SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

ordineingegneridellaprovinciadibenevento

Verso IperWall BIM: analisi e verifica di strutture esistenti in muratura

Prof. Ing. Enzo Martinelli

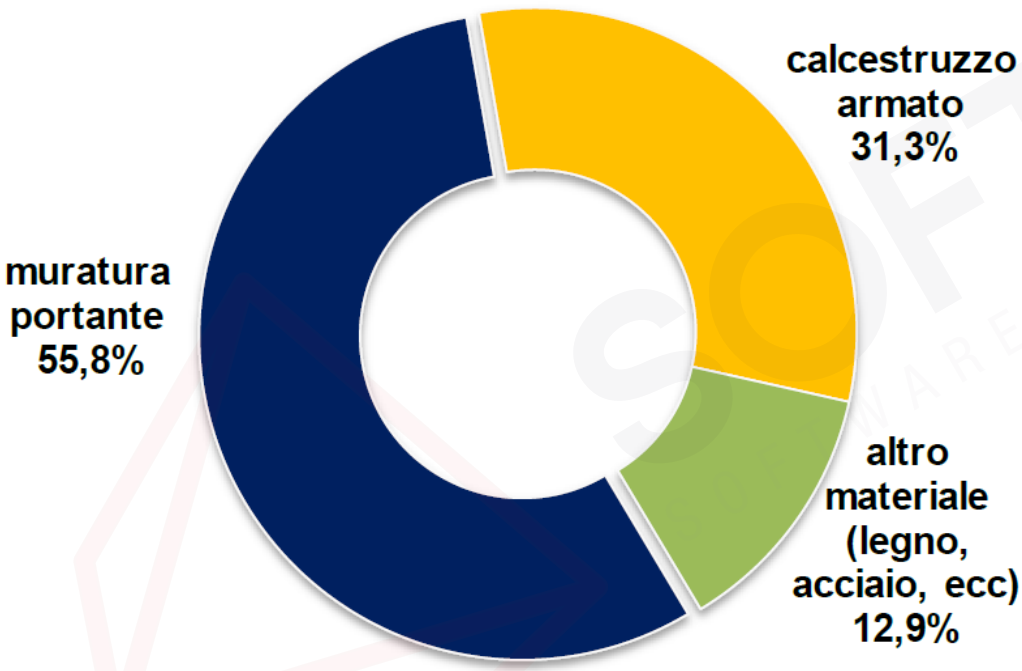
esis s.r.l.
Tecnologie Emergenti a Servizio dell'Ingegneria Strutturale
SpinOff

SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

- ✓ Introduzione
- ✓ Materiali
- ✓ Analisi e verifiche
- ✓ Applicazioni
- ✓ Conclusioni

Introduzione

Patrimonio edilizio italiano: tipologia costruttiva



Elaborazione Ance su dati Censimento Istat 2011

Circa **5.3 milioni di edifici residenziali** ricadenti in zone sismiche 1, 2 o 3 sono costituiti da strutture in muratura.

Introduzione

Danni indotti da eventi sismici: Croazia (2020)

Introduzione

Danni indotti da eventi sismici: Croazia (2020)

Introduzione

Danni indotti da eventi sismici: Croazia (2020)

Introduzione

Danni indotti da eventi sismici: Croazia (2020)

Introduzione

Danni indotti da eventi sismici: Croazia (1880)

Aspetti normativi

Tipologie costruttive

Tipologie

- **Muratura ordinaria**
- **Muratura armata**
- **Muratura confinata**
- **Strutture miste**

M.II.TT. (2018), NTC 2018,
D.M. 17.01.2018

Aspetti normativi

Materiali

- **Muratura**
  - **Blocchi (Elementi)**
    - Artificiali
      - Laterizio
      - Calcestruzzo
    - Naturali
  - **Malte**

M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

Materiali

Materiali: blocchi artificiali (specifiche tecniche)

Specifica Tecnica Europea di riferimento	Categoria	Sistema di Valutazione e Verifica della Costanza della Prestazione
Specifica per elementi per muratura - Elementi per muratura di laterizio, silicato di calcio, in calcestruzzo vibrocompresso (aggregati pesanti e leggeri), calcestruzzo aerato autoclavato, pietra agglomerata, pietra naturale UNI EN 771-1, 771-2, 771-3, 771-4, 771-5, 771-6	Categoria I	2+
	Categoria II	4

Sistemi di valutazione e verifica della costanza della prestazione secondo il Regolamento (UE) n. 305/2011 *Prodotti da Costruzione* (CPR)

Sistemi di valutazione e verifica della costanza della prestazione	Controllo di produzione in fabbrica (FPC)	Ispezione iniziale e del FPC	Sorveglianza continua	Prove iniziali di tipo (ITT)	Altre prove su campioni prelevati secondo il piano di prove prescritto	Prove di controllo di campioni prelevati solo in fabbrica
Sistema 1 +	Fabbricante	3° parte	3° parte	3° parte	Fabbricante	3° parte
Sistema 1	Fabbricante	3° parte	3° parte	3° parte	Fabbricante	
Sistema 2+	Fabbricante	3° parte	3° parte	Fabbricante	Fabbricante	
Sistema 3	Fabbricante			3° parte		
Sistema 4	Fabbricante			Fabbricante		

M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

Materiali

Materiali: elementi (prove di accettazione)

Il controllo di accettazione in cantiere ha lo scopo di accertare se gli elementi da mettere in opera abbiano le caratteristiche dichiarate dal fabbricante.

Nel caso in cui il fabbricante abbia dichiarato la resistenza media, il controllo sarà effettuato su almeno un campione per ogni 350 m^3 di fornitura per elementi di Categoria II, e per ogni 650 m^3 per elementi di Categoria I. Ogni campione sarà costituito da n elementi ($n \geq 6$) da sottoporre a prova di compressione. Per ogni campione siano $f_1, f_2, \ldots f_n$ le resistenze a compressione degli elementi con $f_1 < f_2 < \ldots < f_n$; il controllo sul campione si considera positivo se risultino verificate entrambe le disuguaglianze:

$$(f_1 + f_2 + \ldots + f_n)/n \geq f_{bm} \qquad [11.10.1]$$

$$f_1 \geq 0{,}80\ f_{bm} \qquad [11.10.2]$$

dove f_{bm} è la resistenza media a compressione dichiarata dal fabbricante.

Nel caso in cui il fabbricante non abbia dichiarato la resistenza media ma abbia dichiarato la sola resistenza caratteristica, il controllo di accettazione in cantiere sarà effettuato su almeno un campione per ogni 350 m^3 di fornitura per elementi di Categoria II, innalzabili a 650 m^3 per elementi di Categoria I. Per ogni campione, siano $f_1, f_2, \ldots f_6$ la resistenza a compressione dei sei elementi con $f_1 < f_2 < \ldots f_6$, il controllo si considera effettuato con esito positivo se risulta verificata la seguente disuguaglianza: $f_1 \geq f_{bk}$, dove f_{bk} è la resistenza caratteristica a compressione dichiarata dal fabbricante.

Al Direttore dei Lavori spetta comunque l'obbligo di curare, mediante sigle, etichettature indelebili, ecc., che i campioni inviati per le prove ai laboratori siano effettivamente quelli prelevati in cantiere con indicazioni precise sulla fornitura e sulla posizione che nella muratura occupa la fornitura medesima.

Le modalità di prova sono riportate nella UNI EN 772-1:2015.

M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

Materiali

Materiali: blocchi artificiali (forati)

Tab. 4.5.Ia - *Classificazione elementi in laterizio*

Elementi	Percentuale di foratura φ	Area f della sezione normale del foro
Pieni	$\varphi \leq 15\%$	$f \leq 9\ cm^2$
Semipieni	$15\% < \varphi \leq 45\%$	$f \leq 12\ cm^2$
Forati	$45\% < \varphi \leq 55\%$	$f \leq 15\ cm^2$

Tab. 4.5.Ib - *Classificazione elementi in calcestruzzo*

Elementi	Percentuale di foratura φ	Area f della sezione normale del foro	
		$A \leq 900\ cm^2$	$A > 900\ cm^2$
Pieni	$\varphi \leq 15\%$	$f \leq 0{,}10\ A$	$f \leq 0{,}15\ A$
Semipieni	$15\% < \varphi \leq 45\%$	$f \leq 0{,}10\ A$	$f \leq 0{,}15\ A$
Forati	$45\% < \varphi \leq 55\%$	$f \leq 0{,}10\ A$	$f \leq 0{,}15\ A$

M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

Materiali

Materiali: malte per muratura

La classe di una malta è definita da una sigla costituita dalla lettera M seguita da un numero che indica la resistenza f_m espressa in N/mm² (per muratura portante $f_m \geq 2{,}5$ N/mm².

Per garantire la durabilità è necessario che i componenti la miscela rispondano ai requisiti contenuti nelle norme UNI EN 1008:2003 (acqua di impasto), nelle norme europee armonizzate UNI EN 13139 (aggregati per malta) e UNI EN 13055 (aggregati leggeri).

Le malte possono essere prodotte in fabbrica oppure prodotte in cantiere mediante la miscelazione di sabbia, acqua ed altri componenti leganti.

Le malte per muratura prodotte in fabbrica devono essere specificate o come malte a prestazione garantita oppure come malte a *composizione prescritta*.

La composizione delle malte per muratura prodotte in cantiere deve essere definita dalle specifiche del progetto.

M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

Materiali

Materiali: malte a prestazione garantita

Tab. 11.10.II - *Classi di malte a prestazione garantita*

Classe	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	M d
Resistenza a compressione N/mm²	2,5	5	10	15	20	d

d è una resistenza a compressione maggiore di 25 N/mm² dichiarata dal fabbricante

Tab. 11.10.III

Specifica Tecnica Europea di Riferimento	Uso Previsto	Sistema di Valutazione e Verifica della Costanza della Prestazione
Malta per murature UNI EN 998-2	Usi strutturali	2+

M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

Materiali

Materiali: malte a composizione prescritta

Tab. 11.10.V - *Corrispondenza tra classi di resistenza e composizione in volume delle malte*

Classe	Tipo di malta	Composizione				
		Cemento	Calce aerea	Calce idraulica	Sabbia	Pozzolana
M 2,5	Idraulica	–	–	1	3	–
M 2,5	Pozzolanica	–	1	–	–	3
M 2,5	Bastarda	1	–	2	9	–
M 5	Bastarda	1	–	1	5	–
M 8	Cementizia	2	–	1	8	–
M 12	Cementizia	1	–	–	3	–

Tab. 11.10.IV

Specifica Tecnica Europea di Riferimento	Uso Previsto	Sistema di Valutazione e Verifica della Costanza della Prestazione
Malta per murature UNI EN 998-2	Usi strutturali e non	4

M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

Materiali

Materiali: strutture esistenti

Tipologia di muratura	f (N/mm²)	τ_0 (N/mm²)	f_{v0} (N/mm²)	E (N/mm²)	G (N/mm²)	w (kN/m³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es,: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.

Materiali

Materiali: strutture esistenti (effetto di interventi)

Tabella C8.5.II -*Coefficienti correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato; ristilatura armata con connessione dei paramenti.*

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonacoarmato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (****)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es,: doppio UNI foratura ≤40%)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3

(*) I coefficienti correttivi relativi alle iniezioni di miscele leganti devono essere commisurati all'effettivo beneficio apportato alla muratura, riscontrabile con verifiche sia nella fase di esecuzione (iniettabilità) sia a-posteriori (riscontri sperimentali attraverso prove soniche o similari).

(**) Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

(***) Nel caso di muratura di mattoni si intende come "malta buona" una malta con resistenza media a compressione f_m superiore a 2 N/mm². In tal caso il coefficiente correttivo può essere posto pari a $f_m^{0.35}$ (f_m in N/mm²).

(****) Nel caso di muratura di mattoni si intende come muratura trasversalmente connessa quella apparecchiata a regola d'arte.

M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.

Materiali

Fattori parziali di sicurezza (nuove costruzioni)

Tab. 4.5.II. *Valori del coefficiente γ_M in funzione della classe di esecuzione e della categoria degli elementi resistenti*

Materiale	Classe di esecuzione	
	1	2
Muratura con elementi resistenti di categoria I, malta a prestazione garantita	2,0	2,5
Muratura con elementi resistenti di categoria I, malta a composizione prescritta	2,2	2,7
Muratura con elementi resistenti di categoria II, ogni tipo di malta	2,5	3,0

La Classe 1 è attribuita qualora siano previsti, oltre ai controlli di cui sopra, i seguenti controlli:
– controllo e valutazione in loco delle proprietà della malta e del calcestruzzo;
– dosaggio dei componenti della malta “a volume” con l’uso di opportuni contenitori di misura e controllo delle operazioni di miscelazione o uso di malta premiscelata certificata dal produttore.

Per le verifiche sismiche (Capitolo 7), i coefficienti parziali di sicurezza per la resistenza del materiale forniti nel Capitolo 4 possono essere ridotti del 20% e comunque fino ad un valore non inferiore a 2.

M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.

Materiali

Fattori parziali di sicurezza (strutture esistenti)

La tabella C8.5.I riporta, per il comportamento delle tipologie murarie più ricorrenti, indicazioni, non vincolanti, sui possibili valori dei parametri meccanici, identificati attraverso il rilievo degli aspetti costruttivi (§ C8.5.2.1) e relativi, con l'eccezione dell'ultima riga, a precise condizioni: malta di calce di modeste caratteristiche (resistenza media a compressione $\mathbf{f_m}$ stimabile tra 0,7 e 1,5 N/mm2), assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte, muratura non consolidata.

Ai soli fini della verifica sismica, nel caso in cui la malta abbia caratteristiche particolarmente scadenti (resistenza media a compressione $\mathbf{f_m}$ stimabile inferiore a 0,7 N/mm^2) <u>ai valori della tabella si applica un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici</u>. I parametri indicati in tabella sono principalmente finalizzati alle verifiche nei riguardi delle azioni sismiche.

M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.

Materiali

Livelli di conoscenza (strutture esistenti)

Prove limitate: Si tratta di indagini non dettagliate e non estese, basate principalmente su esami visivi delle superfici, che prevedono limitati controlli degli elementi costituenti la muratura. Sono previste rimozioni locali dell'intonaco per identificare i materiali di cui e costituito l'edificio; in particolare, avvalendosi anche dell'analisi storico-critica, e possibile suddividere le pareti murarie in aree considerabili come omogenee. […]

Prove estese: Si tratta di indagini visive, diffuse e sistematiche, accompagnate da approfondimenti locali. Si prevedono saggi estesi, sia in superficie sia nello spessore murario (anche con endoscopie), mirati alla conoscenza dei materiali e della morfologia interna della muratura, all'individuazione delle zone omogenee per materiali e tessitura muraria, dei dispositivi di collegamento trasversale, oltre che dei fenomeni di degrado. E inoltre prevista l'esecuzione di analisi delle malte e, se significative, degli elementi costituenti, accompagnate da tecniche diagnostiche non distruttive (penetrometriche, sclerometriche, soniche, termografiche, radar, ecc.) ed eventualmente integrate da tecniche moderatamente distruttive (ad esempio martinetti piatti), finalizzate a classificare in modo più accurato la tipologia muraria e la sua qualità.

Prove esaustive: In aggiunta alle richieste della categoria precedente, si prevedono prove dirette sui materiali per determinarne i parametri meccanici. […]

M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.

Materiali

Fattori di confidenza (strutture esistenti)

LC1: si intende raggiunto quando siano stati effettuati, come minimo, l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato, il rilievo geometrico completo e indagini limitate sui dettagli costruttivi, prove limitate sulle caratteristiche meccaniche dei materiali […] (FC=1.35);

LC2: si intende raggiunto quando siano stati effettuati, come minimo, l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato, il rilievo geometrico completo e indagini estese sui dettagli costruttivi, prove estese sulle caratteristiche meccaniche dei materiali (FC=1.20)

LC3: si intende raggiunto quando siano stati effettuati l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato, il rilievo geometrico, completo ed accurato in ogni sua parte, e indagini esaustive sui dettagli costruttivi, prove esaustive sulle caratteristiche meccaniche dei materiali (FC=1.0, da applicarsi limitatamente ai valori di quei parametri per i quali sono state eseguite le prove e le indagini su citate, mentre per gli altri parametri meccanici il valore di FC è definito coerentemente con le corrispondenti prove limitate o estese eseguite).

M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.

Materiali

Valori di calcolo dei parametri meccanici (strutture esistenti)

LC1: -Resistenze: i valori minimi degli intervalli riportati in Tabella C8.5.I.

- Moduli elastici: i valori medi degli intervalli riportati nella tabella suddetta.

LC2: - Resistenze: i valori medi degli intervalli riportati in Tabella C8.5.I

-Moduli elastici: i valori medi degli intervalli riportati nella tabella suddetta.

LC3: -I valori delle resistenze e dei moduli elastici riportati in Tabella C.8.5.I individuano una distribuzione a-priori che può essere aggiornata sulla base dei risultati delle misure eseguite in sito. Considerato il generico parametro X, una stima dei parametri μ' e σ' della distribuzione a-priori può essere dedotta dai valori minimo e massimo in tabella, con le formule seguenti:

$$\mu' = \tfrac{1}{2}\left(X_{min} + X_{max}\right) \qquad [C8.5.4.1]$$

$$\sigma' = \tfrac{1}{2}\left(X_{max} - X_{min}\right) \qquad [C8.5.4.2]$$

Eseguito un numero n di prove dirette, l'aggiornamento del valore medio può essere effettuato come segue:

$$\mu'' = \frac{n\bar{X} + \kappa\mu'}{n+\kappa} \qquad [C8.5.4.3]$$

dove $\bar{X}$ è la media delle n prove dirette e κ è un coefficiente che tiene conto del rapporto tra la dispersione (varianza) della stima effettuata attraverso le prove (combinazione tra incertezza della misurazione sperimentale e dispersione dei parametri meccanici nell'ambito dell'edificio che si sta analizzando) e la varianza σ'^2 della distribuzione a-priori.

M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.

Materiali

Fattori parziali di sicurezza (strutture esistenti)

Tabella C.8.5.III –*Valori del coefficiente κsuggeriti per l'aggiornamento del valore medio dei parametri meccanici, secondo l'equazione [C8.5.4.3], con riferimento ai più diffusi metodi di indagine diretta sulle proprietà meccaniche della muratura.*

Metodo di prova	Parametro	κ
Prova di compressione diretta (su una porzione di parete muraria)	E	1,5
	f	1
Martinetto piatto doppio	E	1,5
	f (*)	2 (*)
Prova di compressione e taglio (su un pannello isolato nella parete muraria) – prova tipo Sheppard	G	1,5
	τ_0 - f_{v0}	1
Prova di compressione diagonale	G	1,5
	τ_0	1
Prova di taglio diretto sul giunto	f_{v0}	2
Prove in laboratorio sui costituenti (**)	f_b, f_m, f_g	2

(*) La prova con il martinetto piatto doppio consente di ottenere una misura del modulo elastico E della muratura, molto più raramente di misurarne direttamente la resistenza a compressione. Il coefficiente in tabella è quello suggerito quando nella prova viene misurata direttamente la resistenza a compressione. Ricordando che esiste una correlazione empirica approssimata di proporzionalità tra modulo E e la resistenza media a compressione della muratura (desumibile dagli intervalli di variazione dei due parametri nella tabella C.8.5.I) il modulo E ottenuto dalla prova con martinetto piatto può fornire una stima indiretta di f utilizzabile nell'equazione [C8.5.4.3] purché si adotti un valore di τ almeno pari a 3.

(**) Nel caso di muratura in blocchi di pietra squadrati o artificiali pieni o semipieni si ipotizza che, con prove a compressione diretta sugli elementi e sulla malta (i costituenti), si possa stimare la resistenza caratteristica a compressione della muratura f_k tramite i metodi descritti al § 11.10.3.1.2 delle Norme. Nota: f_k, la resistenza a compressione media f della muratura potrà essere quindi stimata come $f = 1{,}25\ f_k$.

M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.

Analisi e verifiche

Tipologie di analisi

Analisi Sismica

- Statica
  - Consiste nell'applicazione di un sistema di azioni statiche (forze) i cui effetti sulla struttura si ritengono equivalenti a quelli indotti dallo scuotimento sismico atteso
- Dinamica

In base al modo in cui sono riprodotte le azioni sismiche

- Lineare
- Non Lineare
  - Viene condotta su un modello strutturale di tipo inelastico

- Lineare
- Non Lineare

In base alle caratteristiche del modello numerico considerato nelle analisi

Analisi e verifiche

Definizioni di Stato Limite

L'analisi statica non lineare consiste nell'applicare all'edificio i carichi gravitazionali ed un sistema di forze orizzontali che vengono tutte scalate in modo da far crescere lo spostamento orizzontale di un punto di controllo sulla struttura (ad esempio posto in sommità dell'edificio, a livello della copertura) fino al raggiungimento delle condizioni ultime. Il principale risultato dell'analisi consiste in un diagramma riportante in ascissa lo spostamento orizzontale del punto di controllo, in ordinata la forza orizzontale totale applicata (taglio alla base). La capacità di spostamento relativa ai diversi stati limite (§ 3.2.1) verrà valutata sulla curva forza-spostamento così definita, in corrispondenza dei seguenti punti:

SLC: il minore tra i valori di spostamento corrispondenti a ciascuna delle due condizioni:

- quello corrispondente ad un taglio di base residuo pari all'80% del massimo;
- quello corrispondente al raggiungimento della soglia limite della deformazione angolare a SLC in tutti i maschi murari verticali di un qualunque livello in una qualunque parete ritenuta significativa ai fini della sicurezza (questo controllo può essere omesso nelle analisi quando i diaframmi siano infinitamente rigidi o quando sia eseguita l'analisi di una singola parete).

SLV: spostamento corrispondente a 3/4 dello spostamento allo SLC;

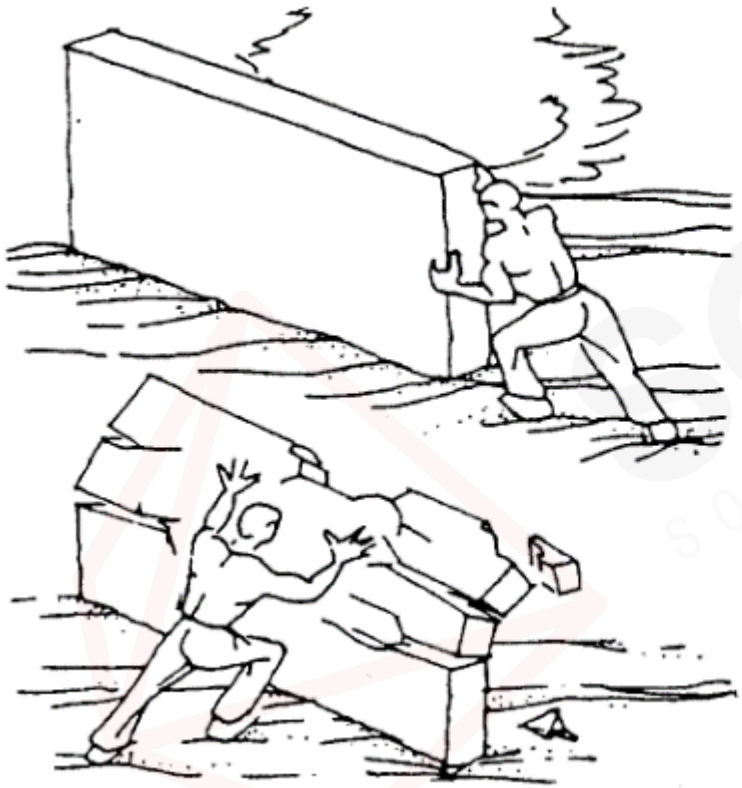
SLD: spostamento minore tra quello corrispondente al raggiungimento della massima forza e quello per il quale lo spostamento relativo fra due piani consecutivi eccede i valori riportati al § 7.3.6.1; (Muratura ordinaria: 0.002 h)

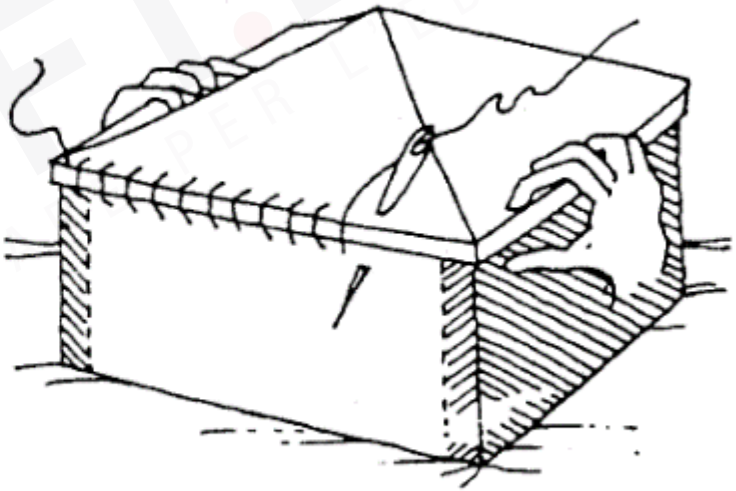
SLO: spostamento minore tra quello corrispondente al raggiungimento della massima forza e quello per il quale lo spostamento relativo fra due piani consecutivi eccede i 2/3 dei valori riportati al § 7.3.6.1.

M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

Analisi e verifiche

Meccanismi di crisi e modelli di capacità

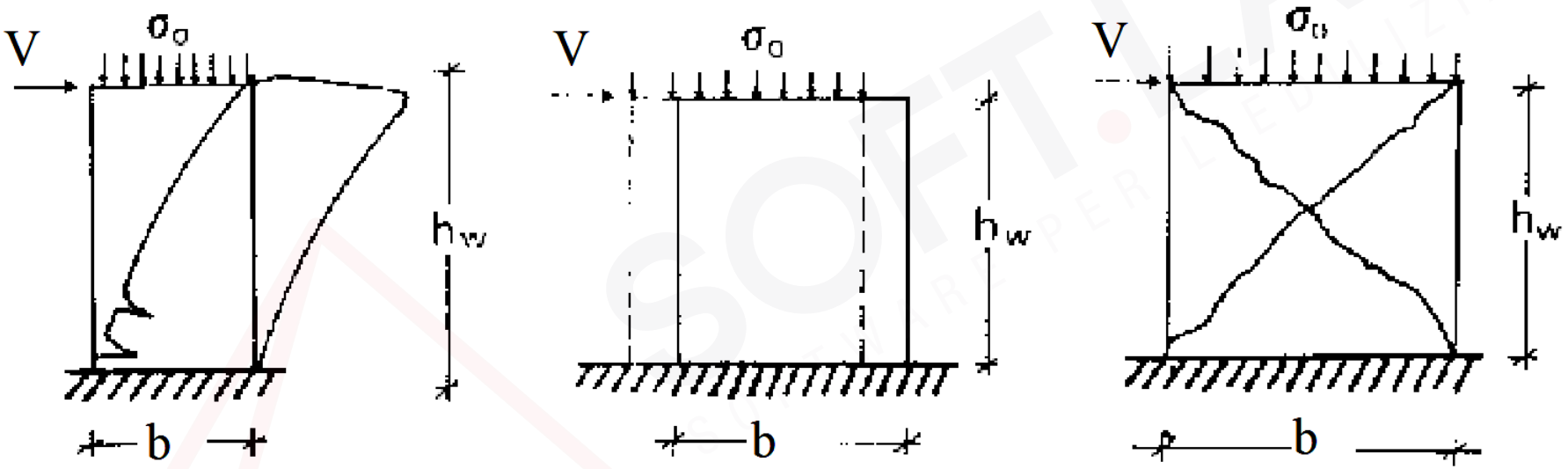




Touliatos (1996)

Analisi e verifiche

Meccanismi di crisi e modelli di capacità/1



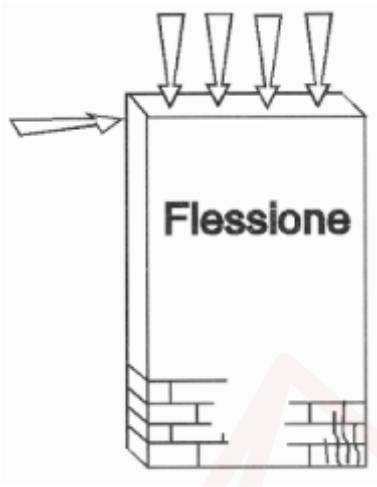
a) Rottura per flessione

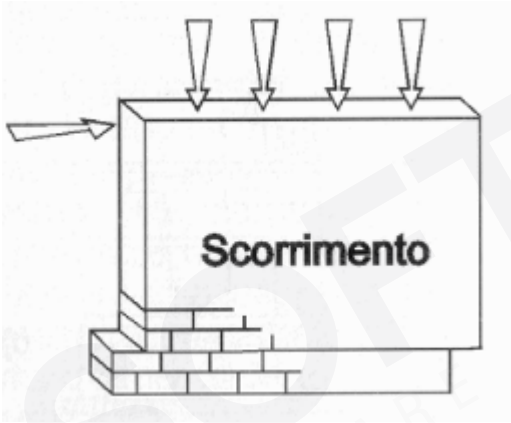
b) Rottura per scorrimento

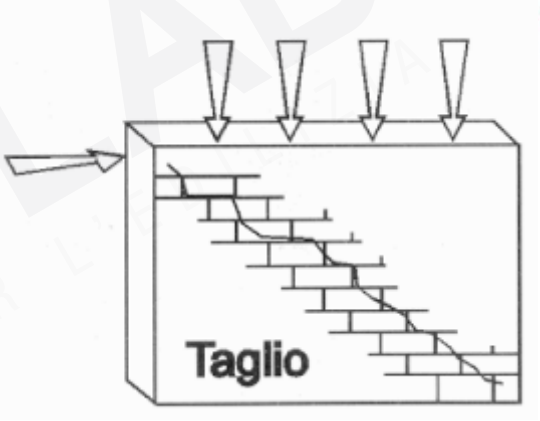
c) Rottura per fessurazione diagonale

Analisi e verifiche

Meccanismi di crisi e modelli di capacità







Analisi e verifiche

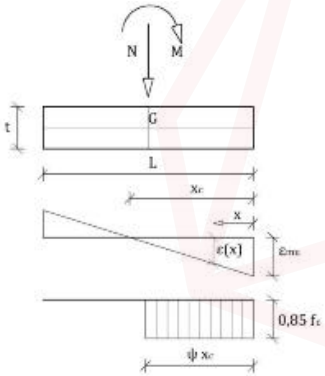
Meccanismi di crisi e modelli di capacità/1

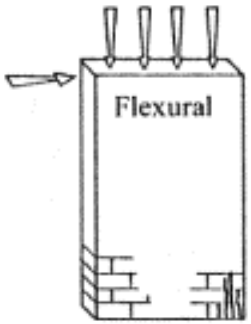
M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

$$M_u = \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot t \cdot L^2 \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{0{,}85 \cdot f_c}\right)$$

$$V_f = \frac{2 \cdot M_u}{h}$$

$$\delta_u = 0.010 \cdot h$$





$\nu > 0.2$

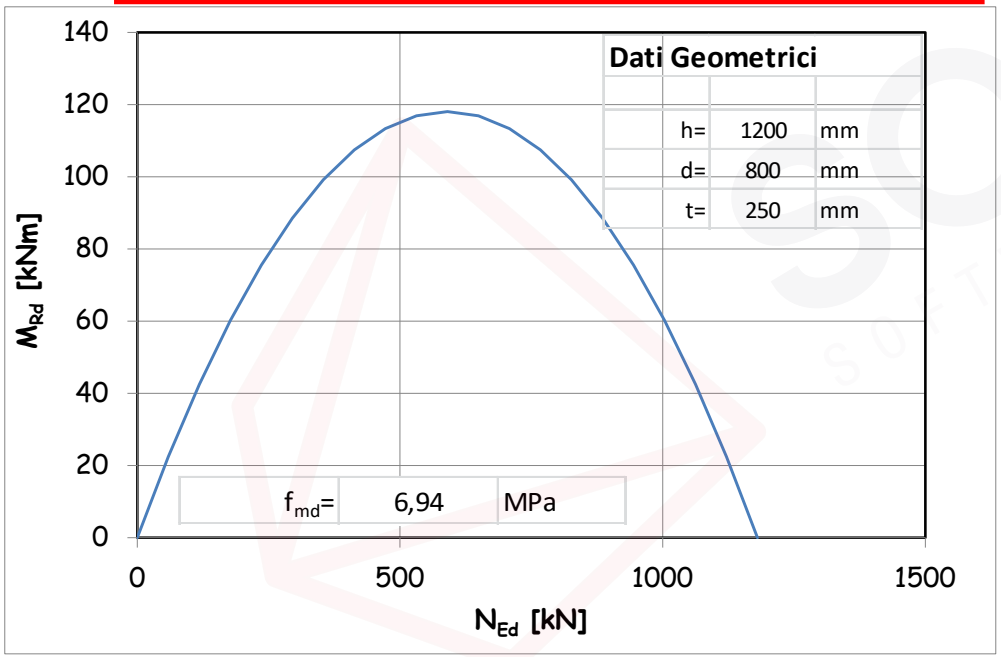
$\delta_u = 0.0125 * (1 - \nu)$

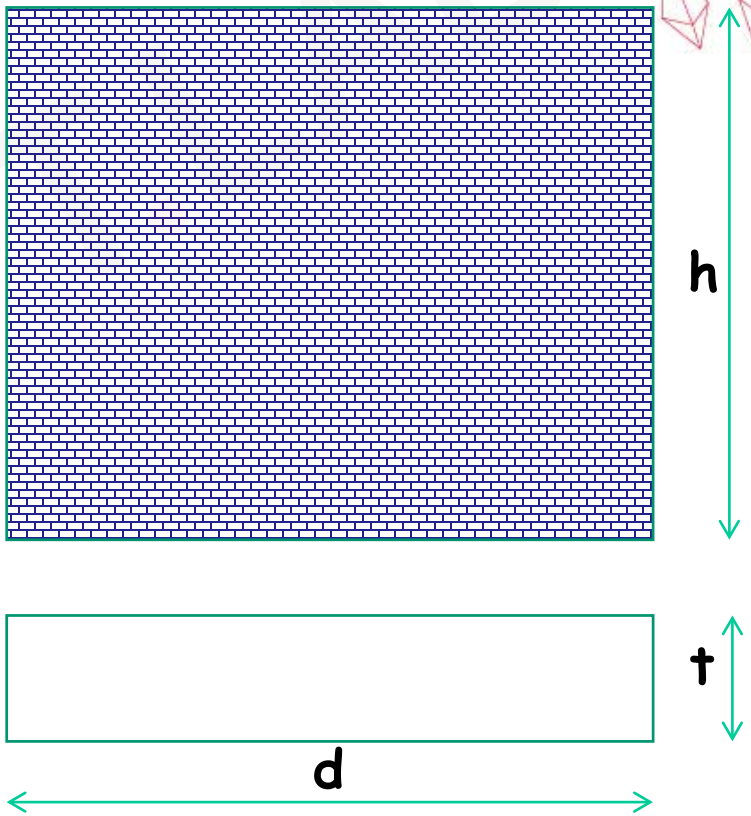
M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.

Analisi e verifiche

Meccanismi di crisi e modelli di capacità

$$M_{Rd} = \frac{N_{Ed} d}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{Ed}}{0.85 \cdot f_{md}}\right)$$





M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

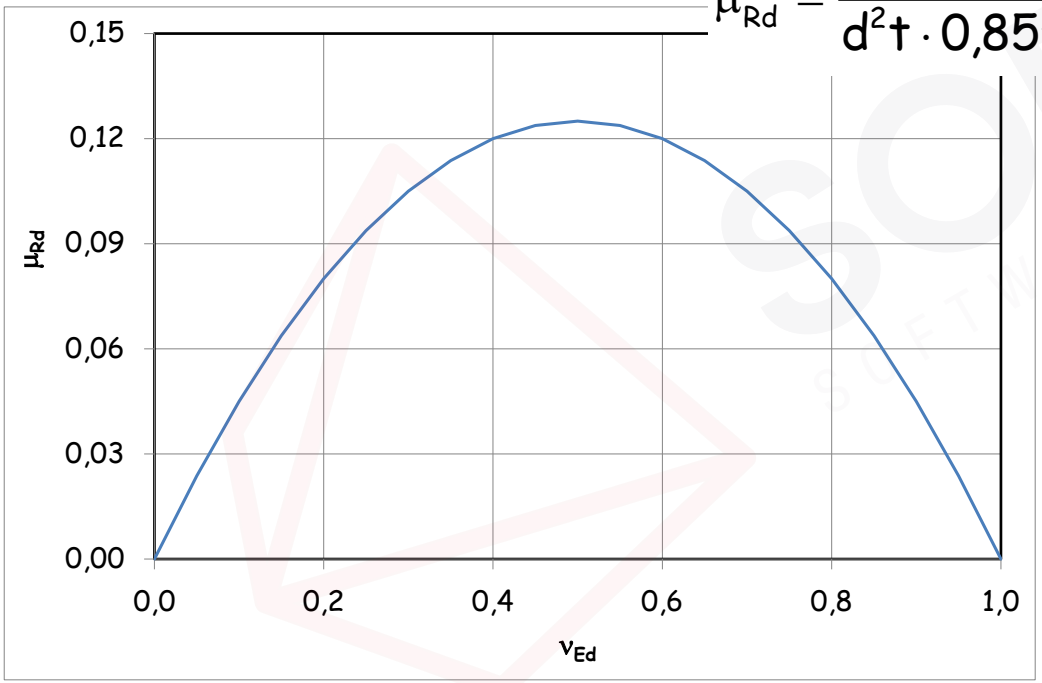
Analisi e verifiche

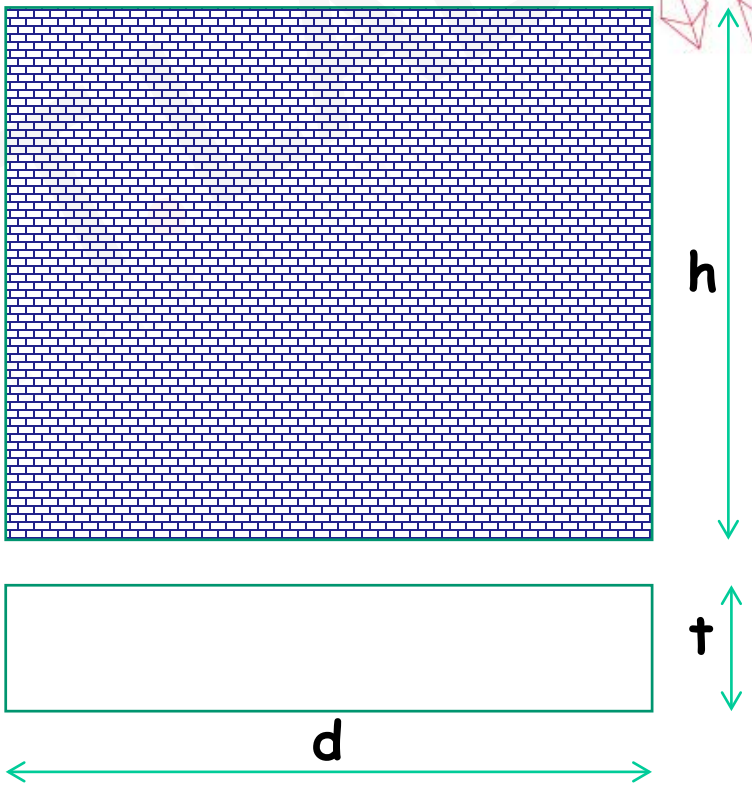
Meccanismi di crisi e modelli di capacità

$$\mu_{Rd} = \frac{\nu}{2} \cdot (1 - \nu)$$

$$\nu_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{dt \cdot 0{,}85 f_{md}}$$

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Rd}}{d^2 t \cdot 0{,}85 f_{md}}$$

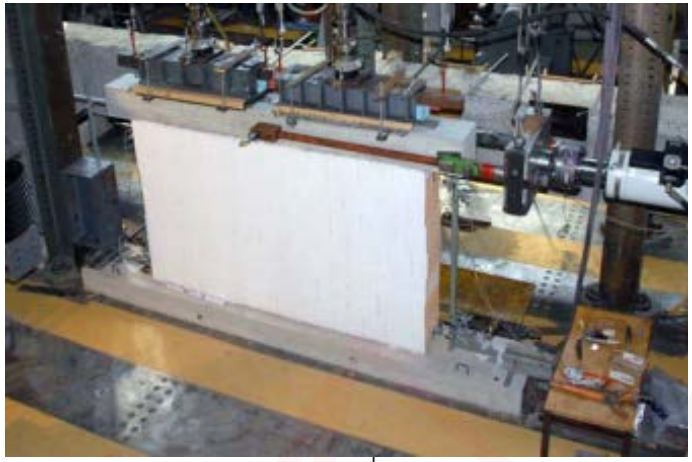




M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

Analisi e verifiche

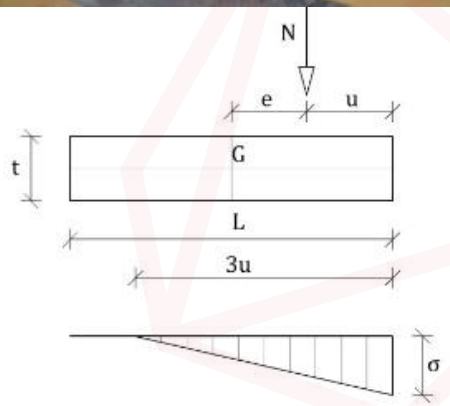
Meccanismi di crisi e modelli di capacità/2



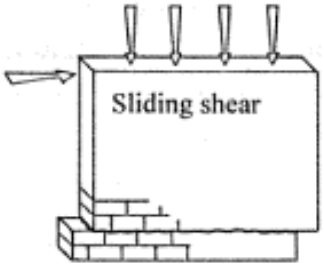
$$f_{vd} = f_{vd0} + \mu \cdot \sigma' \qquad \sigma' = \frac{N}{t \cdot D'}$$

se: e < L / 6 $\qquad D' = L$

se: e > L / 6 $\qquad D' = 3u = 3 \cdot \left(\frac{L}{2} - e \right)$



$$\delta_u = 0.005 \cdot h$$



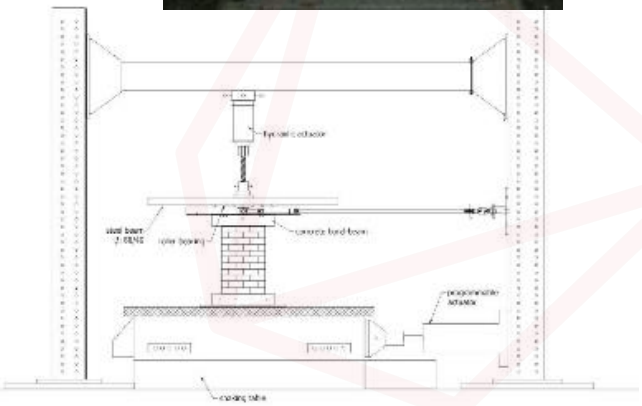
M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018

Analisi e verifiche

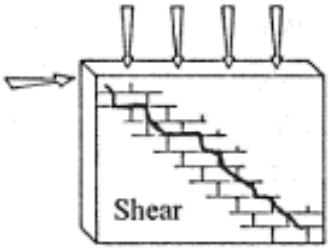
Meccanismi di crisi e modelli di capacità/3

$$b = \frac{h}{L} \qquad \sigma = \frac{N}{L \cdot t}$$

$$V_{ds} = L \cdot t \cdot \frac{1{,}5 \cdot \tau_{0,d}}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma}{1{,}5 \cdot \tau_{0,d}}}$$



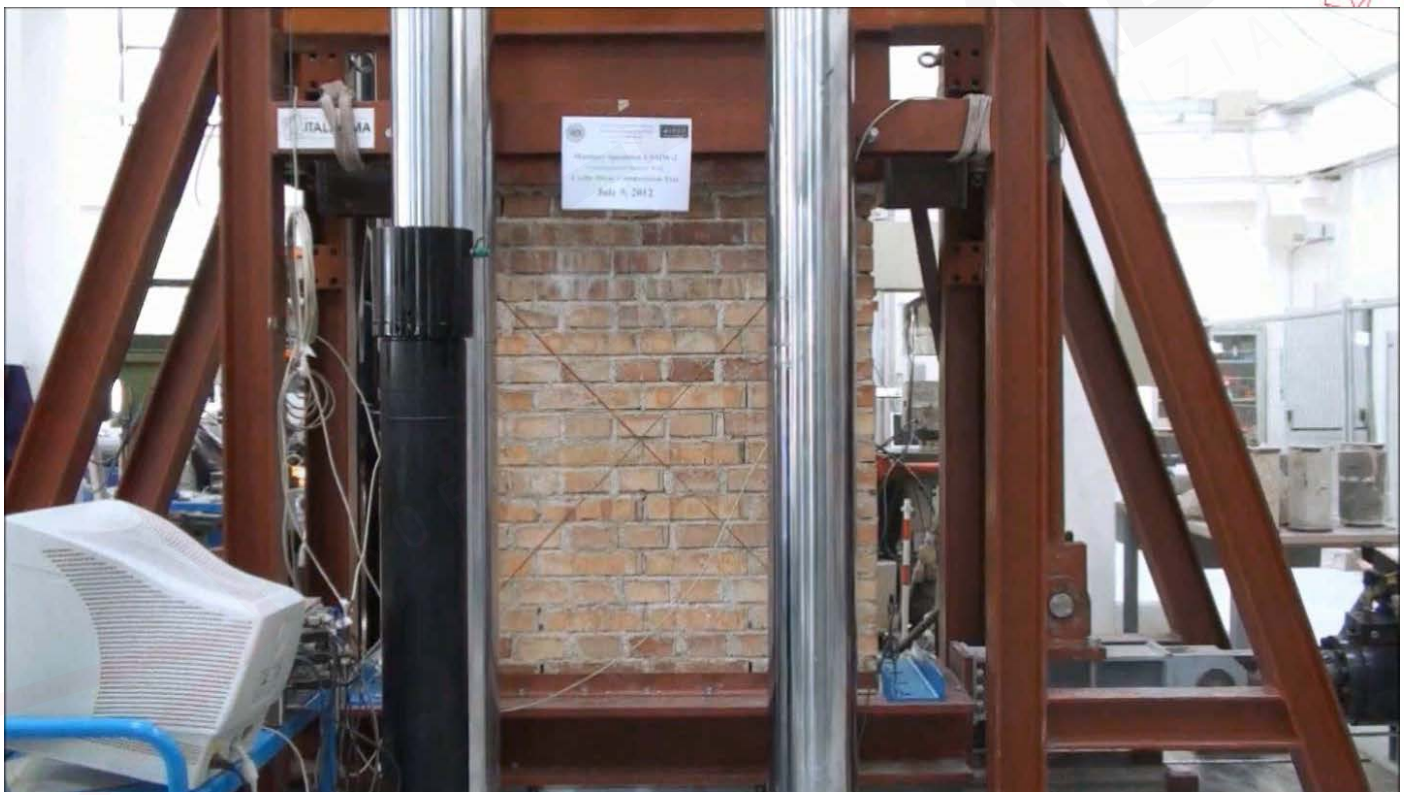
$$\delta_u = 0.005 \cdot h$$



EN 1998-3:2005

Analisi e verifiche

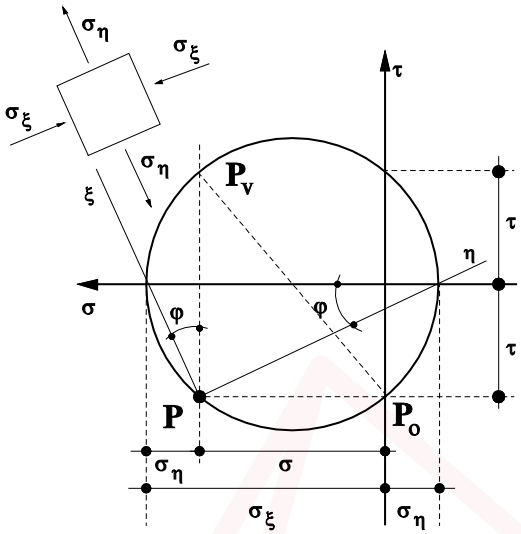
Meccanismi di crisi e modelli di capacità/3

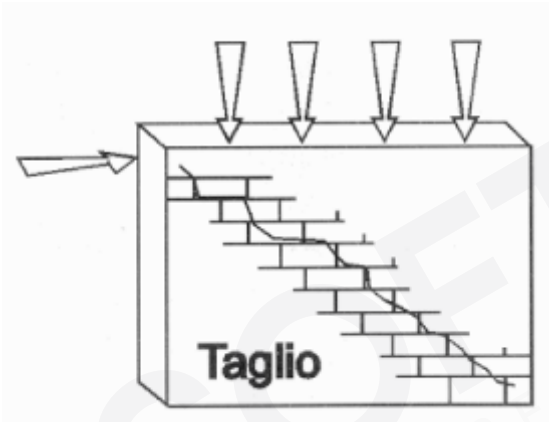


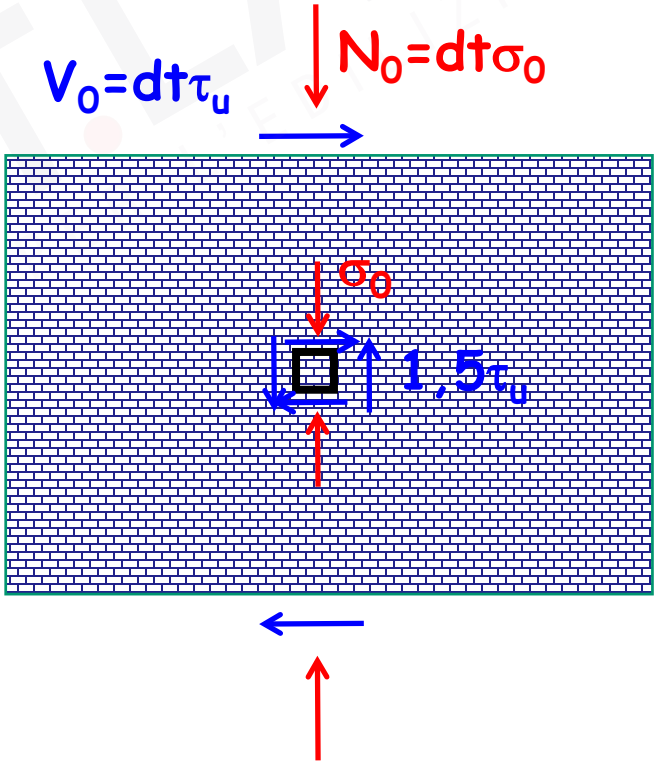
Martinelli & al (2016)

Analisi e verifiche

Meccanismi di crisi e modelli di capacità/3







$$\sigma_\eta = \left(\frac{\sigma_0}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (1.5 \cdot \tau_u)^2} = 1.5 \cdot \tau_k$$

Analisi e verifiche

Meccanismi di crisi e modelli di capacità/3

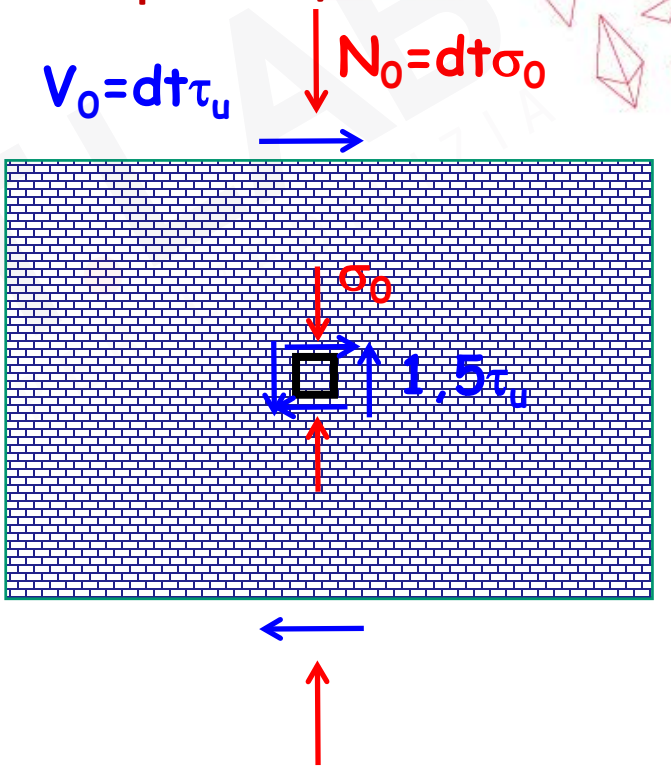
$$\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (1.5 \cdot \tau_u)^2 = \left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (1.5 \cdot \tau_k)^2 + 1.5 \cdot \tau_k \cdot \sigma_0$$

$$(1.5 \cdot \tau_u)^2 = (1.5 \cdot \tau_k)^2 + 1.5 \cdot \tau_k \cdot \sigma_0$$

$$\tau_u = \sqrt{(\tau_k)^2 + \frac{1}{1.5} \cdot \tau_k \cdot \sigma_o}$$

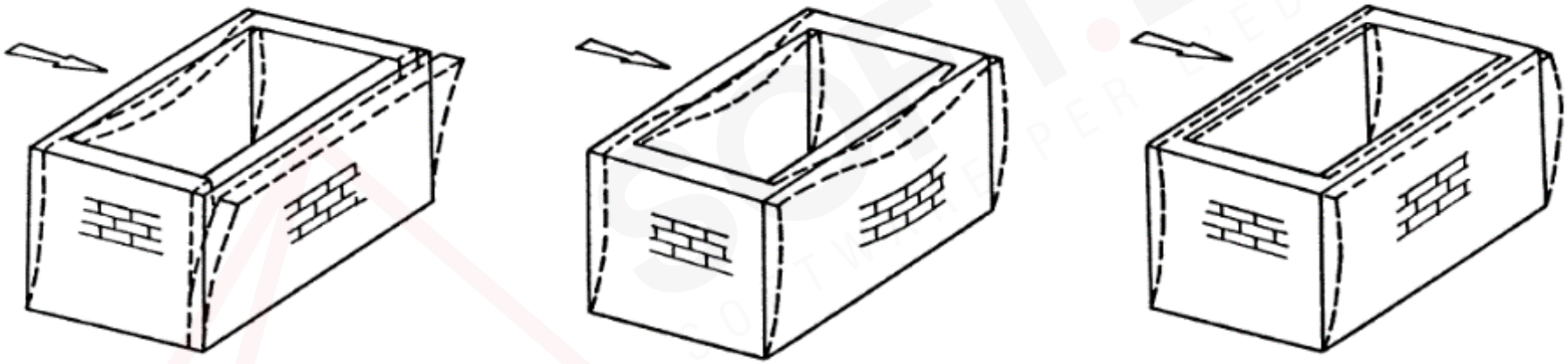
$$\boxed{\tau_u = \tau_k \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \cdot \tau_k}}}$$

$$\boxed{V_{Rms} = \tau_u dt}$$



Analisi e verifiche

Meccanismi di crisi e modelli di capacità: fuori piano/2



a) con solaio deformabile e senza cordolo

b) con cordolo e con solaio deformabile

c) con cordolo e con solaio rigido

Touliatos (1996)

Analisi e verifiche

Meccanismi di crisi e modelli di capacità: fuori piano/2

Le verifiche fuori piano possono essere eseguite separatamente, e possono essere adottate le forze equivalenti indicate al § 7.2.3 per gli elementi non strutturali, assumendo $q_a = 3$. Più precisamente l'azione sismica ortogonale alla parete può essere rappresentata da una forza orizzontale distribuita, pari a (S_a/q_a) volte il peso della parete nonché da forze orizzontali concentrate pari a (S_a/q_a) volte il peso trasmesso dagli orizzontamenti che si appoggiano sulla parete, qualora queste forze non siano efficacemente trasmesse a muri trasversali disposti parallelamente alla direzione del sisma. Per le pareti resistenti al sisma, che rispettano i limiti di Tab. 7.8.II, si può assumere per S_a la seguente espressione:

$$S_a = \alpha \cdot S \cdot [1.5 \cdot (1 + Z/H) - 0.5] \geq \alpha \cdot S$$

dove:

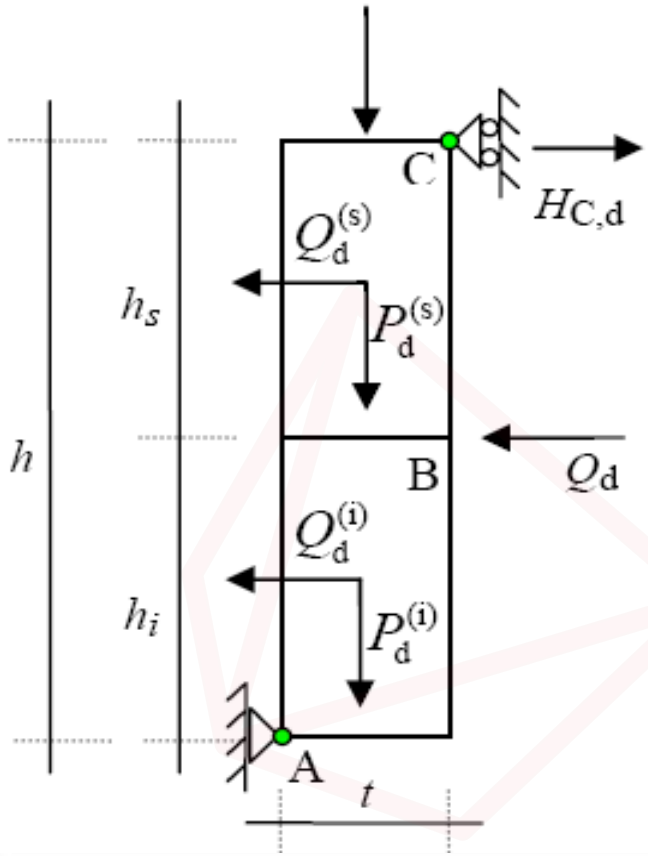
- α è il rapporto tra accelerazione massima del terreno a_g su sottosuolo tipo A per lo stato limite in esame (vedi § 3.2.1) e l'accelerazione di gravità g;
- S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche secondo quanto riportato nel § 3.2.3.2.1;
- Z è la quota del baricentro dell'elemento non strutturale misurata a partire dal piano di fondazione (vedi § 3.2.2);
- H è l'altezza della costruzione misurata a partire dal piano di fondazione;

Per le strutture con isolamento sismico si assume sempre Z=0.

Per le pareti non resistenti al sisma la verifica fuori piano va comunque condotta facendo ricorso a formulazioni di comprovata validità.

Analisi e verifiche

Meccanismi di crisi e modelli di capacità: fuori piano/2



$P_d^{(s)}$ = weight of the upper side of the panel

$P_d^{(i)}$ = weight of the lower side of the panel

$Q_d^{(s)}$ = seismic force related to the upper side of the panel.

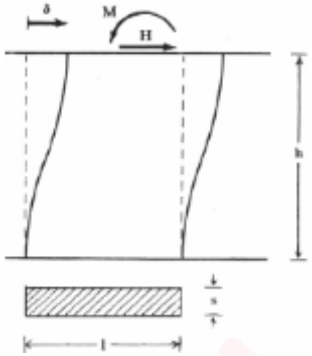
$Q_d^{(i)}$ = seismic force related to the lower side of the panel

N_d = axial force acting on the panel.

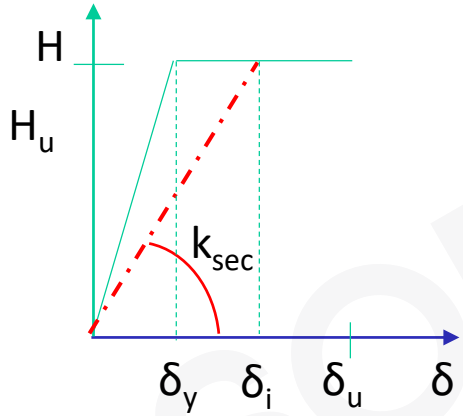
Q_d = load due to a further horizontal loading condition

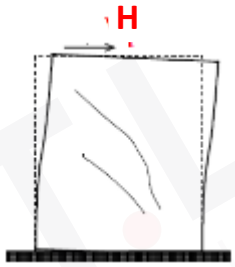
Analisi e verifiche

Approcci a macro-elementi

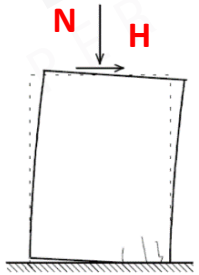


$$\frac{1}{K_0} = \frac{1}{K_M} + \frac{1}{K_T} = \frac{h^3}{12EI} + \frac{\chi h}{GA}$$

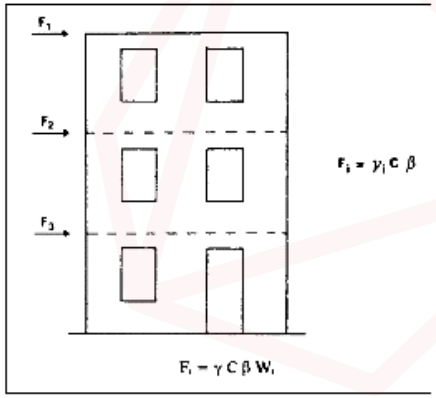


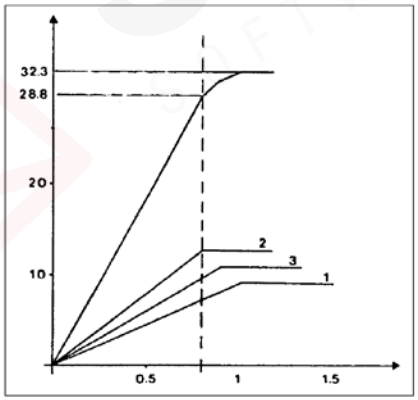


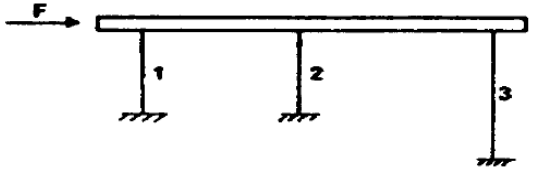
$$H_{u,s} = \frac{C_R A f_t}{b}\sqrt{1+\frac{\sigma_0}{f_t}}$$



$$H_{u,f} = \left(\sigma_0 t l^2\right)\frac{\left(1-\frac{\sigma_0}{f_c}\right)}{h}$$

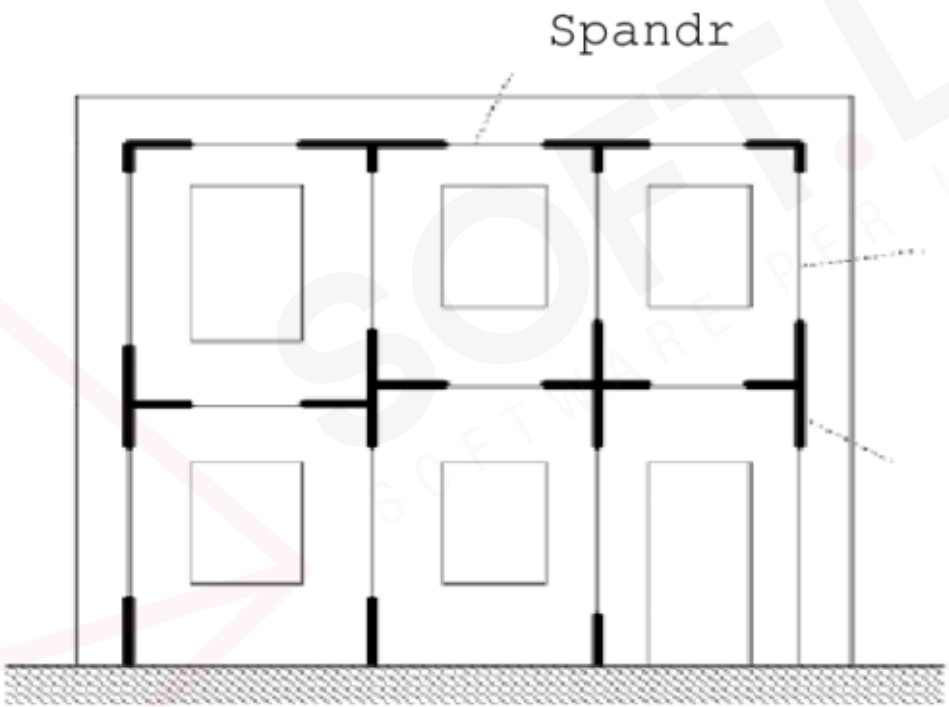






Analisi e verifiche

Modello a telaio equivalente: assunzioni



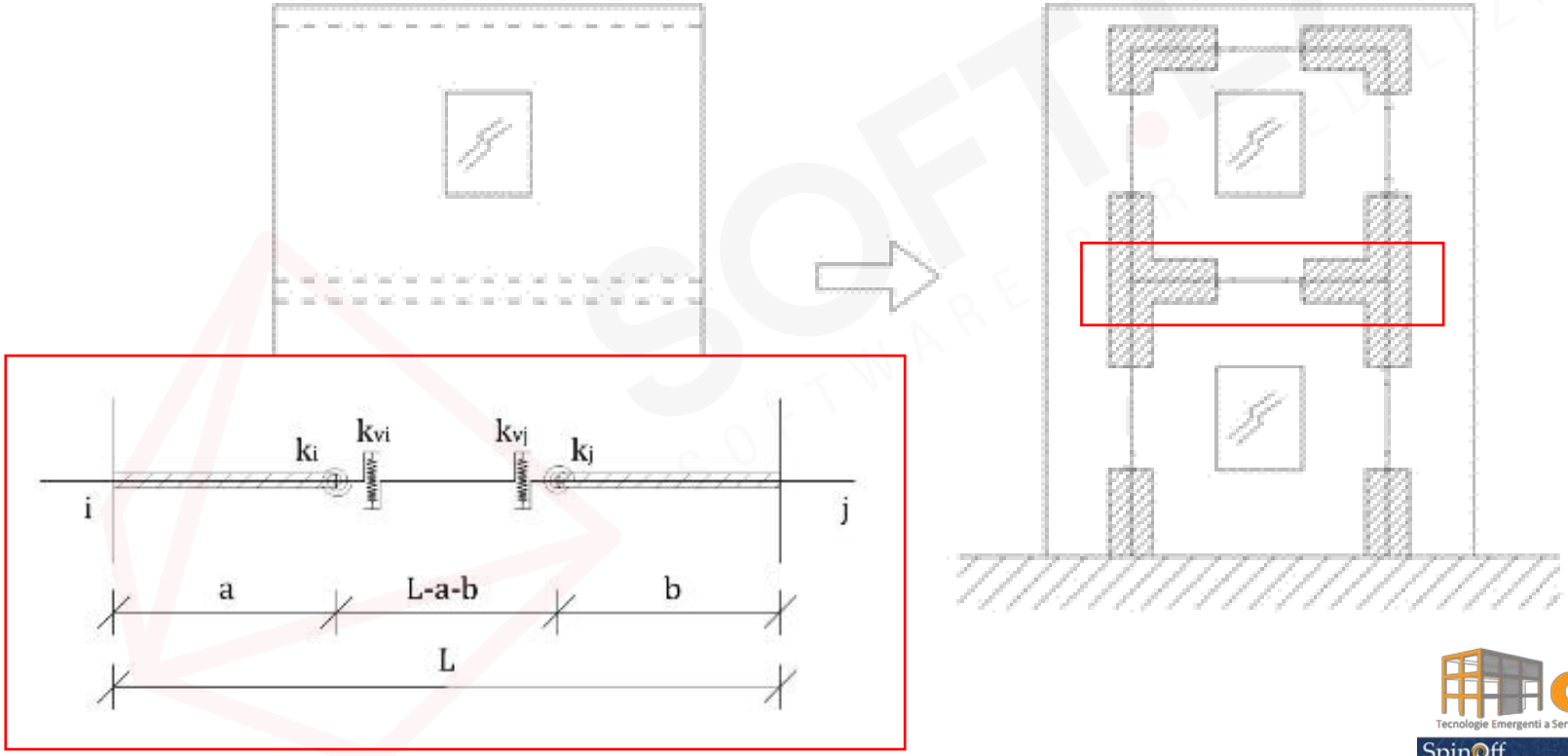
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

IperWall BIM

esis s.r.l.
Tecnologie Emergenti a Servizio dell'Ingegneria Strutturale
SpinOff

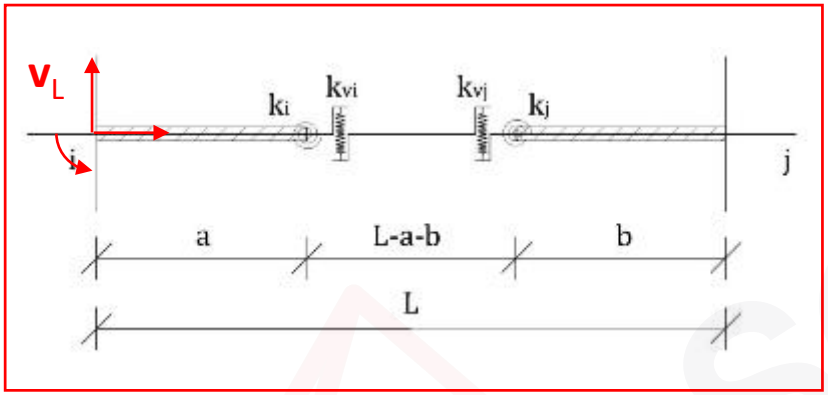
Analisi e verifiche

Modello a telaio equivalente: formulazione



Analisi e verifiche

Modello a telaio equivalente: formulazione



Definizione della matrice di trasformazione:

$$\underline{v}' = \begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ \varphi'_i \\ u'_j \\ v'_j \\ \varphi'_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & r_i \cdot L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -r_j \cdot L \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ \varphi_i \\ u_j \\ v_j \\ \varphi_j \end{bmatrix}$$

Fattori di deformabilità:

$$\alpha_{ij} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{3 \cdot EI} + \frac{1}{k_i} + \frac{2}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} \cdot \frac{1}{k_v} + \frac{\chi}{GA \cdot L}$$

$$\alpha_{ji} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{3 \cdot EI} + \frac{1}{k_j} + \frac{2}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} \cdot \frac{1}{k_v} + \frac{\chi}{GA \cdot L}$$

$$\beta_{ji} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{6 \cdot EI} + \frac{2}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} \cdot \frac{1}{k_v} - \frac{\chi}{GA \cdot L}$$

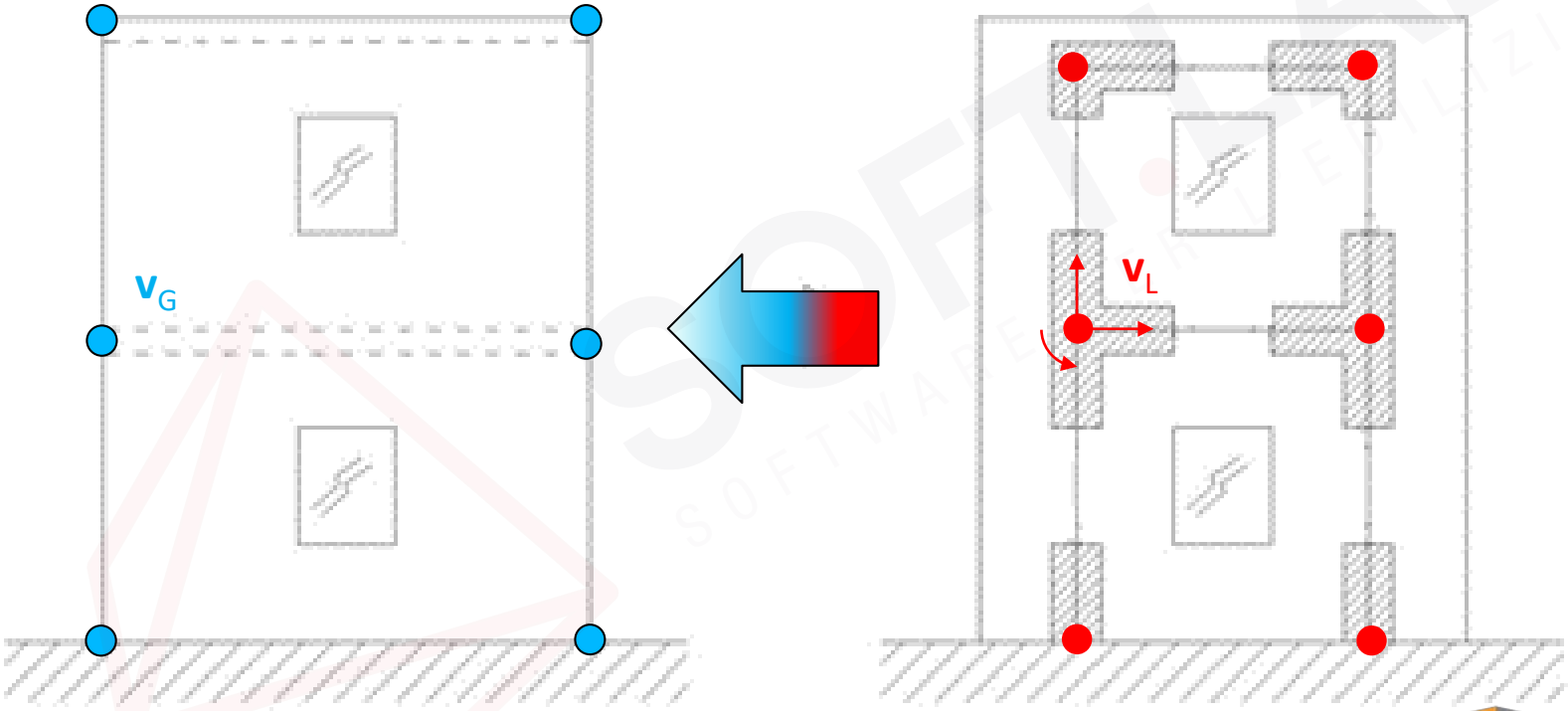
Relazione della parte deformabile: $\underline{f}' = \underline{\underline{K}}' \cdot \underline{v}' + \underline{f}'_0$

Forma simbolica: $\underline{v}' = \underline{\underline{T}} \cdot \underline{v}$

Relazione di tutto il frame: $\underline{f} = \underline{\underline{K}} \cdot \underline{v} + \underline{f}_0 + \underline{f}''_0$

Analisi e verifiche

Modello a telaio equivalente: formulazione

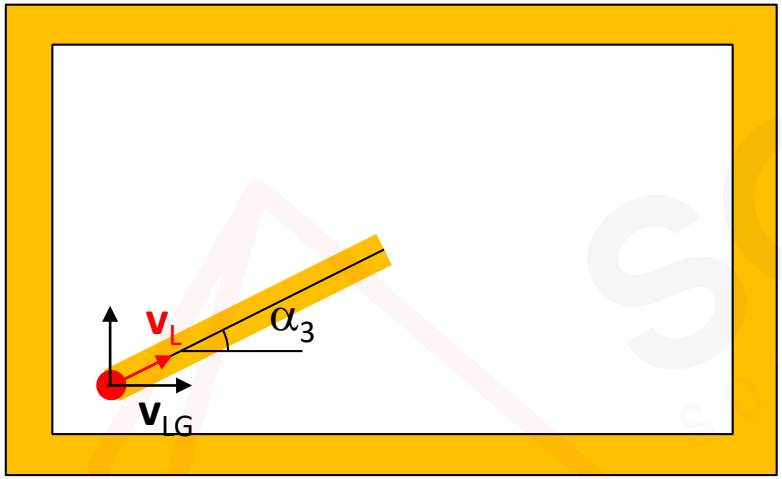


5 DoF

3 DoF

Analisi e verifiche

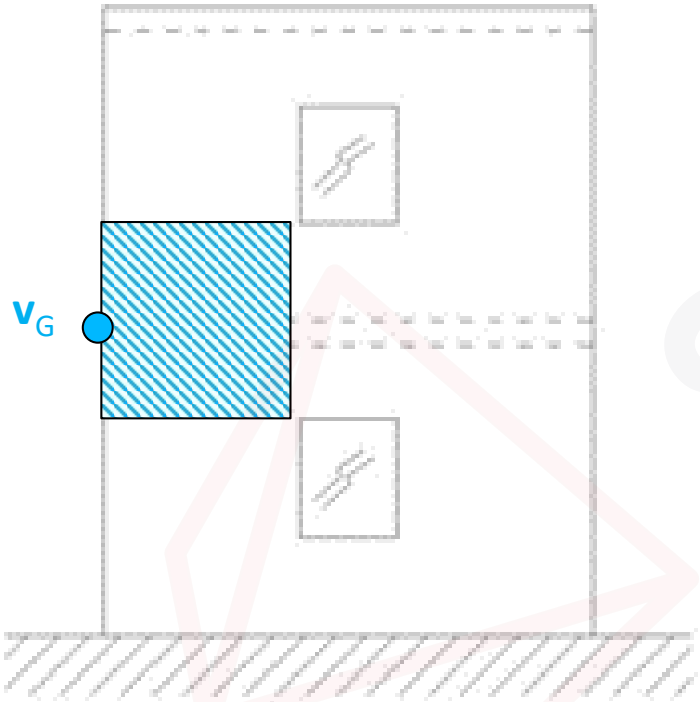
Modello a telaio equivalente: formulazione

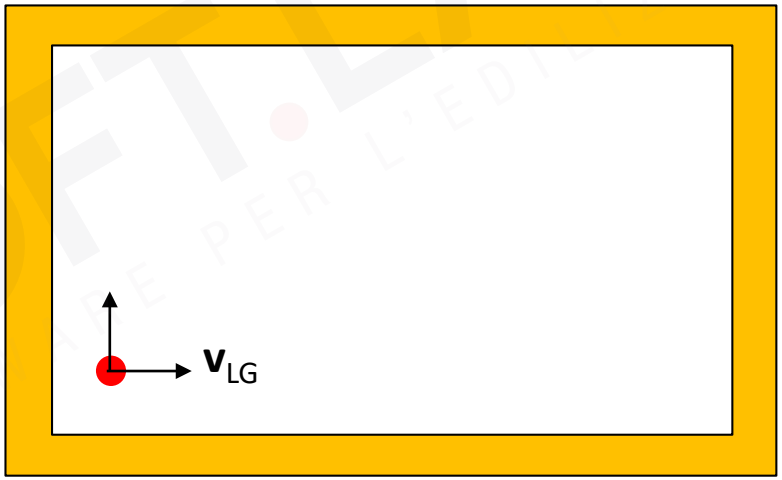


$$\mathbf{v}_L = \mathbf{LG}_1 \mathbf{v}_{LG}$$

Analisi e verifiche

Modello a telaio equivalente: formulazione

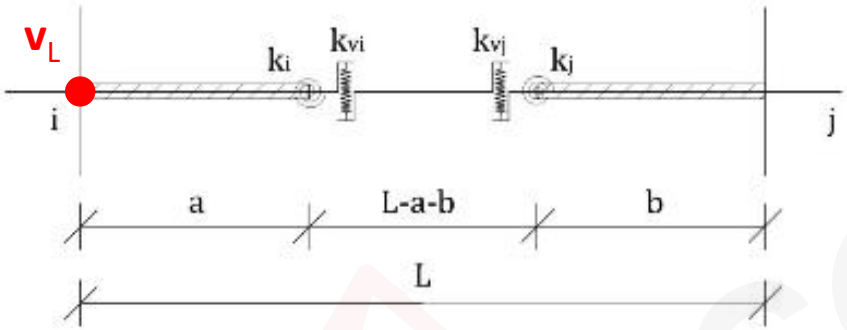


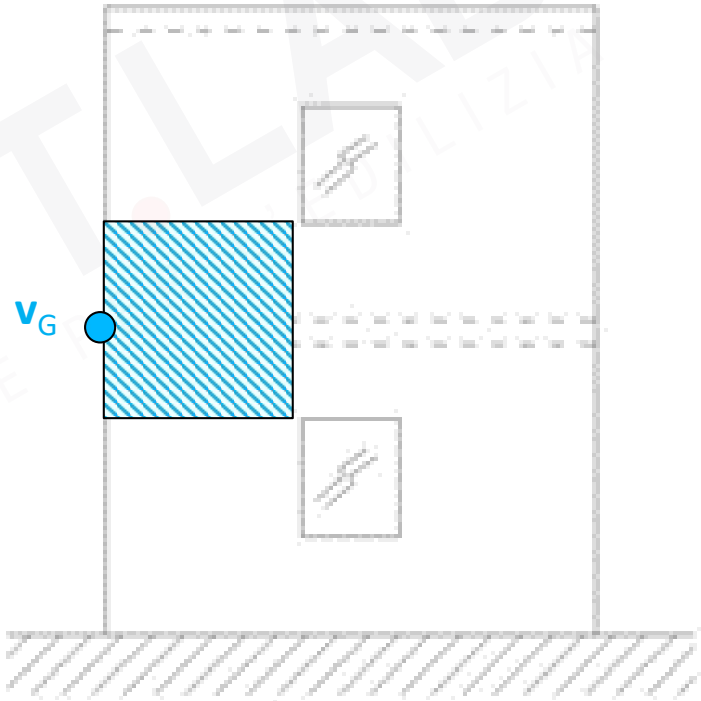


$$v_{LG}=LG_2 v_G$$

Analisi e verifiche

Modello a telaio equivalente: formulazione

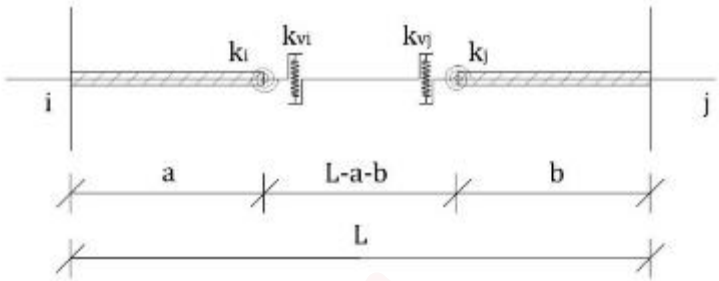


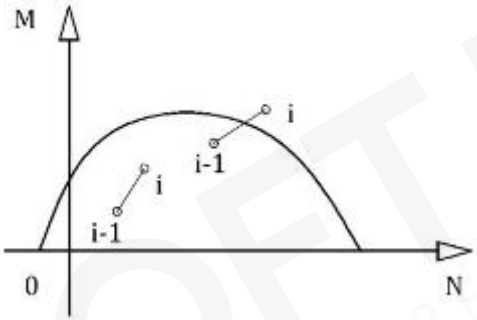


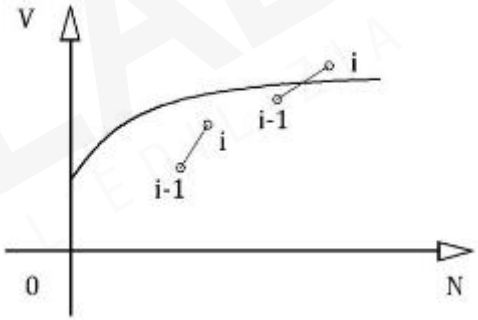
$$\underline{F} = \underline{\underline{K}} \cdot \underline{s} + \underline{F}_0$$

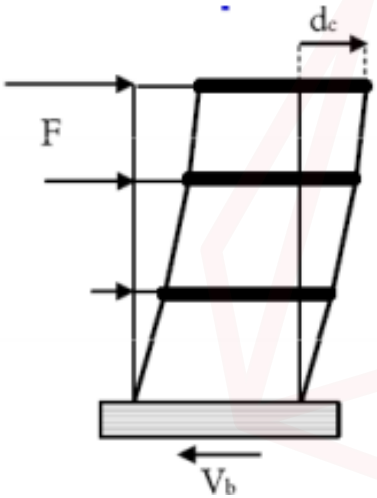
Analisi e verifiche

Modello a telaio equivalente: formulazione



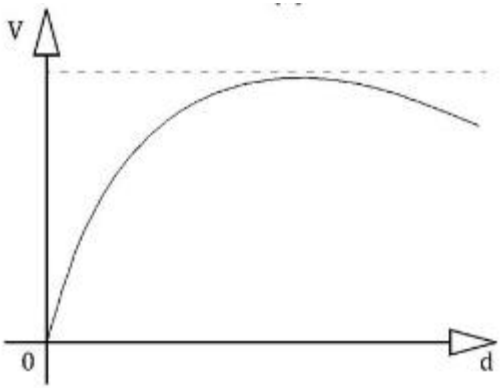






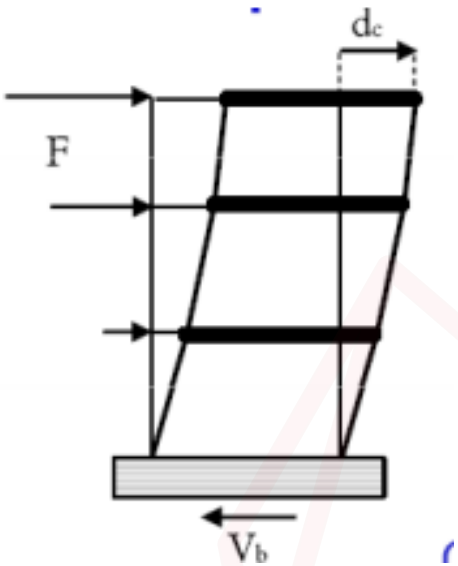
Analisi statica non lineare (incrementale-iterativa)

- Predizione elastica;
- Correzione plastica.



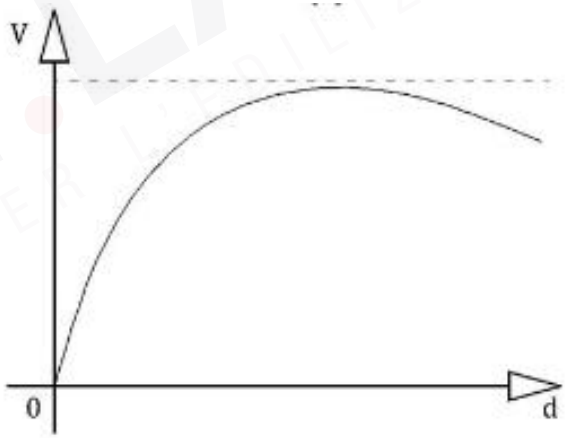
Analisi e verifiche

Modello a telaio equivalente: formulazione



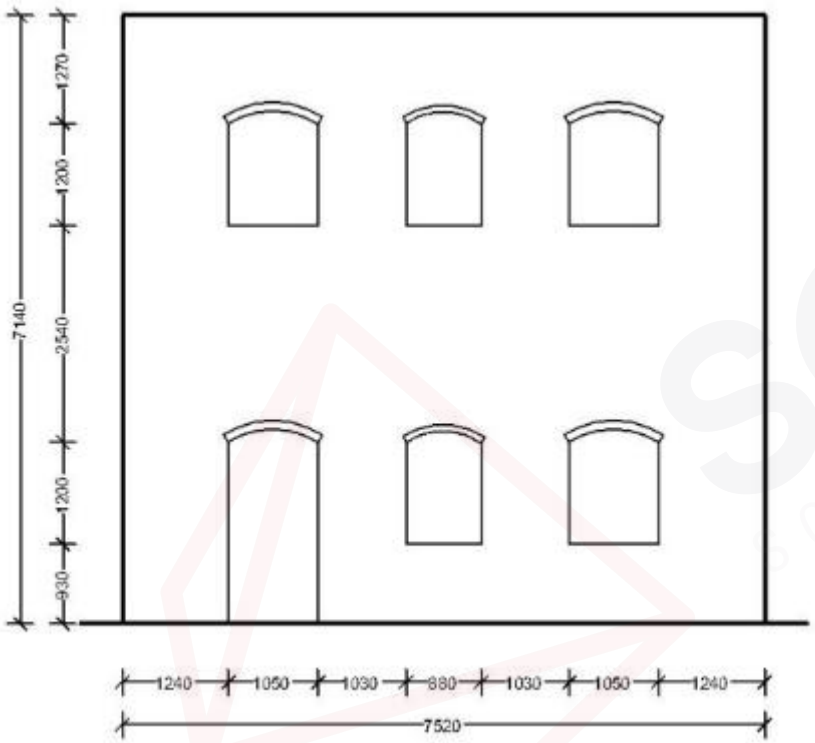
Analisi statica non lineare (incrementale-iterativa)

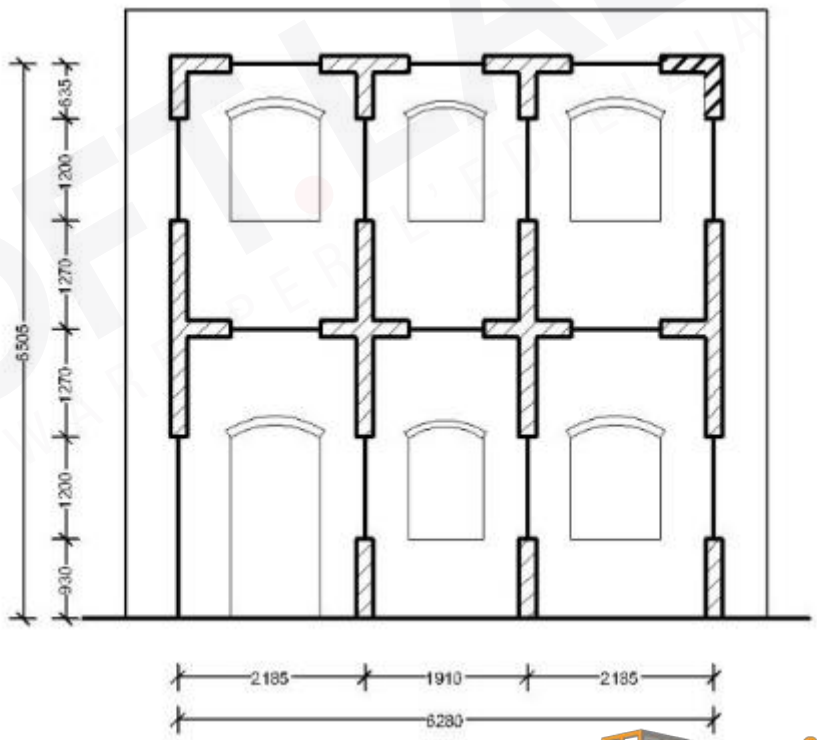
- Predizione elastica;
- Correzione plastica.



Applicazioni

Modello a telaio equivalente: validazione

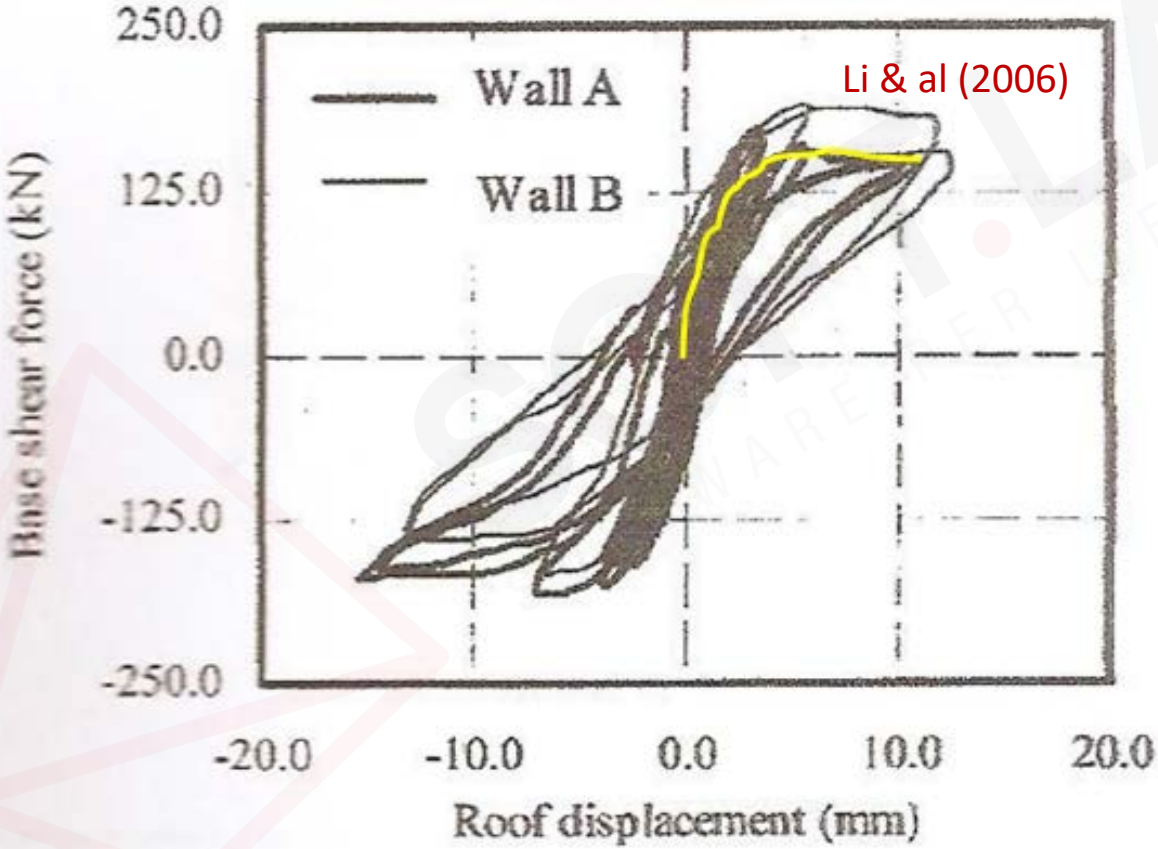




Li & al (2006)

Applicazioni

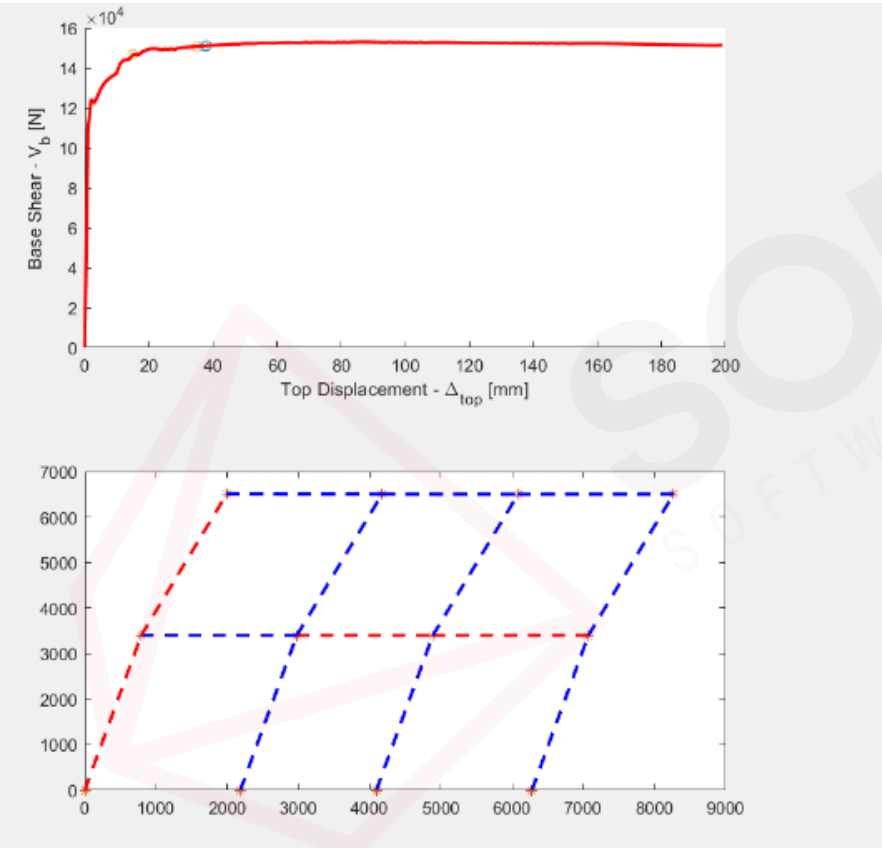
Modello a telaio equivalente: validazione

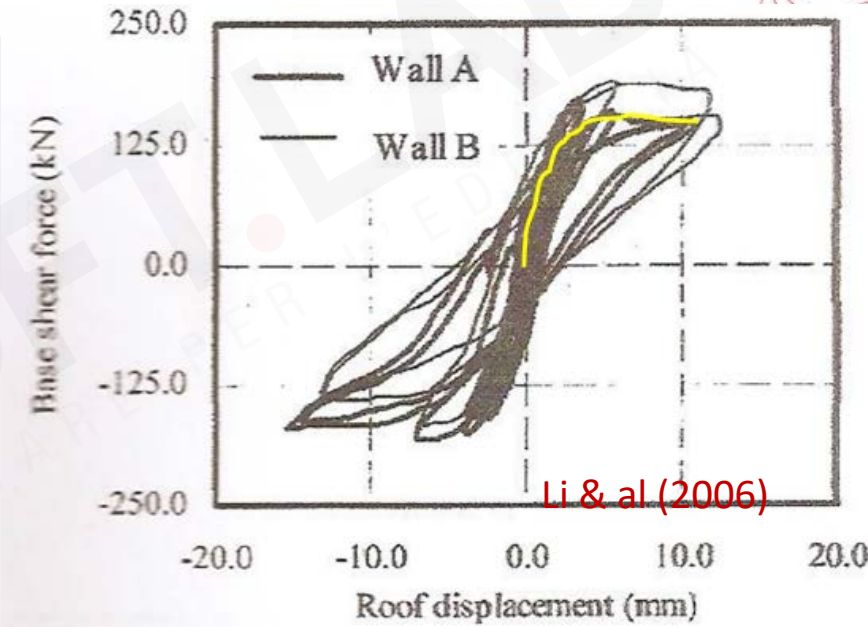


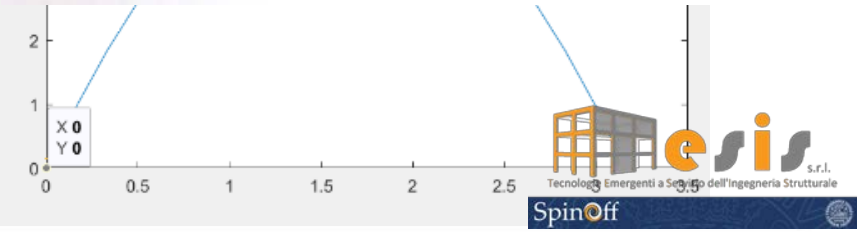
inviluppo dei dati sperimentali.

Applicazioni

Modello a telaio equivalente: validazione

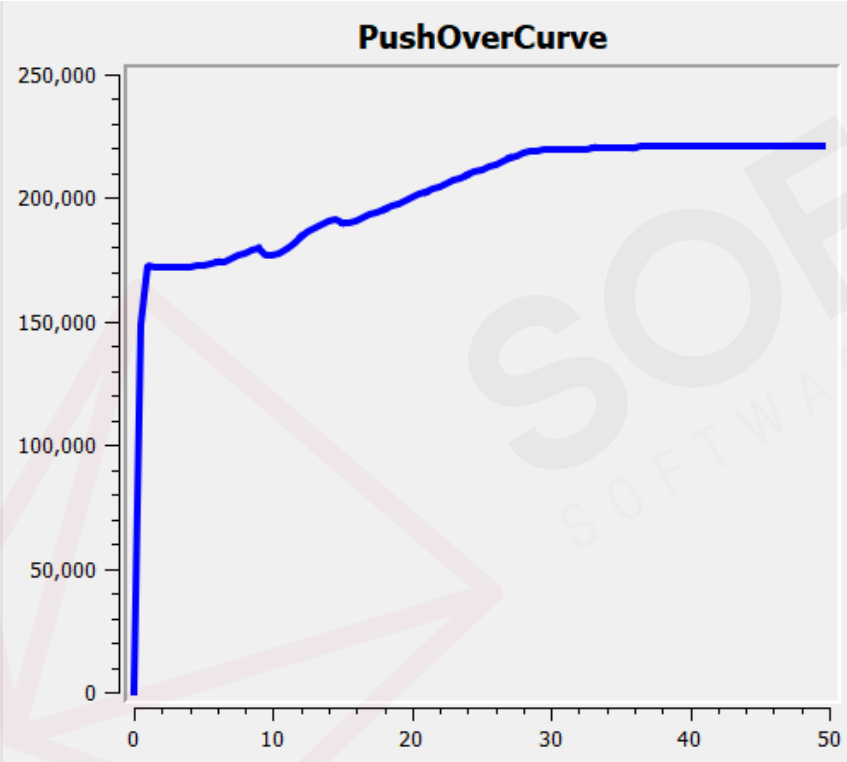


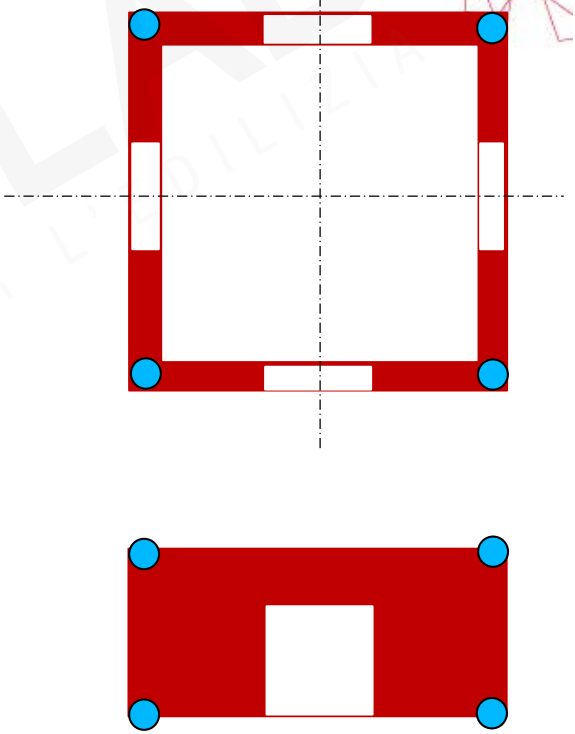




Analisi strutturale

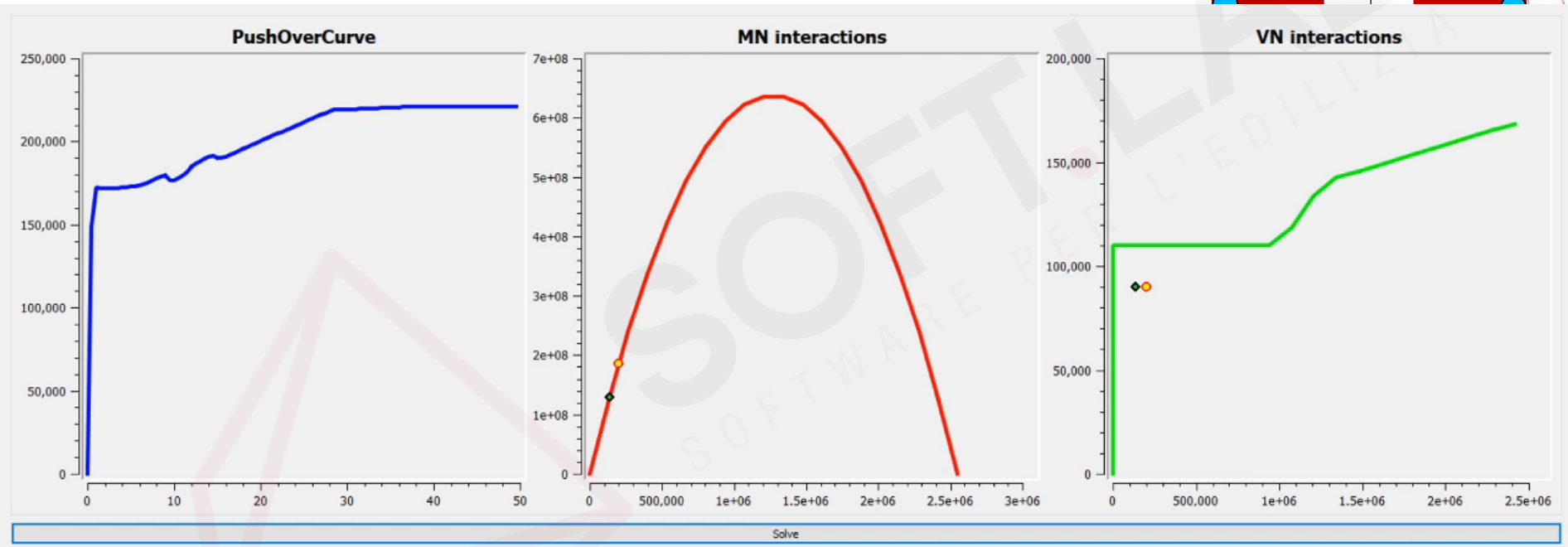
Modello a telaio equivalente: esempio di analisi/1





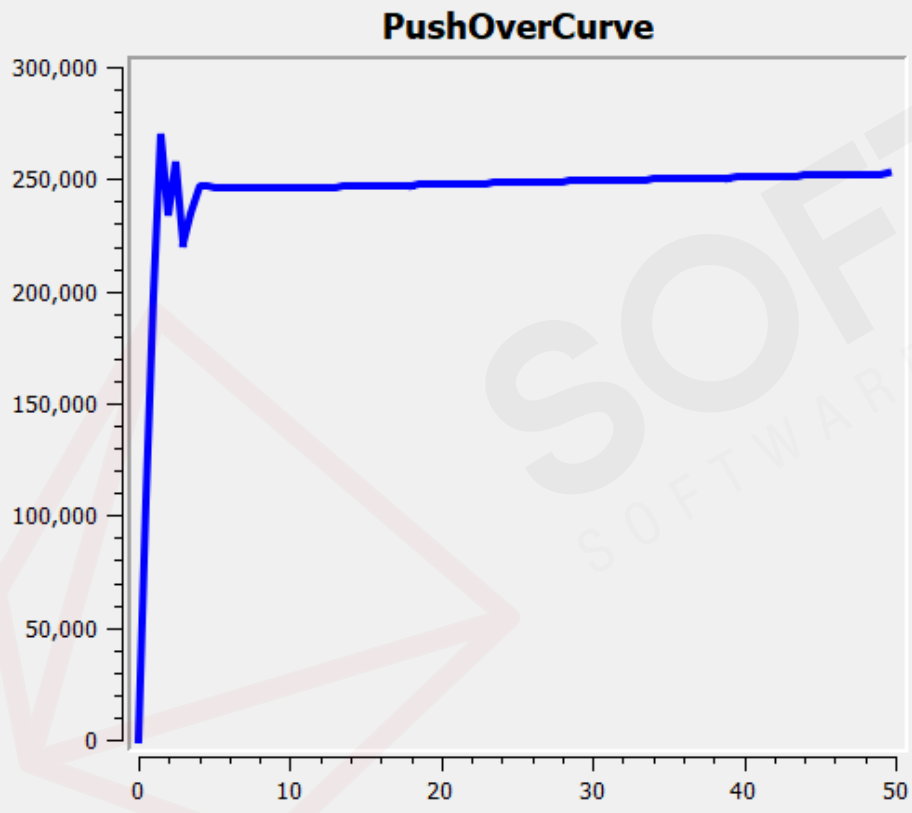
Analisi strutturale

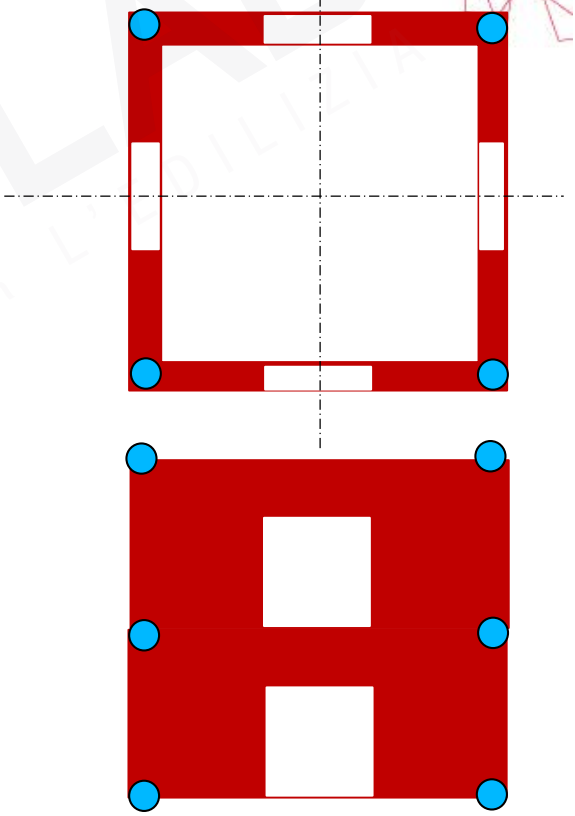
Modello a telaio equivalente: esempio di analisi/1



Analisi strutturale

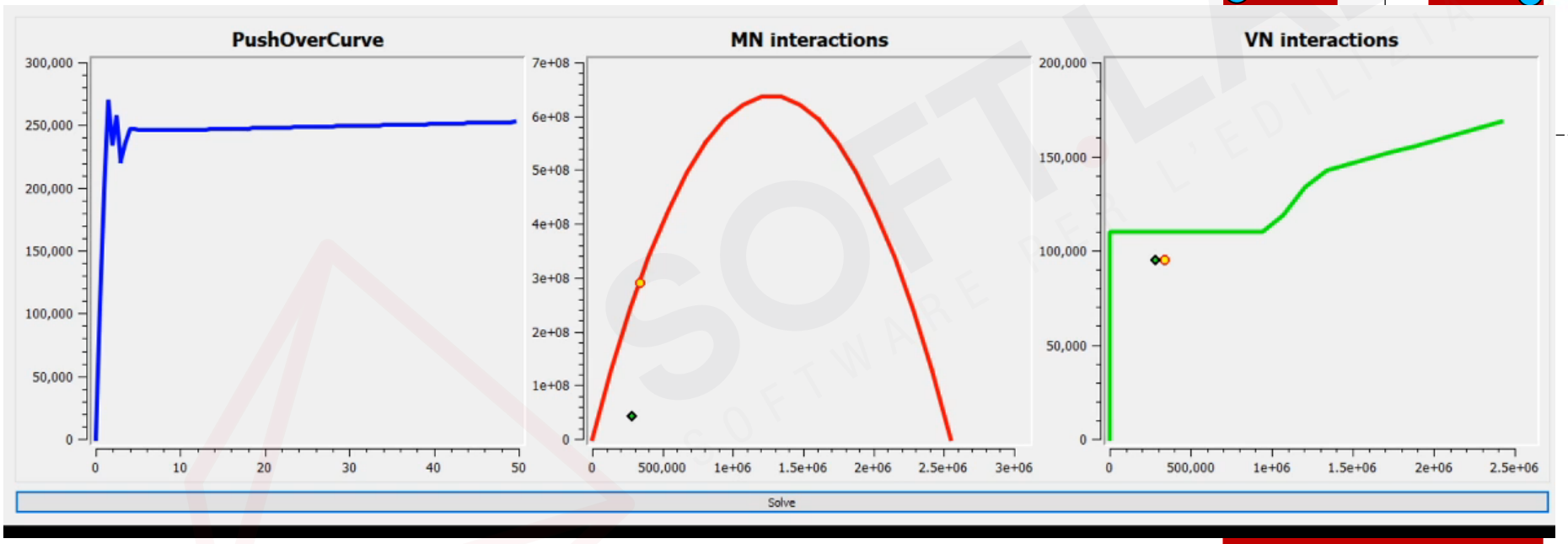
Modello a telaio equivalente: esempio di analisi/2





Analisi strutturale

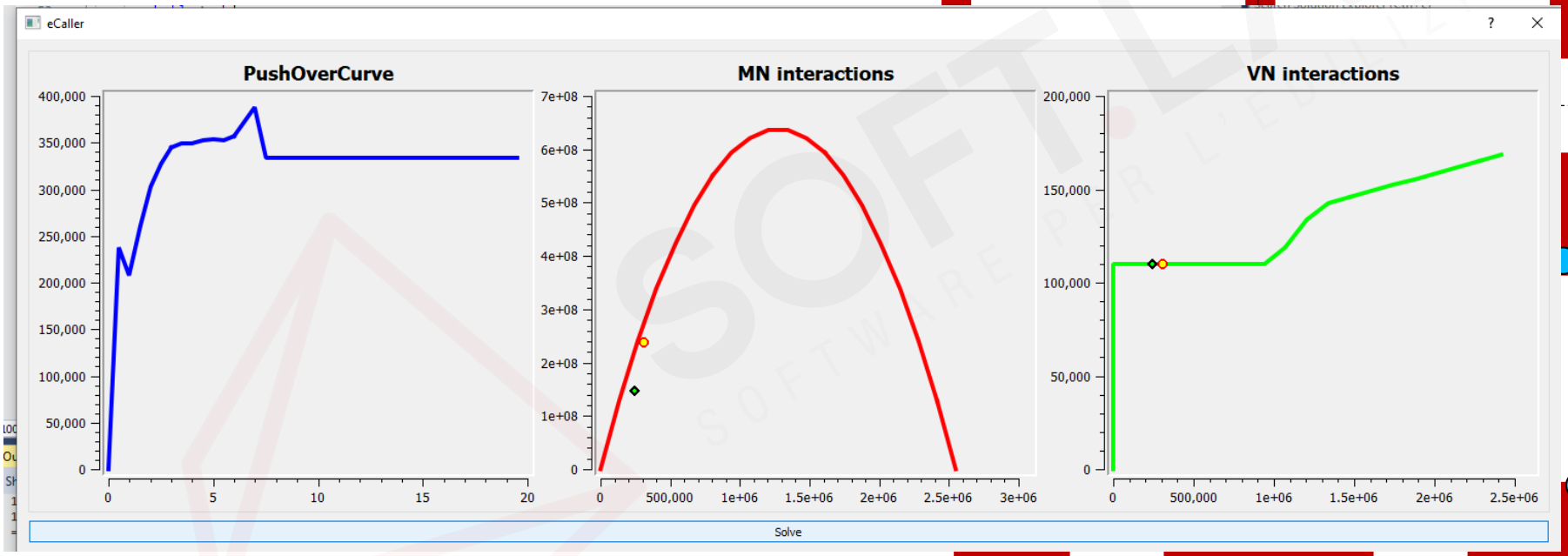
Modello a telaio equivalente: esempio di analisi/2



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: esempio di analisi/3



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Bibliografia

- Faella C., **Martinelli E.**, Nigro E., Paciello S. (2010), *Shear Capacity of Masonry Walls Externally Strengthened by a Cement-Based Composite Material: an Experimental Campaign*, Construction and Building Materials 24(1), 84-93 (doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.019);
- Faella C., **Martinelli E.**, Paciello S., Camorani G., Aiello M.A., Micelli F., Nigro E. (2011), *Masonry columns confined by Composite materials: experimental investigation*, Composites Part B, 42(4), 692-704 (doi:10.1016/j.compositesb.2011.02.001);
- Faella C., **Martinelli E.**, Camorani G., Aiello M.A., Micelli F., Nigro E. (2011), *Masonry columns confined by Composite materials: design formulae*, Composites Part B, 42(4), 705-716 (doi:10.1016/j.compositesb.2011.02.024);
- Faella C., Camorani G., **Martinelli E.**, Paciello S.O., Perri F. (2012), *Bond behaviour of FRP strips glued on masonry: Experimental investigation and empirical formulation*, Construction and Building Materials, 31, 353-363 (doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.100);
- **Martinelli E.**, Perri F., Sguazzo C., Faella, C. (2016), *Cyclic shear-compression tests on masonry walls strengthened with alternative configurations of CFRP strips*, Bulletin of Earthquake Engineering, 14(6), 1695-1720 (doi: 10.1007/s10518-016-9895-6);
- Ferrara G., Caggegi C., Gabor A., **Martinelli E.** (2019), *Shear strengthening of masonry walls with Flax Textile Reinforced Mortar composite systems*, Proc. of the 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, 27-29 August 2019 in Potsdam (DE).

SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Grazie per l'attenzione

SOFT.LAB

SOFTWARE PER L'EDILIZIA

info@soft.lab.it +39.0824.874.392

e.martinelli@tesis-srl.eu

www.soft.lab.it