

# Applicazione del metodo life cycle cost su struttura storica in muratura portante soggetta ad azione sismica

Federico Colussi, Rosario Ceravolo, Alessandro De Stefano, Andrea Alberto

31 luglio 2015

## Abstract

Il lavoro di analisi è consistito nell'applicazione del metodo di life cycle cost, introdotto da Wen e Kang [9] nel 2001, ad una struttura strategica e rappresentativa della muratura portante soggetta a pericolo sismico, con l'obiettivo di quantificare in termini monetari l'efficacia ed utilità delle indagini conoscitive della compagine muraria. Attualmente i vantaggi derivanti da una migliore conoscenza del comportamento meccanico della muratura esistente consistono in un incremento delle resistenze di design del materiale stesso, ma spesso i costi e l'incertezza sull'efficacia delle analisi rendono le campagne di indagini poco sfruttate. In questo lavoro si è cercato, mediante l'utilizzo di un innovativo metodo prestazionale che prevede analisi di tipo non lineare, di rendere apprezzabile come la spesa necessaria a caratterizzare la muratura sia giustificata da un più affidabile comportamento dell'edificio, oltre che ad un'ottimizzazione degli interventi eventualmente utili.

## Il corpo M dell'ospedale SS Annunziata di Savigliano

La struttura scelta per applicare il metodo è l'ala denominata corpo M del complesso ospedaliero SS Annunziata di Savigliano, in provincia di Cuneo (Figura 1).

L'edificio, la cui costruzione risale al 1771, si presenta con una pianta particolarmente allungata, i due lati principali misurano infatti rispettivamente 105 e 21 m, per un'area di piano di circa 2000 mq. La struttura è posta su 3 livelli e raggiunge una quota di 10,5 m dal piano campagna ma il piano sottotetto, a causa del deterioramento della copertura, non è attualmente agibile.

Le prime ispezioni, rese possibili dalla collaborazione con l'ufficio tecnico dell'Usl, sono servite a verificare la presenza dei presupposti necessari ad effettuare un'analisi sismica globale; in particolare è stato verificato lo stato delle fondazioni (di tipo continuo), l'efficacia degli ammorsamenti parete-solaio (mediante cordolo in calcestruzzo armato), l'attenuazione della spinta orizzontale dovuta alle volte nei solai (assorbita dalle numerose catene già presenti), il comportamento rigido dei solai (irrigiditi da una rete elettrosaldata annegata in una soletta di 4 cm di calcestruzzo). La struttura, a seguito dei diversi interventi susseguitesesi negli anni, è stata quindi definita conforme alle ipotesi necessarie per poter effettuare le analisi.

## Modellazione

Per la modellazione della struttura è stato utilizzata la schematizzazione a telaio equivalente [5, 6, 7], capace di produrre le tensioni e deformazioni utili all'applicazio-

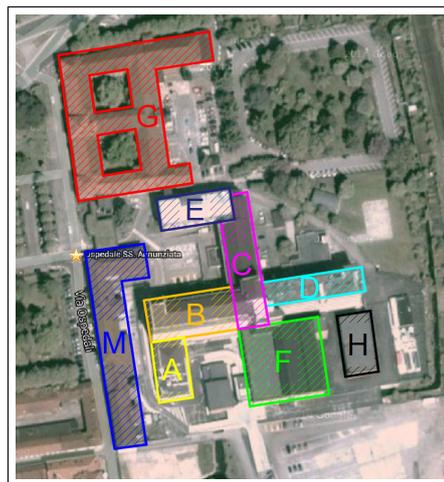


Figura 1: Suddivisione dei diversi corpi di fabbrica dell'ospedale SS. Annunziata

ne del metodo di life cycle cost oltre che all'esecuzione delle verifiche classiche proposte dalle NTC 08. In particolare sono stati generati 4 distinti modelli: 2 modelli completi per eseguire le verifiche di resistenza previste dall'attuale normativa (soggetti ad analisi dinamico lineare/modale) e 2 modelli semplificati analizzati con il metodo pushover (analisi statica non lineare).

I modelli utilizzati per ogni analisi sono 2 in quanto sono stati volutamente considerati 2 distinti *livelli di conoscenza*, LC1 ed LC3, distinzione necessaria per valutare l'efficacia della conoscenza raggiunta sulla struttura; si rimanda il lettore all'appendice 8 delle NTC per maggiori approfondimenti.

Il software FEM utilizzato per eseguire tutte le analisi sopra descritte, nonché per la modellazione dello stabile, è *Dolmen CAD 3D struttura e Murature Portanti*, com-

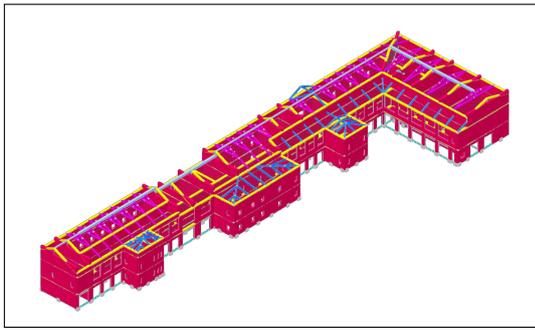


Figura 2: Modello FEM

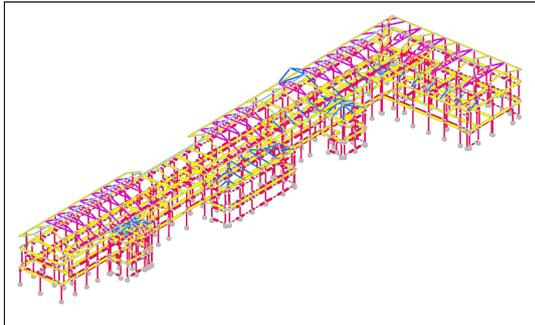


Figura 3: Modello a telaio equivalente per analisi *lineare*

mercializzato dalla *CDM Dolmen e omnia IS s.r.l.*, che attraverso i moduli relativi alla costituzione del modello e all'analisi sismica della muratura ha rappresentato uno strumento completo per poter eseguire le analisi necessarie.

Come osservabile dalle Figure 3 e 4, il modello analizzato con la metodologia del pushover si presenta decisamente più snello: da questo sono stati rimossi tutti gli elementi che non influiscono sul comportamento *plastico* della struttura, tra cui le capriate di copertura, al fine di ridurre i tempi di calcolo.

### Verifiche secondo le NTC 2008

A seguito delle analisi eseguite è stato possibile eseguire le verifiche previste dalle NTC ed accertarsi in modo qualitativo dell'importanza dell'incremento di resistenza caratteristico del modello con LC3: quest'ultimo infatti non è soggetto in nessun elemento alle crisi

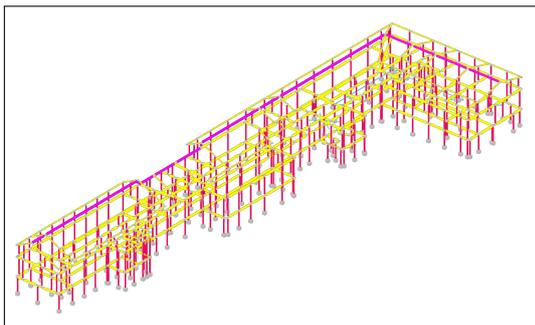


Figura 4: Modello a telaio equivalente per analisi *non lineare*

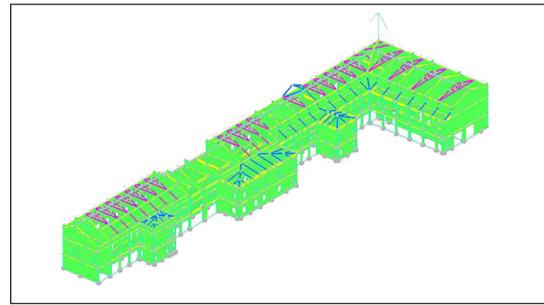


Figura 5: Esito delle verifiche sul modello con LC3

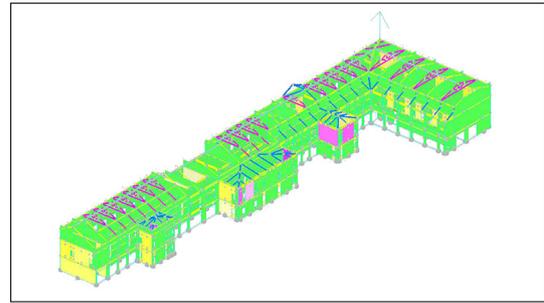


Figura 6: Esito delle verifiche sul modello con LC1

per pressoflessione e taglio che invece si presentano nel modello con LC1.

Nelle Figure 5, 6, è riportato a livello cromatico lo stato dei singoli elementi secondo le convenzioni del software Dolmen:

Verde: l'elemento risulta verificato per tutte le sollecitazioni considerate;

Viola: l'elemento presenta problemi di instabilità per *pressoflessione nel piano*;

Azzurro: l'elemento presenta problemi di instabilità per *pressoflessione fuori dal piano*;

Giallo: l'elemento presenta problemi per *taglio*;

Grigio: l'elemento presenta problemi di *instabilità locale* (verifica come elemento secondario nei confronti della direzione del sisma perpendicolare al piano del pannello).

Senza entrare nel merito della "quantificazione del beneficio" dovuto alla migliore conoscenza della struttura, è fin da ora visibile come quest'ultima possa effettivamente fare la differenza in fase di progetto di intervento: si sottolinea come i 2 modelli siano di fatto legati alla medesima struttura, e che quindi in questo caso è la sola conoscenza della muratura, a seguito delle indagini previste, a rendere superfluo un intervento migliorativo.

### Applicazione del metodo di life cycle cost

Il metodo prestazionale del life cycle cost si presenta come innovativa metodologia in grado di determinare il costo di gestione totale (inteso, sinteticamente, come sommatoria delle spese a cui uno stabile sarà soggetto)

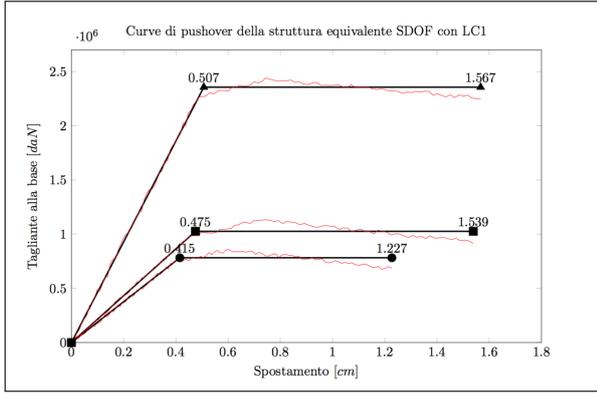


Figura 7: Curve di pushover SDOF, struttura con LC1

derivante dal pericolo sismico a cui una struttura è soggetta.

Onde evitare di perdersi nella descrizione del metodo ci si limita a dire che questo si propone di determinare, per diversi livelli di rischio scelti dal progettista, un *damage index* associato (in questo caso il drift interpiano), necessario a ricavare le cosiddette “curve di fragilità”, che legano i drift di interpiano ad una probabilità di superamento, basata sul modello poissoniano. Attraverso l’associazione dei drift stessi a diverse categorie di costo a cui la struttura è soggetta a fini manutentivi, e considerando la vita utile dello stabile, è possibile determinare il costo di gestione totale.

Si rimanda il lettore agli articoli di Wen [9], [10] per una spiegazione dettagliata della metodologia.

Le curve di pushover relative ai diversi impalcati della struttura, ottenute variando il punto di controllo sulle 3 diverse quote dei solai, sono prodotte dal software; al progettista non rimane che applicare il metodo N2, basato sugli spettri di risposta anelastici ricavati in funzione della duttilità strutturale osservata, ed ottenere i drift interpiano associati agli stati di limite di operatività, danno, salvaguardia della vita, e collasso (le rispettive probabilità di superamento nell’arco di vita della struttura sono 81, 63, 10, 5%). Si è scelto in questa sede di limitarsi ai 4 stati limite previsti dall’attuale normativa: nulla vieta di considerarne un numero maggiore per meglio interpolare la curva di fragilità.

In Figura 7 è riportata a titolo esemplificativo la curva di pushover SDOF (*single degree of freedom*) relativa alla struttura con LC1 prodotta da Dolmen: nell’immagine sono accorpate le 3 diverse bilatere relative ai 3 solai.

Attraverso le curve di pushover, applicando il metodo N2 ([1, 2]), è possibile determinare i drift interpiano associati ai diversi spettri elastici (SLE) e anelastici (SLU); il metodo è graficamente riassunto dalla Figura 8, si rimanda ai 2 articoli sopracitati per maggiori approfondimenti.

Come intuibile, nel grafico lo spostamento è determinato dall’intersezione tra la curva di pushover (capacità) e lo pseudo spettro anelastico (domanda).

Dalle coppie di valori *probabilità di superamento - drift associato* è possibile ottenere per interpolazione esponenziale la curva di fragilità, in grado di esprimere

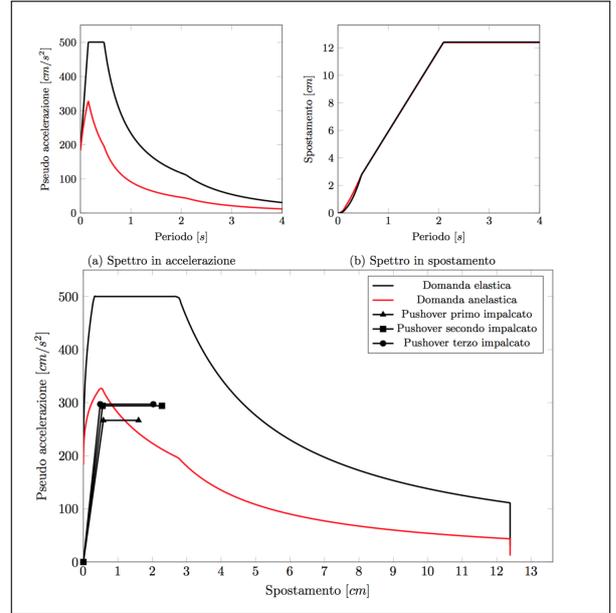


Figura 8: Sintesi grafica del metodo N2

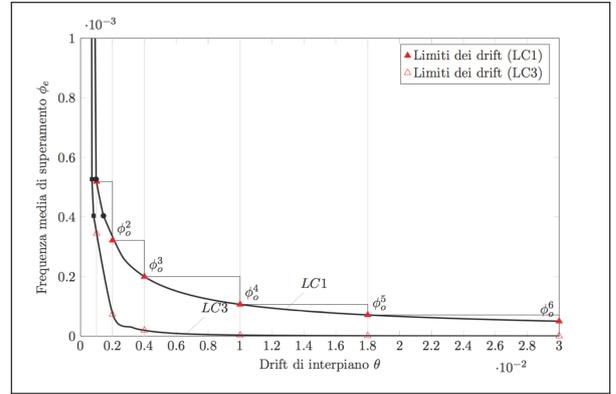


Figura 9: Curva di fragilità del 2° impalcato

la frequenza media di accadimento di un determinato drift. Viene riportata in Figura 9 la curva di fragilità relativa al 2° impalcato.

Attraverso la definizione delle curve di fragilità di tutti gli impalcati, sia per la struttura con LC1 che con LC3, è possibile applicare la formula proposta da Wen e Kang [9] ed ottenere i costi associati alle strutture suddivise per piano.

Il costo totale è quindi determinato come sommatoria di diversi contributi:

$$C_{tot}^i = C_{dam}^i + C_{con}^i + C_{ren}^i + C_{inc}^i + C_{inj}^i + C_{fat}^i$$

Dove:

$C_{dam}^i$ : costo di riparazione dei danni subiti in seguito al sisma;

$C_{con}^i$ : costo derivante dai danni ad attrezzature, impianti, arredi;

$C_{ren}^i$ : mancato reddito associato a canoni di affitto o altri diritti sull’immobile;

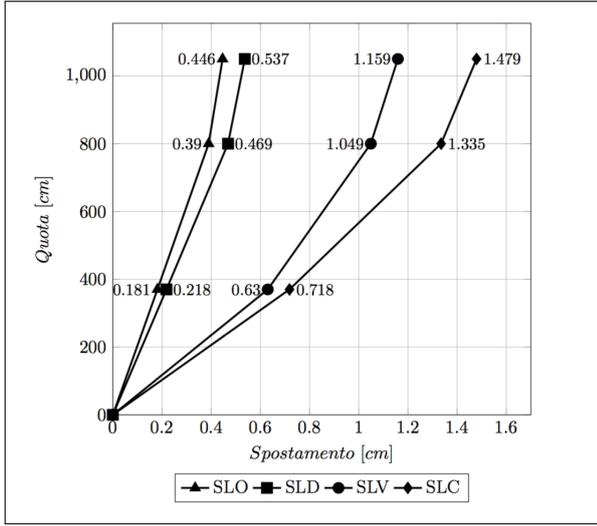


Figura 10: Drift interpiano, struttura con LC1

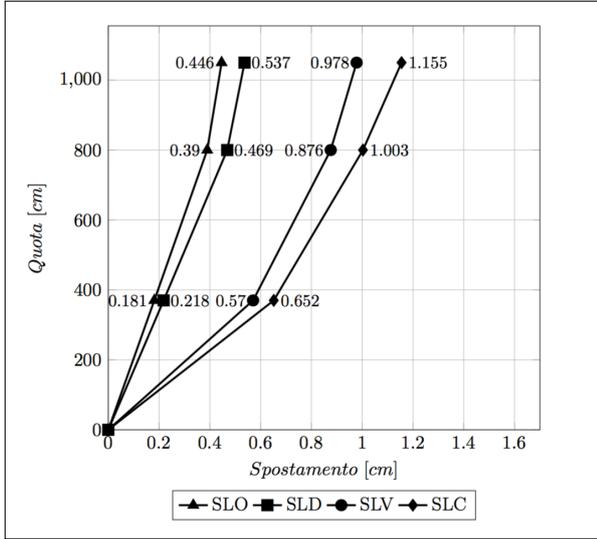


Figura 11: Drift interpiano, struttura con LC3

$C_{inc}^i$ : mancato reddito associato alla perdita di entrate nel periodo di dismissione;

$C_{inj}^i$ : costo associato agli infortuni causati dal sisma;

$C_{fat}^i$ : costo associato alle perdite di vite umane causate dal sisma;

L'apice  $i$  sta ad indicare l' $i$ -esimo stato di danno: stato di degradazione della struttura individuato mediante un associato drift ratio (in questo studio se ne sono considerati 7). È comunque visibile (Figure 10, 11) come la struttura con LC3 sia decisamente più rigida, soprattutto quando si considerano gli stati limite ultimi, in cui è superato il limite elastico determinato dalle curve di pushover.

Si riporta di seguito la formula proposta da Wen [9] per determinare il costo totale in funzione del tasso di interesse medio  $\lambda$ , del costo associato ai 7 stati di danno considerati e delle probabilità di accadimento degli stati di danno stessi.

Tabella 1: Costi relativi alla struttura con LC1

	PIANO 0 Costo €	PIANO 1 Costo €	PIANO 2 Costo €
1-None	-	-	-
2-Slight	3330.80	740.96	105.71
3-Light	7593.48	3223.45	411.55
4-Moderate	8232.36	9715.54	987.17
5-Heavy	2534.21	8762.72	693.16
6-Major	1298.44	9462.89	628.92
7-Destroyed	1038.47	32573.77	1279.19
Costo totale $C_{TOT}(t)$	24027.76	64479.33	4105.70
		<b>92 612.79 €</b>	

Tabella 2: Costi relativi alla struttura con LC3

	PIANO 0 Costo €	PIANO 1 Costo €	PIANO 2 Costo €
1-None	-	-	-
2-Slight	2984.04	752.64	97.59
3-Light	6215.10	1424.13	474.29
4-Moderate	6897.77	1683.80	1460.38
5-Heavy	2179.10	570.32	1318.52
6-Major	1136.32	311.84	1428.87
7-Destroyed	931.73	273.77	4697.99
Costo totale $C_{TOT}(t)$	20344.06	5016.48	9477.63
		<b>34 838.18 €</b>	

$$C_{TOT}(t) = \nu \left( \frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda} \right) \sum_1^7 C_{tot}^{i,\theta} P_o^i$$

I costi derivanti dall'analisi, suddivisi per piano e per categoria, sono sintetizzati nelle Tabelle 1, 2 ed esposti per via grafica nelle Figure 12 e 13.

I costi relativi alla struttura con LC1 si dimostrano effettivamente superiori a quelli della struttura con LC3, come presunto:

$$\Delta_{Costo} = 92\,612.79 - 34\,838.18 = 57\,774.61 \text{ €}$$

Per definire in modo affidabile l'efficacia delle indagini conoscitive in termini economici, come proposto dal metodo, manca il confronto tra la spesa necessaria ad ottenere i 2 diversi livelli di conoscenza: questa è funzione delle analisi discrezionalmente prescritte dal progettista, stimate sulla base di prezzi ricavati dal prezzario della Camera di Commercio e da preventivi avanzati da laboratori privati agenti nel settore.

$$Indagini_{LC1} = 7\,399.20 \text{ €}$$

$$Indagini_{LC3} = 54\,499.20 \text{ €}$$

Considerando il costo appena introdotto, la differenza del costo totale relativo ai 2 livelli di conoscenza risulta:

$$\Delta_{Costo} = 100\,011.99 - 89\,337.38 = 10\,674.61 \text{ €}$$



Figura 12: Costi relativi alla struttura con LC1

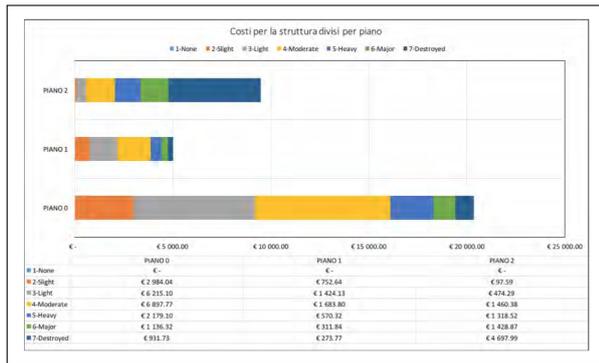


Figura 13: Costi relativi alla struttura con LC3

Il risultato dell'analisi, per quanto variabile in funzione della scelta e del costo delle indagini, è una differenza di costo che quantifica in modo deciso l'utilità e l'efficacia delle indagini sulla muratura e di quanto l'attuale normativa le incentivi, concedendo un margine di incremento delle resistenze di design davvero importante.

L'analisi di life cycle cost proposta inizialmente da Wen per le strutture in telaio metallico e successivamente applicata da diversi autori ai telai in calcestruzzo armato [3, 4, 8], in questa sede si è confermata un'affidabile strumento decisionale riguardo l'utilità sismica di un intervento, anche se in questo caso all'intervento si è sostituita l'efficacia della conoscenza sulla struttura stessa.

Per qualsiasi tipo di edificio, ma soprattutto per quelli con valore storico, non è mai da sottovalutare l'idea di investire preliminarmente in una maggiore conoscenza della struttura prima di eseguire interventi migliorativi o adeguativi.

## Riferimenti bibliografici

- [1] P. Fajfar e M. Fischinger. «A method for non-linear seismic analysis of regular buildings». In: *9th World Conference on Earthquake Engineering* (1988).
- [2] S.A. Freeman. «The capacity spectrum method as a tool for seismic design». In: *11th European Conference on Earthquake Engineering* (1998).

- [3] A.J. Kappos e Dimitrakopoulos. «Feasibility of pre-earthquake strengthening of buildings based on cost-benefit and life-cycle cost analysis, with the aid of fragility curves». In: *Natural Hazards, Vol.28* (2008).
- [4] N.D. Lagaros. «Life-cycle cost analysis of design practices for RC framed structures». In: *Bulletin of Earthquake Engineering* (2007).
- [5] G. Magenes, D. Bolognini e C. Braggio. «Metodi semplificati per l'analisi sismica non lineare di edifici in muratura». In: *GNDT - Gruppo Nazionale Difesa Terremoti* (2000).
- [6] G. Magenes e A. Della Fontana. «Simplified non-linear seismic analysis of masonry buildings». In: *5th International Masonry Conference* (1998).
- [7] G. Magenes e Calvi G. M. «Prospettive per la calibrazioni di metodi semplificati per l'analisi sismica di pareti murarie». In: *La Meccanica delle Murature tra Teoria e Progetto* (1996).
- [8] C. C. Mitropoulou, N.D. Lagaros e Papadrakakis M. «Life-cycle cost assessment of optimally designed reinforced concrete buildings under seismic actions». In: *Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research* (2011).
- [9] Y.K. Wen e Y.J. Kang. «Minimum building life cycle cost design criteria I: methodology». In: *American Society of Civil Engineers* (2001).
- [10] Y.K. Wen e Y.J. Kang. «Minimum building life cycle cost design criteria II: applications». In: *American Society of Civil Engineers* (2001).