

Un algoritmo per l'ottimizzazione strutturale topologica di edifici irregolari in muratura armata

A method of structural topology optimization of irregular reinforced brick masonry buildings

Ennio Casagrande¹ ■

Sommario

In questo articolo si presenta un metodo per l'ottimizzazione strutturale topologica di edifici in muratura armata. Attraverso l'implementazione di un algoritmo per la ricerca dell'eccentricità di impianto (M.I.T., D.M. 17/01/2018; 2018) è stato possibile definire un sistema di equazioni non lineari, in grado di ricercare le lunghezze e la corrispondente posizione di ogni singolo pannello murario, sottoposto ad un sistema di vincoli di dimensionamento.

Dopo la descrizione del metodo, l'articolo propone un esempio di ottimizzazione strutturale di un edificio irregolare sottoposto a vincoli dimensionali architettonici. Il contributo si conclude con l'esposizione dei risultati e la descrizione dei possibili sviluppi futuri.

Parole chiave: Muratura armata, sismica, ottimizzazione strutturale, edifici irregolari.

Abstract

This paper presents a new procedure to design a Reinforced Brick Masonry building (RBM) by topology structural optimization. The minimization of torsional effect (M.I.T., D.M. 17/01/2018; 2018) was founded by nonlinear system equation of position and relative length of single masonry wall.

After introduce a new procedure, the paper describes the optimization design of irregular RBM building subject to architectural boundary condition. The results and the future developments of the new procedure was presented.

Keywords: Reinforced brick masonry, seismic, irregular building, topology optimization.

1. Introduzione

La continua ricerca di forme esteticamente complesse per la realizzazione di nuovi edifici residenziali, commerciali o direzionali tende, sempre più, a separare il flusso progettuale tra parte architettonica e parte strutturale. Dapprima, infatti, si tende a creare la forma architettonica dell'involucro; solo successivamente essa viene sottoposta ad analisi strutturale con l'intento di dimensionare gli elementi portanti (Casagrande, 2018).

Per gli edifici in muratura ordinaria e armata, ad esempio, l'inserimento dei setti di muratura avviene solamente dopo la definizione del ben noto layout architettonico e delle relative esigenze prospettive ed estetiche.

In un'ottica ideale, invece, il progetto architettonico dovrebbe essere concepito come "fusione" delle esigenze strutturali ed impiantistiche con l'obiettivo di ricercare, pertanto, una soluzione che sia in grado di *soddisfare* tutte le condizioni al contorno: questo è il caso tipico di ciò che avviene per la realizzazione delle tensostrutture, dove, la forma architettonica è il risultato di un particolare processo strutturale (Mezzi et al., 2006; Casagrande, 2011).

Una metodologia pratica che si sta diffondendo attualmente in altri paesi è quella di progettare con una modalità "semplificata", attraverso una parametrizzazione di quelle che sono le esigenze statiche e dinamiche che dovrà possedere la nuova costruzione (Meli, 2011; Porst, 2015).

Nel campo della muratura ordinaria e armata, anche la nuova normativa strutturale italiana (M.I.T., D.M. 17/01/2018; 2018) al paragrafo 4.5.6.4 ammette la verifica semplificata di edifici in muratura, purché essi rispettino determinati vincoli tra i quali spicca un'altezza massima di interpiano pari a 3,5 m, una snellezza inferiore a 12, una planimetria inscritta in un rettangolo il cui rapporto tra lato inferiore e maggiore non sia inferiore a 1/3 e un carico massimo variabile inferiore a 3,00 kN/m².

Con tali "imposizioni" strutturali, quindi, è possibile concepire un'estetica e una funzionalità attraverso una fusione di tipo strutturale senza incorrere, successivamente, a varianti oppure a problematiche inerenti il comportamento dell'impianto strutturale in condizioni sismiche.

¹ Ingegnere libero professionista - ✉ ennio.casagrande@gruppcasagrande.it

Tuttavia, le imposizioni che rispettano le caratteristiche delle costruzioni semplici si basano sul concetto di **regolarità della pianta**. Infatti, qualora, l'edificio si scosti da quello che è il requisito geometrico, esso rientra nell'ambito delle strutture definite irregolari e quindi trattato alla stregua delle verifiche per gli edifici ordinari (Petrini et al., 2004).

Attualmente una progettazione attenta alle esigenze sismiche cerca di ridurre al minimo quelle che sono i fattori che amplificano le sollecitazioni sugli elementi verticali, in questo caso, i setti in muratura. Infatti, per gli edifici irregolari, il fattore che amplifica la sollecitazione flettente e il taglio in un ipotetico pannello murario è l'effetto torcente che si genera tra il baricentro delle masse e il baricentro delle rigidezze.

Attraverso il concetto base per la progettazione delle tensostrutture (Casagrande, 2011) un nuovo edificio in muratura potrebbe essere concepito a livello strutturale e architettonico seguendo la logica dell'**ottimizzazione topologica** (Gatti, 2014), già impiegata con successo nel progetto degli edifici in calcestruzzo armato (Kulkarni et al., 2016). Per quanto concerne il caso degli edifici in muratura ordinaria e armata, il processo di ottimizzazione può essere definito come una sorta di *size and topology optimization*. Infatti, a livello del singolo pannello murario, l'ottimizzazione riguarda principalmente la dimensione (lunghezza) del setto murario (*size optimization*), mentre per quanto attiene la distribuzione delle pareti all'interno del layout, l'ottimizzazione si configura come una sorta di ottimizzazione topologica (*topology optimization*).

Il presente articolo propone un algoritmo per effettuare l'ottimizzazione strutturale topologica di un edificio in muratura armata con una data distribuzione iniziale di setti e una serie di vincoli di forma e spostamento che simulino le esigenze architettoniche. Sfruttando le tecniche classiche di risoluzione dei sistemi non lineare è possibile ricercare un layout dell'edificio tale da rispettare le condizioni iniziali imposte.

2. Formulazione del procedimento

Come per ogni altro problema simile l'ottimizzazione strutturale la soluzione può essere ricondotta a quello che è l'obiettivo principale. Generalmente l'ottimizzazione strutturale consiste in una funzione obiettivo f dipendente da una serie di variabili x e da una serie di restrizioni che possono essere di disuguaglianza g , di uguaglianza h e di appartenenza ad un dominio D (Baldock, 2007):

- funzione da minimizzare

$$\min f(x) \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (1)$$

- con restrizioni di disuguaglianza

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (2)$$

- con restrizioni di uguaglianza

$$H_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, p \quad (3)$$

- con restrizioni di appartenenza

$$x_i \in D_j \quad D_j = (d_{i1}, d_{i2}, d_{in}); i = 1, \dots, n_d \quad (4)$$

Ovviamente le equazioni precedenti rappresentano solo una parte del sistema di ottimizzazione, in quanto, applicazioni complesse possono tenere in debita considerazione, ad esempio, anche le forze di contatto tra vari blocchi (Whiting et al., 2012). Ciò nonostante, per quanto attiene la mera ottimizzazione strutturale dei pannelli murari non ci sono particolari esempi in bibliografia che impiegano un processo di ottimizzazione diretto, se non quelli inerenti le pareti a taglio in calcestruzzo armato (Nikzad e Yoshitomi, 2017).

Per l'ottimizzazione strutturale di un edificio in muratura armata con forma irregolare la funzione da minimizzare potrebbe variare a seconda dell'obiettivo principale. Essenzialmente, per questo tipo di tecnologia costruttiva (muratura armata), la ricerca delle lunghezze minime dei setti non produce un'ottimizzazione strutturale, come potrebbe essere nel caso di telai in calcestruzzo armato, in quanto, l'intera parete risulta comunque un unico sistema globale formato da elementi in laterizio (fasce di piano ecc.)

In base al paragrafo 7.3.5 delle NTC 2018 (M.I.T., 2018), la risposta strutturale, tralasciando la componente verticale¹ del sistema, deve essere valutata applicando la relazione 7.3.10 di seguito riportata:

$$c_x \cdot E_x + c_y \cdot E_y \quad (5)$$

in cui i coefficienti c_x e c_y assumono, alternativamente, i valori 1,00 e 0,30.

¹ In base al paragrafo 7.2.2 delle NTC 2018 (M.I.T., 2018), la componente verticale deve essere considerata in presenza di elementi pressoché orizzontali con luce superiore a 20 m, elementi precompressi, elementi a mensola di luce superiore a 4 m, strutture di tipo spingente, pilastri in falso. Negli edifici in muratura armata, le condizioni poc'anzi citate sono raramente presenti.

Negli edifici in muratura armata, le componenti sismiche E_p possono essere generalmente suddivise per le due direzioni fondamentali X e Y, in quanto, per i setti ortogonali alla direzione principale del sisma (effetto fuori piano), si tende ad assumere una rigidezza nulla (Casagrande, 2018).

Ciò che invece può essere dimensionante dal punto di vista strutturale è l'effetto torcente dovuto all'azione sismica. Infatti, il paragrafo 7.2.6 delle NTC 2018 (M.I.T., 2018), prescrive come al centro di massa debba essere attribuita "un'eccentricità accidentale rispetto alla sua posizione quale deriva dal calcolo" in misura non minore del 5% della dimensione dell'edificio in senso perpendicolare alla direzione della forza sismica.

Il **momento torcente** che si genera dall'applicazione della prescrizione normativa può effettivamente amplificare notevolmente le sollecitazioni nei vari pannelli murari e limitare quelli che sono gli efficaci metodi semplificati per il calcolo, ad esempio, di sistemi confinati (Tena-Colunga e Lopez-Blancas, 2011; Meli e Brzev, 2011). Per l'applicazione delle metodologie semplificate si è visto come l'amplificazione del momento torcente sia effettivamente dimensionante qualora il rapporto tra il lato minore e lato maggiore sia, in effetti, inferiore a 1/3 (M.I.T., 2018; Membreno, 2016).

In base a quanto evidenziato, quindi, una riduzione del momento torcente diminuirebbe conseguentemente le sollecitazioni sui pannelli murari. Per definire un processo di ottimizzazione strutturale applicata al sistema costruttivo muratura armata, è quindi necessario costruire quella che è la funzione obiettivo e le relative restrizioni per ricercare una possibile soluzione.

In Figura 1 è riportato lo schema base per la definizione dell'eccentricità globale. Dato un certo impianto strutturale generico con i relativi carichi permanenti e accidentali (Figura 1), l'eccentricità che esiste tra il centro delle masse e il centro delle rigidzze genera, in caso di moto sismico, un momento torcente che si può definire di **impianto**. Secondo i dettami della normativa cogente (M.I.T., 2018), a tale eccentricità si deve sommare l'eccentricità accidentale dovuta alla non perfetta definizione del centro delle masse. Questa eccentricità genera un momento torcente accidentale che deve essere opportunamente considerato nella definizione del **momento torcente globale**.

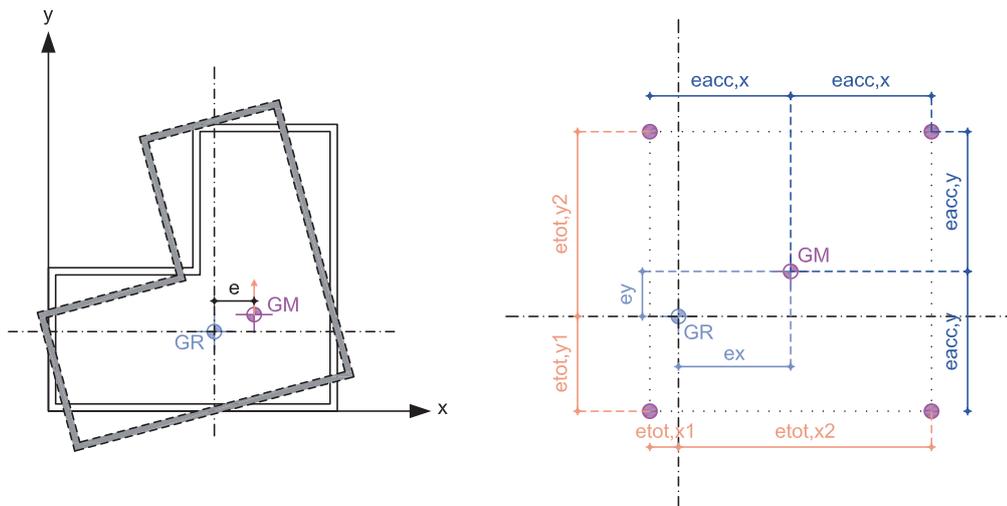


Figura 1
Definizione delle eccentricità in un impianto strutturale generico.

Per la definizione della funzione obiettivo, quindi, si dovrebbe considerare l'eccentricità accidentale definita con la relazione seguente:

$$e_{acc,t} = ass(e_d) + e_{acc,d} \quad d = (x,y) \quad (6)$$

ovvero come somma dell'**eccentricità di impianto** (masse - rigidzze) e dell'**eccentricità accidentale** da normativa. L'eccentricità di impianto, come anticipato in precedenza, è funzione della posizione del centro delle masse della posizione del centro di rigidzze mentre l'eccentricità accidentale è un valore funzione della geometria dell'edificio, generalmente proporzionale ad una percentuale (5%) della dimensione massima di quest'ultimo. Supponendo, quindi, di fissare una data geometria dell'edificio, avremmo un valore dell'eccentricità accidentale univoco. Essendo il valore dell'eccentricità accidentale derivante dalle caratteristiche puramente geometriche dell'edificio, l'obiettivo può essere ristretto in modo tale da effettuare una minimizzazione solamente dell'eccentricità di impianto.

Il processo di ottimizzazione topologica per un **edificio di muratura armata** può essere applicato in modo agevole, in quanto, questa tecnologia non prevede le restrizioni imposte dai normali edifici in muratura ordinaria. Questo aspetto permette di

evitare di inserire nella definizione dei parametri di ottimizzazione una serie di vincoli prescritti dalla normativa: la lunghezza del setto minimo oppure il vincolo di posizione per gli angoli esterni (caso tipico della muratura ordinaria).

Per la definizione delle funzioni di ottimizzazione, ipotizziamo di applicare il processo di in questione all'edificio proposto in Figura 2. Ogni setto di riferimento S_i collocato in una posizione data, può essere suscettibile di modifica lungo un prestabilito dominio W_i , delimitato da una lunghezza minima e una lunghezza massima.

A tal punto, la definizione topologica del setto generico può essere descritta con riferimento alla Figura 3. Dato un generico setto S_i , posto lungo la direzione X o Y, avente spessore t e dimensione prevalente (lunghezza) D_i , esso può essere individuato all'interno del dominio globale (edificio) attraverso la posizione del suo baricentro geometrico (X_{Gi}, Y_{Gi}) . Il setto così individuato può essere sottoposto ad una serie di vincoli di ottimizzazione: la sua lunghezza può variare tra due punti estremi imposti (L_{min} e L_{max}), i quali, devono rimanere all'interno di un dominio prestabilito W_i limitato dalle coordinate relative Z_{min} e Z_{max} . In base ai parametri definiti in precedenza il processo di ottimizzazione, secondo la logica proposta nelle equazioni Equazione 1 - Equazione 5, può definirsi come specificato nei paragrafi che seguono.

3.1 Funzione da minimizzare

Per rendere ottimale la progettazione strutturale, l'obiettivo è quello di minimizzare l'effetto torcente di impianto ricercando una "forma" architettonica che rispetti le condizioni "strutturali". A tal proposito, il parametro da minimizzare risulta essere la distanza assoluta che insiste tra il baricentro delle rigidezze e il baricentro delle masse, ovvero:

$$d = \sqrt{(X_R - X_M)^2 + (Y_R - Y_M)^2} \quad \{X_i, Y_i\} \in \Omega_G \quad (7)$$

Figura 2
Schema per la definizione dei parametri caratteristici da sottoporre a processo di ottimizzazione.

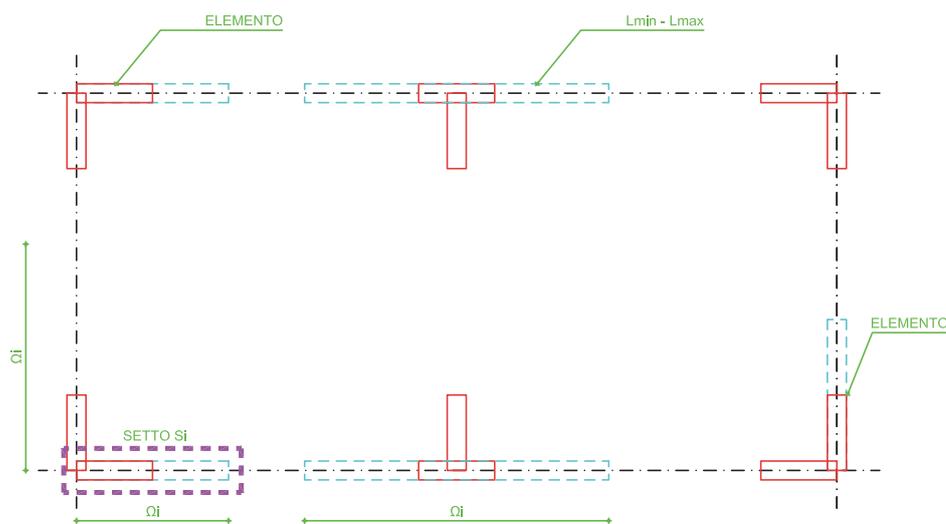
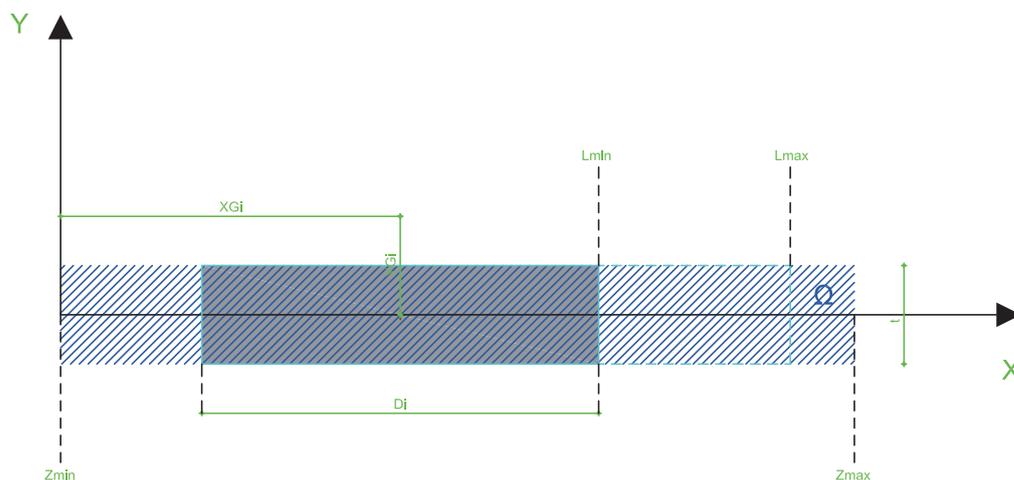


Figura 3
Schema per la scelta dei parametri da sottoporre ad ottimizzazione per un setto in muratura armata lungo la direzione X.



La funzione di minimizzazione risulta essere, pertanto, definita dall'equazione seguente:

$$d = \sqrt{(X_R(\Omega_R) - X_M(\Omega_M))^2 + (Y_R(\Omega_R) - Y_M(\Omega_M))^2} \quad (8)$$

Le coordinate indicate con il pedice R e M sono funzione dei rispettivi domini di rigidezza e delle masse (Ω_R e Ω_M). Come si osserva dalle equazioni precedentemente riportate, nella topologia proposta, la relazione di obiettivo è funzione sia della posizione di ogni setto (e.g. baricentro) sia delle dimensioni del setto (e.g. lunghezza).

3.2 Restrizioni di disuguaglianza

Le restrizioni di disuguaglianza per l'ottimizzazione topologica sono applicate ai parametri principali e riguardano sia la posizione all'interno del dominio (Ω_R) sia la lunghezza dell'elemento (D_i).

Per quanto concerne quest'ultimo parametro, la lunghezza deve essere compatibile con la dimensione del dominio e con i valori limite prefissati L_{\min} e L_{\max} . La disuguaglianza, quindi, può essere determinata come segue:

$$D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max}(L_{\min}, L_{\max}) \quad D_{\min} = a \quad D_{\max} \in \Omega_i \quad i = (1, \dots, n) \quad (9)$$

In realtà, il valore minimo della lunghezza, per quanto concerne la muratura armata, potrebbe essere nullo (M.I.T., 2018). Tuttavia, l'individuazione di un valore minimo "a" potrebbe evitare l'insorgere di instabilità del metodo e generare problematiche nelle successive analisi statiche (e.g. eccessivo sforzo normale).

La seconda disuguaglianza riguarda, invece, il dominio di calcolo. Infatti, il baricentro dell'elemento geometrico e conseguentemente l'intero elemento deve appartenere al sub-dominio Ω_i di ogni singolo setto.

$$Z_{\min}(L_{\min}, D_i) \leq G_i \leq Z_{\max}(L_{\min}, D_i) \quad D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max}(L_{\min}, L_{\max}) \quad (10)$$

In questo caso si nota come le restrizioni formino un sistema prettamente non lineare legato alla posizione del setto e alla sua dimensione.

3.3 Restrizioni di appartenenza

Le restrizioni di appartenenza, servono per associare dei parametri ad un determinato insieme di valori. In questo caso, come già evidenziato, avremmo:

$$\begin{aligned} D_i &\in \Omega_i & i &= (1, \dots, n) \\ L_i &\in \Omega_i & i &= (1, \dots, n) \end{aligned} \quad (11)$$

Le dimensioni e i limiti imposti appartengono al dominio del singolo setto W_i . Queste restrizioni di appartenenza servono per limitare quelle che possono essere i vincoli tipologici di sovrapposizione oppure di necessità architettonica (e.g. finestre, porte ecc.) Nell'elenco delle restrizioni, non sono state menzionate quelle inerenti i criteri di uguaglianza. Infatti, essendo il problema non lineare, l'introduzione di una condizione di uguaglianza potrebbe generare delle instabilità del metodo e quindi l'impossibilità di ricerca di una soluzione.

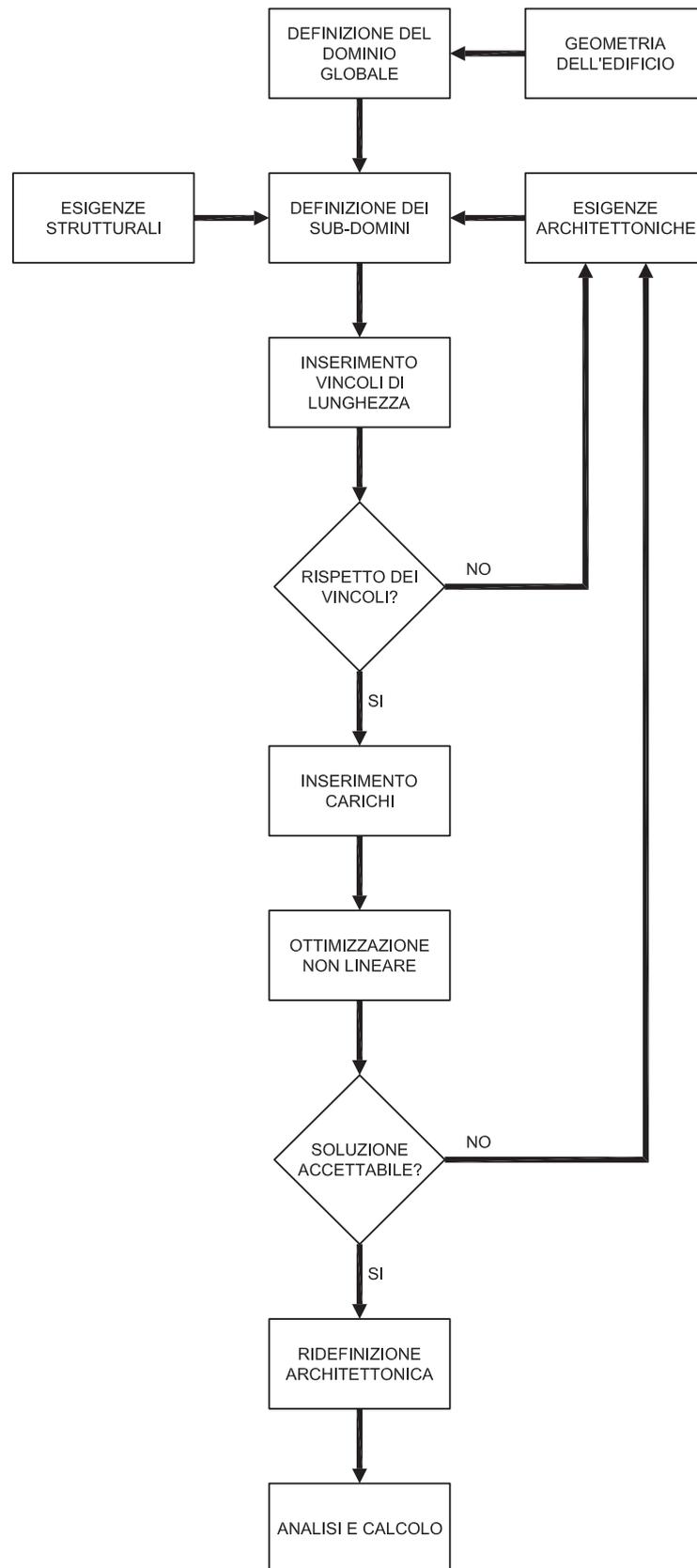
3. Flow-chart

Come già anticipato, l'ottimizzazione strutturale topologica di un edificio in muratura armata risulta simile al processo di definizione di una tensostruttura (Casagrande, 2011). Come riportato nella Figura 4, il metodo consta di un sistema globalmente non-lineare che raggruppa sia le esigenze architettoniche sia le esigenze strutturali. Partendo proprio da tali esigenze, si costruisce il dominio globale del sistema, formato sostanzialmente dalla geometria dell'edificio (sagoma o perimetro). Individuati i sub-domini derivati dai vincoli architettonici e strutturali iniziali, si passa alla definizione delle lunghezze minime e massime, le quali, devono essere compatibili con la "forma" del *concept* iniziale.

Qualora i vincoli sono rispettati, è possibile passare al processo di ottimizzazione strutturale attraverso i metodi non lineari a disposizione. La soluzione ottenuta, così, può essere sottoposta ad una ridefinizione della configurazione architettonica, attraverso una calibrazione più precisa delle misure per esigenze di cantiere. A tal punto è possibile effettuare l'analisi strutturale secondo la normativa cogente (M.I.T., 2018) e produrre gli esecutivi per la fase realizzativa.

I metodi utilizzati per l'ottimizzazione strutturale possono essere diversi: il metodo del gradiente coniugato molto utilizzato nell'ambito delle tensostrutture (Casagrande, 2011) oppure i classici metodi non lineari implementati anche nei fogli di calcolo di uso quotidiano (GRG non lineare).

Figura 4
Flow-chart del processo di ottimizzazione topologica per un edificio in muratura armata.



4. Applicazione ad un edificio regolare

L'algoritmo è stato testato per un edificio semplice composto da un singolo piano la cui pianta rettangolare presenta dimensioni pari a circa $5,0 \times 5,0 \text{ m}^2$.

Ipotizzando di ottimizzare la struttura in modo tale da raggiungere un'area dei pannelli maggiore del 2,5%, l'applicazione dell'algoritmo di ottimizzazione per la minimizzazione dell'eccentricità di impianto porta alla soluzione proposta in Figura 9a. Lo schema evidenzia come il processo di ottimizzazione, pur raggiungendo una soluzione compatibile con i vincoli dati,

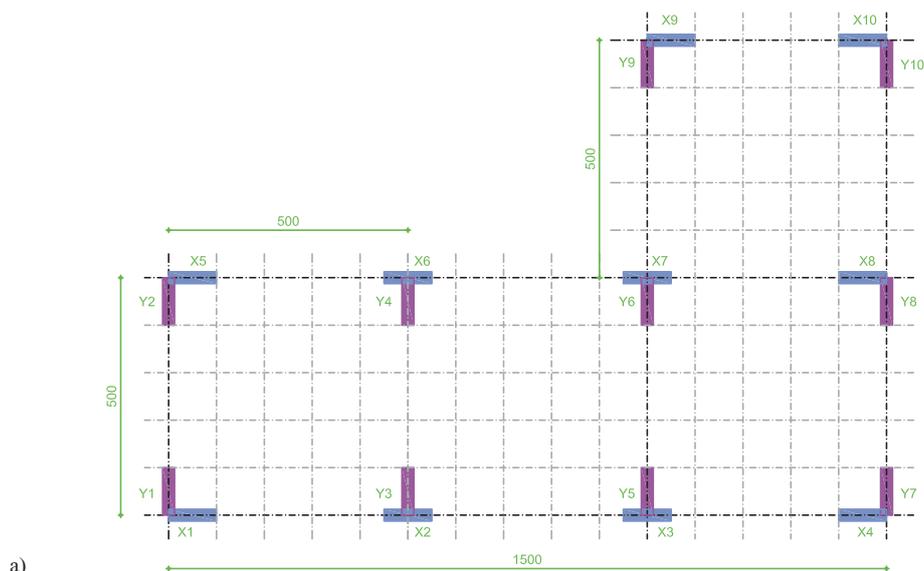
comporti una configurazione dei pannelli di muratura con lunghezze e collocazioni non perfettamente simmetriche. Questo aspetto è dovuto principalmente a due cause:

1. Il processo di ottimizzazione è un metodo numerico che ricerca una soluzione in funzione di una serie di vincoli. La ricerca di una configurazione simmetrica comporterebbe l'inserimento di ulteriori vincoli di uguaglianza, i quali, come già appurato potrebbero influire sulla stabilità del metodo.
2. L'utilizzo del parametro della superficie minima dei setti consente di raggiungere la condizione di simmetria. Infatti, l'aumento della superficie minima dei setti, costringe il processo non lineare a bilanciare la posizione del baricentro delle rigidzze con le lunghezze imposte.

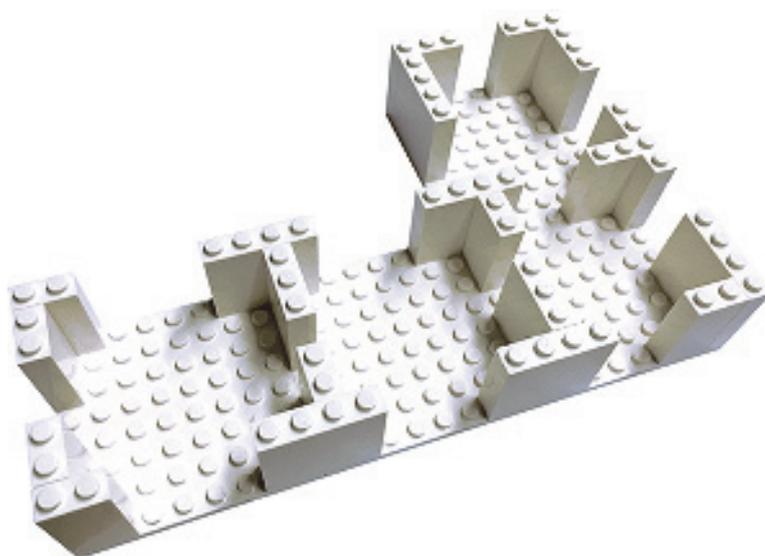
5. Applicazione ad un edificio irregolare

Il processo di ottimizzazione strutturale, è stato applicato ad un edificio irregolare ovvero che non presenta le caratteristiche tipiche delle costruzioni semplici. La Figura 5 riporta le dimensioni in pianta dell'edificio oggetto di analisi e una rappresentazione tridimensionale utilizzando il sistema Lego Studio Architecture® con lunghezze dei setti variabili.

L'edificio in questione consiste in una struttura ad L con dimensioni massime pari a circa 15,0x10,0 m² composta da moduli aventi una dimensiona pari a circa 5,0x5,0 m² con un'altezza del piano pari a circa 3,0 m.



a)



b)

Figura 5
Geometria dell'edificio irregolare sottoposto ad ottimizzazione strutturale.
a) schema planimetrico,
b) modello dell'edificio attraverso Lego (copyright).

5.1 Scelta della tecnologia

I vincoli di lunghezza del setto *i*-esimo devono essere scelti in base alla performance sismica a cui dovrà sottostare l'edificio una volta realizzato. Nell'esempio in oggetto, viene utilizzato il sistema di muratura armata Biotaurus® con blocco da cm 25 del quale è stata condotta un'estesa sperimentazione con il fine di coglierne il comportamento in condizioni sismiche (Destro, 2014). La lunghezza minima e massima del setto dovrebbe essere scelta in funzione proprio delle performance sismiche del pannello murario tipo. A tal proposito, per la tecnologia Biotaurus® i test hanno dimostrato come pannelli di tipo snello (Figura 6) siano molto più performanti rispetto a pannelli tozzi (Figura 7).

Il ricorso all'ottimizzazione topologica permette anche di indicare, all'interno della pianta dell'edificio, quali setti devono possedere una capacità di deformazione maggiore (elementi snelli) oppure un'alta resistenza e una deformazione limitata (Casagrande, 2018).

5.2 Considerazione sull'ottimizzazione strutturale

In questo primo tentativo di ottimizzazione, è stato supposto un carico uniformemente ripartito su tutto il solaio, in modo tale, da cogliere la condizione classica che si verifica spesso nell'ambito residenziale.

La Figura 8 riporta il settaggio iniziale relativo alle lunghezze minime e massime per ogni setto murario inserito nella pianta dell'edificio. Come si nota dal grafico, le lunghezze sono variabili a seconda delle necessità strutturali: gli elementi posti al vertice della geometria dell'edificio presentano delle lunghezze limite inferiori a quelle interne. Questo aspetto permette di aumentare le performance sismiche dell'edificio, in quanto, i setti in oggetto possono sfruttare livelli di *drift* maggiori rispetto a quelli degli elementi tozzi.

La Figura 10 riporta il confronto tra la lunghezza dei setti e la disposizione in pianta degli stessi supponendo una lunghezza minima dei setti pari a circa 0,50 m (a) e 1,0 m (b). Come si evince dall'immagine la lunghezza e la disposizione dei setti viene variata

Figura 6
Involuppi medi dei cicli di isteresi per campioni snelli (Destro, 2014)

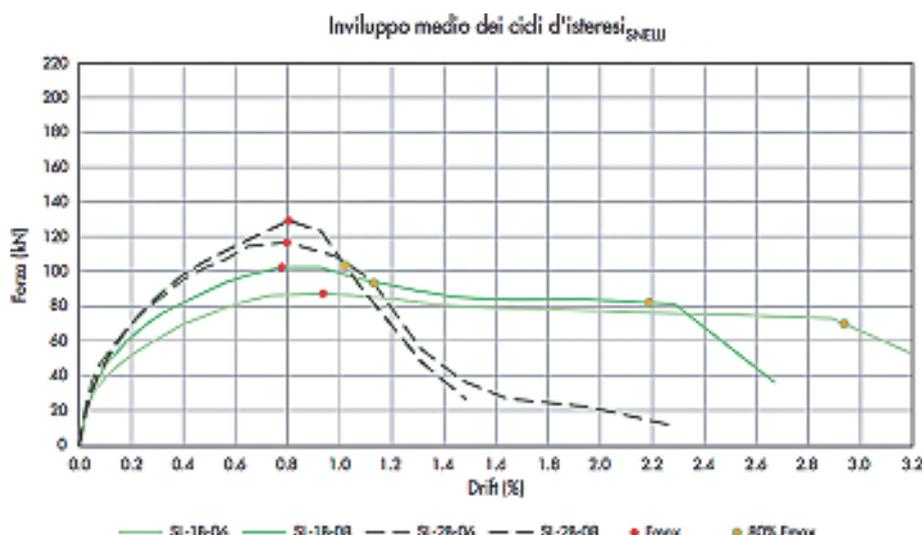
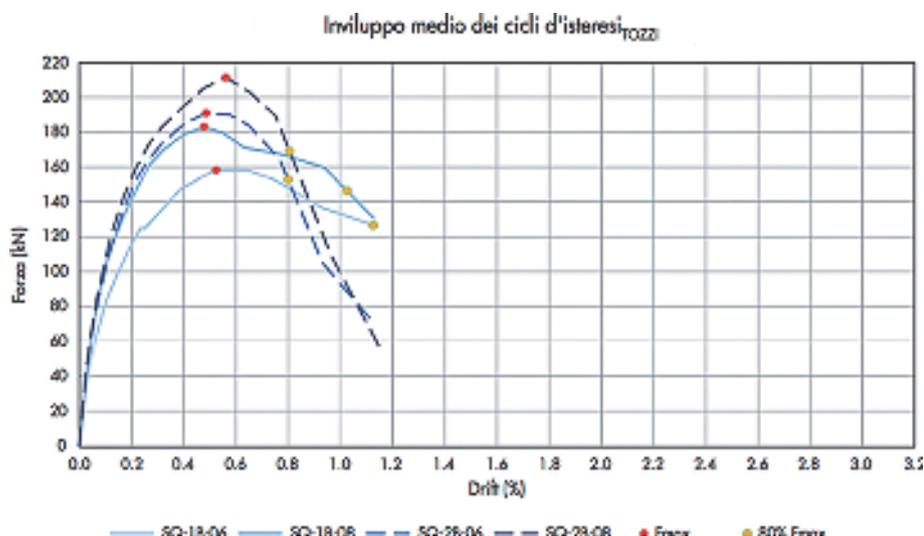


Figura 7
Involuppi medi dei cicli di isteresi per campioni tozzi (Destro, 2014)



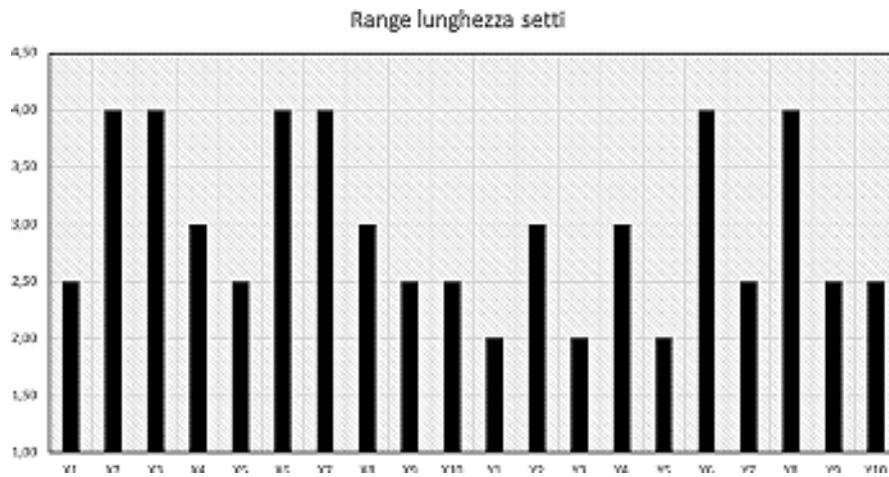


Figura 8
Settaggio relativo al range delle lunghezze di ogni setto

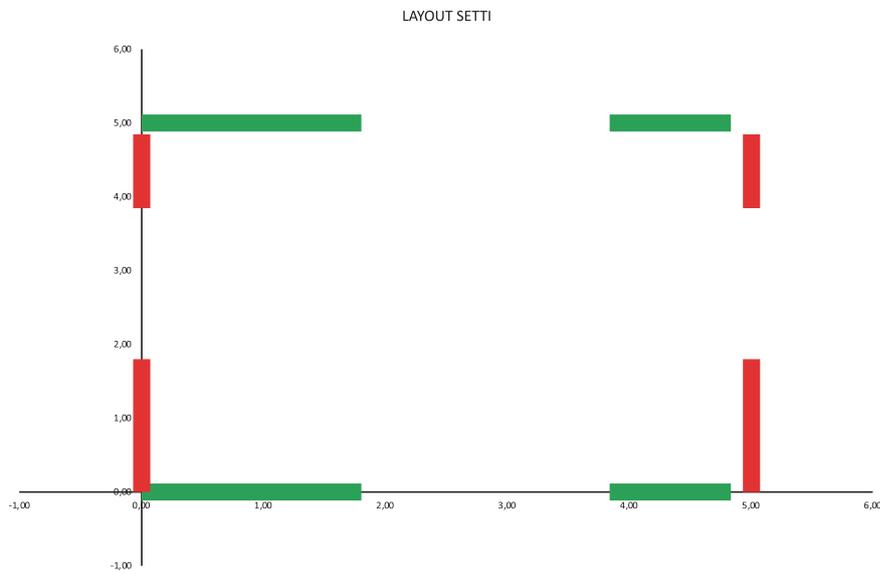
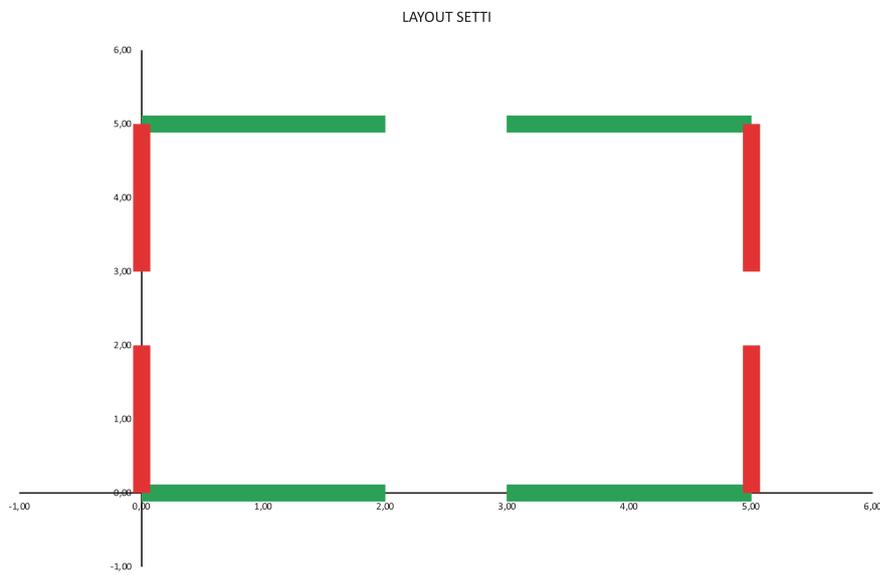


Figura 9
Comparazione tra layout della pianta dopo l'ottimizzazione di un edificio semplice regolare considerando una superficie minima dei setti pari a 2,5% (a) e 10% (b)



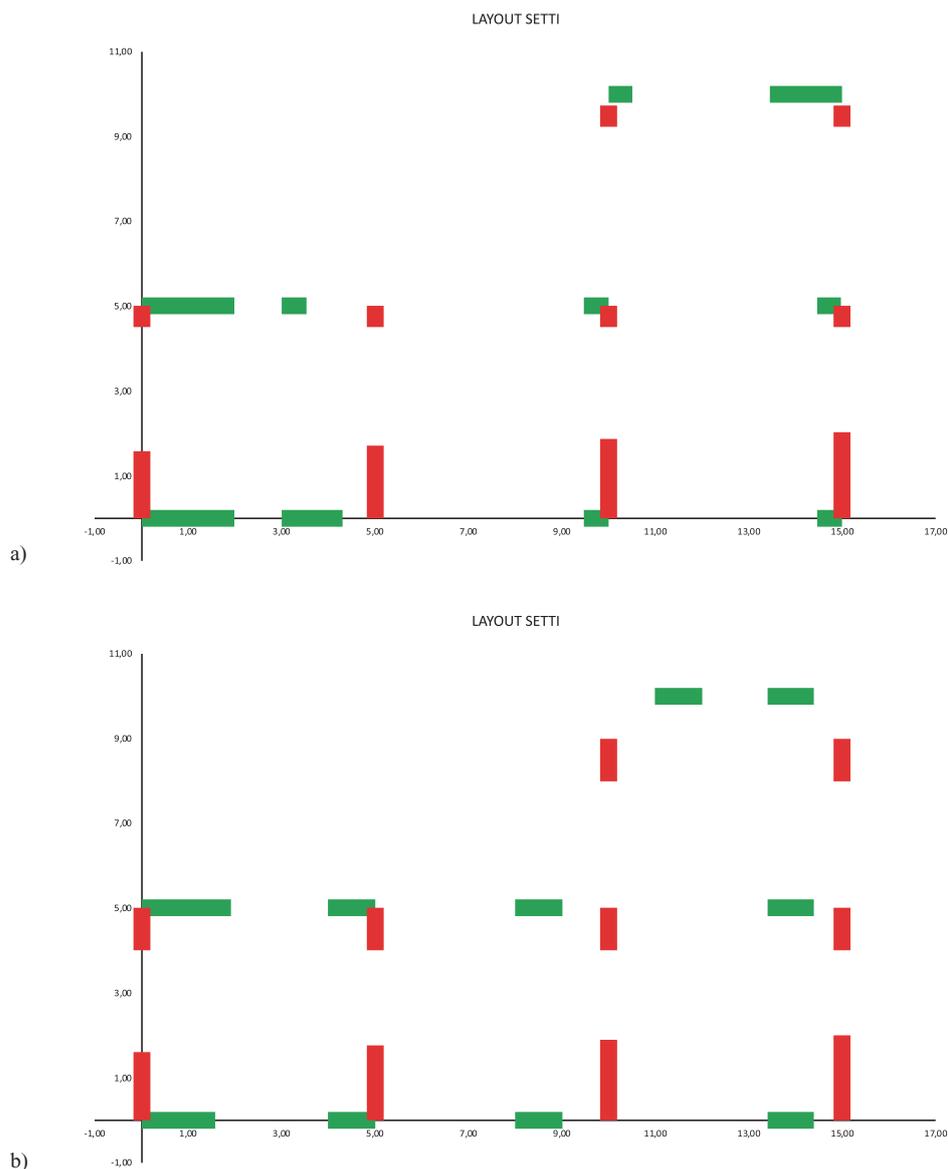
fino a ridurre al minimo l'eccentricità di impianto. Interessante è notare come l'utilizzo di uno schema classico con setti disposti nei vertici, possa essere addirittura controproducente a livello strutturale, soprattutto, quando i pannelli sono piuttosto snelli.

Se nel processo di ottimizzazione si impongono delle lunghezze minime di 1,5 m (Figura 11 a) e 2,0 m (Figura 11 b) si nota come il layout in pianta tenda a diventare un organismo strutturale con pannelli di medesima lunghezza. È evidente, quindi, che all'aumentare della lunghezza minima imposta ai setti, il processo di ottimizzazione tenda a trovare una soluzione agendo sulla posizione del setto anziché sulla sua lunghezza.

Di particolare interesse ingegneristico, è la relazione che sussiste tra eccentricità di impianto e lunghezza minima dei setti imponendo delle superfici minime a cui i pannelli devono sottostare (condizioni limite secondo la tabella 7.8.II (M.I.T., 2018)). Come si evince dalla Figura 12 l'eccentricità di impianto, all'aumentare della lunghezza minima dei setti ed ipotizzando una superficie minima di 2,5%, aumenta di circa il 30%. Qualora, invece, la superficie muraria minima debba rispettare un valore minimo di 6,5% (valore massimo per $a_g < 0,50g$) l'aumentare della lunghezza minima dei setti fa sì che l'eccentricità di impianto diminuisca. Come si nota dal grafico riportato nella Figura 12, tale tendenza risulta compatibile con il concetto di superficie minima indicata dalla norma per le costruzioni semplici. Infatti, imponendo una quantità minima di pannelli murari, l'eccentricità di impianto diminuisce in quanto la densità degli elementi resistenti aumenta (Figura 13).

Nella Figura 11 e nella Figura 12 sono riportati i layout per una lunghezza dei setti e la supponendo una lunghezza minima dei setti rispettivamente pari a 0,5 - 1,0 - 1,5 - 2,0 m. Come si nota, il layout in pianta dei setti si modifica in modo tale da poter rispettare le condizioni date in fase di ottimizzazione. Come evidenziato in precedenza, l'imporre una lunghezza minima dei setti tende ad infittire i pannelli iniziali sino ad arrivare ad una lunghezza medesima per i singoli muri.

Figura 10
 Comparazione tra la lunghezza dei setti e layout della pianta dopo l'ottimizzazione con una lunghezza minima dei setti pari a 0,5 m (a) e 1,0 m (b).



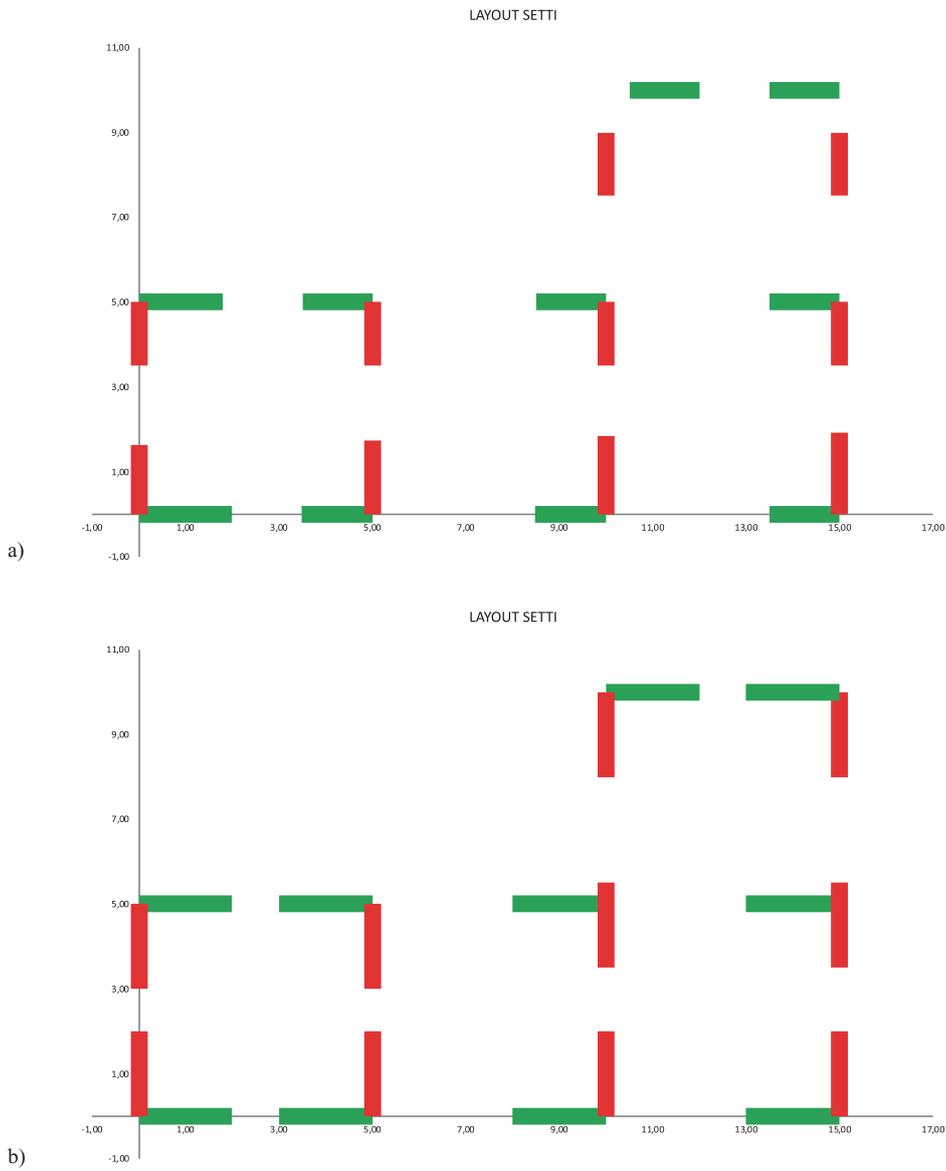


Figura 12
 Comparazione tra la lunghezza dei setti e layout della pianta dopo l'ottimizzazione con una lunghezza minima dei setti pari a 1,5 m (a) e 2,0 m (b).

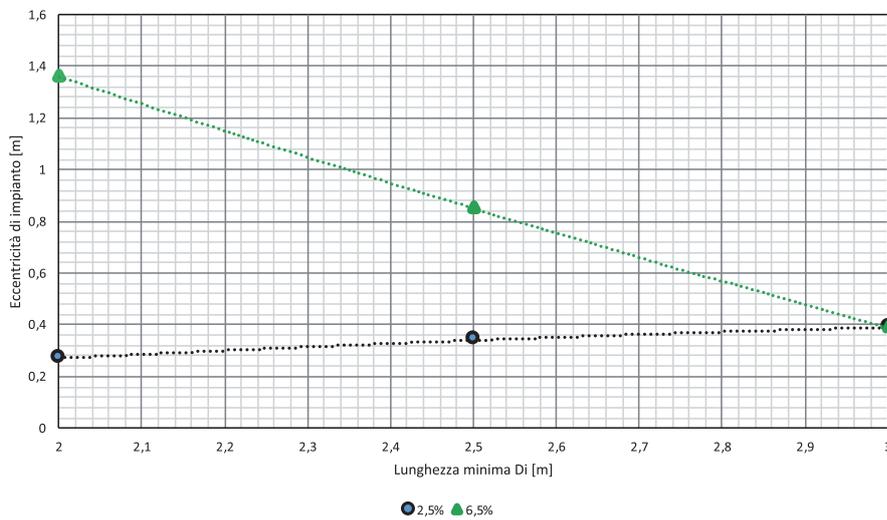
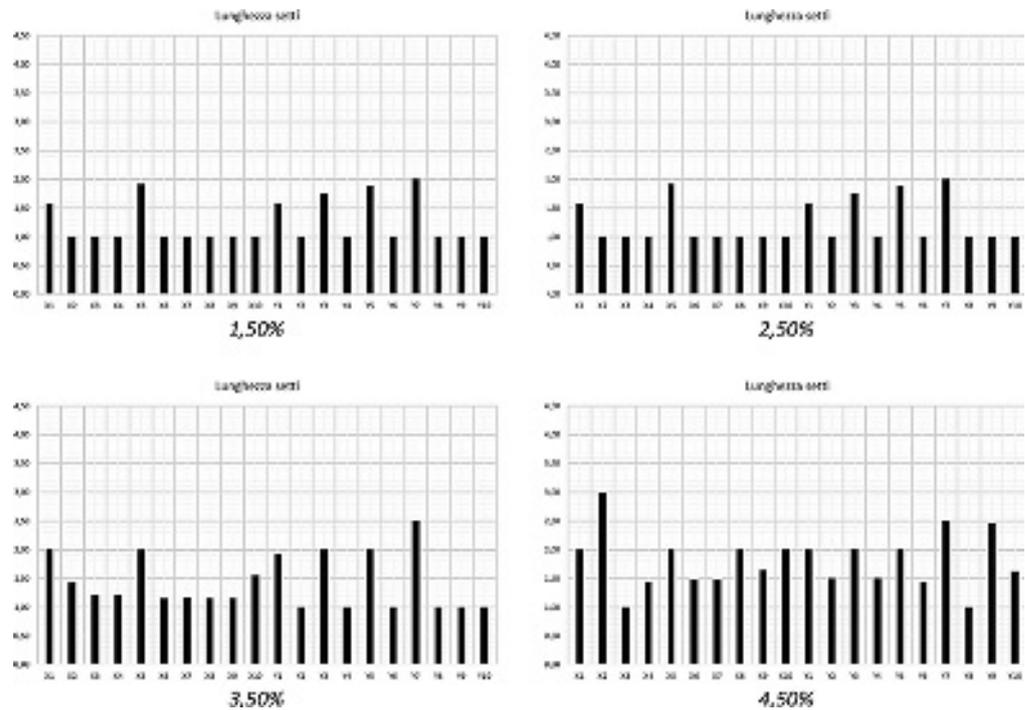


Figura 12
 Andamento dell'eccentricità d'impianto in funzione della superficie minima dei setti.

Figura 13
Andamento della lunghezza dei setti di muratura al variare della densità minima richiesta.



6. Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente articolo propone un metodo per l'ottimizzazione strutturale topologica di edifici in muratura armata. Attraverso l'implementazione di un algoritmo non lineare è stato possibile definire la funzione obiettivo e i vari vincoli (architettonici, strutturali ecc.)

È stata verificata la condizione di normativa inerente le costruzioni semplici, verificando che la densità dei pannelli murari consente la riduzione dell'eccentricità di impianto.

L'applicazione dell'algoritmo ad un edificio irregolari in pianta ha permesso di evidenziare come un'ottimizzazione strutturale topologica possa generare delle soluzioni che permettono il rispetto dei vincoli architettonici ed estetici sia delle esigenze strutturali.

Gli sviluppi futuri permetteranno di effettuare un'ottimizzazione strutturale topologica basata sulla capacità non lineare dei singoli pannelli nonché sulla gerarchia delle resistenze.

Bibliografia

- M.I.T., D.M. 17/01/2018 (2018) - Aggiornamento alle nuove norme tecniche per le costruzioni, M.I.T., Roma.
- Casagrande E. (2018) - Progettazione in zona sismica: muratura armata, Rimini: Maggioli Editore.
- Mezzi M., Parducci A., Comodini F., Lucarelli M., Tomassoli E. (2006) - Configurazioni strutturali per l'ottimizzazione delle prestazioni dei sistemi innovativi di protezione sismica, Udine.
- Casagrande E. (2011) - Introduzione all'analisi automatica di sistemi strutturali composti da funi, Padova: Cleup, 2011.
- Meli R. (2011) - Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings, Earthquake Engineering Research Institute.
- Porst C. (2015) - Confined Masonry for Seismically Resilient Low-Cost Housing in India: A Design and Analysis Method, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Petrini L., Pinho R., Calvi G. (2004) - Criteri di progettazione antisismica degli edifici, Pavia: IUSS Press.
- Casagrande E. (2011) - Tensostrutture, opere di ingegneria architettonica, Ingegneri a Treviso, vol. 1, n. 1, pp. 6-9, 2011.
- Gatti R. (2014) - Impiego di tecniche di ottimizzazione topologica nel processo di design, Tesi - Politecnico di Milano, Milano.
- Kulkarni R., Ashwini & Bhusare e Vijaykumar (2016) - Structural optimization of reinforced concrete structures, International Journal of Engineering Research, vol. 5, n. 10.17577/IJERTV5IS070156.
- Baldock R. (2007) - Structural optimisation in building design practice: case-studies in topology optimisation of bracing systems, University of Cambridge - Department of Engineering, Cambridge.
- Whiting E., Shin H., Wang R., Ochsendorf J., Durand F. (2012) - Structural Optimization of 3D Masonry Buildings, ACM Transactions on Graphics 31, vol. 6.

- Nikzad H., Yoshitomi S. (2017) - Structural Optimization Method for 3D Reinforced Concrete Building Structure with Shear Wall, World Academy of Science, Engineering and Technology - International Journal of Civil and Environmental Engineering, vol. 11, n. 9, pp. 1352-1358.
- Tena-Colunga A., Lopez-Blancas A. (2011) - limiting torsional eccentricity for the simplified method for the seismic analysis of low-rise confined masonry shear-wall buildings in mexican codes, Minneapolis.
- Meli R., Brzev S. (2011) - Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings, Earthquake Engineering Research Institute, California.
- Membreno M. (2016) - Seismic resiliency using confined masonry: parametric study using a simplified analysis method, massachusetts institute of technology.
- Casagrande E. (2011) - Introduzione all'analisi automatica di sistemi strutturali composti da funi, Padova: Cleup.
- Destro M. (2014) - Ricerca sperimentale sulla muratura armata portante Taurus, Progettazione Sismica, n. 3, pp. 135-158.

L'Autore

Ennio Casagrande, ingegnere civile svolge la libera professione nel campo strutturale e nell'idraulica. È membro dell'associazione SPONSE e dell'ITCOLD a cui partecipa attivamente al Gruppo di Lavoro "*Dighe alleggerite e a speroni*".

Docente in corsi di formazione per enti pubblici e privati in materia di rischio sismico e strutture, è autore di memorie scientifiche relative all'ingegneria strutturale.

È autore, inoltre, di diversi libri tra i quali "*Progettazione Sismica: muratura armata*" pubblicato nel 2018 per Maggioli Editore.