

STUDIO SUI DANNI INDOTTI DA MOVIMENTI DI PENDIO SU CHIESE ED EDIFICI STORICI: IL CASO DELLA CHIESA DI SAN NICOLÒ DI CAPODIMONTE IN LIGURIA

Ludovica Cambiaggi

Università degli Studi di Genova

Ludovica.cambiaggi@edu.unige.it

Daniela Sauvageon

Università degli Studi di Genova

daniela.sauvageon@gmail.com

Riccardo Berardi

Università degli Studi di Genova

riccardo.berardi@unige.it

Sommario

Nell'ambito delle attività di un più ampio progetto di ricerca relativo alla tutela e salvaguardia del patrimonio storico- culturale soggetto a fenomeni franosi, la memoria propone un caso studio riferito alla chiesa romanica di S.Nicolò di Capodimonte situata sul promontorio di Portofino (Liguria), complesso inserito nella lista dei monumenti nazionali italiani. Lo studio è stato condotto innanzitutto raccogliendo dati generali (idrogeologici, geotecnici, strutturali, sui danni, ecc.), quindi proseguendo nella loro rielaborazione. Sono state identificate dettagliate sezioni di interesse che sono state utilizzate per effettuare le analisi numeriche FEM, finalizzate a comprendere i fenomeni in atto. Sono state eseguite diverse analisi, sia in condizioni free-field, sia per tenere conto della presenza della struttura, cambiando scenari di pericolosità. Gli andamenti degli spostamenti sotto il piano di fondazione sono stati confrontati con i danni presenti nella chiesa, consentendo la lettura del quadro fessurativo anche in base alla direzione dei movimenti di versante. Infine, è stata eseguita una valutazione di massima del livello di danno, che ha permesso di identificare il contesto critico per il monumento in esame.

1. Introduzione

La chiesa di San Nicolò di Capodimonte è un antico luogo di culto cattolico dell'Arcidiocesi di Genova ed è stato inserito nella lista dei monumenti nazionali italiani. Si tratta di un complesso religioso, sito in ambito collinare nel Comune di Camogli, lungo la via pedonale San Rocco-Porto Pidocchio, lungo la costa compresa tra Camogli e Punta Chiappa, sul versante occidentale del Promontorio del Monte di Portofino.

La chiesa, la cui edificazione risale probabilmente all'XI secolo (Cavaciocchi et al. 2009), è una costruzione di limitate dimensioni e presenta una navata singola con transetto e absidi (Figura 1). Sul lato a monte si innalza il campanile, mentre sul lato a mare, in corrispondenza del transetto, la chiesa è collegata ad una serie di edifici minori tra cui la canonica e la Casa dei Pescatori. S.Nicolò di Capodimonte si trova in una zona classificata con una classe di suscettività al dissesto elevata (Pg3b) ed in una posizione prossima ad una grande area in frana attiva. L'area nella quale si trova il complesso è limitata da due impluvi naturali ("fossi") lungo i quali si incanalano le acque di ruscellamento e che fungono da ricettori per le acque di falda superficiali.

La presenza di un quadro fessurativo molto marcato ha posto l'attenzione sulla chiesa, vincolata dalla Soprintendenza, che è stata sottoposta a diversi monitoraggi strutturali negli ultimi anni.

Obiettivo del presente lavoro è quello di approfondire lo studio dei danni indotti dai movimenti di pendio, legati ai fenomeni indotti dalle precipitazioni, alla morfologia del sito, a possibili azioni gravitative dovute all'erosione marina agente al piede della falesia prossima al complesso di San Nicolò.

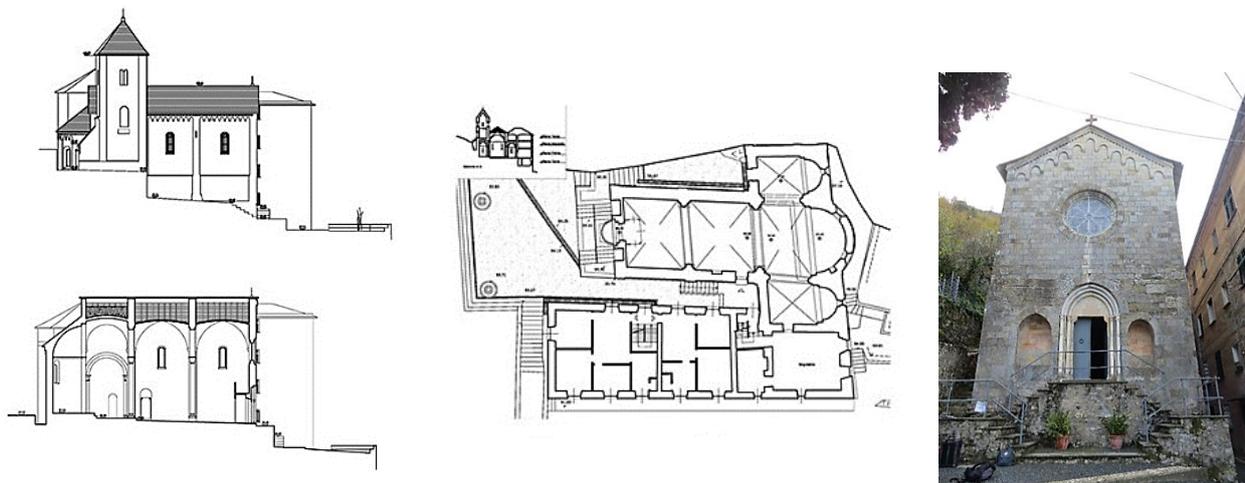


Figura 1- Piante, sezioni, prospetti del complesso della chiesa di San Nicolò di Capodimonte

2. Elaborazione dei dati

L'area in esame è stata sottoposta negli anni a diverse campagne di monitoraggio, indagini geotecniche e rilievi di cui si riporta nel seguito una sintetica descrizione.

Dal 2006 è stato installato un sistema di monitoraggio strutturale composto da fessurimetri esterni ed interni, grazie ad essi viene monitorata l'evoluzione delle lesioni presenti nella chiesa.

Nel 2002 sono state eseguite indagini geotecniche per conto della Provincia di Genova con l'obiettivo di definire il profilo stratigrafico di massima nell'area di imposta della costruzione. In particolare, sono state eseguite 7 stese tomografiche elettriche, 5 stese sismiche a rifrazione e 4 prove penetrometriche dinamiche con strumentazione medio-leggera (l'accessibilità al sito è estremamente difficile: l'area è accessibile tramite un percorso solo pedonale). L'indagine venne condotta prevalentemente per acquisire indicazioni stratigrafiche di massima: le informazioni geotecniche sono perciò purtroppo assai limitate, insufficienti per una definizione di dettaglio del modello geologico e geotecnico del sottosuolo.

Il terreno risulta caratterizzato dalla presenza di uno strato di coltre superficiale eterogenea e ricca di clasti di spessore pari a circa 4m, uno strato di alterazione di spessore 2-3m ed il substrato roccioso che si sviluppa in profondità. Tale conformazione è tipica dei versanti liguri: il substrato è costituito da calcari marnosi appartenenti alla formazione del Flysh di Monte Antola. Subito a monte del complesso di San Nicolò si ha il passaggio al Conglomerato di Portofino.

In Tabella 1 si riportano i principali parametri geotecnici adottati per le analisi FEM, stimati in base ai dati disponibili e all'esperienza su contesti simili.

	Coltre	Strato alterazione	Substrato
Peso unità volume γ (kN/m³)	19	23	27
Velocità onde primarie V_p (m/s)	500-800	800-2100	3300
Coesione efficace c' (kPa)	4	40	100
Angolo resistenza al taglio ϕ' (°)	30°	35°	42°
Rapporto di Poisson ν	0,33	0,3	0,25
Modulo elastico E_{50} (MPa)	100	198	7000
Modulo elastico E_{oed} (MPa)	79,2	158,4	

Tabella 1- Proprietà meccaniche del terreno

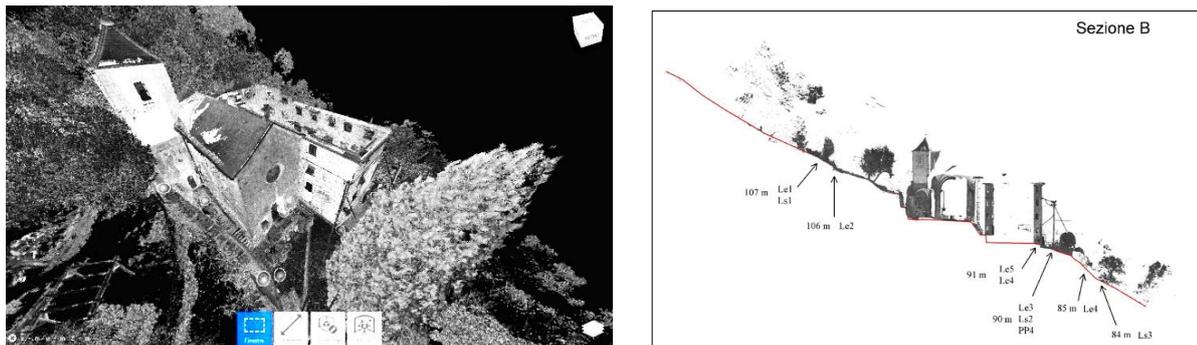


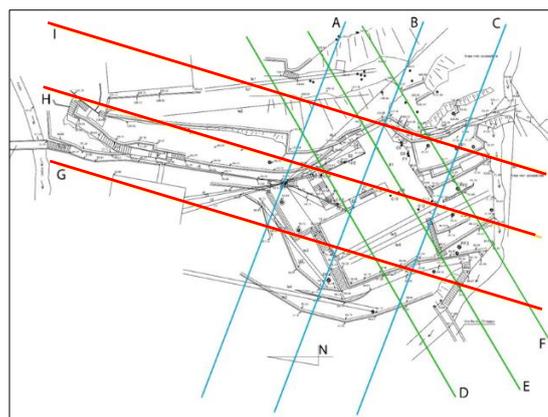
Figura 2 - Restituzione rilievo laser scanner ed esempio di sezione

Per quanto attiene le condizioni della falda, si è fatto riferimento alle misurazioni effettuate in due piezometri situati sulla strada pedonale che da San Rocco di Camogli scende verso San Nicolò; data la distanza rispetto alla chiesa, ma la sostanziale similitudine in termini di successione stratigrafica, i valori rilevati durante il monitoraggio piezometrico sono stati considerati per stimare le oscillazioni della falda all'interno degli strati più superficiali, falda il cui livello inferiore si colloca nelle porzioni più fratturate dell'ammasso roccioso.

Nell'inverno del 2017 è stato effettuato dagli scriventi un rilievo tramite laser scanner non solo della chiesa ma anche dell'area limitrofa. Tramite l'acquisizione della nuvola di punti 3D e la sua elaborazioni in ambiente CAD, è stato possibile ottenere il profilo plano-altimetrico della zona in modo accurato, migliorando il profilo altimetrico ottenuto dalla rielaborazione delle carte tecniche. Si riporta in Figura 2, a titolo di esempio, un'immagine dell'elaborazione dei dati ed una delle sezioni così ottenute, con l'indicazione della posizione delle indagini geotecniche a disposizione.

Per condurre le analisi è stato scelto di studiare l'area del complesso di San Nicolò considerando una serie di sezioni individuabili grazie all'elaborazione della nuvola di punti, suddivisibili in tre categorie principali (Fig. 3):

- Sezioni lungo la direttrice di massima pendenza (A, B,C);
- Sezioni parallele alla facciata della chiesa (D, E, F);
- Sezioni ortogonali alla traccia del fossato (G, H, I).



Particolare attenzione è stata rivolta alle sezioni B, E ed I.

Figura 3 - Indicazione delle sezioni

3. Modellazione numerica

Successivamente la fase di collezione ed elaborazione dei dati, lo studio ha previsto una serie di analisi sulle sezioni individuate utilizzando un software di calcolo agli elementi finiti, PLAXIS 2D.

Le analisi sono state svolte preliminarmente facendo variare l'altezza della falda, per evidenziarne l'influenza, e ponendo a confronto condizioni iniziali di free-field e condizioni che tengano conto della presenza del complesso (chiesa e Casa dei Pescatori).

Partendo da una modellazione più semplice è stato condotto uno studio iniziale sulle tre sezioni B, E ed I caratterizzando i diversi tipi di terreno con il modello elastico-perfettamente plastico di Mohr-Coulomb, al fine di indagare il comportamento del terreno in condizioni free-field al variare della falda.

A queste analisi, utilizzate poi come confronto e conferma per le successive, sono seguite quelle più elaborate in cui, modellando il terreno con un modello non lineare ad incrudimento isotropo, Hardening Soil Model presente nella libreria del software utilizzato, è stato analizzato il profilo dei cedimenti nelle diverse condizioni di falda per ciascuna sezione, sia in condizioni free-field, sia introducendo la presenza delle sovrastrutture.

Si riporta a titolo di esempio in Figura 4 l'andamento degli spostamenti orizzontali per la sezione E, osservando

come la variazione della quota di falda porti a scenari più gravosi nel caso di innalzamento della falda.

Effettuate le analisi in condizioni free-field è stato ritenuto fondamentale modellare la presenza del complesso per evidenziare l'influenza dello stesso sul profilo degli spostamenti.

Il problema dell'interazione terreno-struttura è molto complesso e articolato, soprattutto in caso di strutture irregolari e in muratura, come la chiesa in esame.

Per gli obiettivi preliminari della ricerca in corso, riassunti nel presente lavoro, si è seguito un approccio schematico e semplificato per la modellazione della sovrastruttura:

partendo dal rilievo geometrico della chiesa e della Casa dei Pescatori, valutando quindi lo spessore delle murature, il numero di piani, l'estensione areale delle piante, le dimensioni dell'impronta su ciascuna sezione degli edifici e le caratteristiche della muratura, si è definita una pressione media di circa 100 kN/m^2 per la Casa dei Pescatori e di 110 kN/m^2 per la chiesa.

La modellazione del complesso ha previsto l'utilizzo di cluster di materiali e dimensioni idonee per soddisfare le pressioni sopra riportate. Per quanto riguarda il modulo elastico esso è stato fatto variare nell'intervallo $800\text{-}2500 \text{ MPa}$ al fine di evidenziarne l'influenza sul profilo e l'entità degli spostamenti.

Analisi dettagliate e precise, in relazione a tale parametro, saranno condotte a partire da un più preciso rilievo delle strutture, utilizzando approcci più rigorosi (p.es. Losacco et al. 2014), differenziando quindi il comportamento della chiesa da quello della Casa dei Pescatori.

Con la presenza degli edifici così schematizzata sono state eseguite, per entrambe le sezioni B ed E, analisi plastiche di deformazione facendo nuovamente variare le condizioni di falda per simularne l'abbassamento e l'innalzamento secondo diversi cicli; i valori degli spostamenti considerati sono quelli raggiunti e stabili dopo un sufficiente numero di cicli.

Lo spostamento maggiore si concentra sotto la Casa dei Pescatori, condizionando quindi la risposta della Chiesa di S. Nicolò a cui essa è collegata. In Figura 5a-b sono illustrati rispettivamente gli spostamenti verticali e orizzontali della sezione E. L'analisi ha inoltre messo in evidenza come con l'aumentare del numero dei cicli, zone di concentrazione delle deformazioni di taglio presenti nello strato di coltre tendano ad unirsi in un'unica potenziale superficie di rottura (Fig. 5c).

Complessivamente le analisi numeriche hanno fornito risultati globalmente congruenti con le evidenze reali osservate nel sito anche riferendosi alle altre sezioni in esame. Ad esempio, l'affidabilità delle analisi condotte è stata comprovata dall'osservazione di locali fenomeni di instabilità della coltre che si sono realmente verificati nel recente passato.

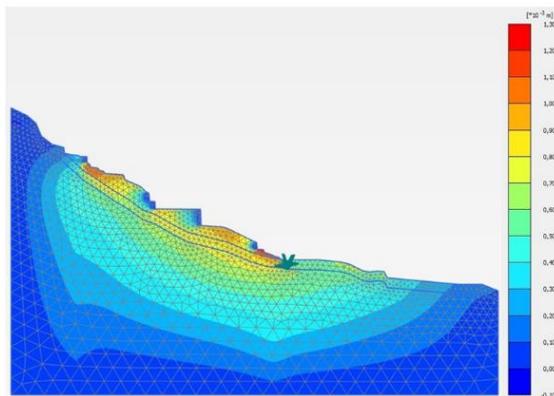


Figura 4 - Spostamenti orizzontali – free field

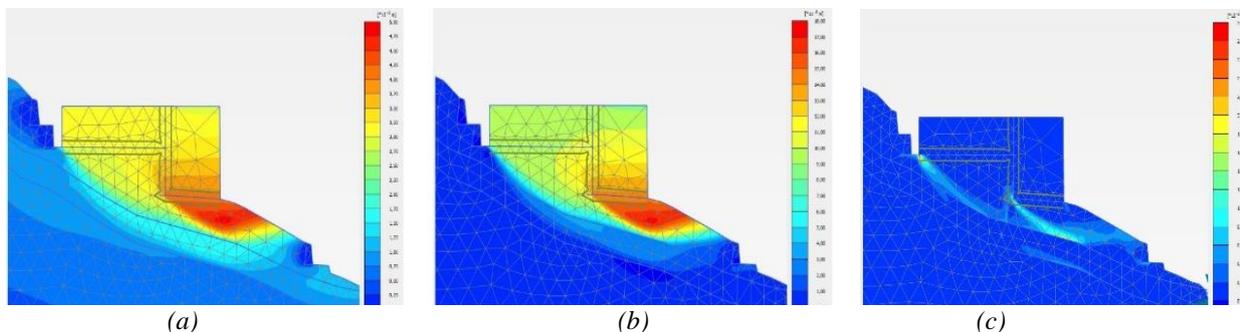


Figura 5 - Spostamenti orizzontali (a) e verticali (b); andamento deformazioni di taglio (c)

4. Analisi del danno

Ottenuti i profili di spostamento al piano di posa delle fondazioni, è stato possibile eseguire un confronto con il quadro fessurativo del complesso di S. Nicolò. Dalla lettura del cedimento al piano di fondazione della Casa dei Pescatori, evidenziato dalle analisi, si può osservare una corrispondenza fra il cedimento relativo alla sezione E e le lesioni individuate; infatti, in corrispondenza del piano terra della Casa dei Pescatori, vi è la presenza di gravi lesioni.

L'effetto di connessione tra i due edifici, che dalle analisi si concretizza nell'effetto di richiamo di una struttura sull'altra, pone in evidenza la criticità di tale porzione del complesso, fatto che è confermato dalla concentrazione dei danni osservati nel transetto lato mare corrispondente alla zona ove si innesta la Casa dei Pescatori (Fig. 6a).

La presenza di altre lesioni con andamento quasi perfettamente perpendicolare (Fig. 6b) rispetto ai dissesti di cui sopra, fa inoltre presupporre la presenza di un fenomeno di cedimento locale dovuto probabilmente a fenomeni di infiltrazione dell'acqua superficiale al di sotto dell'abside della chiesa. Questo aspetto è avvalorato da emergenze idriche dal pavimento, in periodi di pioggia intensa, e dalla presenza di un fossato esterno all'abside nel quale, in occasione di forti piogge, l'acqua tende ad incanalarsi. Il complesso dei risultati ottenuti ha quindi evidenziato una possibile correlazione fra l'apertura delle lesioni e periodi particolarmente piovosi, che necessariamente influenza le oscillazioni del livello di falda e i fenomeni di infiltrazione locale.

Il confronto fra il monitoraggio delle lesioni e le frequenze cumulate di pioggia negli ultimi anni ha mostrato un'effettiva correlazione fra questi fenomeni.



(a) (b)
Figura 6 - Rilievo del quadro fessurativo nel complesso di San Nicolò

Per effettuare infine una valutazione approssimata del danno sono stati considerati i risultati ottenuti per la sezione E, valutando separatamente la condizione di dissesto nei due corpi strutturali di chiesa e Casa dei Pescatori. Per la chiesa, considerando una sezione al piano di posa della fondazione, si ottengono degli spostamenti massimi u_x e u_y dell'ordine di 1 cm, che rapportati alle dimensioni in pianta di 12 m del transetto della chiesa forniscono valori medi di deformazione laterale ϵ_L e distorsione angolare β pari rispettivamente a circa $8 \cdot 10^{-4}$ e $1 \cdot 10^{-4}$.

Analizzando i risultati relativi alla Casa dei Pescatori, gli spostamenti orizzontali risultano essere più elevati, associati anche ad un fenomeno di cedimento differenziale; ciò porta a valori di ϵ_L pari a circa $2,6 \cdot 10^{-3}$ e di β circa a $1,6 \cdot 2 \cdot 10^{-4}$.

I valori di deformazione orizzontale e distorsione angolare sono stati utilizzati per stimare il grado di danno secondo gli approcci suggeriti da Son e Cording (2005) e Schuster et al. (2009); secondo il primo approccio (Fig. 7) il danno risulta da lieve (per la chiesa) a medio (per la Casa dei Pescatori). Analogo risultato si ottiene con il secondo approccio, per il quale l'indice di danneggiamento potenziale DPI è pari rispettivamente a 16 e 52.

Questi risultati sono conformi alle osservazioni reali delle lesioni che infatti appaiono più gravi nel piano seminterrato della Casa dei Pescatori, rispetto invece a quelle della chiesa che, seppur rilevanti, hanno un'apertura generalmente inferiore.

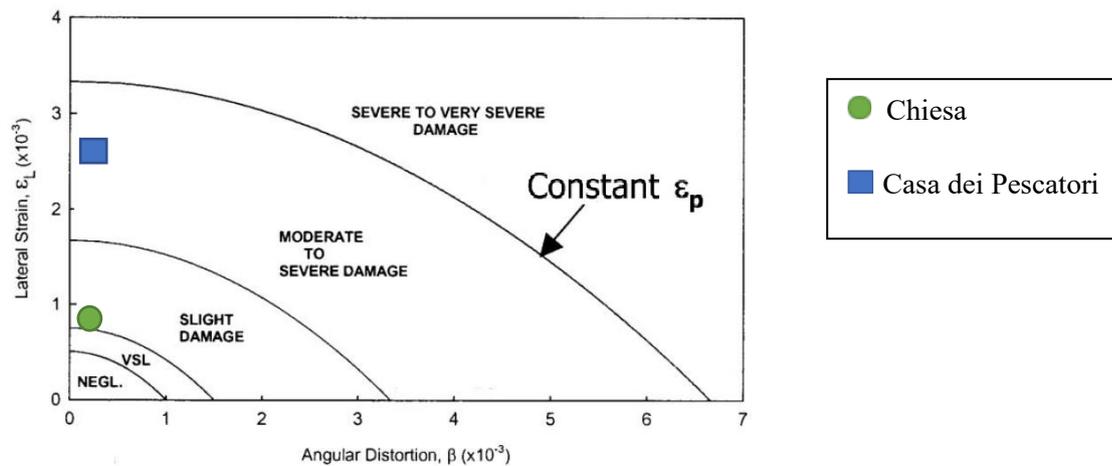


Figura 7 - Abaco per la stima del danno (da Son e Cording, 2005)

5. Conclusioni

Il presente lavoro si inserisce in un più ampio ambito finalizzato anche a proporre una metodologia di approccio per lo studio dei danni su edifici storici; il caso specifico ha trattato il complesso di S.Nicolò di Capodimonte, inserito nella lista dei monumenti nazionali italiani e soggetto a fenomeni franosi. I problemi riscontrati nell'analisi di un sistema complesso hanno riguardato sia aspetti strutturali che geotecnici poiché le informazioni disponibili, ottenute da indagini pregresse, non si sono rivelate, come spesso accade in questi casi, sufficientemente esaustive. A tal proposito le analisi numeriche effettuate sono state semplificate proprio per la mancanza di maggiori informazioni per la caratterizzazione geotecnica e stratigrafica del sito. Ulteriori miglioramenti potranno essere effettuati per l'analisi dell'interazione terreno – struttura, realizzando una migliore schematizzazione della parte in elevazione che tenga conto della complessità strutturale della chiesa. I risultati ottenuti, nonostante le semplificazioni adottate, risultano essere congruenti con il reale grado di danno osservato e permettono di fornire utili indicazioni sia per la necessaria pianificazione di indagini integrative e sia per proporre linee di intervento atte a ridurre la vulnerabilità della struttura e la pericolosità da frana.

Bibliografia

1. Cavaciocchi, P., Lastrico C., Molinari A., Pesce G., Soppa S. (2009) Studi sull'antica Chiesa di San Nicolò di Capodimonte a Camogli. Atti del Seminario "Indagini preliminari al progetto di recupero e restauro della chiesa di S.Nicolò di Capodimonte". Camogli, 9 Giugno 2007.
2. Losacco N., Burghignoli A., Callisto L. (2014) "Uncoupled evaluation of the structural damage induced by tunnelling", *Géotechnique*, 64(8), 646-656.
3. Schuster M, Kung G.T., Juang H., Hashash Y.M. (2009) "Simplified Model of Evaluating Damage Potential of Buildings Adjacent to a Braced Excavation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (12), 1823-1835.
4. Son M., Cording J.E. (2005) "Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2), 162-177.