progetto RePAIR (scansione)

Il presente studio, intitolato *Reconstructing the Past: Artificial Intelligence and Robotics meet Cultural Heritage*, è condotto da un gruppo di ricercatori affiliati all'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) con l'obiettivo di contribuire al

complesso e prolungato processo di restauro dei reperti archeologici di Pompei. La metodologia impiegata in questo progetto si basa sull'integrazione di tecnologie avanzate, tra cui la robotica, la scansione tridimensionale, gli algoritmi di apprendimento automatico e l'intelligenza artificiale.

Inizialmente, i frammenti dei manufatti sono sottoposti a scansione utilizzando sofisticati dispositivi informatici, che si avvalgono di algoritmi di apprendimento automatico per anticipare la configurazione originale di tali reperti. Questo processo, in cui l'intelligenza artificiale opera in sinergia con l'input umano, è eseguito con la massima precisione per garantire una ricostruzione accurata dei pezzi.

Nella fase successiva, un team di archeologi, in collaborazione con esperti di storia dell'arte e studiosi, integra le proprie conoscenze sul sito di Pompei nell'algoritmo di intelligenza artificiale, permettendo poi a quest'ultimo di evolversi e di analizzare autonomamente ulteriori dati basati su esempi precedentemente forniti. Il *software* effettua una comparazione sistematica tra tutti i frammenti a coppie, valutando le somiglianze in termini di forma, di struttura fisica e di corrispondenza delle illustrazioni presenti sui pezzi. Tale processo contribuisce significativamente alla ricostruzione dell'aspetto originale del manufatto completo.

Il secondo elemento chiave coinvolge l'impiego di robot sul campo. Questi, sviluppati dal Laboratorio di Meccatronica Umana e dal Centro di Ricerca dell'IIT di Genova, sono dotati di un braccio robotico simile in dimensioni a quello di un essere umano medio, con un peso compreso tra 25 e 30 chilogrammi e una lunghezza variabile tra 80 e 100 centimetri. Un guanto protesico è montato sul braccio del robot per la manipolazione delicata dei frammenti, consentendo al robot di raccogliere preziose informazioni mentre effettua le operazioni.

L'impiego di tali robot comporta notevoli risparmi in termini di tempo e risorse umane. Il design della mano del robot è stato curato da Antonio Bicchi, eminente scienziato dell'IIT di Genova e professore di robotica presso l'Università di Pisa. In futuro, si prevede che tale tecnologia consentirà anche agli esseri umani di indossare il guanto e raccogliere dati durante il processo di manipolazione.

Il presente progetto, ancora in fase sperimentale, si concentra sull'applicazione di tali metodologie all'interno del restauro degli affreschi del soffitto della Casa dei Pittori al Lavoro nell'*Insula dei Casti Amanti* e degli affreschi della *Schola Armaturarum*. A completamento del progetto, gli affreschi restaurati saranno esposti al pubblico, consentendo ai visitatori di immergersi nell'antica Pompei e fornendo ulteriori opportunità di ricerca.

L'impiego su vasta scala dell'intelligenza artificiale e delle mani robotiche in campo archeologico rappresenta una pietra miliare significativa e promettente. Come dichiara il coordinatore del progetto, Marcello Pelillo, professore di informatica e intelligenza artificiale presso l'Università di Venezia: «Se il progetto avrà successo, la tecnologia potrà essere utilizzata per ricostruire una varietà di

5. Reperti archeologici di Pompei assemblati utilizzando le tecnologie di acquisizione digitale e Intelligenza Artificiale

manufatti culturali frammentati il cui restauro è rimasto 'fuori dalla portata umana». Tale progresso apre nuove prospettive entusiasmanti per il restauro del patrimonio culturale e storico, con implicazioni significative per il futuro delle scienze archeologiche (fig. 5).

3.2 Palazzo Spada a Ferrara

Sismaitalia, un'azienda specializzata in comunicazione visiva, interior design e stampa digitale, è stata la prima in Italia ad introdurre una stampante 3D di tipo Massivit 1800. Inizialmente, l'obiettivo principale era fornire soluzioni nel campo dell'*interior design* ai propri clienti, ma successivamente ha individuato un'opportunità nel settore del restauro, sfruttando la stampa 3D di grande formato.

Federica Tisato, responsabile del marketing e della comunicazione presso *Sismaitalia*, ha sottolineato la potenzialità di riuscire a produrre manufatti di grandi dimensioni, replicando in maniera precisa gli elementi da ripristinare in un lasso di tempo notevolmente ridotto e con costi inferiori rispetto ai metodi tradizionali. Tale capacità ha permesso alla società di riuscire ad ampliare l'offerta di servizi offerti e di esplorare nuovi mercati.

Un esempio tangibile di questo progresso è rappresentato da un recente progetto, in cui *Sismaitalia* ha realizzato cinque capitelli a grandezza naturale per il Palazzo Spada a Ferrara. Questo edificio, costruito nel XIX secolo, originariamente di proprietà della famiglia Spada, è stato successivamente abitato da

diverse altre famiglie prima di essere adibito all'attuale uso di albergo. Tisato ha raccontato come i proprietari del palazzo abbiano contattato *Sismaitalia* su suggerimento di un esperto ingegnere specializzato in restauro constatando, nello specifico, lo stato di degrado di cinque capitelli presenti in facciata. Tali capitelli sono stati considerati come elementi essenziali per la configurazione storica della facciata e, in tal senso, la proprietà ne ha richiesto urgentemente il ripristino.

I metodi di restauro tradizionali richiedono tempi prolungati, principalmente a causa del lavoro manuale necessario. Inoltre, i costi possono aumentare notevolmente in base alla complessità del progetto. Alla ricerca di una soluzione più economica, i proprietari hanno valutato l'ipotesi di una temporanea sostituzione in polistirolo, finché non hanno scoperto le numerose potenzialità offerte dalla stampa 3D.

Sfruttando la fabbricazione digitale, i cinque capitelli sono stati prodotti in due dimensioni differenti: un set con dimensioni di 480 mm. in altezza, 430 mm. in lunghezza e 215 mm. in spessore, e un set più ampio composto da tre pezzi, con dimensioni di 790 mm. in altezza, 790 mm. in lunghezza e 215. mm in spessore. Grazie alla doppia testina di stampa della Massivit 1800, *Sismaitalia* è stata in grado di produrre contemporaneamente un paio di capitelli in circa 20 ore.

Con la capacità di produrre ciascun capitello a grandezza naturale in una sola stampa, i progettisti sono riusciti ad eliminare i tempi di consegna prolungati associati ai metodi tradizionali di restauro. Inoltre, poiché i proprietari richiedevano solo i capitelli stampati in 3D per scopi estetici, è stato possibile produrre rapidamente la struttura vuota e rinforzarla con schiuma di poliuretano velocizzandone la realizzazione e minimizzando i costi di produzione. Una volta completati, i capitelli sono stati rifiniti con intonaco e dipinti nello stesso colore delle controparti originali per garantire l'autenticità formale (fig. 6).

3.3 Modern Ornamental

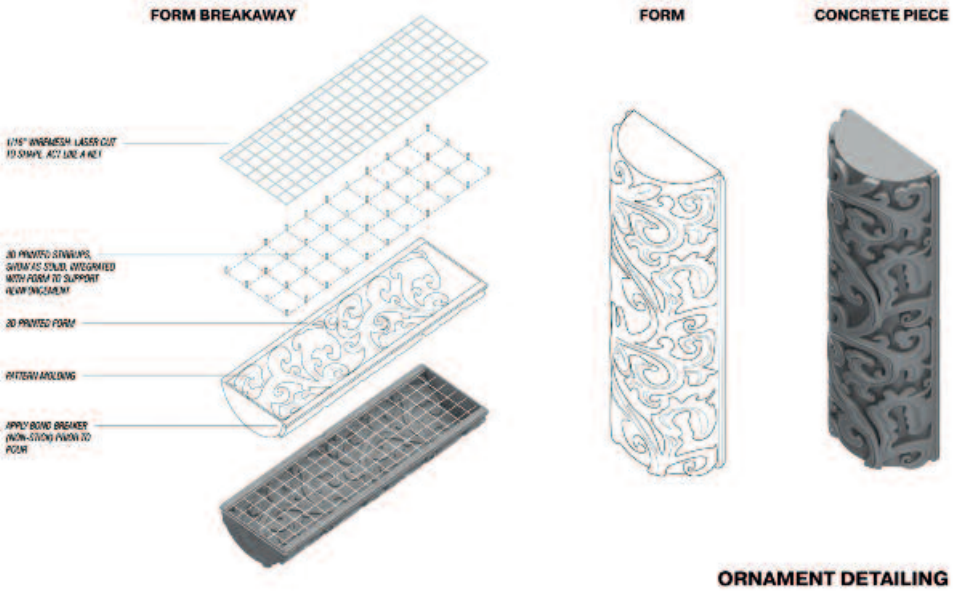
Edg è uno studio di architettura e ingegneria di New York che porta avanti, nell'ambito dei suoi progetti, l'utilizzo di tecnologie per il restauro. Nello specifico, il team di ricerca di Edg ha iniziato a studiare il potenziale della stampa 3D come metodo per la realizzazione di complessi stampi in calcestruzzo. Tale ricerca ha trovato campo applicativo nel progetto di restauro di un edificio del 1940 sulla 574 Fifth Avenue, caratterizzato da complessi elementi di facciata deteriorati.

Come evidenziato in figura 7, la forma in plastica stampata in 3D è intarsiata con una rete metallica tagliata al laser e staffe per fornire rinforzo per il getto. Edg ha anche progettato un semplice sistema di connessione della piastra che si forma nell'area stampata per facilitare il facile fissaggio alla facciata. I prototipi finali sono stati prodotti da VoxelJet utilizzando la loro stampante VoxelJet VX1000 e sono stati fabbricati con il calcestruzzo Sika. Tale caso studio dimostra la complessità formale delle riproduzioni ottenibili sfruttando le tecnologie digitali e la potenzialità del riuscire a produrre, limitando i costi, elementi non standard (figg. 7, 8).

6. Capitelli stampati in 3d per il restauro di Palazzo Spada.

3.4 Palazzo Ducale di Mantova

Questo intervento di restauro è stato condotto nel gennaio 2015 presso il Palazzo Ducale di Mantova, durante la riabilitazione della Sala conosciuta come la Sala di Cristoforo Sorte. La Sala è situata nel cuore del Palazzo Ducale, con vista sul sottoportico del Cortile della Cavallerizza, ed è parte degli ambienti noti come la Rustica, progettati da Giulio Romano per Federico II Gonzaga. Questo ambiente, decorato nella prima metà del XVI secolo, presenta una volta completamente dipinta con colonne tortili, un pergolato con foglie di vite e grappoli che si sviluppano dal soffitto, e un'apertura rettangolare sul soffitto con putti che si inseguono tra i girali, tutti elementi distintivi dello stile giuliesco. Inoltre, lungo il perimetro della volta si trova una cornice decorativa composta da una doppia fascia: la fascia inferiore presenta una decorazione costituita da elementi a forma



7. Dettagli dell'intervento di restauro Modern Ornamental

8. Elemento in cemento per il restauro Modern Ornamental.

di ovulo, circondati su tre lati da una curva e separati da 'freccette' (*kyma* ionico), mentre la fascia superiore è caratterizzata da un motivo costituito da "archetti" che racchiudono un elemento interno a forma di lancia (*kyma* lesbio continuo).

Al momento dell'inizio dei lavori di restauro, la cornice presentava gravi danni, con numerose e ampie lacune. Di conseguenza, l'attenzione è stata focalizzata sulla ricostruzione di questo elemento.

L'obiettivo principale era integrare le lacune nel modo più accurato possibile, combinando metodi tradizionali di restauro con le tecnologie dell'ingegneria inversa e della prototipazione rapida. Sono stati sperimentati due approcci differenti:

1. Ricostruzione delle parti mancanti tramite stampa 3D e loro inserimento nelle lacune.
2. Creazione di controforme in stampa 3D della cornice per utilizzarle come stampi su di una base di malta al fine di riprodurre la decorazione.

Dal punto di vista operativo, il processo è stato suddiviso in tre fasi principali:

1. Acquisizione tridimensionale della cornice e creazione di modelli digitali tridimensionali.
2. Produzione fisica in stampa 3D dei modelli digitali.
3. Integrazione delle lacune mediante l'utilizzo delle riproduzioni ottenute.

La prima fase ha coinvolto la scansione tridimensionale di una porzione ben conservata della cornice, sia nella fascia superiore che in quella inferiore. La cornice era situata a circa tre metri da terra ed era di difficile accessibilità attraverso i ponteggi presenti nel cantiere di restauro. Pertanto, è stata adottata una soluzione di scansione basata sull'acquisizione e sull'elaborazione di immagini digitali utilizzando tecniche di ricostruzione *Structure-from-Motion* (SfM) e *Multi-View Stereo* (MVS). Il modello 3D risultante è stato adattato mediante un software di scultura digitale per consentire una riproduzione accurata in stampa 3D. Sono stati creati due modelli digitali distinti:

- Il modello 3D effettivo, che rappresenta fedelmente una porzione della cornice originale e verrà successivamente denominato 'positivo'.

- Il modello negativo del 3D della cornice originale, ottenuto ribaltando la superficie originale.

La stampa 3D è stata effettuata utilizzando una stampante 3D a Filamento Fuso, una tecnologia di produzione additiva che stratifica e fonde materiale termoplastico per creare oggetti tridimensionali. In questo caso, il materiale termoplastico scelto è stato il PLA (acido polilattico), un biopolimero derivato da amido di mais, tapioca o zucchero di canna, noto per la sua facilità di stampa e adatto all'applicazione in un ambiente interno.

L'integrazione della cornice è stata realizzata seguendo due approcci differenti. In un caso, il modello negativo è stato utilizzato come stampo tradizionale, mentre nell'altro, è stata adottata una soluzione sperimentale, con due modelli positivi posizionati all'interno delle lacune. Il modello negativo, essendo una rappresen-

9. Dettagli dell'intervento di restauro del Palazzo Ducale di Mantova.

tazione digitale del calco tradizionale, è stato utilizzato come controforma su cui applicare la decorazione in un tradizionale strato di malta a base di calce e inerti, consentendo la riproduzione della decorazione originale (fig. 9).

3.5 Mattia Mercante e l'Opificio delle Pietre Dure

Mattia Mercante, restauratore di beni culturali con collaborazioni presso istituzioni museali di rilievo, incluso l'Istituto Opificio delle Pietre Dure di Firenze, ha recentemente sfruttato avanzate tecnologie digitali, quali scanner 3D, software di modellazione tridimensionale (CAD) e la stampante 3D Formlabs Form 2, per condurre operazioni di restauro su opere d'arte rinascimentali di notevole importanza, tra cui quelle attribuite a Michelangelo e Leonardo Da Vinci. L'introduzione di questa applicazione della stampa 3D nell'ambito della conservazione dei beni culturali e artistici ha consentito a Mercante di portare a termine con successo progetti che, in assenza di tali strumenti, avrebbe dovuto abbandonare.

Mercante sottolinea che: «L'adozione di tecnologie come la scansione e la stampa 3D è stata innescata da esigenze di natura pratica, quali la soluzione di problematiche relative alla documentazione, valorizzazione e preservazione del patrimonio culturale. Abbiamo iniziato ad utilizzare lo scanner 3D per l'analisi delle opere d'arte, successivamente l'impiego di software di modellazione digitale è diventato una componente essenziale del nostro processo di lavoro, il quale ora è stato ampliato con l'incorporazione della stampa 3D». Prosegue affermando: «Fin dai miei primi anni di formazione, il mio obiettivo è stato dimostrare come coloro impegnati nel restauro del patrimonio culturale possano integrare direttamente e in modo indipendente gli strumenti digitali disponibili oggi nel loro approccio lavorativo, evitando di dipendere da servizi esterni di professionisti».

Tra gli esempi di restauro di successo effettuati da Mercante, spicca il caso del Monumento Isimbardi. In questo progetto, Mercante ha proceduto alla ricostruzione delle dita mancanti di una scultura funeraria in marmo, partendo da una scansione 3D della mano danneggiata e da un modello di gesso. Prima di effettuare

10. Restauro del pannello Gibbons attraverso stampa 3D.

la riparazione finale, le parti ricostruite sono state testate su di una replica stampata in 3D della mano, garantendo così un restauro preciso e accurato.

Un altro significativo intervento di restauro condotto in collaborazione con l'Istituto Opificio delle Pietre Dure di Firenze riguarda il pannello Gibbons. Attraverso una scansione 3D, è stata integrata una porzione mancante nell'opera, la quale è stata poi ricostruita grazie all'impiego della stampa 3D consentendo così una completa e accurata riabilitazione dell'opera d'arte (fig. 10).

Conclusioni

L'applicazione delle tecnologie digitali nel campo del restauro rappresenta un'innovazione fondamentale che sta rivoluzionando il modo in cui preserviamo e recuperiamo il nostro patrimonio culturale e artistico. Attraverso l'uso di avanzati strumenti, come lo scanner 3D, il software di modellazione tridimensionale e le stampanti 3D, come dimostrato nei casi studio analizzati, è possibile affrontare sfide complesse nel restauro di opere d'arte con una precisione senza precedenti.

L'abilità di ricostruire parti mancanti, restaurare elementi deteriorati e preservare il valore storico e artistico delle opere è stata notevolmente potenziata da queste tecnologie. Inoltre, la possibilità di operare in modo autonomo all'interno del processo di restauro, riducendo la dipendenza dai servizi esterni, rappresenta un passo avanti significativo nel campo della conservazione del patrimonio culturale.

Tuttavia, è essenziale che la comunità scientifica, gli esperti del restauro e le istituzioni culturali continuino a collaborare per sviluppare e condividere le migliori pratiche nell'impiego di queste tecnologie al fine di garantire un'integrazione tra l'utilizzo delle tecnologie e le strategie di restauro.

Riferimenti bibliografici

DI ANGELO L., DI STEFANO P., FRATOCCHI L., MARZOLA A.

- *An AHP-Based Method for Choosing the Best 3D Scanner for Cultural Heritage Applications*, J. Cult. Herit. 2018, 34, pp. 109-115

EUMULLER M., REICHINGER A., RIST F., KERN C.

- *3D Printing for Cultural Heritage: Preservation, Accessibility, Research and Education*, In Ioannides, M., Quak, E. (eds) '3D Research Challenges in Cultural Heritage. Lecture Notes', in Computer Science, vol. 8355. Springer, Berlin, Heidelberg 2014

GAO W., ZHANG Y., RAMANUJAN D., RAMANI K., CHEN Y., WILLIAMS C.B., WANG C.C., SHIN J.C., ZANG S., ZAVATTIERI P.D.

- *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*, Comput.-Aided Des. 2015, 69, pp. 65-89

KANTAROS A., GANETSOS T., PETRESCU

- *F.I.T. Three-Dimensional Printing and 3D Scanning: Emerging Technologies Exhibiting High Potential in the Field of Cultural Heritage*, Appl. Sci. 2023, 13, 4777

MELVIN J., WACHOWIAK and BASILIKI VICKI KARAS

- *3d Scanning and Replication for Museum and Cultural Heritage Applications*, in Journal of the American Institute for Conservation, 2009, 48:2, pp. 141-158

REMONDINO F.

- *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning*, Remote Sens. 2011, 3, pp. 1104-1138

TASHI, ULLAH A.S., WATANABE M., KUBO A.

- *Analytical Point-Cloud Based Geometric Modeling for Additive Manufacturing and Its Application to Cultural Heritage Preservation*, Appl. Sci. 2018, 8, 656

GLI AUTORI

Presentazione

ing. **Gennaro Annunziata**, Presidente dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli

Introduzione

prof. ing. **Aldo Aveta**, Università di Napoli Federico II

Prefazione

prof. arch. **Bianca Gioia Marino**, Ordinario di Restauro architettonico, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università di Napoli Federico II

1. Restauro dell'architettura e dell'archeologia, tra formazione e prassi

prof. ing. **Aldo Aveta**, Ordinario f.r. di Restauro architettonico, già Direttore della Scuola di specializzazione in Beni culturali e del Paesaggio, Università di Napoli Federico II

ing. **Vincenzo Calvanese**, Responsabile dell'Ufficio Tecnico del Parco Archeologico di Pompei, Coordinatore della Commissione Ingegneria per i Beni culturali dell'Ordine degli Ingegneri di Napoli

ing. arch. **Maurizio Di Stefano**, Presidente ICOMOS Italia

2. Miglioramento strutturale, efficientamento energetico, geotecnica per il Patrimonio

prof. ing. **Marco Di Ludovico**, Associato di Tecnica delle Costruzioni, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università di Napoli Federico II

ing. **Stefano Iaquinta**, Consigliere dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli

prof. ing. **Andrea Prota**, Ordinario di Tecnica delle Costruzioni, Direttore del Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università di Napoli Federico II

prof. ing. **Filippo de Rossi**, Ordinario di Fisica Tecnica Ambientale, Dipartimento di Architettura, Università di Napoli Federico II

ing. **Claudia Colosimo**, Consigliere dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli, Assegnista, Dipartimento di Architettura, Università di Napoli Federico II

prof. ing. **Carlo Viggiani**, Emerito di Geotecnica, Università di Napoli Federico II

prof. ing. **Stefano Aversa**, Ordinario di Geotecnica, Dipartimento di Ingegneria, Università di Napoli Parthenope

prof. ing. **Alessandro Flora**, Ordinario di Geotecnica, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Napoli Federico II

3. Difesa dei paesaggi costieri

prof. ing. **Mario Calabrese**, Ordinario di Regime e Protezione dei litorali e Costruzioni marittime, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Napoli Federico II

prof. ing. **Mariano Buccino**, Associato di Costruzioni idrauliche e marittime, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Napoli Federico II

ing. **Margherita Carmen Ciccaglione**, Dottore di Ricerca, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Napoli Federico II

ing. **Sara Tuozzo**, Dottorando di Ricerca, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Napoli Federico II

ing. **Pietro Moretti**, CIDIEMME Engineering s.r.l.

4. Informatica e modellistica per il Patrimonio

prof. ing. **Angelo Chianese**, Ordinario di Sistemi di elaborazione delle informazioni, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione, Università di Napoli Federico II

dott. **Mario Byron Coppola**, NETCOM Group

dott. **Alfredo Troiano**, Direttore tecnico NETCOM Group

prof. dott. **Isabella Valente**, Associato di Storia dell'Arte contemporanea, Dipartimento di Studi Umanistici, Università di Napoli Federico II

prof. ing. **Gino Nicolais**, Emerito di Tecnologia dei polimeri e di Scienza della tecnologia, Università di Napoli Federico II

prof. ing. **Costantino Menna**, Associato di Ingegneria strutturale, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università di Napoli Federico II

arch. **Flavio Galdi**, ETESIAS s.r.l.

Nella stessa Collana

n. 1
Memorie dalla città a venire. Decostruzione e conservazione *(2016)*
Bianca Gioia Marino, Francesco Rispoli, Francesco Vitale

n. 2
La chiesa dei Santi Cosma e Damiano in Napoli: ricerche e studi per il restauro *(2016)*
Raffaele Amore, Claudia Aveta, Alfredo Buccaro

n. 3
Castel Nuovo in Napoli. Ricerche integrate e conoscenza critica per il progetto *(2017)*
di restauro e di valorizzazione
a cura di Aldo Aveta

n. 4
Il restauro fra conservazione e modificazione. Principi e problemi attuali *(2017)*
Giovannni Carbonara

Finito di stampare
nel mese di novembre 2023

La Conservazione del Patrimonio dei beni culturali e del paesaggio costituisce oggi uno degli obiettivi prioritari da perseguire nella nostra nazione: senza dubbio in Italia le testimonianze storiche ed i caratteri naturalistici del territorio definiscono un paesaggio culturale unico al mondo.
Il volume, ricco di contributi di tanti autorevoli esperti nel campo dell'ingegneria, intende evidenziare quanto sia determinante nel campo della Conservazione, a livello progettuale ed esecutivo, una Cultura dell'ingegneria. Una Conservazione, si badi bene, da intendersi non in modo passivo, ma attivo ed aperto all'evoluzione della società e, dunque, in modo dinamico ed integrato, ed anche ai temi dell'architettura in questo periodo di transizione. I vari scritti contribuiscono a testimoniare il valore fondamentale dei molteplici saperi specialistici che caratterizzano le discipline che si insegnano nei diversi Dipartimenti (ex Facoltà) afferenti all'ingegneria ed all'architettura.
I saggi che incrementano ed avvalorano tale consapevolezza vengono distinti in quattro tematiche.
Il restauro dell'architettura e dell'archeologia, in cui si affrontano gli aspetti della formazione, della normativa e della prassi, nonché le esperienze che si compiono in un sito archeologico di valenza internazionale quale è Pompei.
Il miglioramento strutturale, l'efficientamento energetico e la geotecnica per il patrimonio: sia per gli edifici di valore storico-artistico che per il costruito storico: si affrontano i temi legati ad aspetti di grande attualità, che tengono in conto la natura dei nostri territori soggetti ad eventi sismici e bradisismici, nonché la sostenibilità in campo energetico. Viene illustrato un caso molto importante nello scenario internazionale, quello della Torre di Pisa, nel quale le soluzioni degli ingegneri geotecnici in sintonia con gli assunti del restauro hanno portato a risultati straordinari per la salvaguardia di questo monumento.
Il tema della *difesa dei paesaggi costieri* è affrontato dai saperi specialistici dell'ingegneria con approcci che tendono a dimostrare l'importanza di ricercare soluzioni che garantiscano l'efficacia dei risultati, ma anche la salvaguardia dei valori paesaggistici, con particolare riferimento alla situazione della costiera sorrentina, di Napoli e di Amalfi.
Infine, vengono illustrati sia le applicazioni dell'*Informatica* per la valorizzazione e la fruizione dei beni culturali, sia l'apporto della *Modellistica* e della digitalizzazione per la conservazione del Patrimonio.
Il quadro delle conoscenze specialistiche nel campo dei beni culturali e del paesaggio non può certamente risultare esaustivo, ma il volume costituisce un documento di particolare importanza, di aggiornamento tecnico e scientifico, affinchè negli ingegneri e negli architetti, anche nei giovani professionisti, si possa incrementare la consapevolezza del ruolo determinante della Cultura dell'Ingegneria, in sinergia con gli altri saperi, sia nello scenario attuale che nel futuro prossimo.
Dunque, un volume di grande interesse, anche di valenza divulgativa, in cui si affrontano in modo esauriente aspetti metodologici, ma anche applicazioni pratiche nel campo di una professione che intende promuovere un progetto di qualità all'altezza della complessità contemporanea.

ISSN 2531-6354
ISBN 979 12 81389 182

Euro 20,00

9 791281 389182