

INTERVENTI INTEGRATI DI PROMOZIONE, MONITORAGGIO E MODELLAZIONE STRUTTURALE DI SITI O MANUFATTI DI PARTICOLARE PREGIO ARCHEOLOGICO/ARCHITETTONICO

Fernando Fraternali*, Angelo Esposito*, Gerardo Carpentieri*, Luigi Petti*

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno, Via Ponte Don Melillo, 84084, Fisciano (SA), +39089964083, f.fraternali@unisa.it

Vittorio Scarano, Luca Vicidomini**, Roberto Andreoli**, Ugo Erra**, Gennaro Cordasco**, Delfina Malandrina**, Alberto Negro****

**ISISLab, Dipartimento di Informatica, Università degli Studi di Salerno, Via Ponte Don Melillo, 84084, Fisciano (SA).

Abstract

Si presenta una metodologia per interventi di promozione, monitoraggio e modellazione strutturale di manufatti o siti di particolare interesse archeologico e/o architettonico (siti archeologici, chiese, complessi monumentali, ecc.). Gli interventi proposti hanno finalità di conoscenza e tutela del sito/manufatto oggetto d'indagine, coniugando ricerca storico-architettonica, ricostruzioni virtuali interattive e modelli di analisi strutturale. La metodologia proposta si fonda su precedenti esperienze di ricerca applicata svolte nell'ambito del sito archeologico di Paestum (SA) all'interno dell'Università degli Studi di Salerno.

1. Introduzione

Si presenta un progetto di ricerca che mira a creare un gruppo di studio internazionale dedicato allo sviluppo di applicazioni strutturali e multimediali, che consentano di ottenere risultati significativi in merito a due obiettivi distinti, di seguito denominati Obiettivo di conoscenza ed Obiettivo di tutela. Il primo intende portare allo sviluppo di ricostruzioni virtuali interattive finalizzate alla promozione ed alla valorizzazione di un particolare sito o manufatto di particolare pregio architettonico e/o archeologico. Il secondo è orientato, invece, alla creazione di un sistema integrato di monitoraggio in sito e di modellazione strutturale delle opere oggetto d'indagine, che abbia come finalità principali la verifica della stabilità di tali opere, in previsione di eventi sismici, e l'individuazione degli interventi più opportuni che si dovessero rendere necessari per la loro messa in sicurezza.

Il gruppo proponente possiede specifiche competenze in merito ad entrambi gli obiettivi dal presente progetto, come si evince dalla sezione bibliografia e dal sito web <http://isis.dia.unisa.it/projects/paestumgate/> (obiettivo 1), realizzato dall'ISISLab dell'Università degli Studi di Salerno (<http://isis.dia.unisa.it>), che fornisce ricostruzioni virtuali interattive del sito archeologico di Paestum (progetto “PaestumGate”, responsabile scientifico Prof. Vittorio Scarano, patrocinato da Innova - Centro Regionale di Competenza per lo Sviluppo ed il Trasferimento dell'Innovazione applicata ai Beni Culturali e Ambientali).

Per quanto riguarda gli aspetti strutturali del progetto (obiettivo 2), il gruppo operante presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell’Università di Salerno lavorerà in stretta collaborazione con i gruppi attivi presso lo “Structural Systems and Control Laboratory” della University of California di San Diego, USA (Prof. Robert E. Skelton) ed il “Department Steel and Composite Structures” della University of Kassel, Germania (Prof. Uwe E. Dorka). Queste collaborazioni, già attive allo stato attuale con riferimento ad una varietà di tematiche di ricerca (vedi sezione bibliografia), contribuiranno a trasfondere nella realtà italiana importanti esperienze internazionali sul tema del controllo strutturale, del monitoraggio sismico e della modellazione meccanica di strutture monumentali. Si ritiene utile sottolineare che il presente progetto intende rappresentare un primo passo nella direzione della creazione di un esteso network di laboratori e strutture di ricerca operanti sul tema del monitoraggio della risposta sismica reale di strutture di rilevanza monumentale. E’ opinione dei proponenti, infatti, che la creazione di un tale network sia di fondamentale importanza per la definizione di opportuni interventi di salvaguardia del vastissimo patrimonio architettonico ed archeologico disponibile sul territorio nazionale.

1.1 Obiettivo di conoscenza

Il progetto proposto mira allo svolgimento di una accurata ricerca storico-architettonica sul manufatto o sito oggetto d’indagine ed allo sviluppo di applicazioni di realtà virtuale interattiva multiplatforma (per Windows, Mac, smartphone e tablet Android e iOS), che consentano all’utente di immergersi in ricostruzioni virtuali di tale sito/manufatto. Queste applicazioni saranno riferite allo stato attuale, a configurazioni relative a precedenti epoche storiche, ed, eventualmente, a configurazioni relative a progettazioni differenti da quella effettivamente realizzata.

La ricostruzione virtuale avverrà mediante un software di modellazione tridimensionale, prendendo come riferimento fotografie e/o misure effettuate sul campo. Ai modelli digitali ricostruiti verranno successivamente applicate delle cosiddette “texture”, ovvero immagini che riproducano l’aspetto esteriore delle superfici. Le texture saranno create a valle di un’approfondita ricerca storico-architettonica sul manufatto oggetto d’indagine, usando come base di partenza il materiale fotografico attualmente a disposizione. L’impiego di texture e di altre tecniche di ricostruzione virtuale (come, ad esempio, l’ombreggiatura dei modelli e l’illuminazione variabile, che simuli le diverse fasi della giornata) contribuiranno a produrre sensazioni di realismo e d’immersione nell’opera da parte dell’utente, grazie anche alla possibilità offerta all’utente di potersi muovere liberamente all’interno del sito ricostruito, per osservarlo da diverse angolazioni e punti di vista.

L’obiettivo 1) del progetto consentirà la promozione della conoscenza su vasta scala del sito o manufatto oggetto d’indagine. In particolare, i modelli virtuali che saranno realizzati permetteranno, come si è già osservato, tour interattivi dell’opera, che ne promuovano la conoscenza grazie all’elevato realismo della grafica virtuale ed alle possibilità offerte dalla navigazione virtuale al suo interno. Il risultato che si intende raggiungere potrebbe portare, ad esempio, a raffinare la ricostruzione virtuale del sito archeologico di Paestum, che è attualmente offerta dal progetto “PaestumGate” dell’ISISLab dell’Università di Salerno (Fig. 1).



Fig. 1 - Ricostruzione virtuale del sito archeologico di Paestum (cortesia di PaestumGate)

1.2 Obiettivo di tutela

Si intende formulare una metodologia che combini modelli di analisi strutturale, tecniche di monitoraggio sismico e modelli di realtà virtuale interattiva per la predizione del comportamento sotto eventi sismici del manufatto o sito oggetto d'indagine.

L'Italia è un Paese il cui patrimonio storico è apprezzato in tutto il mondo. Purtroppo, a causa delle condizioni ambientali cui è stato sottoposto nel tempo, tale patrimonio è allo stato attuale particolarmente fragile, come si è potuto verificare, ad esempio, a seguito dei numerosi eventi sismici che si sono ripetuti negli ultimi anni in diverse aree del territorio nazionale ed anche a causa di fenomeni di degrado dovuti ad agenti fisico/chimici (vedi il caso del sito di Pompei). Tale patrimonio necessita, pertanto, di continue manutenzioni ed interventi, che ne preservino, in particolare, la stabilità in occasioni di eventi sismici. Si tengano presenti, al riguardo, l'elevata sismicità dell'intero territorio nazionale e l'elevata vulnerabilità sismica delle strutture monumentali, anche a causa di una carente manutenzione e di un mancato adeguamento anti-sismico nel corso del tempo. Non sono stati purtroppo rari i casi, sia in epoche remote che in tempi recenti, di crolli o danneggiamenti importanti a seguito di eventi sismici anche di intensità relativamente modesta. Un altro elemento di complessità della problematica in discorso è legato alla difficoltà della modellazione del comportamento strutturale in campo dinamico delle costruzioni di carattere storico e monumentale, che tipicamente sono realizzate in materiale murario. Tale materiale non è, infatti, facilmente schematizzabile nell'ambito di metodi di calcolo di tipo moderno, a causa della sua eterogeneità, dell'incertezza sui valori dei parametri meccanici dei blocchi murari e della malta e della ripetuta esposizione nel tempo a fenomeni di danneggiamento diffusi, quali, ad esempio, il danneggiamento meccanico da fessurazione e schiacciamento o il danneggiamento prodotto da attacchi fisico/chimici (attacchi da cicli di gelo/disgelo, solfati, cloruri, carbonatazione, ecc.). Uno studio accurato

sulle condizioni di stabilità di opere di pregio architettonico e/o archeologico non può prescindere, pertanto, da un'accurata ricerca storico-architettonica, che evidenzi le tecnologie costruttive adottate e l'evoluzione nel tempo di interventi di rinforzo strutturale e/o di restauro, e da una misurazione in sito del comportamento reale della struttura, che consenta un'opportuna calibrazione di modelli strutturali adeguati a descrivere la risposta dell'opera o del sito oggetto di indagine. Questo tipo di studio è di importanza strategica per il nostro paese e si rende sempre più necessario ai fini di una corretta pianificazione delle azioni di salvaguardia e di una migliore gestione delle risorse economiche necessarie. L'idea di progetto nasce da esperienze di ricerca e progetti pregressi sviluppati nell'ambito dell'ISISLab, del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno, dello “Structural Systems and Control Laboratory” della University of California di San Diego (USA) e del “Department Steel and Composite Structures” della University of Kassel, Germania. La principale finalità dell'obiettivo di tutela consiste nell'implementazione di una metodologia che combini modelli di analisi strutturale, tecniche di monitoraggio sismico e modelli di realtà virtuale interattiva per la simulazione in tempo reale e la previsione del comportamento sotto eventi sismici di strutture di particolare interesse archeologico e/o architettonico.

Il progetto si svilupperà, quindi, su tre livelli di azione:

- il monitoraggio, tramite specifici sensori, del comportamento dinamico in tempo reale di un prefissato numero di elementi strutturali costituenti l'opera oggetto di studio;
- l'implementazione di modelli di analisi strutturale che, a partire dai rilievi in sito, permettano la simulazione del comportamento sismico dell'intero modello strutturale;
- la realizzazione di simulazioni di realtà virtuale tridimensionale (attraverso l'utilizzo di opportuni “motori fisici”), che visualizzino il comportamento dinamico della struttura oggetto d'indagine, sia in tempo reale (“real-time”), durante lo svolgersi di un evento sismico, sia a valle di un tale evento.

Tutte e tre le fasi d'indagine suddette fanno riferimento ad un opportuno modello strutturale dell'opera oggetto d'indagine. Tale modello “discretizzerà” opportunamente la struttura in un numero sufficiente di elementi (o blocchi), supposti a comportamento rigido (modelli agli elementi discreti o DEM), a comportamento deformabile (modelli agli elementi finiti o FEM), ovvero a comportamento misto rigido-deformabile (modelli misti DEM/FEM, modelli a graticcio e modelli “tensegrity”). Tali elementi interagiscono tra loro attraverso opportune leggi di contatto all'interfaccia (leggi del tipo a contatto unilaterale con attrito nel caso di modellazione con elementi rigidi, ovvero leggi di interfaccia che consentano l'apertura di fessure nel caso di elementi deformabili, vedi, in particolare, le sezioni “Stato dell'Arte” e “Ricerca Documentale” per una panoramica su tali argomenti). Facendo riferimento, ad esempio, al Tempio di Nettuno del sito archeologico di Paestum, si potrà adottare una modellazione che descriva le colonne e le architravi come interi blocchi rigidi, ovvero modelli più raffinati, che suddividano ciascuna colonna e ciascuna architrave in più blocchi rigidi o deformabili in contatto tra loro.

La prima fase operativa consisterà nell'inserimento di strumenti di misura in opportuni elementi del modello strutturale adottato, al fine di monitorare, in tempo reale, i parametri di spostamento, velocità ed accelerazione di tali elementi (parametri di moto). I sensori saranno in numero tale da ottenere informazioni accurate sui gradi di libertà dell'elemento strumentato (uno o più sensori tridimensionali di spostamento/accelerazione per ogni elemento strumentato). Tali dati saranno immagazzinati e poi inviati, via cavo o GPS, ad un

server centrale e saranno memorizzati in un database, che sarà reso disponibile online in un apposito sito web dedicato al progetto. Il progetto si propone infatti di realizzare un sito web, ispirato al sito “PaestumGate” dedicato all’area archeologica di Paestum (<http://isis.dia.unisa.it/projects/paestumgate/>), che arricchisca le sezioni dedicate alle ricostruzioni virtuali dell’opera oggetto d’indagine con ulteriori sezioni dedicate al monitoraggio strutturale ed alla simulazione del comportamento dinamico delle strutture analizzate. L’elaborazione delle informazioni raccolte dai sensori in sito potrà avvenire sia in real-time, in concomitanza con un evento sismico (attraverso l’impiego di opportuni software grafici, detti anche “motori fisici in tempo reale”, che operino una simulazione real-time del comportamento dinamico del modello strutturale impiegato, vedi sezione “Stato dell’Arte”), sia a valle di un tale evento (attraverso “motori fisici ad alta precisione”, vedi la sezione “Stato dell’Arte”). Si faccia riferimento, a titolo di esempio, alla Fig. 2, che mostra una strumentazione con sensori di accelerazione di una porzione d’angolo del Tempio di Nettuno di Paestum.

La seconda fase porterà alla formulazione di modelli meccanici e/o geometrici per la ricostruzione dei parametri di spostamento degli elementi non strumentati. Si perverrà alla definizione di “sensori virtuali” che misurino i parametri di moto degli elementi non strumentati, attraverso (a) simulazioni strutturali, oppure (b) attraverso opportune leggi d’interpolazione dei dati provenienti dagli elementi strumentati. La soluzione (a) sarà adottata nel caso di simulazioni post-evento della risposta dinamica della struttura oggetto d’indagine, mentre la soluzione (b) sarà adottata, invece, nel caso di simulazioni real-time (contemporanee all’evento).



Fig. 2 - Strumentazione con sensori di accelerazione e centralina di raccolta dati del tempio di Nettuno (Paestum, SA).

In entrambi i casi, i dati in ingresso alle procedure di predizione dei parametri di moto dei sensori virtuali consisteranno nei dati di moto rilevati dai sensori reali.

La Fig. 3 illustra una simulazione strutturale del comportamento dinamico di una porzione del Tempio di Nettuno (ottenuta mediante il software strutturale commerciale SIMWISE 4D), che è illustrata in dettaglio nella sezione “Multibody Systems” del paragrafo “Pubblicazioni”.

Nella terza fase del progetto si perverrà alla realizzazione di un simulazioni virtuali tridimensionali del comportamento dinamico del manufatto o sito oggetto di indagine, che consentano una rappresentazione real-time di tale comportamento, sotto un dato evento sismico o vibrazioni di tipo non sismico del suolo, ovvero la visualizzazione post-evento della risposta strutturale dello stesso manufatto/sito.

A tal fine si utilizzeranno opportuni “motori fisici” della grafica computazionale, come, ad esempio, il motore Unity3D, che costituisce una delle piattaforme di sviluppo più diffuse ed all’avanguardia nel campo della realtà virtuale interattiva. La modularità e l’espandibilità di tali software mettono a disposizione degli sviluppatori una serie di strumenti utili a creare efficaci ricostruzioni “immersive” dello stato di un oggetto. Il motore fisico potrà essere utilizzato, in particolare, per pervenire a predizioni dei parametri di moto dei sensori virtuali dell’opera oggetto d’indagine, utilizzando le sue funzioni predittive del moto di oggetti solidi e caricando, come dati in ingresso, i parametri di moto misurati dai sensori reali. Particolare attenzione sarà dedicata alla calibrazione dei parametri fisici del modello virtuale, di modo che il suo comportamento dinamico rispecchi quanto più possibile quello del modello fisico-matematico impiegato per le simulazioni strutturali. La Fig. 4 mostra la simulazione di un possibile atto di moto di una porzione del tempio di Nettuno (Paestum, SA), che è stata realizzata attraverso il motore grafico 3DS Max.

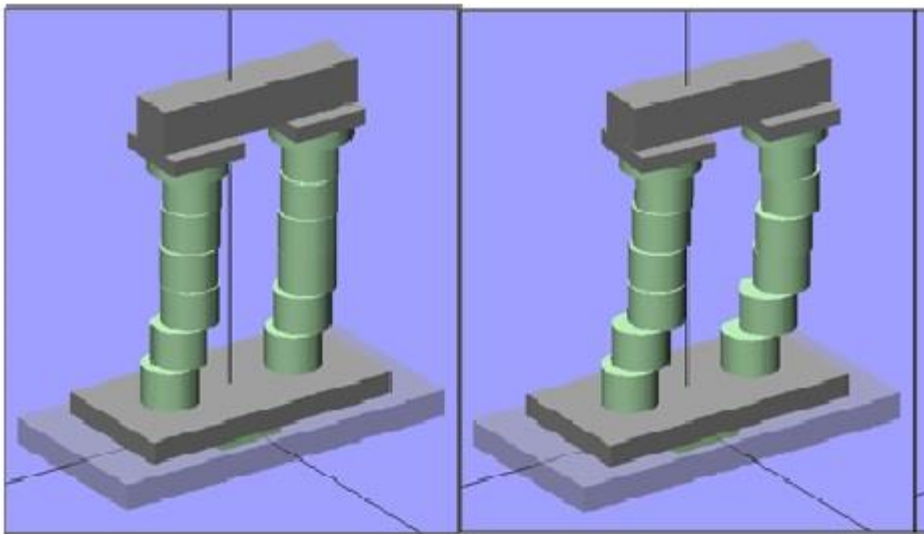


Fig. 3 - Modellazione attraverso un modello misto DEM/FEM (software SIMWISE 4D) di un sistema formato da un architrave e due colonne del tempio di Nettuno (Paestum, SA).

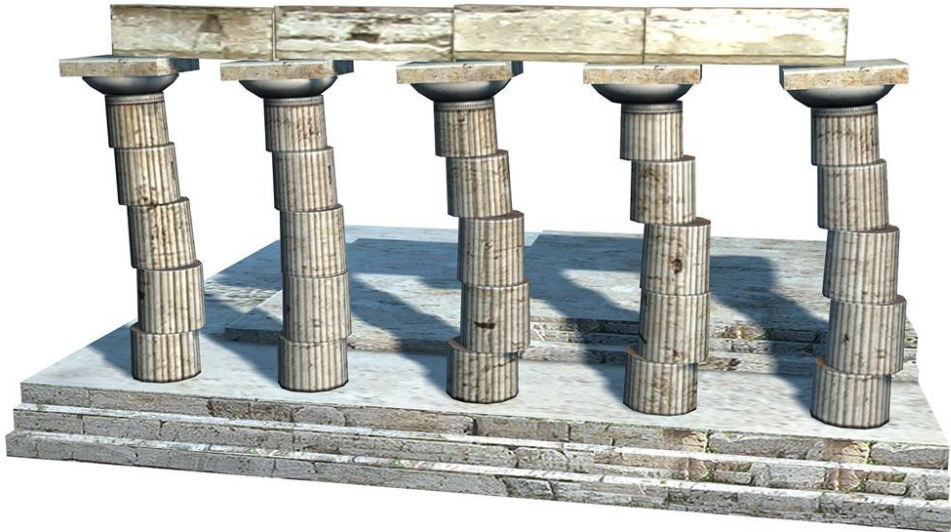


Fig. 4 - Simulazione mediante un motore grafico del comportamento di una porzione del tempio di Nettuno (Paestum, SA), sotto un'eccitazione dinamica alla base (animazioni disponibile agli url: <http://youtu.be/YvtlnLCso-c>, <http://youtu.be/jkpSJUA4Lm8>)

Le colonne del sistema in Fig. 4 sono formate da più elementi rigidi sovrapposti, mentre le architravi sono composte da blocchi adiacenti appoggiati su coppie di colonne, in corrispondenza delle mezzerie degli abachi. Applicando una forza di tipo ondulatorio alla base della fondazione delle colonne, il motore fisico calcola le forze di attrito che si sviluppano all'interfaccia dei vari elementi del modello strutturale impiegato, simulando movimenti di slittamento e di rotazione relativa di tali elementi. Animazioni di oscillazioni sismiche del modello illustrato in Fig. 4 sono già state realizzate nell'ambito di uno studio di fattibilità del presente progetto e sono disponibili agli url: <http://youtu.be/YvtlnLCso-c> (piccole oscillazioni) e <http://youtu.be/jkpSJUA4Lm8> (oscillazioni di ampiezza crescente, che portano il modello esaminato al collasso strutturale).

Le misure dei sensori reali e le stime offerte dai sensori virtuali saranno memorizzate in un database disponibile online, nell'ambito di un sito web dedicato al progetto. La creazione di tale database permetterà a tutti i tecnici ed osservatori interessati di scaricare i dati immagazzinati nel database sui propri personal computer e di svolgere, eventualmente, simulazioni che mirino, ad esempio, alla determinazione del regime di sforzo nella struttura (mediante modelli DEF/DEM, modelli a graticcio, ecc.); all'identificazione di possibili modi di collasso della struttura; ovvero alla costruzione di spettri di risposta in termini di spostamento (SD), velocità (SV) ed accelerazione (SA); pseudo-velocità (PSV), pseudo-accelerazione (PSA). L'accesso ai dati acquisiti in tempi diversi consentirà, inoltre, il monitoraggio e ed il controllo di eventuali fenomeni di degrado dell'opera oggetto di studio. L'obiettivo 2) del presente progetto consentirà, quindi, di pervenire ad importanti elementi conoscitivi del comportamento dinamico di strutture di particolare rilevanza architettonica e/o archeologica.

Come si è già più volte ricordato, i risultati ottenuti in termini di misurazioni e simulazioni saranno ampiamente divulgati nella comunità tecnico-scientifica internazionale. Tali dati consentiranno di studiare e prevedere la vulnerabilità strutturale della struttura indagata nei confronti di eventi sismici ed offriranno un prezioso supporto alla progettazione di eventuali interventi di messa in sicurezza e di restauro. In particolare, le simulazioni del modello virtuale potranno essere impiegate per individuare parti specifiche della struttura su cui dovesse risultare necessario applicare interventi di rinforzo strutturale e, di conseguenza, le tipologie di intervento più opportune.

2. Prospettive post-intervento

Come si è già osservato in precedenza, il presente progetto intende contribuire significativamente alla creazione di un network di laboratori e strutture di ricerca operanti sul tema del monitoraggio della risposta sismica reale di strutture di rilevanza monumentale. Trattandosi di strutture antiche, che sono state soggette nel tempo a numerosi interventi di rimaneggiamento e restauro, nonché all'azione di degrado chimico/fisica da parte degli agenti atmosferici, una loro accurata modellazione strutturale non può prescindere da un'effettiva caratterizzazione in sito del comportamento meccanico. L'associazione di tecniche di analisi strutturale e di modelli di realtà virtuale consentirà, in particolare, di raggiungere i seguenti importanti risultati in tema di promozione e tutela dell'opera o sito oggetto d'indagine:

1. Fornire una metodologia ingegneristica, generalizzabile a qualsiasi struttura di particolare interesse architettonico e/o archeologico vulnerabile dal punto di vista sismico, che possa essere di supporto alle decisioni e alla progettazione della messa in sicurezza, basate sul monitoraggio e sull'analisi del comportamento strutturale sotto eventi sismici reali, anche di lieve intensità. Ciò potrà consentire un'ottimizzazione dei costi di intervento ed una gestione ottimizzata dei fondi destinati al restauro.
2. Creare un database sulla risposta sismica dell'opera monitorata, che porti alla definizione di mappe di vulnerabilità fondate sull'incrocio tra dati sperimentali e danni simulati. Si farà tesoro, in quest'ambito delle esperienze internazionali disponibili in letteratura, con particolare riferimento a quelle provenienti dalla California, regione ad elevata sismicità, che ha già messo a punto reti di dati facilmente accessibili dagli utenti sulla risposta sismica di strutture reali opportunamente monitorate in sito.
3. Avere a disposizione modelli virtuali dell'opera oggetto d'indagine, sotto l'aspetto architettonico e/o archeologico, che siano resi disponibili nell'ambito di un portale interattivo online dedicato al progetto e/o sotto forma di applicazioni commerciali per personal computer e smartphone. Tali strumenti forniranno la possibilità di visitare “virtualmente” il sito o manufatto oggetto d'indagine e consentiranno la sovrapposizione di immagini reali con immagini virtuali relative a configurazioni precedenti, ovvero di progetti differenti da quello effettivamente realizzato dello stesso sito o manufatto, utilizzando approcci avanzati della realtà virtuale interattiva ed accurate ricostruzioni storico-architettoniche.

3. Stato dell'arte

Si fornisce di seguito una panoramica di sintesi sullo stato dell'arte reperibile in letteratura in merito alle tematiche affrontate dal presente progetto.

-Monitoraggio in sito e modellazione meccanica di opere monumentali

Il monitoraggio strutturale e la modellazione meccanica di costruzioni di pregio architettonico e archeologico rappresentano argomenti di ricerca allo stesso tempo stimolanti e complessi, che animano un vivace dibattito nella comunità scientifica internazionale.

In Italia, le testimonianze più notevoli di architetture in pietra sono rappresentate da edifici monumentali di epoche greca, romana, bizantina, romanica e gotica. Gli edifici sopravvissuti ai giorni nostri esibiscono una notevole vulnerabilità sismica e molti di essi, in particolare, ricadono in aree ad elevata sismicità. Queste considerazioni hanno spinto numerosi tecnici e ricercatori a condurre in anni recenti studi sulla risposta dinamica e sulla vulnerabilità sismica di opere di interesse architettonico ed archeologico, sia dal punto di vista teorico che sotto l'aspetto sperimentale. Si noti, a tal riguardo, che le opere suddette sono tipicamente realizzate in materiale murario e che la modellazione meccanica di tale materiale costituisce un tema di notevole interesse tecnico e scientifico, che presenta diversi aspetti di complessità. Questi ultimi sono legati principalmente all'estrema disomogeneità del materiale, agli effetti fortemente non lineari indotti dal contatto con attrito tra i diversi blocchi che costituiscono le strutture murarie, nonché al ricorrente danneggiamento prodotto da fessurazione, schiacciamento e/o da attacchi chimico-fisici.

Notevole importanza riveste, senz'altro, il monitoraggio in sito del comportamento meccanico di strutture murarie di particolare pregio. A tal riguardo, sono reperibili in letteratura diversi studi, che vertono sul controllo dell'apertura delle lesioni e sulla misura delle vibrazioni. In entrambi i casi, si osserva che rivestono particolare importanza la fase preparatoria di allestimento del sistema di monitoraggio (tipologia di sensori da utilizzare, posizione dei sensori, frequenze attese per la struttura monitorata) e la fase di analisi dei dati registrati.

Si ritiene utile citare, innanzitutto, alcuni studi disponibili in letteratura sul monitoraggio sismico e sulla modellazione strutturale di edifici di pregio architettonico danneggiati dal sisma dell'Abruzzo del 2009 (vedi i lavori [1-3] della bibliografia). Il lavoro [1] presenta interessanti sistemi di monitoraggio dinamico della Chiesa di S. Domenico e del Forte Spagnolo, due strutture monumentali della città de L'Aquila. La ricerca presentata in tale lavoro si articola in due fasi distinte: una fase di “pre-processing” ed una fase di “post-processing”. Nell'ambito della fase di pre-processing sono stati realizzati modelli strutturali agli elementi finiti (FEM) per lo sviluppo di analisi dinamiche modali delle strutture oggetto d'indagine. Queste ultime sono state opportunamente caratterizzate mediante una dettagliata analisi storico-architettonica-strutturale ed un rilievo di dettaglio del quadro di danno post-sisma. Tali studi hanno permesso di investigare sul comportamento dinamico delle opere investigate, al fine di ottimizzare la disposizione dei sensori necessari al monitoraggio in sito, riducendo possibili ridondanze. La seconda fase è stata incentrata, invece, sulla elaborazione e sulla interpretazione dei dati provenienti dal sistema di monitoraggio, con lo scopo di pervenire ad una valutazione del comportamento strutturale durante eventi sismici. Sono state identificate, in particolare, le prime quattro frequenze

proprie delle strutture investigate e su di esse, mediante opportuni modelli regressivi statici e dinamici, si è studiata l’incidenza dei parametri ambientali (temperatura ed umidità) e della progressione dello stato di danno. Monitorando eventi sismici di bassa intensità, che frequentemente si manifestano nell’area, sono state inoltre analizzate gli intervalli di variazione delle suddette frequenze, al fine di risalire a possibili progressioni dei fenomeni di danneggiamento. Il lavoro [2] presenta un caso studio relativo a quattro importanti basiliche ricadenti nel Comune di L’Aquila: Santa Giusta, Santa Maria di Collemaggio, San Pietro di Coppito e San Silvestro. I risultati delle indagini post-sisma e delle simulazioni numeriche presentate in tale studio hanno evidenziato una notevole affidabilità delle stime ottenute in merito al livello di sicurezza sismica delle costruzioni analizzate e dei corrispondenti modi di collasso. E’ stato anche stato messo in luce che l’eccitazione dinamica sismica attiva numerosi modi di vibrazione di tali strutture, che sono tutti caratterizzati da bassi valori del fattore di partecipazione (intorno al 10%). Per tali ragioni, i valori elevati di accelerazione spettrale misurati a seguito del sisma del 2006 non corrispondono, in effetti, a valori elevati delle azioni di taglio agenti alla base, che variano tra il 20% e il 30% del peso totale della costruzione. Uno studio sulla modellazione strutturale della Basilica di S. Maria di Collemaggio è presentato invece nel lavoro [3], che è orientato principalmente alla valutazione della vulnerabilità degli elementi strutturali ed alla descrizione del danneggiamento da fessurazione attraverso analisi statiche non lineari.

Un altro caso di interesse italiano è illustrato nel lavoro [4], che esamina la basilica benedettina di S. Angelo in Formis a Capua (CE), contenente celebri affreschi su storie del Vecchio e Nuovo Testamento. Questa struttura ha subito importanti fessurazioni dal 1969 fino ai giorni nostri, che hanno avuto inizio nella navate centrale e si sono estese successivamente alle restanti parti della basilica. A seguito di ripetuti allarmi sulla stabilità strutturale di tale opera, nel lavoro [4] sono state eseguite indagini geologiche e sono stati monitorati gli spostamenti di punti posti sia all’interno che all’esterno dell’opera. L’elaborazione dei risultati misurati in sito ha consentito di pervenire alla identificazione di opportuni interventi di ripristino strutturale.

I lavori [5,6] presentano invece ricerche sul comportamento dinamico dei templi dell’Acropoli di Atene. Il lavoro [5] discute il monitoraggio dinamico del Partenone e l’elaborazione di dati di accelerogrammi registrati in sito mediante il software PQLX. Tali accelerogrammi sono stati impiegati per l’implementazione di analisi non lineari 2-D, allo scopo di investigare la risposta dinamica della struttura analizzata. Il lavoro [6] riguarda, invece, uno studio sulla modellazione “multibody” di alcune colonne del pronao del Partenone. Le analisi presentate in questo lavoro prestano particolare attenzione all’incidenza del danneggiamento da fessurazione sulla stabilità di tali colonne. In uno dei blocchi delle colonne analizzate è stata inserita una frattura di cui è possibile variare l’inclinazione e la posizione. Le simulazioni numeriche presentate in [6] hanno consentito di pervenire al calcolo delle deformazioni normali e di taglio delle discontinuità studiate ed alla determinazione dei parametri minimi di resistenza delle interfacce che separano i blocchi delle colonne.

Il lavoro [7] presenta un interessante studio sulle frequenze proprie di vibrazione delle torri minareto “Menar Jonban” situate nella città di Esfahan in Iran. Le analisi presentate in tale lavoro hanno condotto a schematizzare le torri oggetto d’indagine come due pendoli equivalenti, collegati tra loro dalla struttura di copertura della moschea. Quest’ultima funge, a tutti gli effetti, da mezzo di connessione per le vibrazioni. Sia le analisi sperimentali che

le simulazioni numeriche sviluppate nel lavoro [7] hanno dimostrato che circa l'80% degli spostamenti laterali osservabili alla sommità dei minareti è imputabile alle deformazioni flessionali della copertura, mentre il rimanente 20% è il risultato delle deformazioni laterali delle torri stesse.

Il lavoro [8] presenta un interessante studio numerico-sperimentale sull'attenuazione delle vibrazioni in sistemi di blocchi rigidi soggetti a moti di "rocking" (rotazione relativa) e collegati a smorzatori a massa liquida ("tuner liquid dampers"). Tale tecnica di mitigazione delle vibrazioni rappresenta un efficace strumento di difesa di costruzioni monumentali nei confronti di eccitazione sismiche di particolare rilievo.

Per quanto riguarda gli aspetti più teorici delle modellazioni disponibili in letteratura sulle strutture in muratura, si rimanda ai lavori [9-13] della bibliografia, che descrivono i dettagli di approcci frequentemente impiegati in letteratura per l'analisi limite di modelli "no-tension" ([9,10]); la schematizzazione a blocchi rigidi di sistemi strutturali monumentali ([11,12]) e la simulazione del danneggiamento diffuso attraverso metodi di omogeneizzazione ([13]). Gli studi sopra citati rappresentano solo alcuni dei contributi più recenti all'ampia letteratura disponibile sulle tematiche di natura meccanica affrontate dal presente progetto.

-Ambienti virtuali interattivi

La simulazione grafica di modelli fisici è un importante settore dell'informatica computazionale, che ha avuto origine negli anni '50, grazie allo sviluppo della fluidodinamica computazionale su "supercomputer" [14]. Inizialmente questa tematica di ricerca era ad appannaggio esclusivo di università, organizzazioni militari e grandi centri di calcolo, ma al giorno d'oggi essa è ampiamente diffusa anche nei laboratori di sviluppo di grandi, medie e piccole aziende informatiche, attesa la sempre maggiore diffusione di strumenti di calcolo a costo ridotto e con elevate potenzialità, che consentono di condurre simulazioni computazionali sempre più convenienti in termini economici e di tempo di sviluppo, rispetto alla realizzazione di prototipi fisici da sottoporre a sperimentazione di laboratorio [15]. Allo stato attuale, è possibile suddividere i motori di simulazione fisica in due classi distinte: motori in tempo reale e motori ad alta precisione.

I motori ad alta precisione sono strumenti professionali che trovano svariati campi di applicazione, che includono, ad esempio, simulazioni fluidodinamiche, previsioni meteorologiche, progettazione di gallerie ed animazioni per film. La caratteristica fondamentale di questo tipo di motori è l'alta precisione richiesta alla simulazione grafica, che consente di pervenire a risultati particolarmente accurati dal punto di vista fisico, facendo ricorso, ad esempio, a simulazioni agli elementi finiti.

Diverse finalità hanno, invece, i motori in tempo reale, che hanno come carattere distintivo, rispetto ai motori ad elevata precisione, la velocità di esecuzione. I motori in tempo reale sono orientati a fornire all'utilizzatore un ambiente interattivo, che gli consenta di attivare diversi scenari alternativi in tempo reale, attraverso la generazione di una quantità di informazioni pari ad almeno 30-60 immagini al secondo [16]. Per ognuna di tali immagini vengono calcolate le posizioni relative degli oggetti rappresentati, sulla base di una schematizzazione "semplificata" delle leggi della fisica, consentendo alla scheda grafica di disegnare tali oggetti in tempo reale, con tempi di calcolo dell'ordine dei millisecondi. I motori in tempo reale trovano vasta applicazione per la realizzazione di ambienti virtuali interattivi e nell'industria dei videogiochi. Secondo le statistiche menzionate in [17], alcuni

dei motori più diffusi in quest’ambito sono i seguenti: PhysX (motore sviluppato da Nvidia e particolarmente adatto ai personal computers); Havok (realizzato dall’omonima azienda e molto utilizzato nelle produzioni multiplatforma e per videogiochi [18]) e Bullet (un motore open source sviluppato apprezzato per la sua precisione [19]). I motori in tempo reale fanno tipicamente uso di modellazioni fisiche basate sulla dinamica dei corpi rigidi [20]. È tuttavia possibile articolare opportunamente il sistema “multibody” per simulare il comportamento di oggetti grandi e complessi, e riprodurre, ad esempio, la rottura di corpi, attraverso la loro scomposizione in più parti o attraverso tecniche di frammentazione, che modifichino opportunamente la geometria degli oggetti al momento dell’impatto [21]. La simulazione dinamica di tali motori impiega tipicamente una “pipeline” [22], ovvero una sequenza di operazioni tali che ciascuna di esse utilizza come dati in ingresso i dati in uscita dell’operazione precedente. Partendo dalla posizione e dalla forma degli oggetti nella scena virtuale, si calcolano le collisioni “a grana grossa”, considerando opportune “Bounding Box” (finestre di selezione consistenti, tipicamente, in parallelepipedi o sfere), che racchiudano, totalmente ed individualmente, ogni oggetto della scena. In base ai punti di sovrapposizione delle bounding box, vengono calcolati gli effettivi punti di contatto degli oggetti reali, pervenendo quindi ad una simulazione fisica a grana più fine. In una fase successiva, vengono applicate ai diversi oggetti coinvolti le forze dinamiche in gioco, pervenendo ad algoritmi iterativi di verifica delle leggi della fisica, che consentano di raggiungere precisioni progressivamente crescenti delle simulazioni. Una tecnica di simulazione innovativa, che si è recentemente diffusa in quest’ambito, si basa sulla cosiddetta “Digital Molecular Matter”, per la quale si rimanda al lavoro [23] della bibliografia.

BIBLIOGRAFIA

1. Moreira, S. Dynamic Monitoring of Monumental Buildings Struck by the April 2009 Abruzzo Earthquake: pre- and post-processing procedures. *ADVANCED MASTERS IN STRUCTURAL ANALYSIS OF MONUMENTS AND HISTORICAL CONSTRUCTIONS*, 2010.
2. Brandonisio, G., Lucibello, G., Mele, E., De Luca, A. Damage and performance evaluation of masonry churches in the 2009 L’Aquila earthquake. *ENGINEERING FAILURE ANALYSIS*, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.021>.
3. Gattulli, V., Antonacci, E., Vestroni, F. Field observations and failure analysis of the Basilica S. Maria di Collemaggio after the 2009 L’Aquila earthquake. *ENGINEERING FAILURE ANALYSIS*, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.020>.
4. Cammarota, A., Russo, G., Viggiani, C., Candela, M. The Benedictine Basilica of S. Angelo in Formis (Southern Italy): A therapy without diagnosis?. *GEOTECHNICAL ENGINEERING FOR THE PRESERVATION OF MONUMENTS AND HISTORIC SITES*, 225–232, 2013.
5. Kalogerasand, I. S., Ezzlegos, D. Strong motion record processing for the Athenian Acropolis seismic response assessment. *GEOTECHNICAL ENGINEERING FOR THE PRESERVATION OF MONUMENTS AND HISTORIC SITES*, 483–492, 2013.

6. Stefanou, I., Psycharis, I., Georgopoulos, I. O. Dynamic response of reinforced masonry columns in classical monuments. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, 25, Issue 12, 4325-4337, 2011.
7. Hosseinzadeh, N. Vibration mechanism of 13th century historical Menar-Jonban monument in Iran. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING*, 24-4, 313-324, 2011.
8. Baratta, A., Corbi, I., Corbi, O. Rocking motion of rigid blocks and their coupling with tuned sloshing dampers. *PROCEEDINGS OF THE TWELFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL, STRUCTURAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING COMPUTING*, B.H.V. Topping, L.F. Costa Neves, R.C. Barros (Eds), paper 175, 2009. DOI:10.4203/ccp.91.175.
9. Baratta, A., Corbi, O. On the equilibrium and admissibility coupling in NT vaults of general shape. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SOLIDS AND STRUCTURES*, 47, Issue 17, 2276-2284, 2010. ISSN 0020-7683, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.04.024>.
10. Heyman, J. *THE STONE SKELETON*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997. ISBN: 0521629632.
11. Moreau, J. J., Jean, M. Numerical treatment of contact and friction: the contact dynamics method. *3RD BIENNIAL JOINT CONFERENCE ON ENGINEERING SYSTEMS DESIGN AND ANALYSIS*, 4, 201-208, 1996.
12. Sinopoli, A. Kinematic approach in the impact problem of rigid bodies. *APPLIED MECHANICS REVIEWS*, 42(11), 233-244, 1989.
13. Luciano, R., Sacco, E. Homogenization technique and damage model for old masonry material. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SOLIDS AND STRUCTURES*, 34(24), 3191-3208, 1997.
14. Hess, J. L., Smith, A. M. O. Calculation of potential flow about arbitrary bodies. *AERONAUTICS SCIENCES*, 1-138, 1967.
15. The ROI of Concurrent Design with CFD: <http://www.mentor.com/products/mechanical/resources/overview/the-roi-of-concurrent-design-with-cfd-ebb0d311-350e-4926-a671-7efe11b982af>.
16. The Evolution of PhysX SDK, performance-wise: <http://physxinfo.com/news/11297/the-evolution-of-physx-sdk-performance-wise/>.
17. Popular Physics Engines comparison: PhysX, Havok and ODE: http://physxinfo.com/articles/?page_id=154.
18. Customer Projects (Havok website): <http://www.havok.com/customer-projects/games?product=Physics>.
19. Boeing, A., Braunl, T. Evaluation of real-time physics simulation systems. *5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES IN AUSTRALIA AND SOUTHEAST ASIA (GRAPHITE '07)*, Proceedings, 281-288. DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1321261.1321312>.
20. Lembcke, S. Realtime rigid body simulation using impulses. 2006.
21. Su, J., Schroeder, C., Fedkiw, R. Energy stability and fracture for frame rate rigid body simulation. *2009 ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS SYMPOSIUM ON COMPUTER ANIMATION*, Proceedings, 155-164, 2009.
22. Bullet user manual: <http://bulletphysics.org/wordpress>.

23. O'Brien, J. F., Hodgins, J. K. Graphical modeling and animation of brittle fracture. 1999 ACM SIGGRAPH, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 137-146, 1999.
24. Ascione, L., Feo, L., Fraternali, F. Load Carrying Capacity of 2D FRP/Strengthened Masonry Structures. COMPOSITES. PART B, ENGINEERING, 36, 619-626, 2005. ISSN: 1359-8368.
25. Masonry Vaults via Polyhedral Stress Functions. MECHANICS RESEARCH COMMUNICATIONS, 37, 198-204, 2010. ISSN: 0093-6413, DOI:10.1016/j.mechrescom.2009.12.010.
26. Fraternali, F. A Mixed Lumped Stress – Displacement Approach to the Elastic Problem of Masonry Walls. MECHANICS RESEARCH COMMUNICATIONS, 38, 176-180, 2011. ISSN: 0093-6413, DOI:10.1016/j.mechrescom.2011.03.008.
27. Fraternali, F., Ascione, L., Feo, L. Limit Analysis of Composite Reinforced Masonry Walls. RESTORATION, RECYCLING AND REJUVENATION TECHNOLOGY FOR ENGINEERING AND ARCHITECTURE APPLICATION, G.C. Sih and G. Nobile (Eds), Aracne, Bologna, 351-357, 2004. ISBN 88-7999-765-3.
28. Tortorella, E., Marino, I., Khanlou, M. N., Dorka, U.E., Petti, L. Seismic response control of rigid block system by using tendon system: the case of Greek columns. SEISMIC PROTECTION OF CULTURAL HERITAGE, WCCE - ECCE - TCCE Joint Conference, 149-161, 2011. ID:3040584.
29. Tortorella, E. Seismic response control of rigid block systems by using Tendon System: the case of Greek column. Master thesis in Civil Engineering, University of Salerno, 2011.
30. Dorka, U.E. Structural Control for seismic safety (in German). DER STAHLBAU, 2004.
31. Andreoli, R., De Chiara, R., Erra, U., Iannaccone, A., La Greca, F., Scarano, V. Some Real Experiences in Developing Virtual Environments. INFORMATION VISUALIZATION, Tenth International Conference on, 545-552, 5-7, 2006.
32. Andreoli, R., De Chiara, R., Erra, U., Scarano, V. Interactive 3D environments by using videogame engines. INFORMATION VISUALISATION, Ninth International Conference on, 515-520, 2005.
33. De Chiara, R., Di Santo, V., Erra, U., Scarano V. Real positioning in virtual environments using game engines. 5TH CONFERENCE EUROGRAPHICS ITALIAN CHAPTER (EGITA07), 2007.
34. Andreoli, R., De Chiara, R., Erra, U., Scarano, V., Pontrandolfo, A., Rizzo, L., Santoriello, A. An interactive 3D reconstruction of a funeral in Andriuolo's Necropolis in Paestum. CAA 2005 – COMPUTER APPLICATIONS AND QUANTITATIVE METHODS IN ARCHAEOLOGY, 2005.