

WONDER Masonry

Firenze, 10-11 novembre 2011

L'analisi pushover per la verifica sismica di torri in muratura

M. Lucchesi, B. Pintucchi, N. Zani

**DiCR - Dipartimento di Costruzioni e Restauro,
Università di Firenze**

This research was supported by the Region of Tuscany (project "Tools for modelling and assessing the structural behaviour of ancient constructions: the NOSA-ITACA code", PAR FAS 2007-2013).

This support is gratefully acknowledged.

Obiettivo

Verificare la capacità di previsione del comportamento sismico di analisi statiche non lineari per torri snelle in muratura (confronto con analisi dinamiche non lineari al passo)

Strutture ad elevata vulnerabilità sismica

Analisi pushover ampiamente riconosciute soprattutto con riferimento alle verifiche di capacità delle strutture esistenti

(Ministero per i Beni e le Attività Culturali, 2011; Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2008, 2009; UNI EN 1998-1:2005).

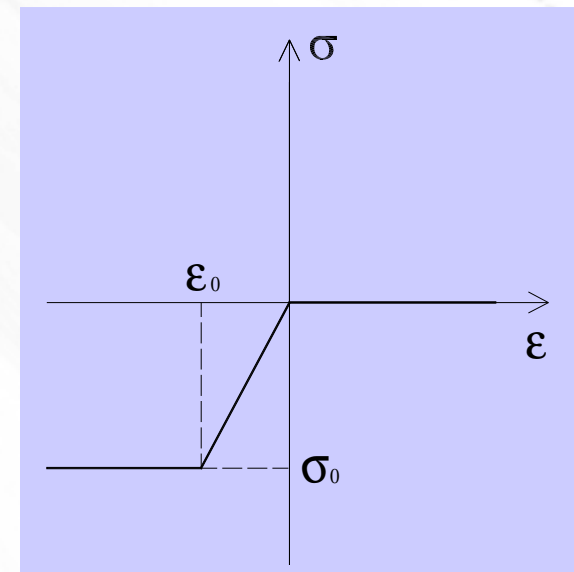
Modello utilizzato

Modello monodimensionale a massa distribuita (modello continuo) a solo comportamento flessionale

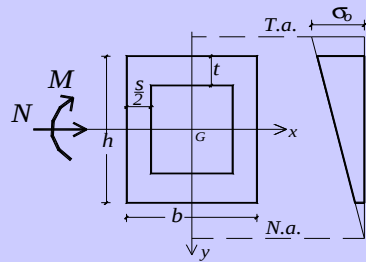
Materiale isotropo elastico non lineare non resistente a trazione e con limitata resistenza a compressione

Equazione costitutiva, formulata in termini di caratteristiche della sollecitazione e della deformazione, appositamente determinata per sezioni rettangolari cave (torri). Ipotesi:

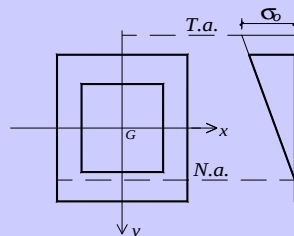
- 1) Si considera solo la componente assiale dello sforzo.
- 2) Ipotesi di Eulero-Bernoulli.



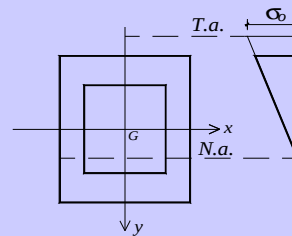
SEZIONE RETTANGOLARE CAVA



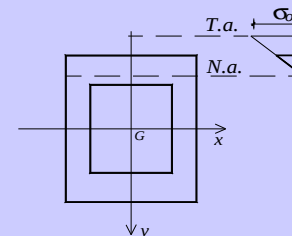
Case 1



Case 2

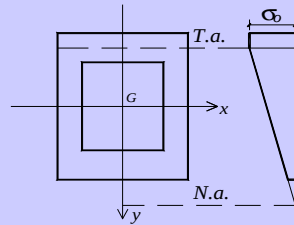


Case 3

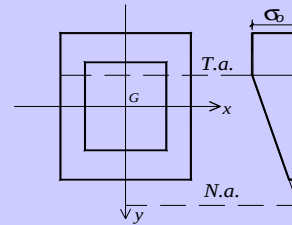


Case 4

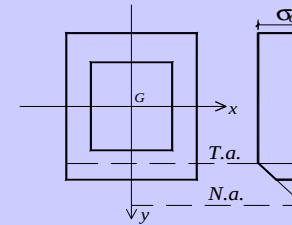
$M > 0$



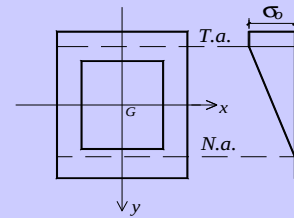
Case 5



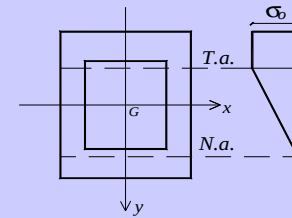
Case 6



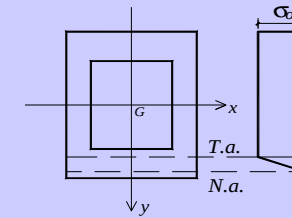
Case 7



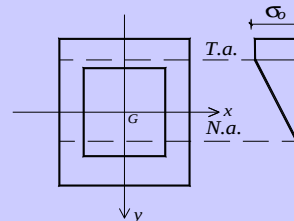
Case 8



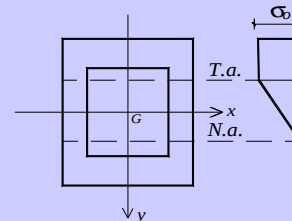
Case 9



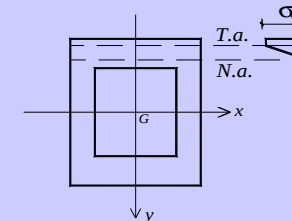
Case 10



Case 11

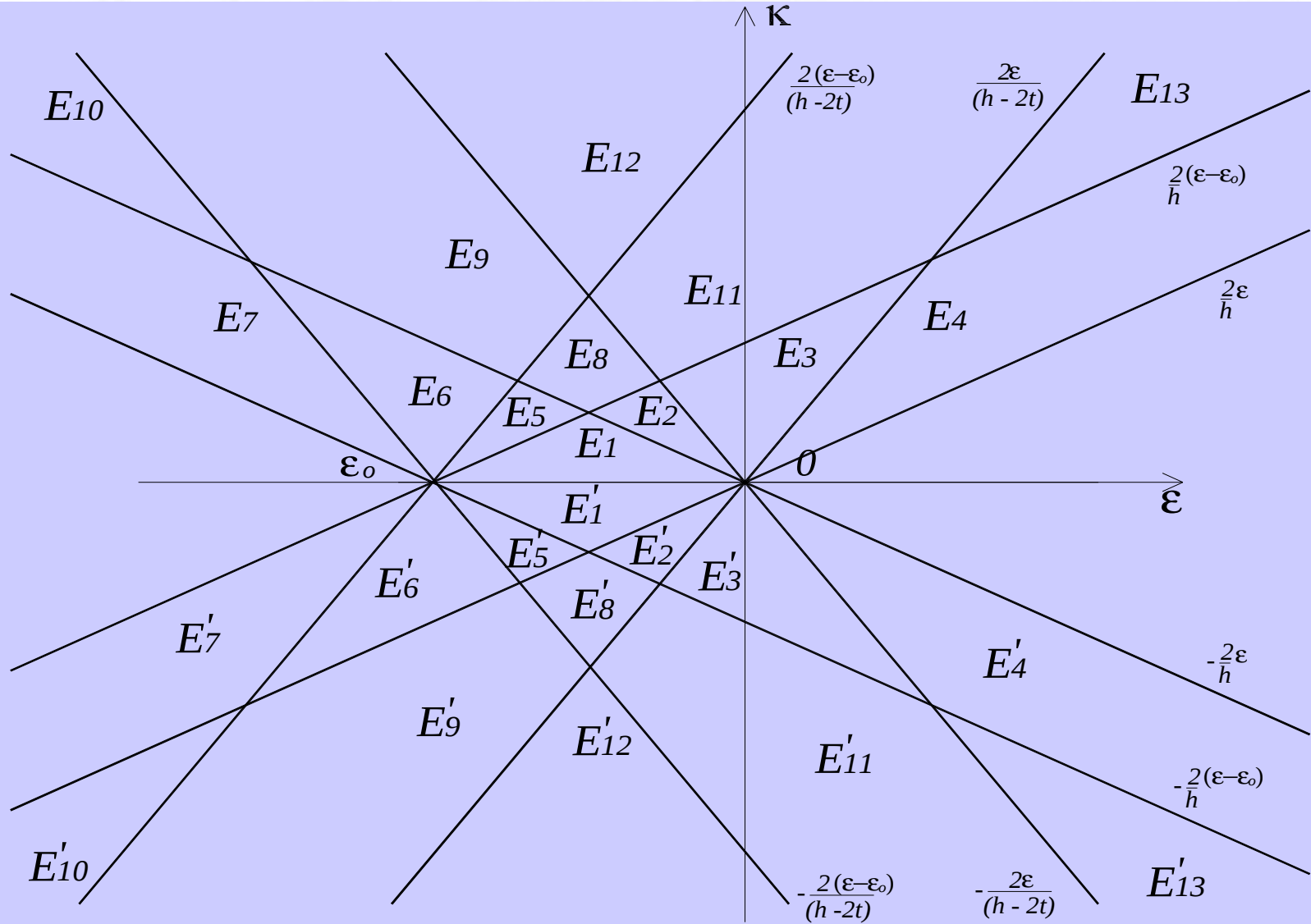


Case 12

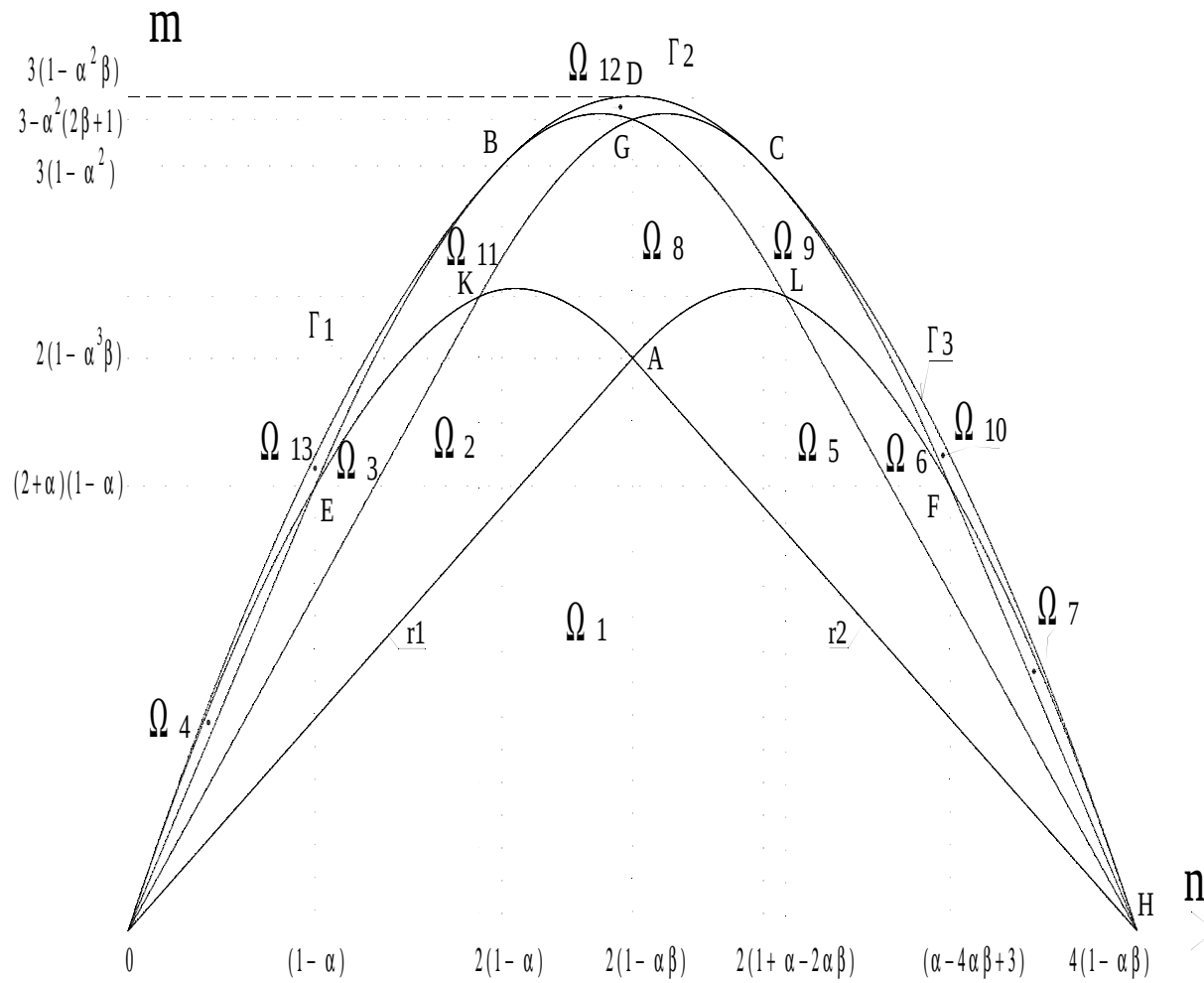


Case 13

SEZIONE RETTANGOLARE CAVA



SEZIONE RETTANGOLARE CAVA



EQUAZIONI DEL MOTO

- La torre è modellata come una struttura monodimensionale ad asse rettilineo e sezione cava, con massa distribuita.

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + q = 0$$

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial N}{\partial x} - p = 0$$

- Metodo numerico agli elementi finiti implementato nel programma di calcolo MADY:
 - Tre gradi di libertà per ogni nodo.
 - Elementi conformi e funzioni di forma di Hermite per il problema flessionale, funzioni lineari per gli spostamenti assiali.
 - Metodo di Newmark e metodo di Newton-Raphson.

Modello utilizzato

Il modello è sufficientemente raffinato da rappresentare le non linearità meccaniche e geometriche proprie di strutture snelle in muratura ma abbastanza semplice da consentire lo svolgimento di analisi pushover e di analisi dinamiche al passo, utilizzate per verificare l'attendibilità delle prime.

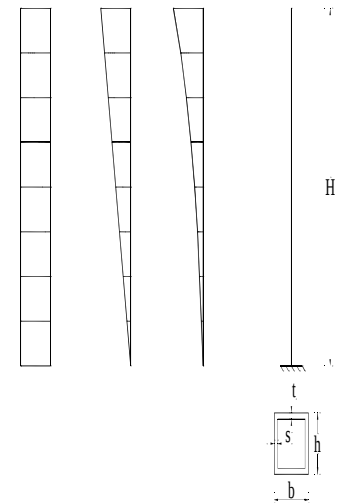
Il comportamento non lineare del materiale viene considerato in tutte le sezioni (non solo alla base).

L'equazione costitutiva prevede che la soluzione, anche in termini di spostamento, se esiste, è unica.

CASO STUDIO

Dati geometrici e valori dei parametri meccanici:

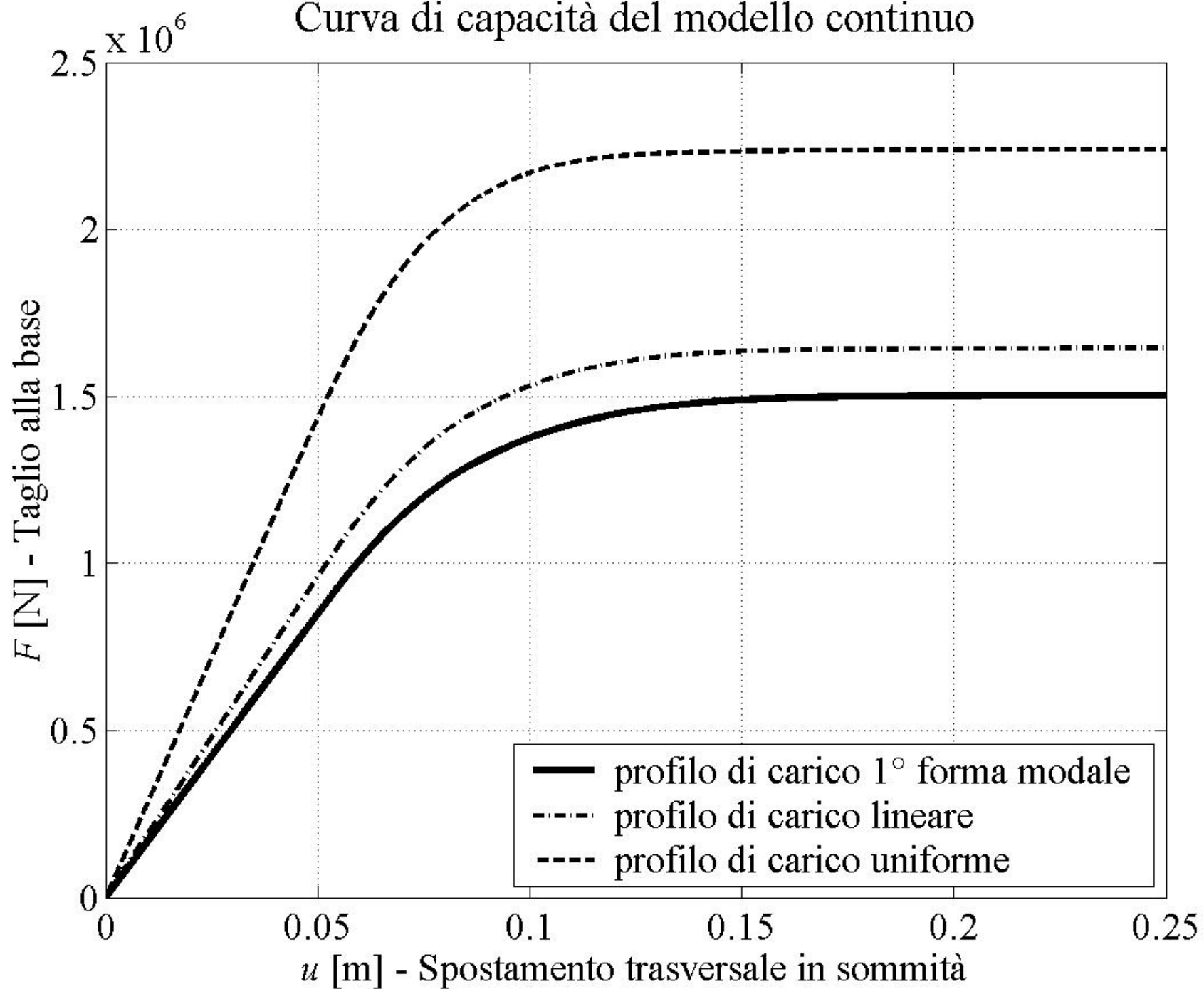
Altezza (H)	35 m
Sezione (b,h)	6 m x 6 m
Spessore muratura (s,t)	1.6 m
Modulo di Young (E)	1500 MPa
Densità di massa (ρ)	1900 kg/m ³
Resistenza a compressione (σ_o)	1.7 MPa
Smorzamento	2%



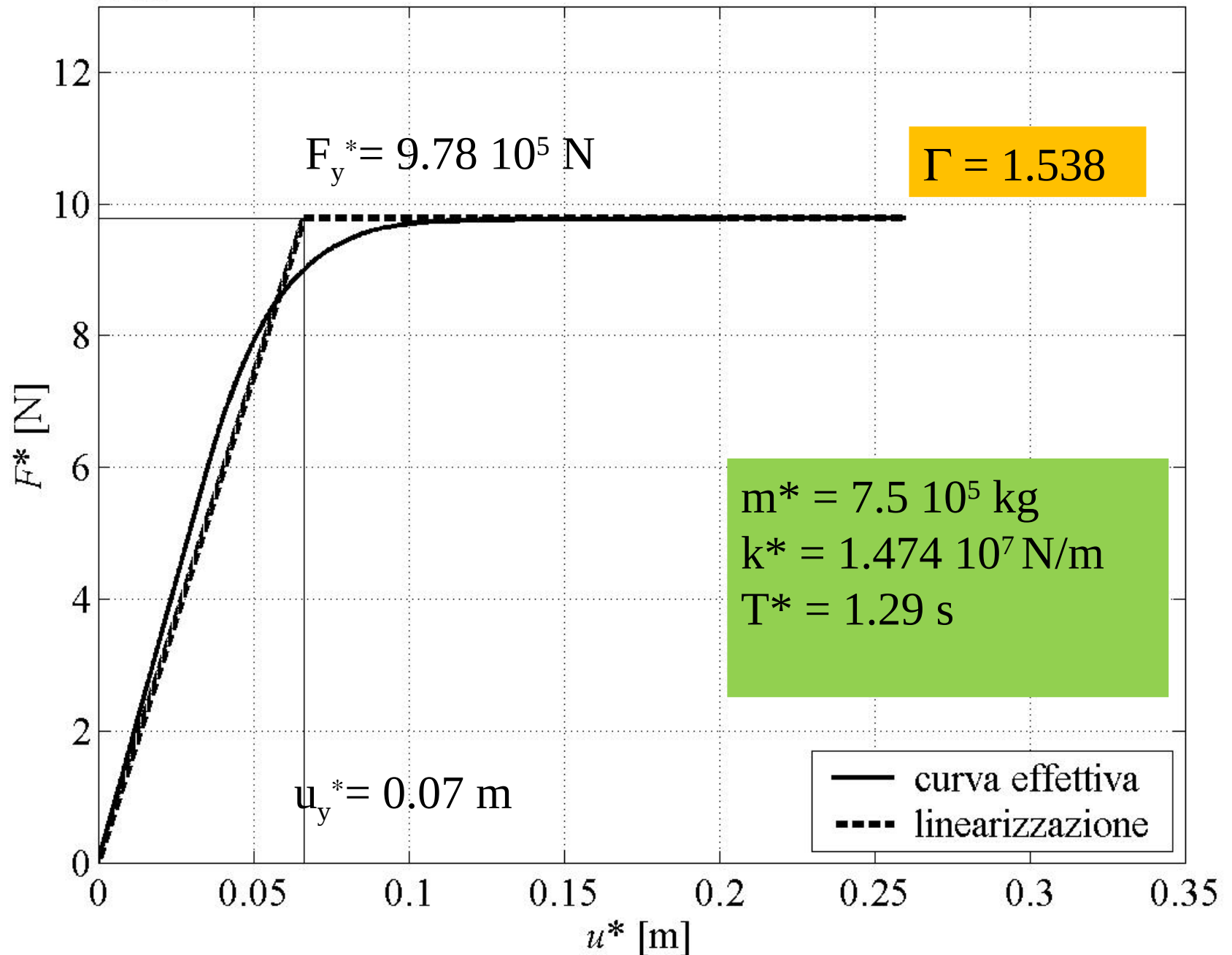
Analisi statica non-lineare:

procedura prevista dalle normative italiane ed europee le quali ripropongono essenzialmente il “Metodo N2” (Fajfar, 2000).

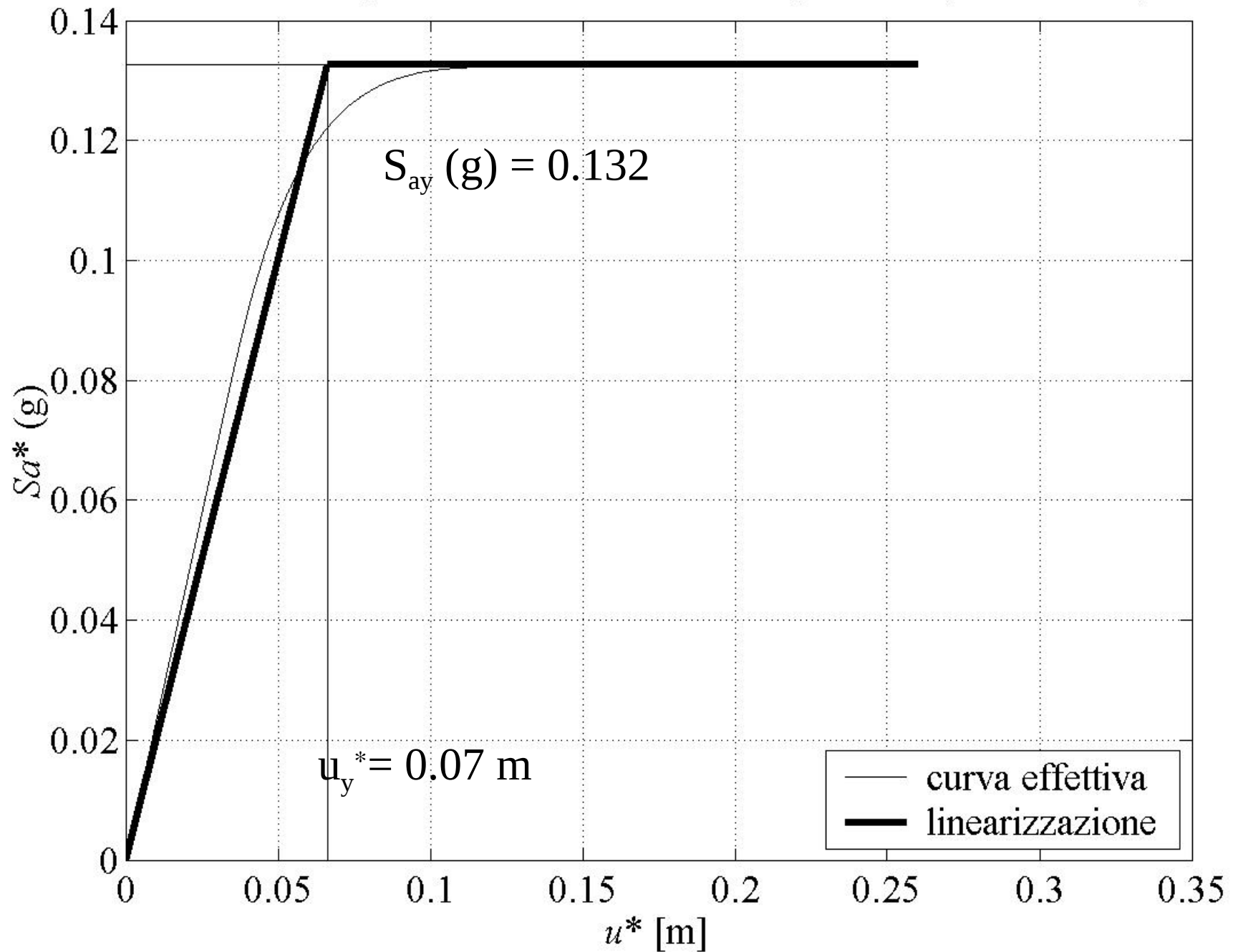
Curva di capacità del modello continuo



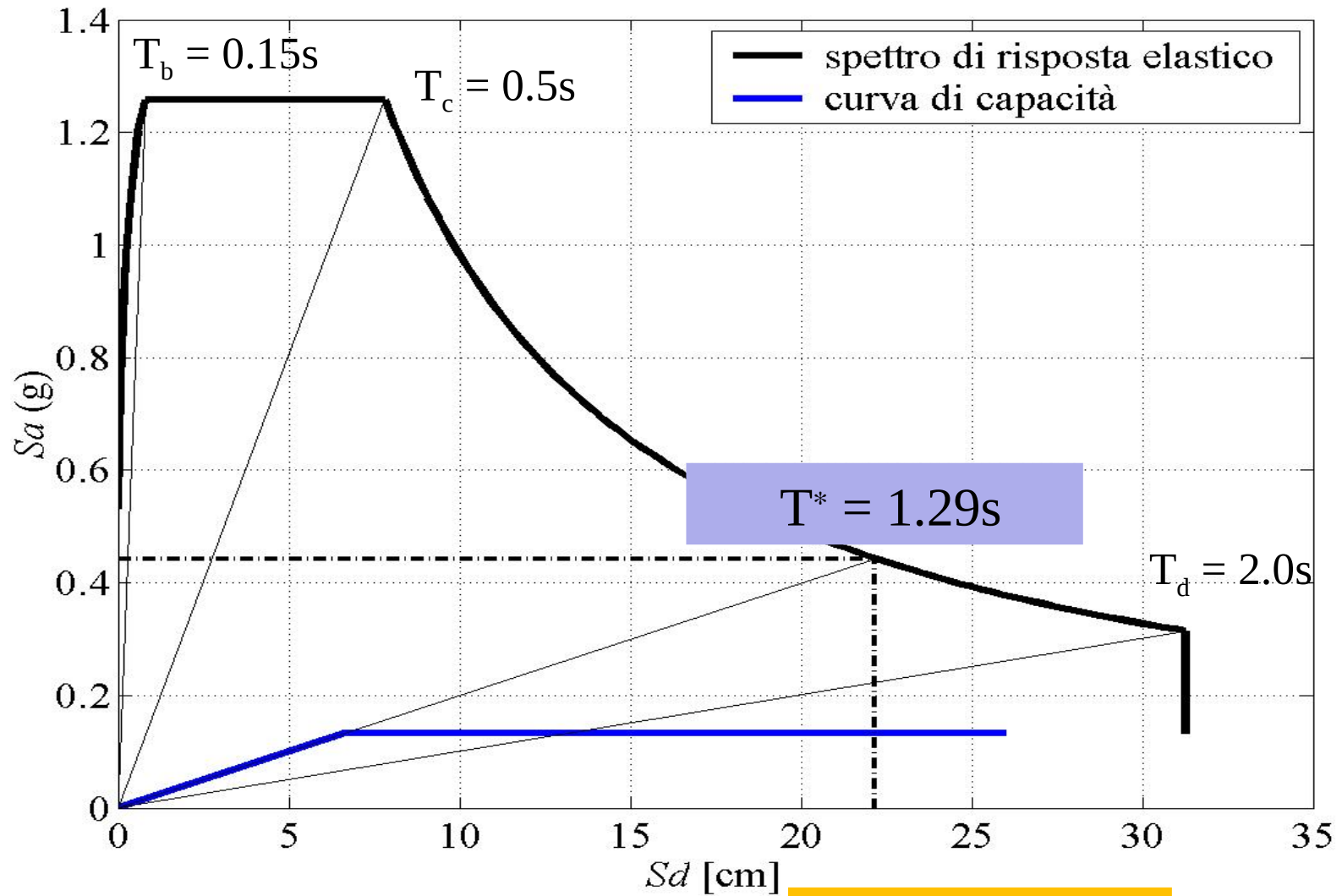
$\times 10^5$ Curva di capacità del sistema SDOF equivalente



Curva di capacità SDOF - formato spettrale (AD format)



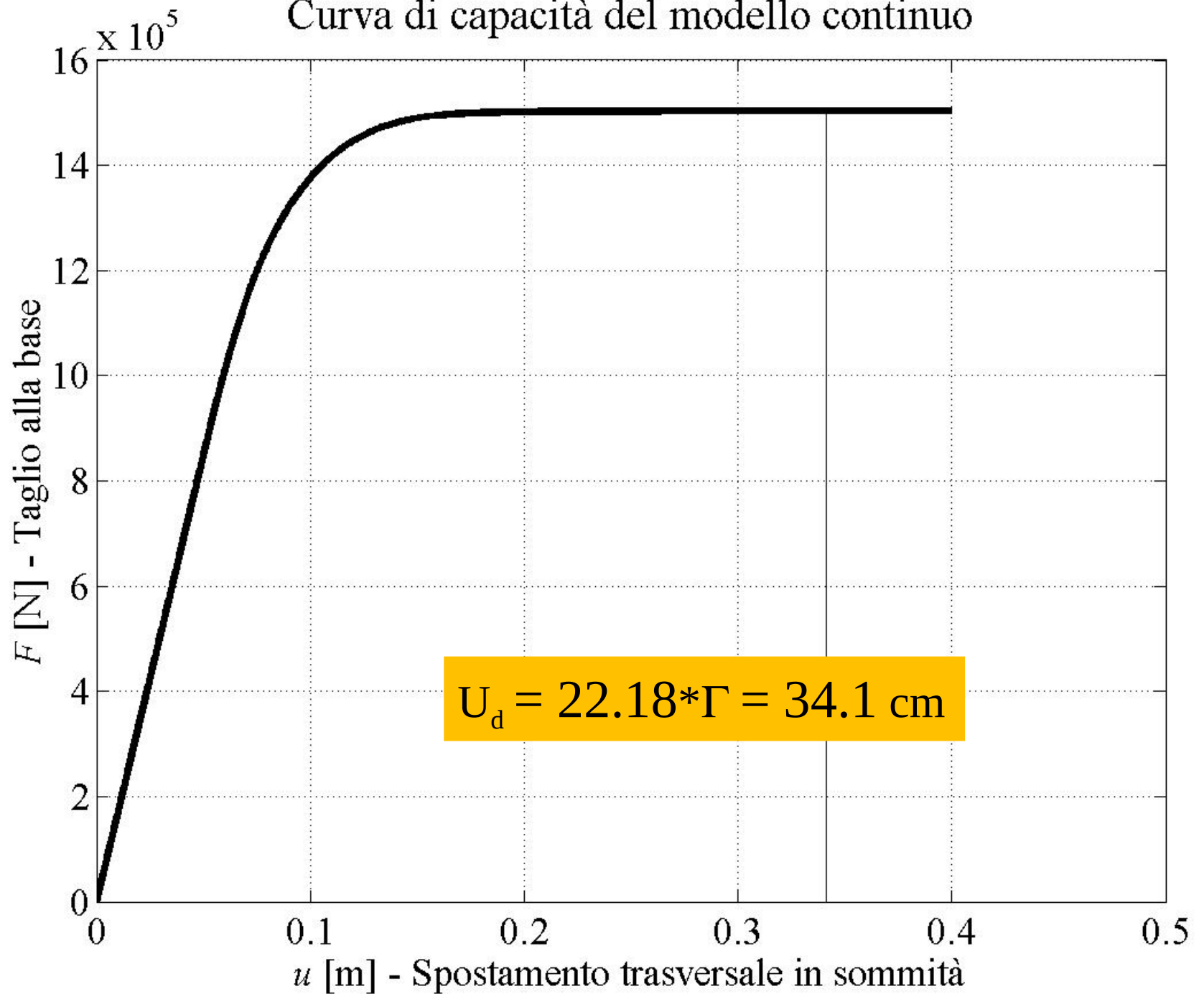
CONFRONTO DOMANDA – CAPACITA'



$T^* = 1.29s$

$u_d^* = 22.18$ cm

Curva di capacità del modello continuo



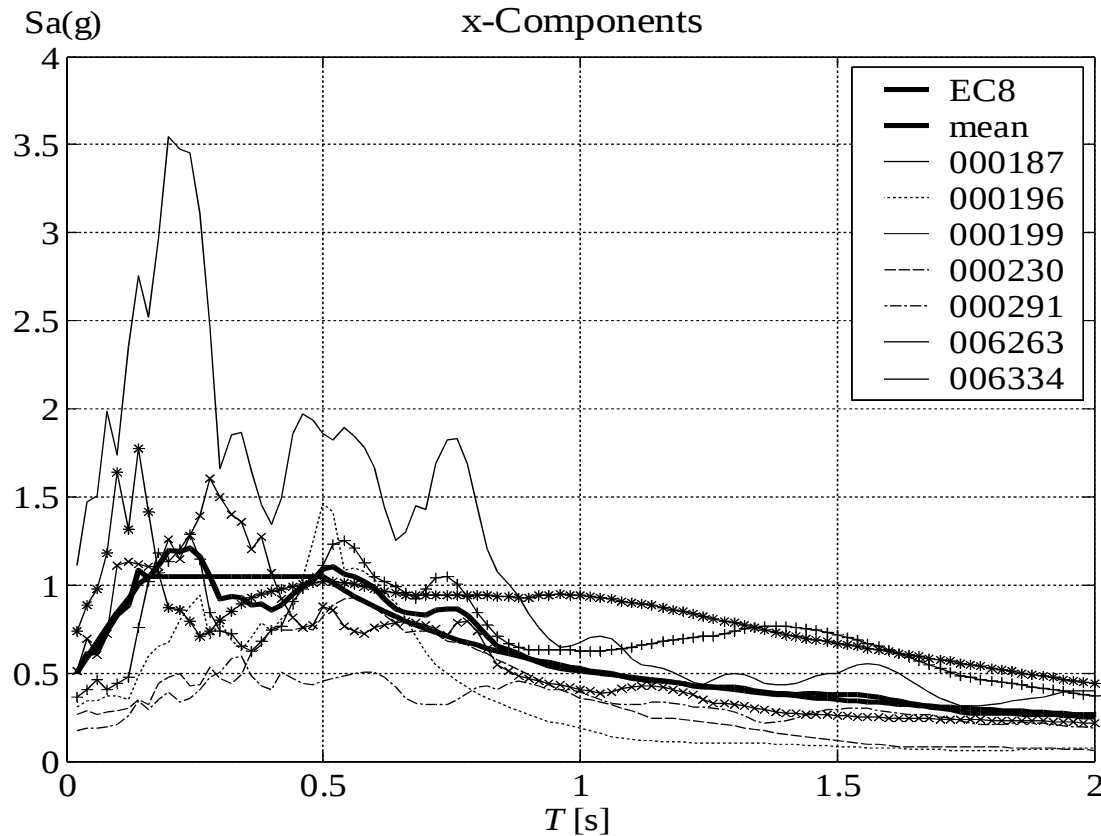
ANALISI DINAMICHE: INPUT UTILIZZATO

Sette terremoti reali selezionati dall'*European Strong motion Database*.

Code	Earthquake	Date	Soil	Magnitude	Fault distance (km)	Duration (s)	X-dir PGA(g)	Station
0187	Tabas	Sept. 16, 1978	stiff	7.4	3	63.40	0.925	Tabas
0196	Montenegro	Apr. 15, 1979	stiff	6.9	12	48.22	0.453	Petrovac-Hotel Oliva
0199	Montenegro	Apr. 15, 1979	stiff	6.9	12	47.80	0.374	Bar-Skupstina Opstine
0230	Montenegro	May 24, 1979	stiff	6.2	9	32.52	0.119	Budva-PTT
0291	Campano Lucano	Nov. 11, 1980	stiff	6.9	13	86.03	0.155	Calitri
6263	South Iceland	June 17, 2000	stiff	6.5	6	72.47	0.624	Kaldarholt
6334	South Iceland	June 21, 2000	stiff	6.4	4	54.99	0.419	Solheimar

ANALISI DINAMICHE: INPUT UTILIZZATO

Accelerogrammi compatibili con lo spettro di risposta elastico dell'EC8, zona 1 e suolo di classe B.



CONFRONTO ANALISI PUSHOVER E DINAMICA

Sisma (code)	Spost. (m)	Volume fessurato %	Volume schiacciato %
187	0.953	71	11
196	0.244	38	5
199	0.299	37	6
230	0.176	22	3
291	0.224	27	4
6263	0.162	65	6
6334	0.173	33	3
media	0.32	42	5
Pushover	0.34	19	2

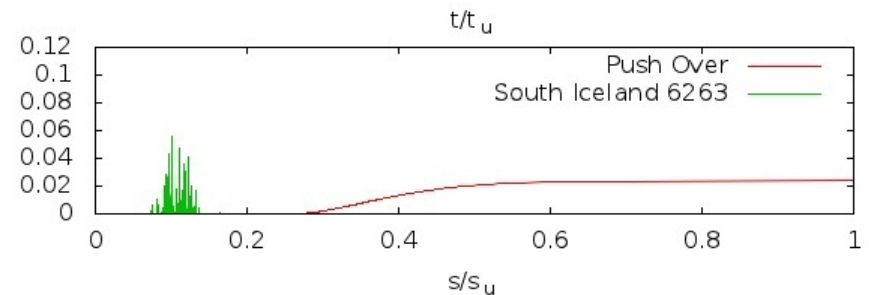
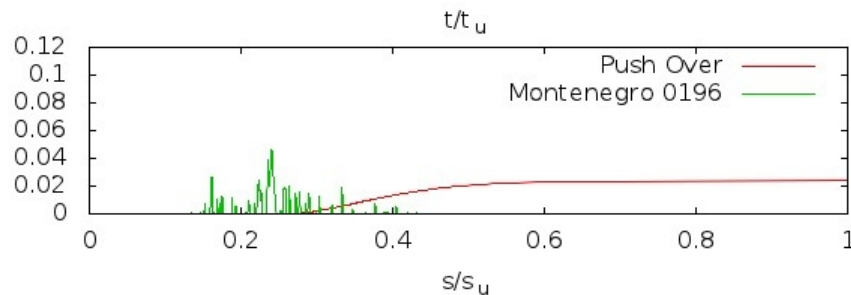
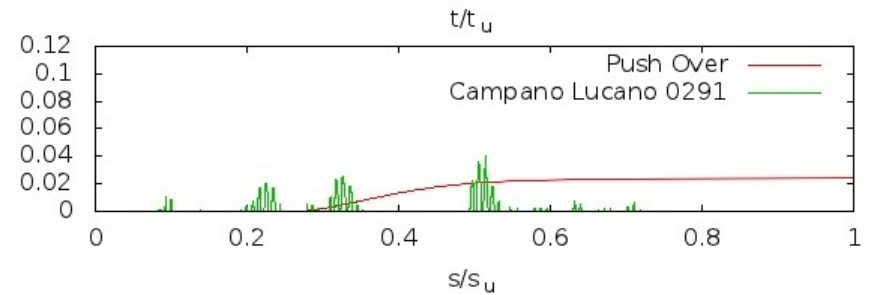
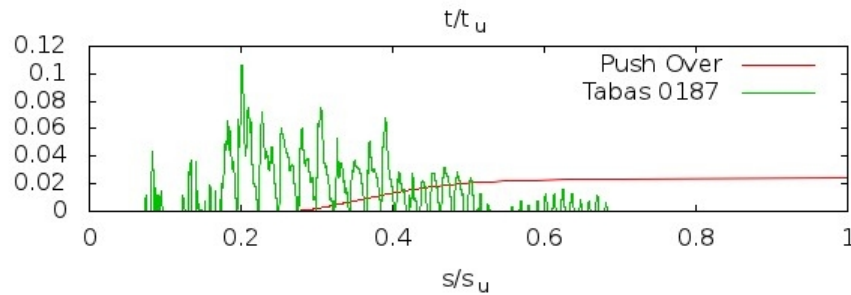
CONFRONTO ANALISI PUSHOVER E DINAMICA

Parametri di danneggiamento globali

Percentuale di volume soggetta a schiacciamento rispetto al volume totale della torre (C_v) vs:

1) il tempo adimensionalizzato t/t_u (analisi dinamica)

2) lo spostamento in sommità adimensionalizzato s/s_u (analisi pushover)



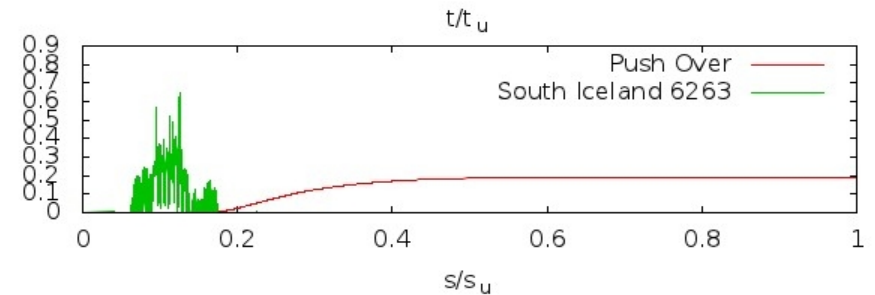
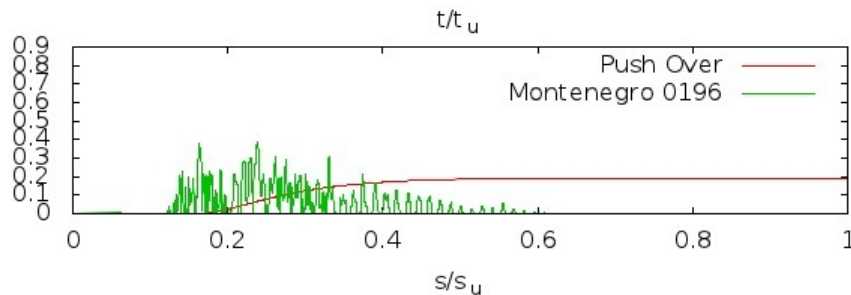
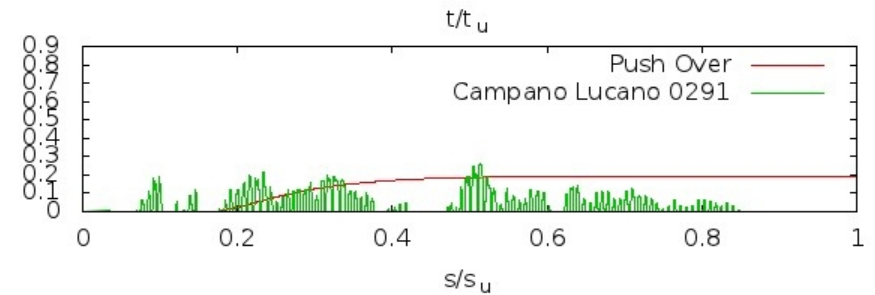
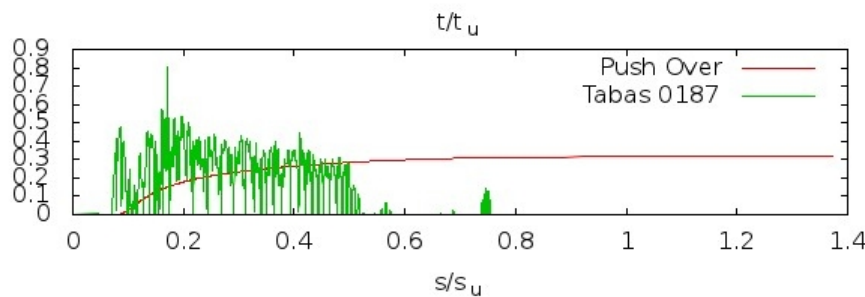
La previsione del danneggiamento globale ottenuto con l'analisi pushover, qualunque sia la richiesta di spostamento, risulta non conservativa.

CONFRONTO ANALISI PUSHOVER E DINAMICA

Parametri di danneggiamento globali

Percentuale di volume soggetta a fessurazione rispetto al volume totale della torre (F_v) vs:

- 1) il tempo adimensionalizzato t/t_u (analisi dinamica)
- 2) lo spostamento in sommità adimensionalizzato s/s_u (analisi pushover)



ANALISI STATICHE NON LINEARI NON CONVENZIONALI

ANALISI PUSHOVER MULTIMODALI:

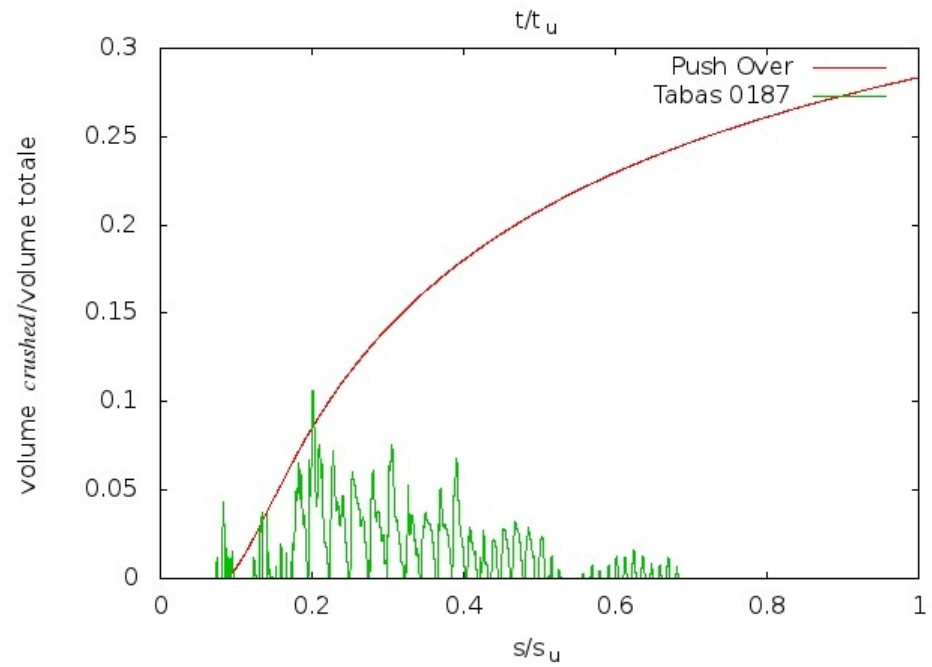
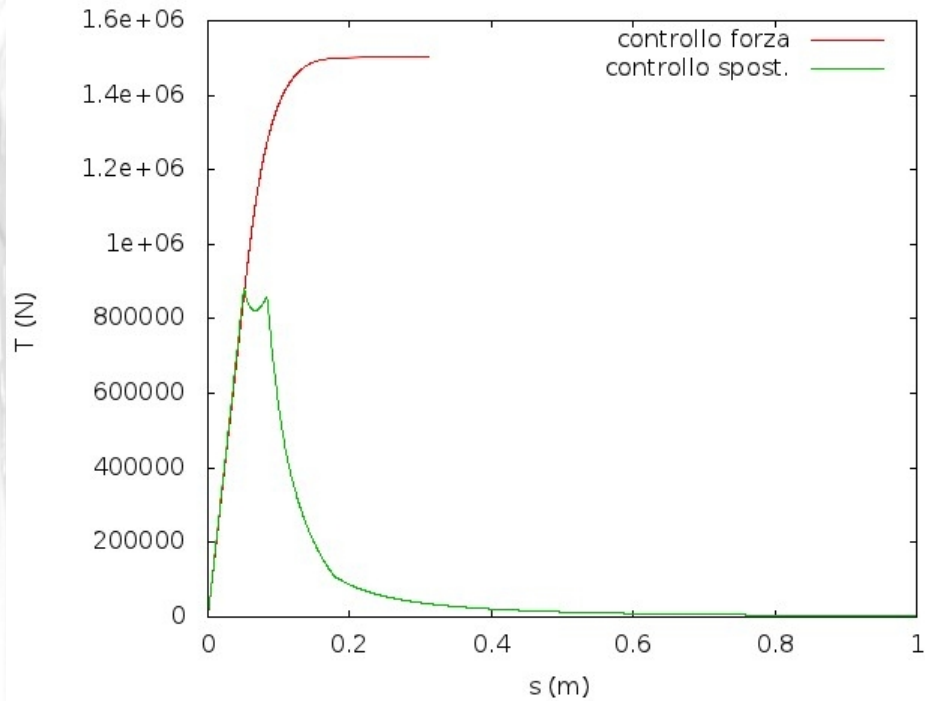
- **Modal pushover analysis (MPA) (Chopra & Goel, 2002)**
- **Procedure che utilizzano il contributo pesato di più forme modali per la definizione del profilo di carico**

ANALISI PUSHOVER ADATTIVE:

- **Il vettore di carico viene aggiornato ad ogni step dell'analisi in funzione delle variate caratteristiche dinamiche della struttura.**

ANALISI PUSHOVER IN SPOSTAMENTO

ANALISI PUSHOVER A CONTROLLO DI SPOSTAMENTO



CONCLUSIONI

La procedura statica non lineare suggerita dalle più recenti normative italiane ed europee viene applicata al caso di torri in muratura isolate.

I risultati ottenuti da un caso studio sembrano suggerire che l'analisi pushover:

1) fornisce un'accettabile previsione del comportamento sismico della torre sia in termini di spostamento che di danneggiamento localizzato nella sezione di base.

2) sottostima l'estensione lungo l'altezza della torre del danneggiamento (fessurazione e schiacciamento) nonché la sua entità in queste zone della struttura, a prescindere dalla domanda di spostamento.

Analisi pushover a forze imposte: Non si ottengono significativi miglioramenti considerando analisi pushover multimodali o adattive.

Più promettente appare l'utilizzo di analisi pushover a spostamenti imposti.