



## Static and seismic response assessment and retrofitting solution for a fabric silo for granular solids

Andrea Nordi<sup>a</sup>, Fabio Minghini<sup>a</sup>, Nerio Tullini<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Università di Ferrara - Dipartimento di Ingegneria – Via G. Saragat 1, 44122 Ferrara, Italy

*Keywords: Fabric flexible silos; Form finding; Granular solids; Nonlinear analysis; Pushover analysis*

### ABSTRACT

Flexible silos offer several advantages compared with the more traditional steel silos. In particular, in flexible silos, being the container a no-compression membrane, the well known instability phenomena affecting the steel sheets are avoided. In addition, the supporting structure of flexible silos, usually comprised of steel profiles jointed with one another through non-bolted cuff connections, eases disassembling and reassembling operations, and then possible reorganisations of the industrial layout. However, with regard to the calculation complexity, form finding of membranes and resulting geometric nonlinearities, often combined with mechanical and geometric nonlinearities of the supporting structure, raise issues which must be handled with care.

This paper presents a series of numerical analyses carried out on a fabric silo for sugar and flour to be installed into a seismic zone. Form finding and all sources of nonlinearity were accounted for and two different models were compared to estimate the filling pressure distribution. In one model, normal and tangential pressures on the membrane, and then stress distributions on the supporting structure, were evaluated from the expressions reported by Eurocode 1 – Part 4. In the other model, the pressure distribution was obtained reproducing the contents with solid finite elements connected with the membrane through a suitable frictional interface. This latter model provided a more accurate representation of the filling pressures. In all cases, instability and plasticity of the columns in proximity of the connections with foundation and bracings were obtained. The silo was shown to be adequate for the installation into a site of moderate seismicity, provided that the more vulnerable parts of the columns are replaced with profiles of increased thickness.



## Valutazione della sicurezza statica e sismica e progetto di rinforzo di un silo per polveri in tessuto

Andrea Nordi<sup>a</sup>, Fabio Minghini<sup>a</sup>, Nerio Tullini<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Università di Ferrara - Dipartimento di Ingegneria – Via G. Saragat 1, 44122 Ferrara, Italy

*Keywords: Fabric flexible silos; Form finding; Granular solids; Nonlinear analysis; Pushover analysis*

### ABSTRACT

Il silo flessibile in oggetto è un sistema strutturale complesso costituito da un sacco, di capacità 50 m<sup>3</sup>, in tessuto Trevira ad alta resistenza per lo stoccaggio di farina o zucchero, sostenuto da una struttura metallica in profili laminati a sezione scatolare. L'intelaiatura, realizzata in acciaio S 235 JR e assemblata mediante collegamenti di tipo *cuff connection*, è alta 8.2 m e misura 3.3 m x 3.3 m in pianta. Al silo sono richieste caratteristiche idonee per l'installazione in zona con PGA pari al valore  $a_g S = 0.2g$  per  $T_R = 475$  anni.

La presenza di forti non linearità a partire dal *form finding* della membrana, la cui configurazione dipende dall'entità del riempimento e dalle caratteristiche geotecniche delle polveri, porta ad uno studio per passi della geometria e dei conseguenti profili di pressione agenti. È stato poi realizzato un modello numerico con il quale viene simulata la fase di riempimento con interazione diretta fra contenuto e sacco.

In condizioni statiche la capacità della struttura risulta adeguata. La risposta sismica, ottenuta mediante analisi pushover, è tuttavia governata dalla notevole massa del contenuto, che determina l'instabilità del tratto di base delle colonne. Si è proposta pertanto la sostituzione di queste con profili scatolari di egual ingombro, ma spessore maggiore. L'analisi del silo rinforzato non evidenzia alcun fenomeno di instabilità e la curva di capacità termina con il raggiungimento del limite di resistenza del materiale in corrispondenza di un tagliante adeguato al sito di installazione della struttura.

### 1 INTRODUZIONE

La diffusione di sili flessibili (Fig.1) per lo stoccaggio di polveri per l'industria alimentare, chimica, farmaceutica e cosmetica è giustificata da costi di produzione contenuti e dalla natura modulare della struttura di sostegno, dove i collegamenti di tipo *cuff connection* fra le aste garantiscono assemblaggi e smontaggi estremamente rapidi. I sili flessibili quindi si adattano facilmente alle esigenze di trasporto e ad eventuali ridefinizioni dei layout industriali. Anche il comportamento strutturale avvantaggia i sili in tessuto rispetto a quelli in lamiera metallica: il sacco di contenimento delle polveri è una membrana soggetta unicamente a sforzi di trazione (JRC 2016) e pertanto non risente dei fenomeni di instabilità che invece contraddistinguono le lamiere sottili (Lodi et al. 2017). È ben noto come per questi ultimi possa risultare particolarmente critica la fase di scarico, a causa degli sforzi di compressione trasmessi per attrito dalla polvere alla lamiera, soprattutto nella parte inferiore del mantello e nella tramoggia (Fig. 2).

Tuttora la definizione delle azioni trasmesse dal contenuto presentano aspetti relativamente poco chiari e spesso le distribuzioni di pressioni statiche equivalenti proposte dalle norme (CEN 2006a) conducono a sollecitazioni di progetto eccessivamente cautelative. Per i sili in tessuto, in particolare, le problematiche legate alla definizione di un corretto profilo di pressioni si amplificano data l'entità degli spostamenti in gioco. Le azioni raccomandate dalla norma derivano infatti dall'ipotesi di pareti rigide, dalla quale il caso in esame si discosta significativamente.

Per la valutazione delle sollecitazioni indotte dal sisma si fa tipicamente riferimento alle condizioni di massimo riempimento, con massa del contenuto ridotta del 20% come suggerito dall'Eurocodice 8 (CEN 2006b); tuttavia, come per le spinte statiche, al momento non sono disponibili studi o ricerche che facciano riferimento alla risposta sismica di sili flessibili.

La presente nota riporta gli esiti delle analisi svolte su un sistema strutturale complesso costituito da un sacco in tessuto per lo stoccaggio

di polveri alimentari, sostenuto da una struttura metallica. I profili costituenti l'intelaiatura sono stati modellati in campo elasto-plastico. Le azioni di *filling* e *discharge* (CEN 2006a) sono state riprodotte tramite una procedura di carico incrementale-iterativa in cui, tenendo conto delle non linearità geometriche, ad ogni passo di carico sono stati definiti i profili di pressione coerenti con l'assetto geometrico assunto dal sacco in quell'istante. Le azioni e la configurazione del contenitore sono quindi state aggiornate passo-passo fino al raggiungimento della combinazione di carico allo Stato Limite Ultimo (SLU) prestabilita. Allo scopo di riprodurre più accuratamente l'interazione fra polvere e sacco durante la fase di riempimento, è stato poi realizzato un secondo modello numerico in campo non lineare, nel quale il contenuto è stato modellato con elementi solidi dotati di specifiche proprietà geotecniche. La valutazione del comportamento sismico è stata condotta mediante un'analisi pushover con profilo di forze proporzionale alle masse. La nota si conclude con la proposta di un intervento di rinforzo delle colonne che migliora significativamente la risposta strutturale.

## 2 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA

### 2.1 Geometria e dettagli costruttivi

La struttura metallica (Fig. 3) è alta 8.2 m e misura 3.3 m × 3.3 m in pianta. È realizzata in profili laminati a sezione scatolare che compongono traversi, colonne ed elementi di controvento. I collegamenti fra le aste sono di tipo *cuff connection* (Fig. 4). Nei punti di innesto sono quindi presenti profili di sezione inferiore che vanno ad incapsularsi all'interno degli scatolari adiacenti. Si tratta di connessioni che realizzano vincoli di tipo monolatero: allo scopo di garantire un'elevata rapidità di montaggio, le bullonature sono infatti del tutto assenti.

I profili costituenti la struttura hanno generalmente sezione 150 mm × 150 mm con spessori variabili da 3 a 4 mm. I tratti di collegamento che vengono incapsulati misurano 140 mm × 140 mm per 3 mm di spessore.

Il sacco di contenimento (Fig. 5) è ancorato ai traversi dell'intelaiatura circostante mediante asole, anch'esse in tessuto, cucite lungo il mantello. Questo misura in pianta 3.0 m × 3.0 m ed è alto 4.9 m. La tramoggia, di forma troncopiramidale, si estende verticalmente per 1.6



Figura 1. Esempio di silo flessibile con sacco in tessuto e struttura di supporto in acciaio (immagine tratta dal sito <http://agriflex.it>).



Figura 2. Instabilità del mantello inferiore in un silo in lamiera causata dalla compressione verticale indotta per attrito dal contenuto (immagine tratta dal sito <http://silopressuremeasurements.weebly.com>).

m e culmina con un foro di diametro 280 mm, dal quale avviene lo scarico del materiale per mezzo di un cono vibrante. Il riempimento del silo avviene invece dall'alto mediante un sistema pneumatico.

L'altezza totale del sacco misura 6.5 m per un volume immagazzinabile di circa 50 m<sup>3</sup>.

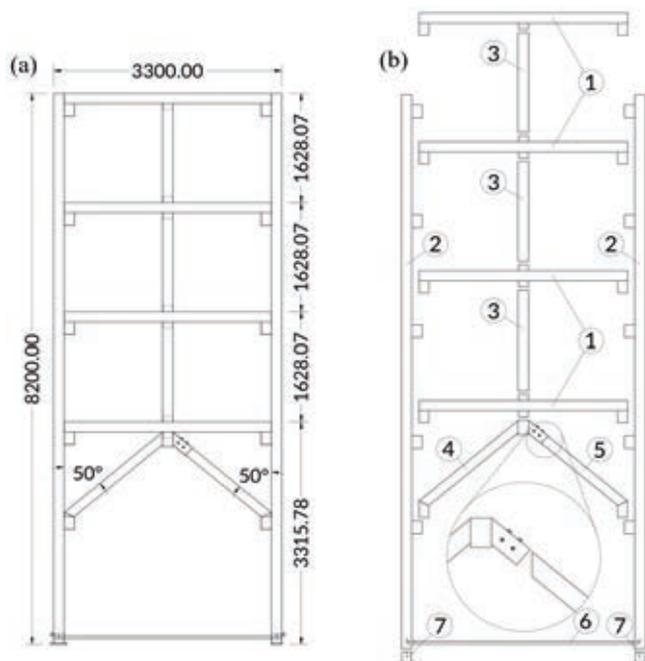


Figura 3. Struttura metallica di supporto: (a) vista frontale quotata (misure in mm) e (b) esploso; legenda:

1. traversi      3. montanti      5. saetta B      7. piedi  
2. colonne      4. saetta A      6. rinforzo

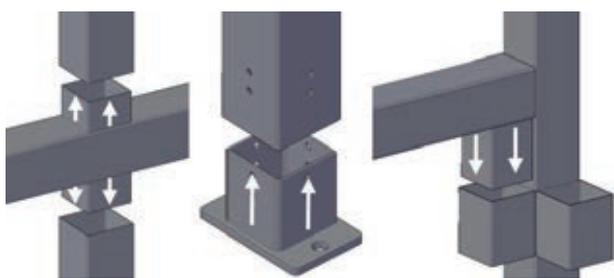


Figura 4. Esempio di connessioni tra profili scatolari di tipo cuff connection.

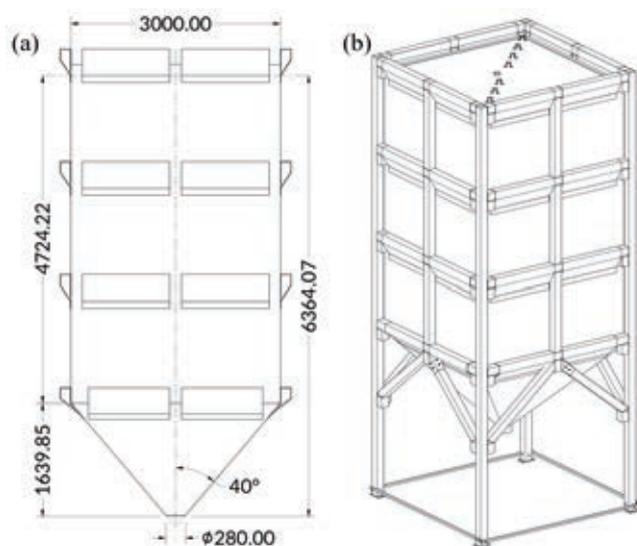


Figura 5. (a) Vista frontale quotata del sacco di contenimento e (b) sacco assemblato alla struttura di supporto.

## 2.2 Materiali

Per realizzare il telaio è stato impiegato un acciaio standard S 235 JR il cui legame costitutivo  $\sigma$ - $\epsilon$  è illustrato in Fig. 6. L'andamento è elastico-perfettamente plastico-incrudente e le deformazioni corrispondenti alla fine del plateau ed alla rottura sono state assunte nei calcoli rispettivamente pari a 0.04 e 0.11. Le proprietà nominali di rigidità e resistenza sono riportate in Tabella 1.

Il sacco è realizzato con un tessuto Trevira in poliestere ad alta resistenza. Sono stati forniti dal produttore i risultati delle prove di trazione eseguite sia lungo l'ordito che lungo la trama. Si evidenziano nette differenze di comportamento nelle due direzioni come tipicamente avviene per i tessuti, con l'ordito meno rigido ma più resistente e deformabile a rottura. I legami costitutivi  $\sigma$ - $\epsilon$  desunti dalle prove di laboratorio e le rispettive approssimazioni lineari adottate nella modellazione numerica sono illustrati in Fig. 7. Le deformazioni a rottura in direzione di ordito e trama sono rispettivamente pari a 0.28 e 0.13. Le proprietà nominali di rigidità e resistenza dedotte dalle prove sono riportate in Tabella 2. Allo scopo di uniformare il comportamento nelle due direzioni, sul sacco sono state cucite strisce di irrigidimento che lo rendono sostanzialmente isotropo.

Per le proprietà geotecniche della farina e dello zucchero, in assenza di prove di laboratorio si è fatto riferimento ai valori riportati dall'Eurocodice 1 (CEN 2006a), qui elencati in Tabella 3. Nella modellazione numerica del contenuto con elementi solidi si è fatto uso di un criterio di rottura alla Mohr-Coulomb, nel quale sia il coefficiente di Poisson  $\nu$  sia il modulo elastico  $E$ , variabile con l'entità del carico, sono stati dedotti da uno studio sulle proprietà geotecniche di polveri alimentari (Ramírez et al. 2009).

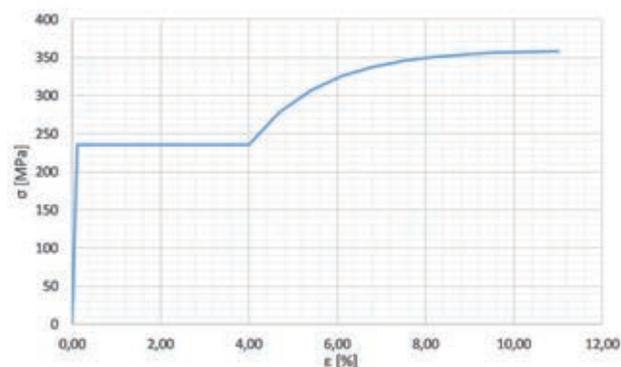


Figura 6. Legame costitutivo dell'acciaio dei profili.

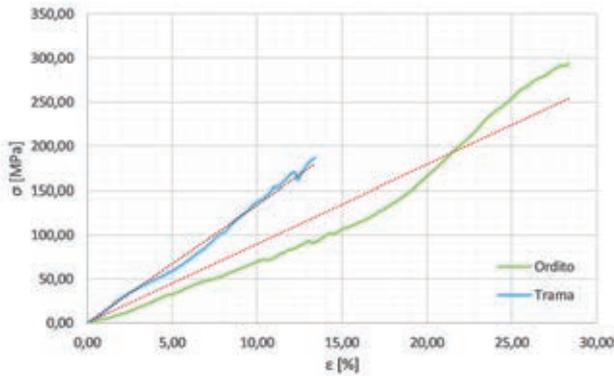


Figura 7. Legame costitutivo del tessuto Trevira lungo ordito e trama.

Tabella 1. Proprietà dell'acciaio

Acciaio	$E$ [GPa]	$f_{yk}$ [MPa]	$f_{tk}$ [MPa]
S 235 JR	210	235	360

Tabella 2. Proprietà del tessuto

Direzione tessuto	$E$ [MPa]	$f_{tk}$ [MPa]
Ordito	648	272
Trama	1137	186

Tabella 3. Proprietà dei materiali insilati

Parametro	Farina	Zucchero
Peso specifico, $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	7.00	9.50
Angolo di riposo, $\phi_r$ [deg]	45	38
Angolo di attrito int., $\phi_i$ [deg]	42	32
Coesione, $c$ [MPa]	0.00	0.00
Fattore di spinta, $K$ [-]	0.36	0.50
Coefficiente d'attrito <sup>(a)</sup> , $\mu$ [-]	0.33	0.51

<sup>(a)</sup> Valutato per scabrezza di classe D2 (CEN 2006a)

### 3 AZIONI E COMBINAZIONI

Il silo, installato al chiuso, non è soggetto ai fenomeni atmosferici e le azioni più significative sono pertanto rappresentate da peso proprio strutturale (circa 22 kN), pressioni esercitate dal contenuto ed azione sismica.

#### 3.1 Spinta del materiale

Seguendo l'Eurocodice 1 (CEN 2006a), per sili aventi capacità inferiori alle 100 tonnellate (nel caso in oggetto si stimano circa 48 t nella situazione più gravosa) si può fare riferimento alla classe AAC1, che consente l'applicazione di azioni semplificate e l'utilizzo di parametri geotecnici medi. Per la valutazione delle pressioni nei casi di *filling* (silo pieno in condizioni stazionarie) e *discharge* (silo pieno in fase di svuotamento) si è fatto riferimento ai sili mediamente snelli ( $1 \leq h_c/d_c \leq 2$  con  $h_c$  altezza del mantello e  $d_c$  dimensione in pianta). In

condizioni di *filling* le spinte normali e tangenziali agenti sulle pareti verticali vengono espresse, rispettivamente, come di seguito:

$$p_{hf}(z) = \gamma K z_0 \{1 - [(z - h_0)/(z_0 - h_0) + 1]^n\} \quad (1)$$

$$p_{wf}(z) = \mu p_{hf}(z) \quad (2)$$

in cui:

$$n = -(1 + \tan\phi_r)(1 - h_0/z_0) \quad (3)$$

$$h_0 = d_c \tan\phi_r / 4 \quad (4)$$

$$z_0 = A/(K\mu U). \quad (5)$$

Nelle (1)-(2)  $z$  è la coordinata verticale con l'origine posta in sommità del mantello (sulla superficie equivalente del contenuto) e diretta verso il basso,  $A$  l'area in pianta del sacco e  $U$  il suo perimetro. Inoltre i parametri  $K$  e  $\mu$  hanno il significato, rispettivamente, di coefficiente di spinta e di coefficiente di attrito fra polvere e silo.

In condizione di *discharge* le azioni (1) e (2) vengono amplificate rispettivamente mediante i coefficienti:

$$C_h = 0.85 + 0.15 h_c/d_c \quad (6)$$

$$C_w = 0.60 + 0.40 h_c/d_c \quad (7)$$

Sulla tramoggia, le tensioni normali e tangenziali di *filling* valgono rispettivamente:

$$p_{nf}(x) = F_f p_v(x) \quad (8)$$

$$p_{tf}(x) = \mu_{heff} p_{nf}(z) \quad (9)$$

in cui:

$$F_f = 1 - [0.2 / (1 + \tan\beta/\mu_{heff})], \quad (10)$$

dove  $p_v(x)$  è la tensione verticale media della polvere insilata,  $x$  è la coordinata verticale con origine posta all'apice della tramoggia e diretta verso l'alto e  $\mu_{heff}$  è il coefficiente efficace d'attrito mobilitato fra polvere e tramoggia. Il valore di quest'ultimo può dipendere dalla pendenza della tramoggia e dal rapporto fra spinte normale e tangenziale. L'Eurocodice 1 (CEN 2006a) distingue una tramoggia *steep* (totale mobilitazione dell'insilato,  $\mu_{heff} = \mu$ ) da una *shallow* (parziale mobilitazione dell'insilato, ( $\mu_{heff} = (1-K)/2\tan\beta$ ) se:

$$\tan\beta < (1 - K)/2\mu \quad (11)$$

dove  $\beta$  indica il semiangolo verticale della tramoggia.

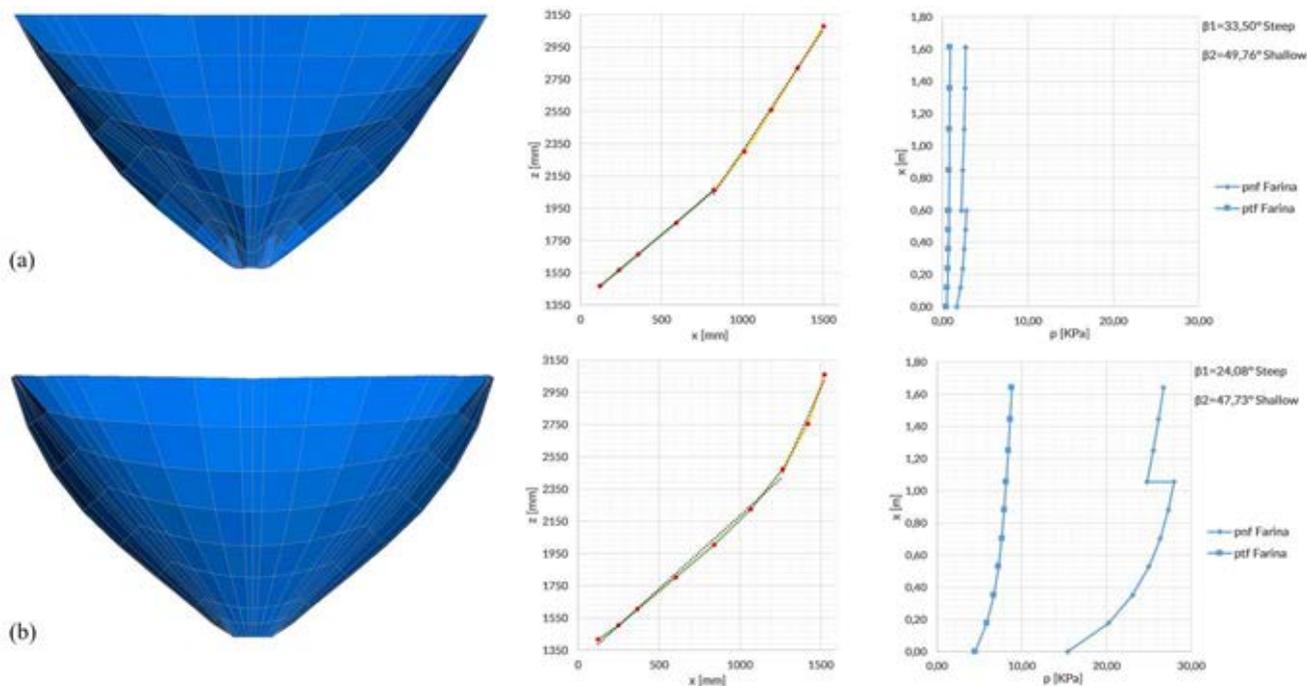


Figura 8. Deformate della tramoggia e relativi profili di spinta per due diversi passi di carico: (a) configurazione iniziale sotto il solo peso proprio; (b) configurazione finale con carico di *filling* completamente applicato.

In condizioni di *discharge* continuano a valere le eq. (8) e (9) nel caso di tramogge *shallow*, mentre per tramogge *steep* occorre sostituire a  $F_f$  il coefficiente di spinta amplificato:

$$F_e = (1 + \sin\phi_i \cos\varepsilon) / [1 - \sin\phi_i \cos(2\beta + \varepsilon)] \quad (12)$$

dove:

$$\varepsilon = \phi_{wh} + \sin^{-1}(\sin\phi_{wh} / \sin\phi_i) \quad (13)$$

$$\phi_{wh} = \tan^{-1}(\mu_{heff}) \quad (14)$$

I profili di pressione agenti sulla tramoggia sono quindi fortemente dipendenti dal semiangolo verticale della stessa. Data l'entità degli spostamenti in gioco, appare inadeguato definire un unico profilo di spinte come avviene per il mantello.

### 3.2 Form finding

Avvalendosi di un'analisi di tipo non lineare statico, mediante procedura incrementale-iterativa con algoritmo di tipo Newton-Raphson, sono stati definiti diversi passi di carico per passare dalla condizione di solo peso proprio della struttura alla configurazione di massimo riempimento del silo. Per il *form finding* (Fig. 8) della tramoggia, nel generico passo di carico la deformata è stata approssimata mediante i due segmenti tangenti all'apice e all'intersezione con il mantello,

ottenendo quindi le relative spinte tramite le equazioni riportate dall'Eurocodice 1 (CEN 2006a). Sotto tali spinte, opportunamente fattorizzate, la tramoggia perviene ad una nuova deformata, che produce a sua volta una modifica delle spinte. La procedura descritta è stata ripetuta iterativamente aggiornando geometria e carichi fino al raggiungimento della combinazione di carico desiderata.

### 3.3 Coefficienti di combinazione

Le spinte dovute al materiale insilato vengono considerate dalla norma (CEN 2006a) come carico variabile. In condizioni non sismiche allo SLU, in assenza di altri variabili, il peso proprio è stato fattorizzato per 1.35, mentre l'azione di *discharge* è stata amplificata moltiplicandola per 1.50.

In condizioni sismiche (Stato Limite di salvaguardia della Vita, SLV) il peso proprio della struttura e l'azione del sisma non vengono fattorizzati, mentre l'azione variabile statica, ossia le spinte di *filling*, vengono ridotte del 20% (Tabella 4).

Tabella 4. Coefficienti di combinazione

Carico	SLU	SLV
G (peso proprio)	1.35	1.00
$Q_{fil}$ ( <i>filling</i> )	1.50	0.80
$Q_{dis}$ ( <i>discharge</i> )	1.50	-
E (sisma)	-	1.00

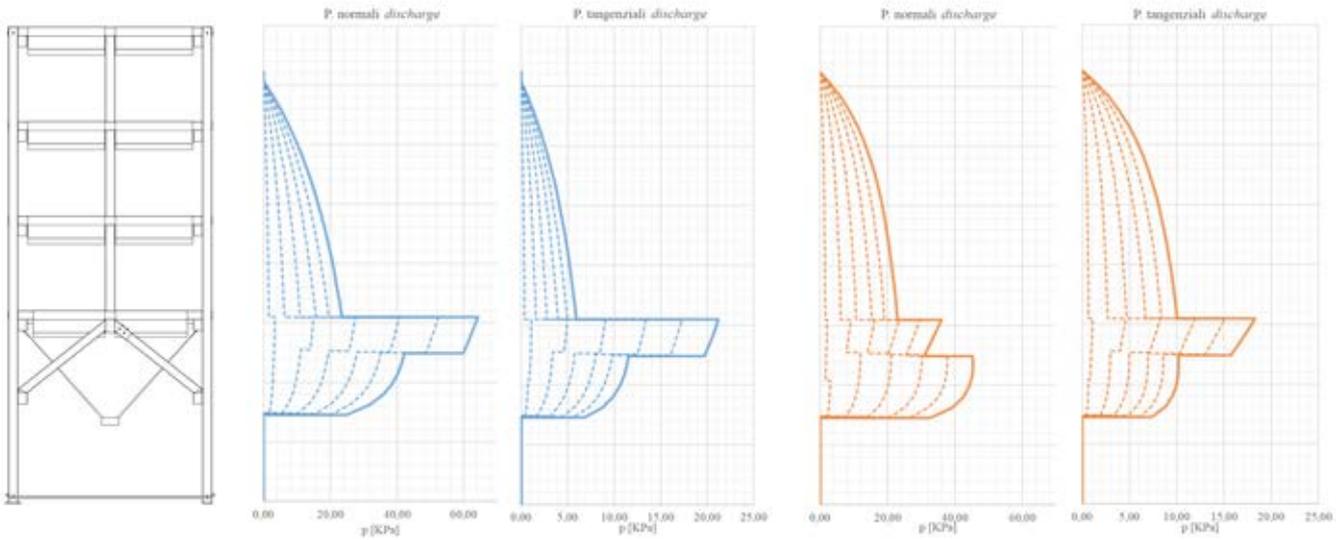


Figura 9. Pressioni normali e tangenziali in condizioni di *discharge* nel caso di farina (in blu) e zucchero (in rosso). I tratteggi indicano gli incrementi di carico fino alla combinazione SLU. Le singolarità nelle distribuzioni di pressione sono dovute alle variazioni locali di pendenza.

In Fig. 9 vengono illustrati gli andamenti delle spinte normali e tangenziali a diversi passi di carico.

#### 4 ANALISI ALLO SLU (SVUOTAMENTO)

La struttura è stata modellata tramite il software Strand7 (G+D Computing 2004). Gli elementi in tessuto, quali sacco e asole di ancoraggio, sono stati discretizzati mediante elementi finiti bidimensionali di tipo membrana isotropa, con proprietà intermedie fra quelle di trama e ordito. I profili in acciaio sono stati modellati in prima approssimazione mediante elementi finiti monodimensionali del tipo trave di Eulero-Bernoulli. Successivamente tutte le membrature sono state discretizzate mediante elementi bidimensionali alla Kirchhoff, al fine di cogliere eventuali fenomeni di imbozzamento locale. I piatti di collegamento fra le basi delle colonne sono stati riprodotti mediante elementi asta. Nelle connessioni fra i profili del telaio e fra sacco e traversi di sostegno è stata imposta la piena congruenza delle deformazioni fra le parti collegate.

Per quanto riguarda i vincoli al piede, le piastre di ancoraggio alla base di ogni colonna sono state modellate con elementi *plate/shell*. In corrispondenza dei fori per i tirafondi sono stati imposti vincoli alla traslazione verticale e nel piano orizzontale, mentre ai restanti nodi della piastra è stato assegnato un vincolo monolatero per simularne l'appoggio al suolo. Analogamente, sono stati assegnati dei vincoli monolateri

all'interfaccia tra sacco e profili verticali della struttura metallica, al fine di rappresentarne l'interazione in fase di riempimento. Immagini del modello sono riportate in Fig. 10.

La capacità del codice di calcolo di riprodurre il comportamento tensio-deformativo della membrana è stata preliminarmente verificata con riferimento al caso di membrana circolare vincolata sul contorno e soggetta ad un carico uniforme ortogonale al suo piano. L'analisi non lineare fornisce frecce e tensioni radiali, al centro e al contorno, in linea con i valori di riferimento (Timoshenko e Woinowsky-Krieger 1987).

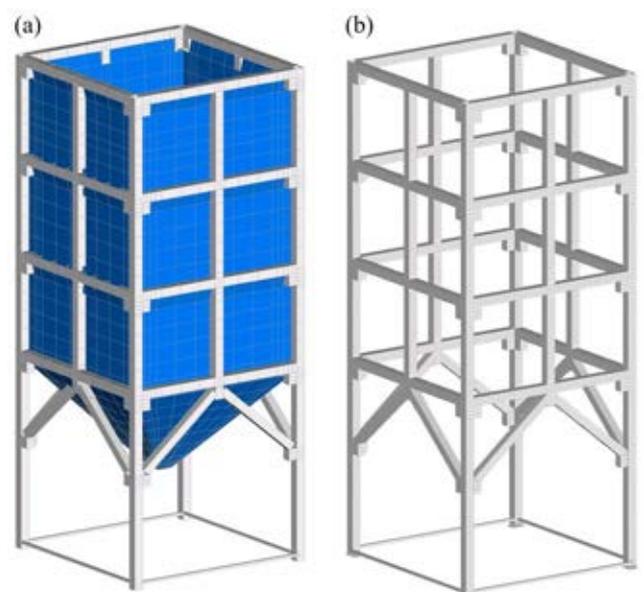


Figura 10. Modello agli elementi finiti: (a) sacco e struttura modellata con elementi *beam*; (b) sola struttura rimodellata con elementi *plate/shell*.

#### 4.1 Analisi di instabilità in campo elastico lineare

Il modello descritto è stato sottoposto inizialmente ad una serie di analisi di *buckling* in campo elastico lineare. Il software ha identificato diverse deformate critiche della struttura, per lo più localizzate nelle colonne in prossimità dei controventi e dei fissaggi alla base (Fig. 11). Indicando con  $F_{cr}$  il carico instabilizzante, il moltiplicatore della combinazione di progetto allo SLU che induce l'instabilità della struttura è stato determinato tramite la relazione:

$$\alpha_{cr} = F_{cr}/F_d = F_{cr}/(1.35G+1.50Q_{dis}) \quad (15)$$

I moltiplicatori  $\alpha_{cr}$  (Tabella 5) risultano ampiamente minori di 10, limite inferiore di validità delle analisi al primo ordine (CEN 2005).

#### 4.2 Analisi non lineare

L'analisi del silo in condizioni non sismiche è stata condotta in campo non lineare per materiale e per geometria. Come anticipato (§ 3.2), la geometria ed i profili di carico agenti sulle pareti del sacco sono stati progressivamente aggiornati e

Tabella 5. Moltiplicatori critici ( $\alpha_{cr}$ )

Combinazione	$\alpha_{cr}$ [-] farina	$\alpha_{cr}$ [-] zucchero
SLU: 1.35G+1.50Q <sub>dis</sub>	3.25	3.33

applicati incrementalmente fino al raggiungimento della combinazione SLU (Tabella 4).

Lo stato tensionale del sacco al termine dell'analisi è riportato in Fig. 12a dove si evidenziano sollecitazioni maggiori nella parte alta della tramoggia, in prossimità della transizione con il mantello. Le massime tensioni principali ottenute, pari a 114 MPa, si raggiungono in presenza della farina e rimangono ben al di sotto dei valori di rottura (Fig. 7).

La Fig. 12b riporta la mappa della deformazione ideale (Von Mises) sui soli elementi plasticizzati del telaio. Le aree evidenziate, seppur limitate, si riferiscono ancora una volta al tratto inferiore delle colonne, in prossimità della base e dei controventi. Tuttavia, la massima deformazione raggiunta è circa pari allo 0.80%, ben al di sotto del valore di rottura (Fig. 6).

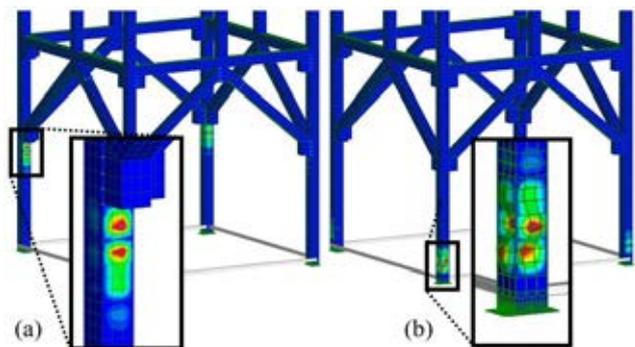


Figura 11. Deformate critiche delle colonne in prossimità di (a) controventi e (b) vincoli.

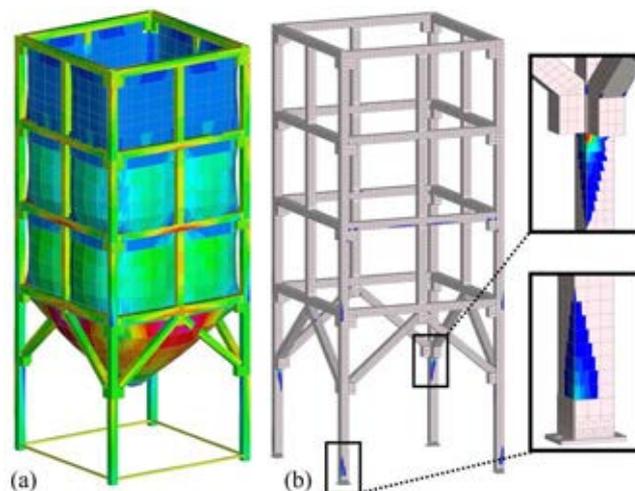


Figura 12. Risultati dell'analisi allo SLU: mappe (a) delle tensioni principali massime nel sacco e (b) delle deformazioni per i soli elementi plasticizzati della struttura metallica.

## 5 ANALISI DELLA SICUREZZA SISMICA

A silo pieno, la massa del contenuto è circa pari a 36 t nel caso della farina e a 48 t nel caso dello zucchero. La massa del silo vuoto è pari a poco più di 2 t. In accordo con l'Eurocodice 8 (CEN 2006b), le masse sismiche sono state stimate secondo la combinazione  $G+0.80Q_{fil}$  (Tabella 4).

Nelle analisi presentate di seguito, sforzi e deformazioni nei profili metallici sono stati valutati tenendo conto delle spinte della polvere, ottenute a loro volta mediante la modellazione descritta al § 4 e facendo uso dei profili riportati dall'Eurocodice 1 (CEN 2006a). Per confronto, nel caso della farina, è stato poi realizzato un nuovo modello numerico, in cui il contenuto è stato discretizzato mediante elementi solidi. A questi sono stati associati un criterio di rottura alla Mohr-Coulomb e le proprietà geotecniche della farina. Mediante un incremento a strati del contenuto (Fig. 13a) è stato possibile simulare l'azione di *filling* fino a completo carico. L'interazione fra polvere e sacco è stata riprodotta mediante elementi finiti monodimensionali posti all'interfaccia, che consentono di apprezzare l'evoluzione della deformata del contenitore. Nella tramoggia, data

la tendenza della farina a compattarsi (a tal punto da pregiudicare lo scarico in assenza di un opportuno cono vibrante), è stata imposta la continuità delle deformazioni all'interfaccia tra contenuto e membrana. Nel mantello, invece, si è tenuto conto dello scorrimento fra polvere e sacco assegnando ai sopraccitati elementi di contatto il coefficiente di attrito fornito dalla normativa (Tabella 3). Si riporta in Fig. 13b la mappa degli spostamenti verticali del contenuto in cui si può apprezzare la mobilitazione dell'attrito in prossimità delle pareti verticali.

### 5.1 Analisi in frequenza

Per la valutazione delle forme modali della struttura metallica e delle frequenze associate, la massa del materiale all'interno del silo è stata riprodotta modificando opportunamente la densità degli elementi *plate/shell* costituenti i traversi, su cui il sacco grava per mezzo delle asole, tramite un criterio a volumi di influenza.

Per tenere conto dell'effetto dei carichi sulle oscillazioni della struttura, sono state condotte preliminarmente delle analisi statiche lineari del solo telaio con applicate, direttamente ai punti di ancoraggio e di contatto, le reazioni vincolari del sacco sviluppatasi all'ultimo passo di carico per la combinazione  $G+0.80Q_{fil}$ . Le sollecitazioni ottenute sono state utilizzate per formare una matrice di rigidità geometrica.

Tanto per la farina quanto per lo zucchero, le masse attivate dal solo modo fondamentale sono risultate superiori all'85%. La massa del contenuto gioca ovviamente un ruolo cruciale, riducendo la frequenza di circa l'80% rispetto al caso di silo vuoto. Il periodo di vibrazione del silo contenente farina è leggermente più contenuto rispetto al caso dello zucchero, coerentemente con la massa sismica inferiore. In Fig. 14a si riporta la deformata modale del silo contenente zucchero, mentre in Tabella 6 i valori delle frequenze e delle masse partecipanti del modo fondamentale.

Ipotizzando l'installazione dell'impianto a Ferrara, massa sismica e periodo di vibrazione conducono, tramite lo spettro di riposta relativo allo SLV ( $T_R = 475$  anni), ad un tagliante massimo  $V_{ref} = 152$  kN nel caso della farina e 174 kN nel caso dello zucchero.

### 5.2 Analisi pushover

Data l'entità della massa sismica, si è adottato un profilo di carico laterale proporzionale ad essa.

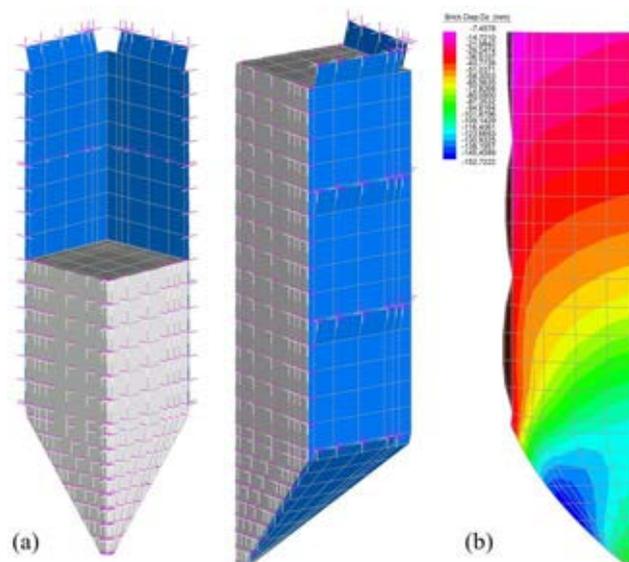


Figura 13. Modellazione agli elementi finiti della farina: (a) fasi di riempimento a strati; (b) mappa degli spostamenti verticali all'ultimo passo di carico (si può notare l'adesione delle polveri all'interfaccia attritiva del mantello).

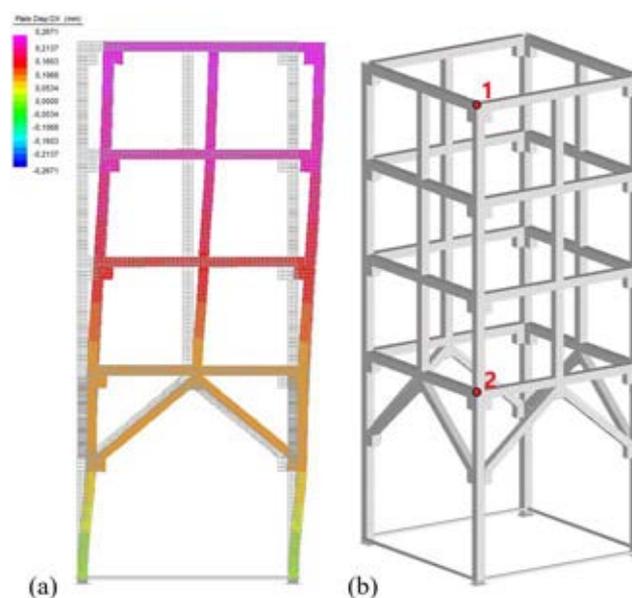


Figura 14. (a) Deformata del modo fondamentale del silo contenente zucchero. (b) Posizione dei punti di controllo considerati per la rappresentazione della curva di capacità.

Tabella 6. Frequenze e masse partecipanti relative al modo fondamentale di vibrare in condizioni di silo vuoto, contenente farina o contenente zucchero.

Condizione	Frequenza [Hz]	Massa attivata [%]
Silo vuoto	8.34	79.3
Farina (80%)	2.16	89.6
Zucchero (80%)	1.87	89.8

Tale carico è stato ripartito sui traversi metallici della struttura di supporto, mantenendo costante durante l'analisi il carico verticale fornito da  $G+0.80Q_{fil}$ . L'azione sismica è stata applicata incrementalmente nell'analisi non lineare secondo la combinazione  $E_x+0.30E_y$ , dove

$x$  e  $y$  indicano le direzioni, mutuamente ortogonali, delle pareti del mantello. Le analisi sono state condotte anche ruotando il modello di  $45^\circ$ , applicando quindi le componenti sismiche secondo le diagonali del quadrato individuato dalle quattro colonne.

Le curve di capacità ottenute (Fig. 15) si riferiscono ai due punti di controllo evidenziati in Fig. 14b. Si osserva un marcato scostamento dalla linearità legato all'imbozzamento ed alla plasticizzazione delle colonne alla base e poco sotto l'innesto con i controventi (Fig. 16). In tutti i casi, le deformazioni massime si mantengono ampiamente al di sotto del limite di rottura del materiale. Tuttavia il rapporto fra i taglianti  $V_{max}/V_{ref}$  mostra una capacità sismica inadeguata per il sito di installazione (Tabella 7), soprattutto se le pressioni della polvere sono valutate tramite le espressioni dell'Eurocodice 1. Con una modellazione accurata del contenuto la capacità risulta solo debolmente inferiore al valore di riferimento.

### 5.3 Interventi di rinforzo

Per migliorare la prestazione sismica del silo si

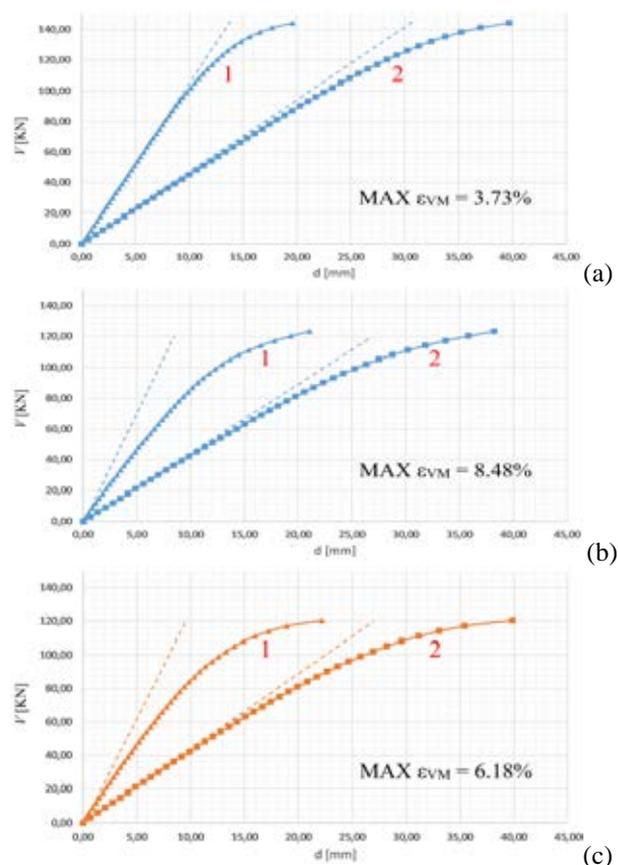


Figura 15. Curve di capacità pre-intervento relative ai punti indicati in Fig. 14b: (a) farina con pressioni ottenute mediante modellazione numerica con elementi solidi; (b) farina e (c) zucchero con pressioni ottenute dalle equazioni riportate dall'EC1 (CEN 2006a).

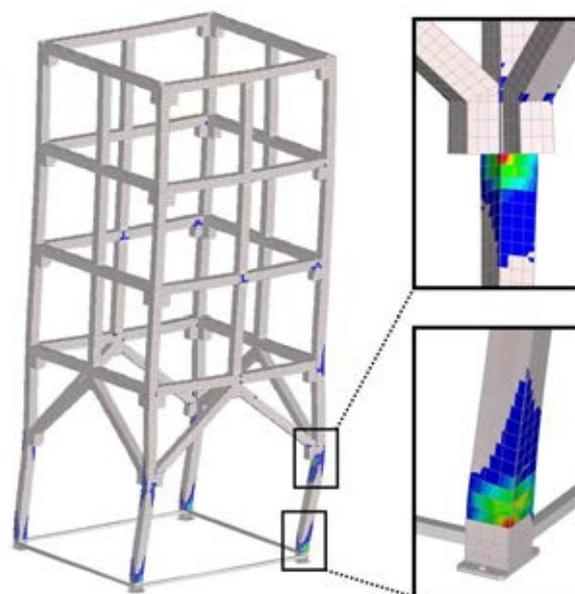


Figura 16. Risultati dell'analisi pushover. Mappa delle deformazioni per i soli elementi plasticizzati.

Tabella 7. Taglianti massimi pre-intervento.

Condizione	$V_{max}$ [kN]	$V_{ref}$ [kN]	$V_{max}/V_{ref}$ [%]
Farina (modello brick)	143	152	94%
Farina (spinte da EC1)	126	152	83%
Zucchero (spinte da EC1)	120	174	69%

è valutata la sostituzione del tratto di base delle colonne con profili dello stesso ingombro ma spessore pari a 10 mm.

Dopo l'intervento si registra un incremento dei moltiplicatori  $\alpha_{cr}$  dell'eq. (15) che divengono circa pari a 4.2. Vi è inoltre un incremento delle frequenze fondamentali del silo che, con riferimento allo spettro di risposta elastico, comporta un incremento dei taglianti  $V_{ref}$  a 160 e a 194 kN rispettivamente per farina e zucchero.

Eseguendo nuovamente l'analisi pushover il panorama delle verifiche migliora significativamente (Fig. 17, Tabella 8). Nel caso della farina, se le pressioni sul sacco, e quindi le sollecitazioni nei profili della struttura di supporto, sono valutate a partire da un modello accurato della polvere con elementi solidi (Fig. 17a), si ottiene un incremento dell'82% del tagliante massimo, che passa da 143 a 261 kN. Le verifiche per questo caso risultano quindi ampiamente soddisfatte.

## 6 CONCLUSIONI

Lo studio presentato riguarda un silo a sacco con struttura di supporto a telaio in acciaio. La deformabilità del sacco sotto le spinte della

polvere comporta una forte sovrastima delle pressioni se queste sono valutate mediante le espressioni riportate dall'Eurocodice 1. Si rende allora necessaria una modellazione accurata del contenuto e della sua interazione con il sacco. Facendo uso di un'opportuna modellazione della farina con elementi solidi si è ottenuta una rappresentazione più accurata delle pressioni agenti sul sacco e degli sforzi nei profili metallici. Il silo si è dimostrato adeguato per l'installazione in zona sismica a patto di incrementare lo spessore del tratto di base delle colonne.

## RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata finanziata con il contributo del Fondo di Ateneo per la Ricerca – FAR 2019

Tabella 8. Taglianti massimi post-intervento.

Condizione	$V_{max}$ [KN]	$V_{ref}$ [KN]	$V_{max}/V_{ref}$ [%]
Farina (modello brick)	261	160	163%
Farina (spinte da EC1)	162	160	101%
Zucchero (spinte da EC1)	159	194	82%

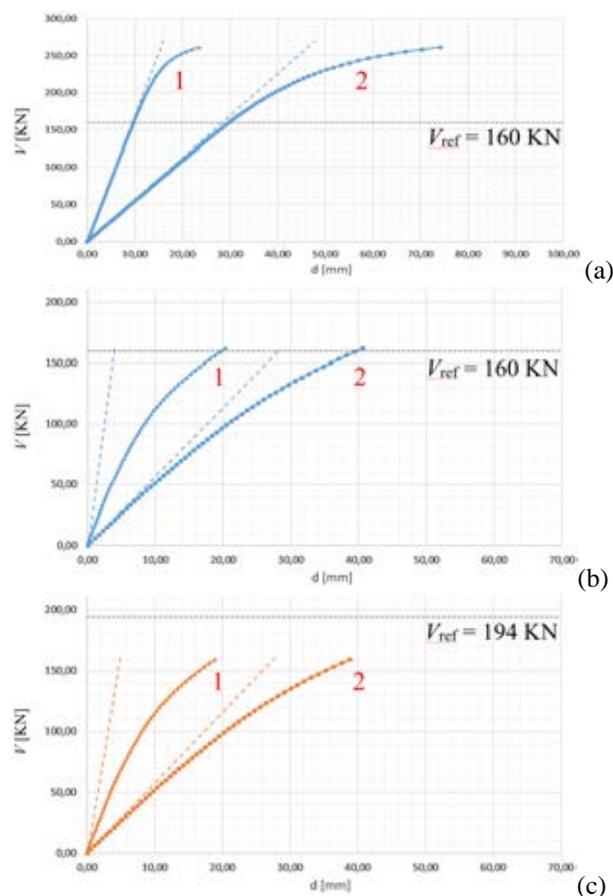


Figura 17. Curve di capacità post-intervento relative ai punti indicati in Fig. 14b: (a) farina con pressioni ottenute mediante modellazione numerica con elementi solidi; (b) farina e (c) zucchero con pressioni ottenute dalle equazioni riportate dall'EC1 (CEN 2006a).

dell'Università di Ferrara. I dati geometrici del silo sono stati forniti dalla ditta B&B Impianti Silos di San Giovanni di Ostellato (FE).

## RIFERIMENTI

- CEN, 2006a. Eurocode 1 – *Actions on structures – Part 4: Silos and tanks* (EN 1991-4:2006), Brussels, B.
- CEN, 2005. Eurocode 3 – *Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings* (EN 1993-1-1:2005), Brussels, B.
- CEN, 2006b. Eurocode 8 – *Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines* (EN 1998-4:2006), Brussels, B.
- G+D Computing, *Theoretical Manual – Theoretical background to the Strand7 finite element analysis system* (2004).
- JRC, 2016. European Commission, Joint Research Centre, *Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures*.
- F. Lodi, F. Minghini, N. Tullini, 2017. Valutazione della sicurezza e progetto di rinforzo di un silo in acciaio per polveri in zona sismica. XVII Convegno ANIDIS, Pistoia.
- A. Ramírez, M. Moya, F. Ayuga, *Part. Part. Syst. Charact.* 26. *Determination of the Mechanical Properties of Powered Agricultural Products and Sugar* (2009).
- S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells* (1987).