



L'esigenza della sicurezza sismica nella ricostruzione di un minareto con le tecniche costruttive della tradizione

Claudio Chesi^a, Devin^a, Sandra Tonna^a

^a Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy

Keywords: Minareto, sicurezza sismica, ricostruzione, muratura, fattore di struttura.

ABSTRACT

La distruzione bellica di opere monumentali, dotate di particolare valore storico-architettonico, pone il problema della individuazione di corrette modalità di ricostruzione, nel senso della scelta fra la riproposizione delle strutture originarie e l'adozione di moderni schemi strutturali. Questo problema viene discusso in riferimento al minareto di Ummayyad ad Aleppo, distrutto in occasione degli scontri sul campo dell'artiglieria pesante. Rispetto a quest'opera, di elevato valore iconico per la città di Aleppo, è chiara la volontà di riproduzione della costruzione nelle sue forme originarie, lasciando peraltro aperto il dubbio se il livello di sicurezza sismica della struttura originaria sia oggi accettabile. Il lavoro, nel tentativo di dare risposta alla domanda, presenta uno studio finalizzato preliminarmente alla conoscenza dell'opera sulla base dei documenti esistenti, per poi dar corso alla implementazione di un modello di calcolo, con cui svolgere l'analisi del comportamento strutturale. Questa sembra giustificare, in coerenza con la lunga sopravvivenza nel tempo del minareto, la riproduzione della struttura originaria, non trascurando peraltro l'adozione delle moderne soluzioni tecniche per l'incremento delle prestazioni strutturali.

1 INTRODUZIONE

I recenti episodi di distruzione bellica di opere del patrimonio architettonico in paesi di antica tradizione culturale pongono un interessante problema rispetto alle esigenze della ricostruzione. Nell'ottica infatti della riproposizione delle forme originarie, occorre valutare se il criterio di una fedele conservazione delle strutture dà luogo a risultati coerenti con le attuali esigenze di sicurezza, in particolare rispetto all'azione sismica.

Questo problema è stato analizzato, in particolare, in riferimento al minareto dell'antica moschea di Ummayyad ad Aleppo, distrutto completamente durante gli scontri sul campo dell'artiglieria pesante. Il famoso minareto, di elevato valore iconico per la città di Aleppo, era una costruzione in pietra del XII secolo, sopravvissuto a vicende di varia natura e recentemente restaurato. La volontà di riproduzione

dell'icona è chiara e ben comprensibile, ma lascia aperto il dubbio se il livello di sicurezza sismica della struttura originaria sia oggi accettabile.

Nel tentativo di dare risposta alla domanda, si rende necessario uno studio finalizzato, prima di tutto, alla conoscenza dell'opera, che può di necessità basarsi solo sull'analisi dei documenti esistenti; successivamente, è possibile l'implementazione di modelli di calcolo con cui svolgere lo studio del comportamento strutturale. Questo oggi può essere compiuto, come noto, a diversi livelli di sofisticazione, con il vantaggio e l'interesse di poter mettere a confronto, per la valutazione della resistenza sismica, analisi globali semplificate e studi della risposta basati su modellazioni non lineari.

Tutto ciò, come di seguito discusso in dettaglio, è stato applicato al caso studio in esame, portando a chiare conclusioni sia sulla possibilità di riproposizione dell'opera originaria, sia sulle modalità di esecuzione delle analisi della risposta sismica di strutture a torre con le procedure normalmente in uso.

2 IL MINARETO: UN CASO PARTICOLARE DI STRUTTURA A TORRE

I minareti, in quanto mensole incastrate al piede, sono del tutto affini, dal punto di vista strutturale, a torri e campanili. Presentano peraltro caratteristiche proprie e, in quanto diffusi su un'area geografica molto ampia, tipologie diverse da regione a regione. Il comportamento strutturale dei minareti è pertanto un tema molto studiato in letteratura, soprattutto dal punto di vista della risposta dinamica e, in particolare, alle azioni orizzontali. Come richiamato nel seguito, alcuni dettagli costruttivi denotano la consapevolezza della necessità di sviluppare resistenza alle azioni orizzontali e devono necessariamente essere presi in considerazione nello sviluppo di modelli di calcolo.



Figura 1. Proporzioni tipiche dei minareti.

Un primo aspetto caratteristico riguarda i valori dei rapporti di snellezza, che spesso risultano anche di molto superiori a quelli comu-

nemente in uso per torri e campanili in Italia e, in genere, nell'Europa Occidentale (Fig. 1). Con valori dell'altezza, infatti, normalmente compresi fra 20 a 50 m e della dimensione trasversale variabile fra 2,5 a 6 m, la snellezza può raggiungere rapporti dell'ordine di 1:15, circa doppi di quelli caratteristici della tradizione italiana (Hejazi, 2016).

La sezione trasversale può essere quadrata, ma più spesso si presenta circolare o poligonale a molti lati, costante o variabile sull'altezza, dando luogo ad una forma del minareto cilindrica o conica. Spesso è presente un nucleo interno, con diametro da 0,3 a 1,6 m che, grazie alla connessione creata dalla scala, collabora con la parete esterna, rendendo difficile la definizione di una sezione resistente equivalente; un esempio tipico in questo senso è fornito dal caso studio presentato nel seguito.

Lungo lo sviluppo verticale del minareto, è possibile riconoscere diverse porzioni: un blocco di base, il corpo principale, la corona, il balcone, una porzione conica terminale (la guglia). Spesso, quindi, la massa non è uniformemente distribuita lungo l'altezza, presentando una concentrazione alla base e, in misura minore, alla quota del balcone.

Il minareto è normalmente una costruzione in muratura di mattoni o di pietra; quest'ultima è spesso calcarea, con valori di resistenza a compressione fino a 16 MPa. E' interessante l'impiego di malte speciali, invecchiate a lungo sotto terra, e soprattutto di perni di ferro per migliorare il collegamento fra blocchi di pietra contigui sia in orizzontale sia in verticale, con uso del piombo per la sigillatura dei fori. Il semplice aspetto esteriore suggerisce un'elevata qualità costruttiva in termini di squadratura delle pietre e loro assemblaggio, con giunti di malta di piccolo spessore. Si è quindi spesso in presenza di una muratura monolitica, con accresciuta capacità di resistenza a taglio e, in qualche misura, anche a trazione.

In sintesi, la modellazione del minareto si confronta con la necessità di una appropriata definizione delle proprietà meccaniche del materiale e, al fine di non sottovalutare la resistenza globale, di una corretta rappresentazione del nucleo interno.

3 IL MINARETO DI UMMAYYAD AD ALEPPO

Il minareto (Fig. 2), che costituiva la parte più antica della moschea di Umayyad, fu costruito nel

1089 e rimase in piedi per oltre nove secoli, fino alla distruzione, avvenuta nel 2013 (Fig. 3).



Figura 2. Il minareto di Umayyad prima della distruzione.

Nello stile della Dinastia Umayyad, la sezione trasversale non era circolare ma quadrata. Nel corso della storia, il minareto aveva sperimentato diversi eventi drammatici: incendi (nel 1169, 1260, 1280), terremoti (nel 1169, 1179, 1822) e attacchi durante le guerre (Alafandi & Rahim, 2014).



Figura 3. Le rovine del minareto.

Numerosi interventi di riparazione ebbero luogo nel tempo, modificando via via la struttura originale; un importante lavoro di restauro era stato effettuato fra il 1999 e il 2006, dovuto principalmente all'inclinazione prodotta da cedimenti del terreno. La distruzione, avvenuta nel 2013, venne attribuita ad un evento accidentale durante i bombardamenti sul campo, ma molto più verosimilmente fu intenzionale, come tipicamente accade nel caso di strutture che costituiscono un "falso obiettivo".

Una vista schematica globale del minareto è riportata in Fig. 4, mentre la Fig. 5 mostra il dettaglio della scala e della sezione trasversale. Come appare evidente, la geometria della struttura era stata documentata con un buon livello di dettaglio. La dimensione trasversale, di 4,90 m alla base e 4,65 m in sommità, era quasi costante, con spessore del muro perimetrale di 90 cm. L'altezza complessiva era di 45,4 m con un rapporto di snellezza, quindi, di circa 1:9. Il corpo principale del minareto era costituito da cinque elementi, terminanti con una soletta di 2 m di spessore, che costituiva la base del balcone ed era sormontata da una struttura sommitale leggera: una copertura in legno della terrazza ed un piccolo corpo cilindrico sormontato da una cupola. La sezione trasversale (Fig. 5) mostra la presenza di un nucleo massiccio centrale a sezione quadrata con lato di 1 m, connesso al muro esterno dalle rampe della scala.

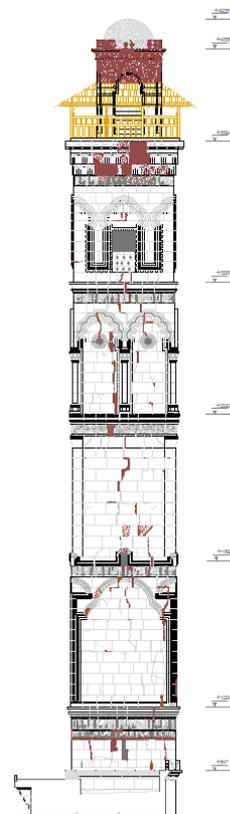


Figura 4. Vista schematica del minareto.

Come mostra la Fig. 6, era presente un ricco apparato decorativo, fortunatamente documentato sia da studi locali (Engineering Office, 1999) sia da un accurato rilievo, eseguito con avanzate tecniche di fotogrammetria sferica (Gussenmeyer & Khalil, 2017; Fangi & Wahbeh, 2013). Il minareto era stato classificato dall'UNESCO come Patrimonio dell'Umanità nel 1986.

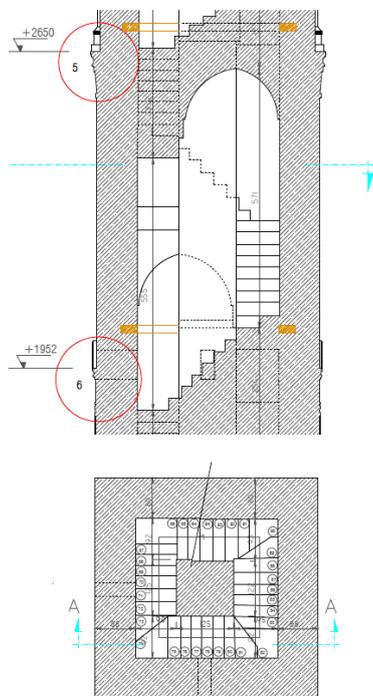


Figura 5. Sezioni verticale e orizzontale.

4 I DATI DI CONTESTO PER LA RICOSTRUZIONE

La possibilità della riproposizione della configurazione originaria in muratura del minareto si basa sulla verifica che possa dar luogo ad un adeguato livello di sicurezza sotto l'effetto dell'azione sismica prevista per il sito e con l'impiego di una pietra simile a quella impiegata per la costruzione originaria.

Per quanto riguarda la pericolosità sismica dell'area, fra i diversi riferimenti possibili, il più significativo sembra essere quello fornito dal Codice Sismico Siriano, la cui mappa di pericolosità risale al 2004; sebbene siano stati svolti diversi studi per l'aggiornamento di questa mappa (Dojcinovski et al, 2012), nessuno di essi è stato ancora recepito ufficialmente. L'unico riferimento significativo è quindi quello del 2004, cui corrisponde la mappa riportata in Fig. 7, che indica, per l'area di Aleppo un valore di PGA compreso fra 0,20 e 0,25 g. La figura mostra

anche lo spettro di risposta adottato che, in mancanza di informazioni specifiche sulla categoria del suolo, fa riferimento a dati tipici dell'area ($C_a = 0,4 - C_v = 0,56$), con una accelerazione di ancoraggio di 0,4 g.



Figura 6. Un esempio del ricco apparato decorativo.

Per quanto riguarda il materiale da costruzione, non sono disponibili dati specifici da letteratura. L'ispezione visiva di campioni prelevati dalle macerie ha consentito però di classificare la pietra impiegata come un calcare, del tutto simile a quello disponibile in cave locali.

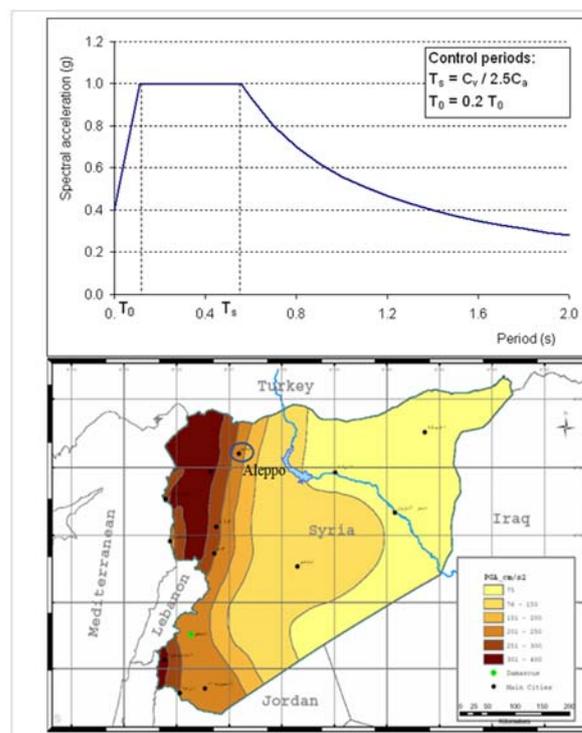


Figura 7. Mappa di pericolosità sismica e spettro di risposta previsti dalle norme siriane..

La ricostruzione potrebbe quindi fare uso di un materiale molto simile a quello originario, per il quale si è ritenuto di far riferimento ai parametri meccanici di seguito indicati, suggeriti da (Turk, 2013):

- Modulo elastico (E) = 2000 MPa
- Peso specifico (w) = 23 kN/m³
- Resistenza a compressione (f_m') = 12 MPa
- Resistenza a trazione (f_t') = 0.88 MPa

5 L'ANALISI NUMERICA

L'analisi di primo livello

La procedura per l'analisi di primo livello delle strutture a torre formulata nelle Linee Guida emesse da (MiBACt, 2011) costituisce un inquadramento preliminare, semplice ma efficace, al problema della capacità di resistenza sismica.

L'applicazione al caso del minareto si basa, nello specifico, sulla individuazione di 8 conci, interpretando le variazioni di sezione dei muri e la presenza di aperture (Fig. 8).

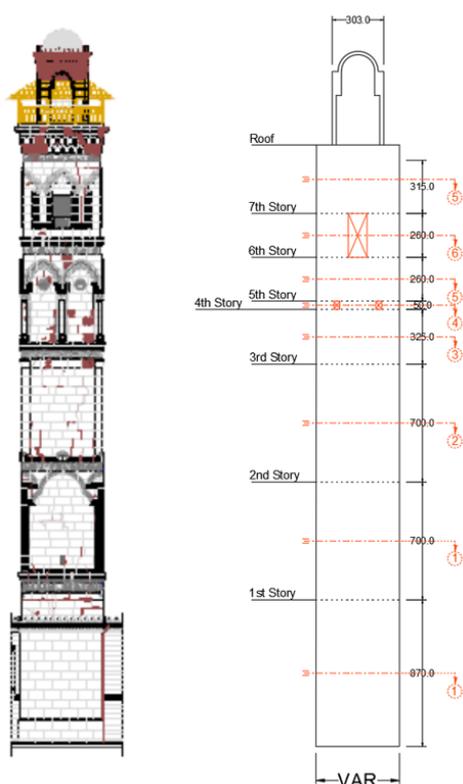


Figura 8. Schematizzazione per l'analisi di primo livello.

Due premesse necessarie all'applicazione del metodo riguardano la stima del periodo proprio e la scelta di un valore per il fattore di struttura. Per quest'ultimo, rispetto al campo di valori indicati dalle Linee Guida, si è ritenuto che la qualità della muratura giustifichi l'assunzione del valore

massimo, pari a 3,6. Per la stima del periodo proprio, mettendo a confronto i risultati di formule semplici (trave continua a massa uniformemente distribuita e mensola con 1/3 della massa concentrata in sommità), si ottengono valori di 1,5 e 1,7 s; si è ritenuto di attenersi al valore più alto di 1,7 s.

La valutazione del momento resistente alla base dei diversi conci porta al diagramma di Fig. 9, che mostra, come atteso, una variazione quasi lineare lungo l'altezza della torre; la ridotta presenza di aperture conferisce regolarità al diagramma.

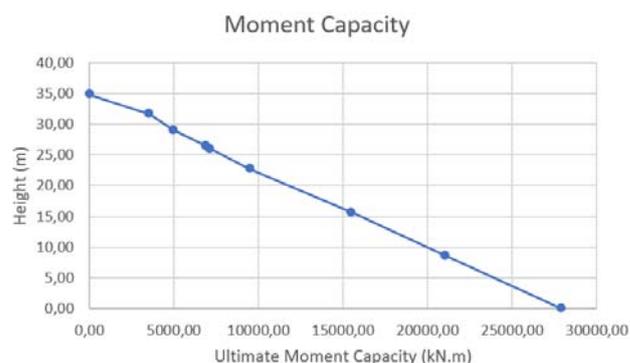


Figura 9. Variazione del momento resistente lungo l'altezza.

La conversione dei momenti resistenti in accelerazioni strutturali è mostrata in Tabella 1, da cui risulta, come atteso, che la massima accelerazione orizzontale cui la struttura può resistere è condizionata dalla sezione di base e corrisponde ad un valore di 0,27 g.

Tabella 1. Accelerazioni strutturali massime.

Piano	$M_{u,i}$ (kN.m)	$S_{e,SLV}$ (g)
Copertura	3557.85	1.43
7	4961.22	0.83
6	6897.12	0.65
5	7149.49	0.62
4	9487.33	0.49
3	15506.84	0.38
2	21059.14	0.31
1	27959.87	0.27

Assumendo il citato valore di 1,7 s per il periodo proprio e tenendo conto della formulazione dello spettro di risposta delle norme siriane, risulta una massima accelerazione del terreno di 0,31 g. Facendo riferimento allo spettro di risposta di progetto di Fig. 7, si ottiene quindi per il fattore di sicurezza sulle accelerazioni la seguente stima:

$$f_a = \frac{0,31}{0,40} = 0,78 \quad (1)$$

Il valore, molto prossimo a 0,8, indicherebbe risorse sismiche della struttura molto prossime a quelle minime richieste per costruzioni esistenti.

5.1 L'analisi di push-over

Allo scopo di avere una valutazione più precisa della sicurezza sismica, è stato implementato un modello ad Elementi Finiti del minareto, con cui svolgere un'analisi di push-over mediante il codice di calcolo Abaqus (D'Ambrisi et al, 2012; Bocciarelli & Barbieri, 2017). Nel modello sono stati schematizzati, per mezzo di 1869 elementi di tipo shell, i muri perimetrali del minareto, mentre non è stato rappresentato il complesso sistema della scala e del nucleo centrale, che viene considerato solo dal punto di vista dell'apporto di massa. La semplificazione è stata adottata a causa della mancanza di informazione sul reale grado di connessione del sistema della scala con il muro esterno.

L'analisi modale ha fornito, per i primi due modi principali, entrambi traslazionali, valori del periodo proprio in linea con le previsioni basate sulle sopra citate formule semplificate: 1,75 s per il primo modo e 1,74 s per il secondo.

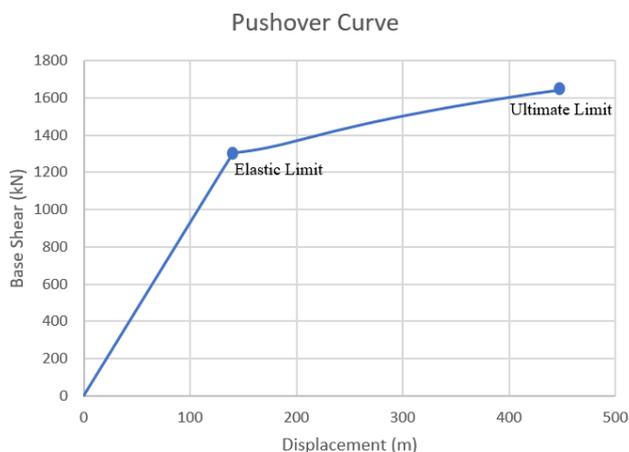


Figura 10. Curva di capacità – distribuzione lineare.

Ai fini dell'analisi non lineare è stato adottato, per la muratura, il "Concrete plasticity model", il cui impiego è ritenuto efficace da molti autori anche per lo studio della muratura (Resta et al, 2013). Un aspetto particolarmente delicato nell'impiego di questo modello di materiale riguarda la definizione dei parametri che lo caratterizzano ed in particolare dell'angolo di

dilatazione (ψ), per il quale è stato assunto il valore di 10° .

L'analisi è stata svolta per le due distribuzioni di forze orizzontali normalmente usate, quella uniforme e quella proporzionale alla deformata del primo modo. Le due curve di capacità ottenute, in termini di taglio al piede e spostamento in sommità, sono rappresentate nelle Figg. 10 e 11.

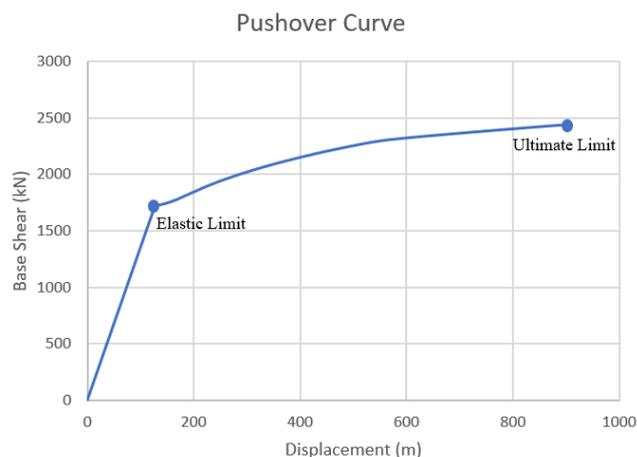


Figura 11. Curva di capacità – distribuzione uniforme.

Il modello di calcolo riproduce correttamente l'evoluzione dello stato di sollecitazione nella sezione di base, di cui le Figg. 12 e 13 mostrano la situazione in termini di sforzi nelle due condizioni di raggiungimento del limite elastico e del limite ultimo.

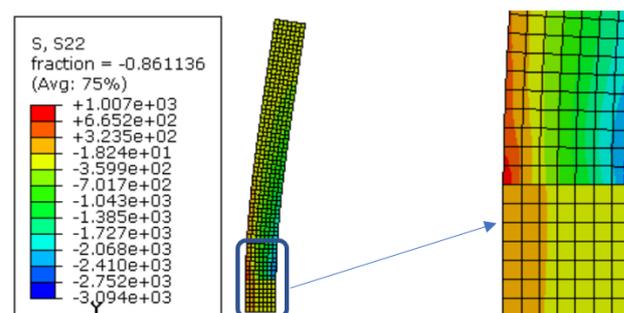


Figura 12. Sforzi verticali alla base al limite elastico (distribuzione forze lineare).

Eseguita la conversione delle curve di capacità in quelle del sistema equivalente ad un grado di libertà secondo il criterio dell'Eurocodice 8, la verifica finale nel dominio spostamento-accelerazione è riportata nelle Figg. 14 e 15, rispettivamente per la distribuzione di forze proporzionale al primo modo e costante. Come appare chiaramente, il minareto sembra possedere risorse di duttilità sufficienti per risultare

verificato, in entrambi i casi analizzati, rispetto allo spettro di risposta prescritto dalle norme siriane per il sito di Aleppo.

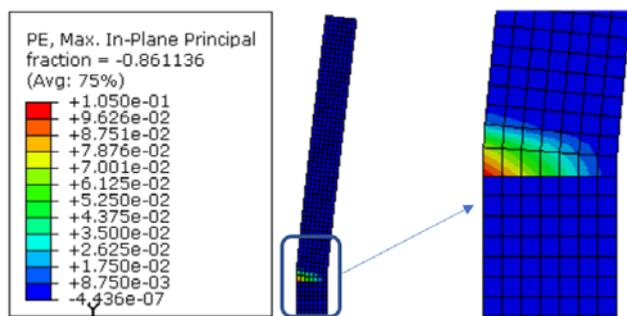


Figura 13. Sforzo principale plastico alla base allo stato limite ultimo (distribuzione forze uniforme).

Come prevedibile, l'analisi di primo livello fornisce un risultato conservativo, fornendo un fattore di sicurezza sulle accelerazioni (0,8) inferiore a quelli relativi agli spostamenti, derivanti dall'analisi di push-over (1,03 in entrambi i casi). E' interessante peraltro osservare che i valori del fattore di struttura forniti dall'analisi di push-over sono rispettivamente pari a 1,78 e 1,71 in netto contrasto con quello assunto a base dell'analisi di primo livello, pari a 3,6. Ne consegue che i margini di conservativismo insiti in questo tipo di analisi sono molto elevati, probabilmente in connessione con il criterio di valutazione del momento resistente, che prescinde completamente dalle risorse di resistenza a trazione del materiale. Va peraltro sottolineato che gli studi presenti in letteratura giungono, rispetto a questo problema, a conclusioni diverse (Bocciarelli, 2017; Valente & Milani, 2016).

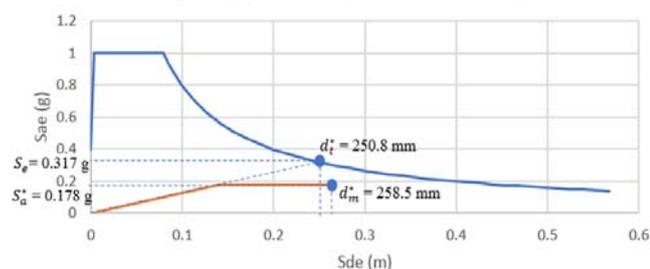


Figura 14. Confronto capacità-domanda (distribuzione forze lineare).

6 CONCLUSIONI

Le analisi numeriche svolte confermano l'evidenza dei fatti: la struttura del minareto è stata in grado di resistere per lungo tempo a sollecitazioni di vario tipo ed è collassata per una

ragione puramente antropica, del tutto indipendente da problemi legati alla resistenza del materiale o ad azioni ambientali. Il margine di sicurezza sismica non è particolarmente ampio, come prevedibile, ma l'analisi non considera alcune risorse della struttura: l'effetto del nucleo interno e della scala e l'accresciuta qualità del materiale dovuta ai particolari costruttivi (probabile elevata qualità della malta e collegamenti meccanici fra i blocchi di muratura).

In vista della ricostruzione del minareto, la tipologia strutturale originaria in muratura sembra quindi proponibile. E' importante peraltro sottolineare che alcuni particolari tecnologici non ben noti, caratteristici delle modalità costruttive originarie, sarebbero difficilmente replicabili; essi tuttavia potrebbero essere efficacemente sostituiti da soluzioni derivate dalle moderne tecnologie, quali la cerchiatura ai piani, l'uso di malte di elevata qualità, l'eventuale predisposizione di armature longitudinali, eventualmente di pre-compressione.

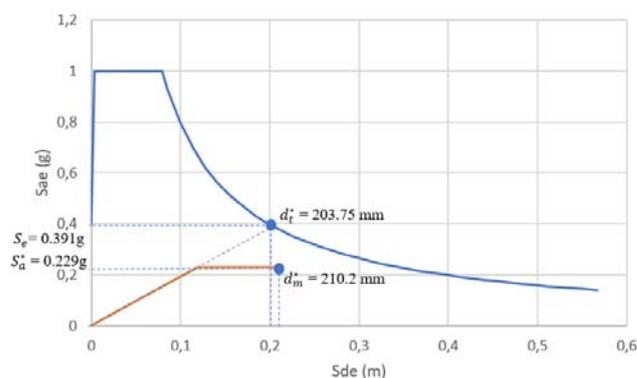


Figura 15. Confronto capacità-domanda (distribuzione forze uniforme).

BIBLIOGRAFIA

- Alafandi, R., Rahim, A.A., 2014, Umayyad mosque in Aleppo yesterday, today and tomorrow, *International Journal of Arts & Sciences*, **07**(05), 319-347.
- Bocciarelli, M., 2017, On the behavior factor of masonry towers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **101**, 81-89.
- Bocciarelli, M., Barbieri, G., 2017, A numerical procedure for the pushover analysis of masonry towers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **93**, 162-171.
- D'Ambrisi, A., Mariani, V., Mezzi, M., 2012, Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests, *Engineering Structures*, **36**, 210-219.
- Dojcinovski, D., Mihailov, V., Ssayed, H.M., Zaineh, H. E., 2012, Re-Evaluations of Seismic Hazard of Syria, *International Journal of Geosciences*, **3**, 847-855.
- Fangi, G., Wahbeh, W., 2013, The destroyed minaret of the Umayyad mosque of Aleppo, the survey of the original

- state, *European Scientific Journal*, Special edition, **4**, 403-409.
- Engineering Office (The), 1999, Study project to rehabilitate the Umayyad Mosque in Aleppo, Aleppo University, Aleppo.
- Grussenmeyer, P., Al Khalil, O., 2017, From metric image archives to point cloud reconstruction: case study of the great mosque of Aleppo in Syria, *26th International CIPA Symposium*, August 28–September 01, Ottawa, Canada.
- Hejazi, M., Moayedian, S.M., Daei, M., 2016, Structural analysis of Persian historical brick masonry minarets, *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, **30**(2), 1-9.
- MiBACt (Ministero per i Beni e le Attività Culturali), 2011, Linee Guida per la valutazione del rischio sismico del patrimonio culturale on riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008.
- Resta, M, Fiore, A., Monaco, P., 2013, Non-linear Finite Element Analysis of Masonry Towers by Adopting the Damage Plasticity Constitutive Model, *Advances in Structural Engineering*, **16**(5), 791-803.
- Turk, M., 2013, Seismic Response analysis of masonry minaret and possible strengthening by fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) materials, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. **2013**, 1-14.
- Valente, M., Milani, G., 2016, Seismic assessment of historical masonry towers by means of simplified approaches and standard FEM, *Construction and Building Materials*, **108**, 74-104.