FACOLTA' DI INGEGNERIA CIVILE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile per la Protezione dai Rischi Naturali (D.M.270)

RELAZIONE DI FINE TIROCINIO

A.A. 2015/2016

MODELLAZIONE DI STRUTTURE IN MURATURA TRAMITE IL SOFTWARE UDEC

TUTOR UNIVERSITARIO

Prof. Ing. Gianmarco De Felice

STUDENTE

Matteo Ammendolia

Matricola: 449021

SOMMARIO

1. Premessa 1

2. Teoria DEM 2

3. Presentazione del software 4

3.1 Generalità 4

3.2 Elementi distinti vs elementi finiti 4

3.3 Campi di applicazione 5

3.4 Creazione del modello ed assegnazione delle caratteristiche 6

3.5 Lettura dei dati ed esecuzione delle istruzioni 9

3.6 Utilizzo delle FISH 10

4. Applicazioni numeriche 12

4.1. Modellazione e calibrazione di semplici strutture in muratura 12

4.2. Validazione dei modelli in campo elastico lineare 18

4.3. Push-over di prima implementazione a controllo di forze 24

4.3.1 Il programma 24

4.3.2 I risultati 26

4.4 Push-over automatica a controllo di forze 29

4.4.1 Il programma 29

4.4.2 I risultati 30

4.5 Push-over a controllo di spostamento 33

5. Conclusioni e sviluppi futuri 37

Riferimenti bibliografici 38

1. Premessa

L'attività di tirocinio è stata svolta nel Laboratorio Computazionale di Strutture, presso il dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi Roma Tre (Vito Volterra 62, Roma) nei mesi di Ottobre, Novembre e Dicembre 2016 ed ha avuto durata complessiva di 150 ore, corrispondenti a 6 CFU.

Tale attività ha riguardato l'apprendimento e l'utilizzo del software specialistico "UDEC" (*Universal Distinct Element Code*), sviluppato in ambito accademico dal professore Cundall nel 1980 [UDEC manual – User's Guide]. Il software, come verrà meglio specificato nel seguito, è un codice di modellazione agli Elementi Distinti che si basa, appunto, su una particolare metodologia di analisi: Distinct Element Method (DEM) (Metodo agli Elementi distinti) ed è utilizzato dal laureando come strumento di analisi di costruzioni in muratura soggette ad azioni esterne (quali, ad esempio, l'azione sismica).

Attualmente UDEC viene correntemente utilizzato sia in ambito accademico che per scopi professionali avanzati ed è disponibile in commercio, distribuito dalla software-house *Itasca Consulting Group*, avente sede a Minneapolis (Minnesota, USA) [Sito internet ITASCA: http://www.itascacg.com/software/udec].

La presente relazione ha quindi l'intento di descrivere quanto appreso nelle ore di lavoro, fornendo anche informazioni relative alla teoria che sta alla base del software ed illustrando gli esperimenti e le prove effettuate con lo stesso. In particolare, nella prima parte del presente lavoro vengono sinteticamente descritti gli aspetti salienti della teoria degli *Elementi Distinti*, mentre nella seconda parte vengono illustrati i principali risultati di alcune indagini numeriche condotte su semplici strutture in muratura durante il periodo di tirocinio mediante l'utilizzo di UDEC. In questo secondo ambito si distinguono:

- analisi parametriche e di sensitività;

- studio di sistemi strutturali semplici e confronto con risultati noti in letteratura o soluzioni teoriche in forma chiusa

2. Teoria DEM

Come accennato nella premessa, la teoria nella quale UDEC pone le sue radici consiste nel Metodo agli Elementi Distinti, più comunemente conosciuto mediante l'acronimo DEM, formulato da Cundall e Strack nel 1979.

Nel metodo agli elementi distinti un ammasso roccioso o, nel caso in esame, una struttura in muratura è rappresentata come un insieme di blocchi discreti. I giunti sono considerati interfacce tra corpi distinti, il che implica che la discontinuità del mezzo venga trattata come una condizione al contorno e che le dimensioni del blocco siano comprensive anche del semi-spessore dei giunti che lo circondano [Handbook of Research on Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures (Panagiotis G. Asteris Vagelis Plevris)] (vedi fig.1). Le forze di contatto e gli spostamenti alle interfacce dell'insieme di blocchi sottoposto a sforzo vengono ricavati attraverso una serie di calcoli che tengono conto del movimento dei blocchi; tale movimento scaturisce dalla propagazione, attraverso l'insieme di blocchi, dei disturbi causati dalle forze applicate al sistema.

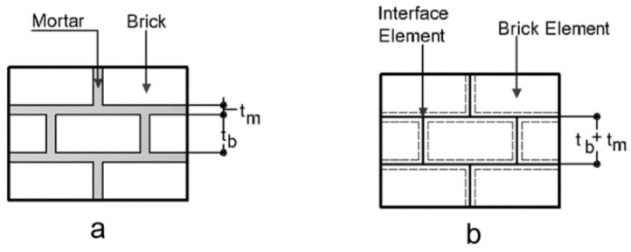


Fig.1: a) stralcio di muratura, b) rappresentazione della muratura agli Elementi Distinti

Quello appena descritto è un processo dinamico in cui la velocità di propagazione del disturbo dipende dalle proprietà fisiche del sistema discreto di blocchi.

Il comportamento dinamico è rappresentato numericamente da un algoritmo di tipo "timestepping" nel quale la grandezza dell'intervallo temporale ("timestep") è limitata dall'assunzione che velocità ed accelerazioni siano costanti nell'intervallo temporale stesso. Il metodo agli Elementi Distinti è infatti basato sul concetto secondo il quale il "timestep" debba essere sufficientemente piccolo in modo che, durante lo step stesso, i disturbi non riescano a propagarsi tra un elemento discreto ed il suo diretto vicino. Ciò corrisponde al fatto che c'è un valore limite di velocità con il quale un'informazione può essere trasmessa in un mezzo fisico. Questa restrizione del passo temporale vale sia per i blocchi che per i contatti; per i blocchi rigidi, la limitazione è definita dalla massa del blocco e dalla rigidezza all'interfaccia tra i blocchi, mentre per i blocchi deformabili tale limitazione è correlata alle dimensioni

della mesh utilizzata e alla rigidezza del sistema (che tiene conto sia del modulo della roccia intatta sia della rigidezza dei contatti).

I calcoli eseguiti nel metodo DEM alternano l'applicazione della legge costitutiva forza-spostamento a tutti i contatti e la seconda legge di Newton (secondo principio della dinamica) a tutti i blocchi; la legge forza-spostamento viene utilizzata per trovare le forze di contatto a partire dagli spostamenti noti, mentre la seconda legge di Newton fornisce il moto dei blocchi scaturito dalle forze note che agiscono sui blocchi stessi. Se i blocchi sono deformabili, il moto è calcolato in corrispondenza dei punti della griglia in cui è stato discretizzato il blocco sottoposto a sforzo; poi, mediante l'applicazione della relazione costitutiva del materiale costituente il blocco si ricavano i nuovi sforzi interni agli elementi [UDEC manual – Theory and background].
Nell'immagine che segue viene sinteticamente riassunto quanto appena esposto relativamente alla logica di base del metodo DEM.

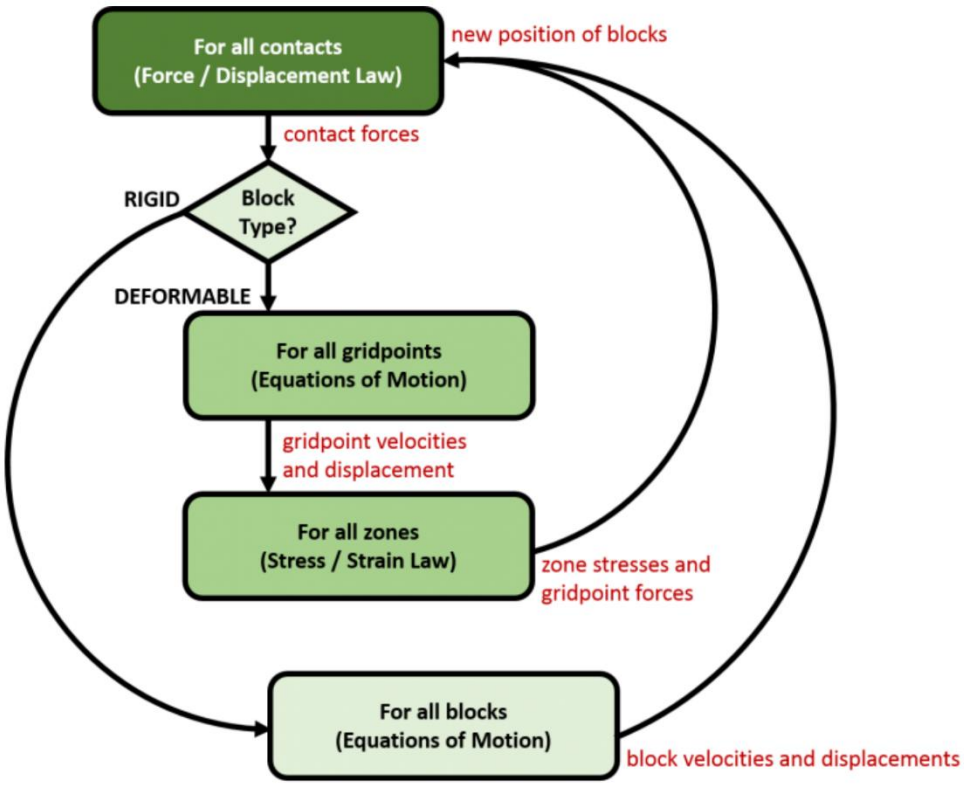


Fig.2: Metodo DEM: blocchi rigidi e deformabili

3. Presentazione del software

3.1 Generalità

UDEC (Universal Distinct Element Code) è un software numerico bidimensionale basato sul metodo agli elementi distinti, consente la modellazione di corpi discontinui (ES. strutture in muratura composte da mattoni e giunti di malta) soggetti sia a carichi statici che dinamici.

I mezzi discontinui vengono rappresentati come un insieme di blocchi e di interfacce di contatto, sono consentiti anche i grandi spostamenti e le grandi rotazioni di tali blocchi lungo le superfici di contatto.
I massi possono essere modellati come rigidi o deformabili, mentre i primi risultano indeformabili, i secondi vengono suddivisi in una *MESH* di elementi, ognuno dei quali si comporterà in accordo con prestabilite leggi sforzi-deformazioni (lineari o non lineari); allo stesso modo anche gli spostamenti relativi tra i blocchi, sia nella direzione normale che in quella tangenziale all'interfaccia di contatto, sono governati da relazioni, lineari o non, di tipo forza-spostamento.
Parametro fondamentale per le analisi condotte in UDEC è lo smorzamento (damping: *auto, local, off o Rayleigh*), dovrà essere opportunamente settato per eseguire analisi dinamiche; il programma è in grado di condurre anche analisi statiche semplicemente integrando le equazioni della dinamica con valori di smorzamento elevati.

3.2 Elementi distinti vs elementi finiti

Molti codici di calcolo agli elementi finiti consentono di modellare le interfacce tra i blocchi (ES. giunti di malta) attraverso le *"slide lines"*, tali approcci sono però limitati sotto alcuni aspetti:

- Presentano problemi di tipo computazionale quando vengono utilizzate più *slide lines* che si intersecano tra loro.
- Durante l'analisi e la deformazione della struttura sottoposta ai carichi esterni non vengono riconosciuti automaticamente i nuovi contatti che si formano.
- La loro formulazione è limitata al campo dei piccoli spostamenti e delle piccole rotazioni.

Il metodo agli elementi distinti utilizzato in UDEC risulta essere più realistico ai fini della modellazione di mezzi discontinui in quanto consente di:

1) Riprodurre grandi spostamenti e grandi rotazioni sino al distacco completo di due blocchi adiacenti.

2) Riconoscere automaticamente il formarsi di nuovi contatti nel progredire dell'analisi.

Senza la prima peculiarità non si sarebbero potuti riprodurre i principali meccanismi che interessano un corpo discontinuo, senza la seconda il programma sarebbe stato limitato ad un ristretto gruppo di corpi discontinui per i quali si conoscono anticipatamente le interazioni tra i vari blocchi.

3.3 Campi di applicazione

UDEC fu sviluppato originariamente per lo studio della stabilità di pendii rocciosi: la formulazione discontinua con blocchi rigidi e la soluzione esplicita, ricavata integrando istante per istante le equazioni del moto (compresi i termini inerziali), hanno facilitato l'analisi dei movimenti progressivi su larga scala di tali pendii rocciosi.

Tra le varie azioni esterne è possibile anche considerare la presenza di fluidi: assegnando le opportune caratteristiche di permeabilità ai giunti si riesce a modellare l'evolversi di moti di filtrazione e le conseguenti azioni sulla struttura.

Il programma è stato spesso utilizzato anche per studi di ingegneria mineraria e di stoccaggio profondo di rifiuti nucleari: sono state condotte analisi sia di tipo statico che dinamico per aperture profonde nel sottosuolo, elementi strutturali sono stati impiegati per simulare sistemi di rinforzo come tiranti imbullonati e iniezioni di calcestruzzo; l'aggiunta del carico termico, ove presente, ha permesso di modellare adeguatamente il comportamento di tali strutture.

Infine il metodo agli elementi distinti sul quale si basa UDEC è appropriato anche per studi di ingegneria sismica, in particolare le strutture in muratura possono essere studiate sia sotto condizioni di carico statiche che dinamiche in maniera molto accurata.

3.4 Creazione del modello ed assegnazione delle caratteristiche

Il tirocinio oggetto della presente relazione è stato finalizzato a comprendere l'utilizzo del software per studiare esclusivamente strutture in muratura, di seguito verranno riportati i principali passi da seguire per creare un modello sul quale effettuare tutte le analisi di interesse.

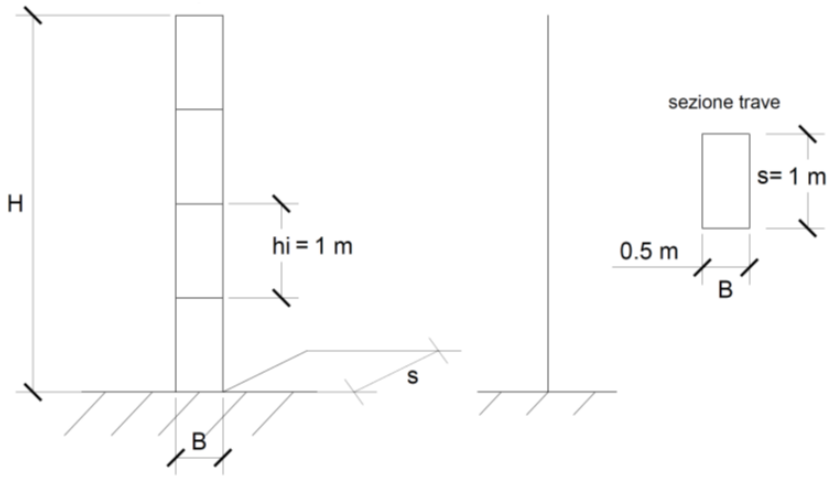
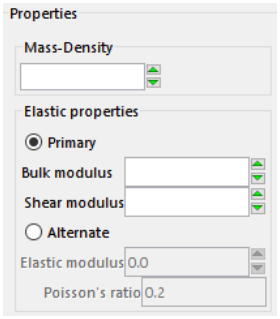


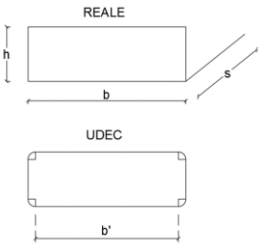
Fig.3: Esempio di modello

Prendendo come esempio il modello sopra riportato abbiamo:

- *Creazione dei blocchi ed assegnazione delle caratteristiche:* Dovranno essere inserite le coordinate dei vertici esterni del "blocco di partenza" in senso orario, in questo caso il blocco di partenza è rappresentato dal rettangolo di dimensioni B*H, a partire da questo si potranno definire tutti i blocchi più piccoli (B*hi) attraverso l'immissione dei *cracks* (giunti tra i massi).
  Come già accennato precedentemente i blocchi possono essere rigidi o deformabili, nel primo caso l'unica caratteristica da definire è la densità dei blocchi (Kg/m^3), nel secondo caso dovranno essere inseriti anche gli opportuni moduli di elasticità (modulo di Bulk *K* & modulo di taglio *G* oppure modulo di elasticità *E* & rapporto di Poisson *v,* vedi figura accanto).



Ulteriore parametro da definire è il *round*, raggio di curvatura degli spigoli di ogni blocco (1cm di default, vedi figura accanto); viene introdotto sia per rappresentare al meglio le condizioni reali, sia per una stabilità computazionale: in questo modo si ha una normale alla frontiera di ogni blocco sempre ben definita.



- *Assegnazione delle caratteristiche ai giunti:* Creati i blocchi il programma riconosce in automatico la presenza dei giunti ai quali però dovranno essere assegnate le caratteristiche di rigidezza e resistenza.

  Il software, per i blocchi rigidi, riconosce due contatti per ogni interfaccia, posti alle estremità del giunto (in corrispondenza dell'inizio della zona di *round*); ad ogni contatto corrispondono due molle, una normale e una tangenziale che racchiudono le caratteristiche di rigidezza e deformabilità del giunto (vedi figura sottostante).

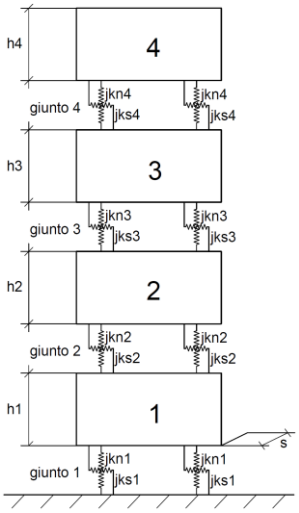


Fig.4: Disposizione dei contatti

La configurazione è la stessa anche per i blocchi deformabili, con l'unica differenza che il numero di contatti per interfaccia aumenta all'infittirsi della mesh con la quale vengono discretizzati i blocchi.

Oltre alle rigidezze dei contatti (jkn & jks) dovranno essere definite le caratteristiche dei giunti in accordo con diversi modelli teorici precaricati in UDEC, in particolare abbiamo:

1. *Coulomb slip (area contact)*
2. *Barton-Bandis model (optional model)*
3. *Continuously yielding model*
4. *Coulomb slip (point contact)*

5. *Coulomb slip with residual strength (area contact)*

Ogni modello sopra elencato richiede differenti parametri di input in relazione alla teoria cui fa riferimento, ad esempio, per il criterio di Coulomb sono richiesti i valori di coesione, angolo di attrito e resistenza a trazione.

- *Condizioni al contorno:* Il software consente di utilizzare differenti tipologie di condizioni iniziali e condizioni al contorno, le principali sono:

1. *Blocchi fissi*
2. *Carichi esterni statici (forze concentrate e carichi distribuiti di qualsiasi forma)*
3. *Carichi esterni dinamici assegnati in termini di storie di velocità*
4. *Distribuzione di sforzi interni alla struttura*

Nell'esempio in esame, per riprodurre la condizione di vincolo incastrato, è stato previsto un ulteriore blocco fisso, al giunto di base sono state assegnate elevati valori di coesione e resistenza a trazione (vedi figura sottostante).

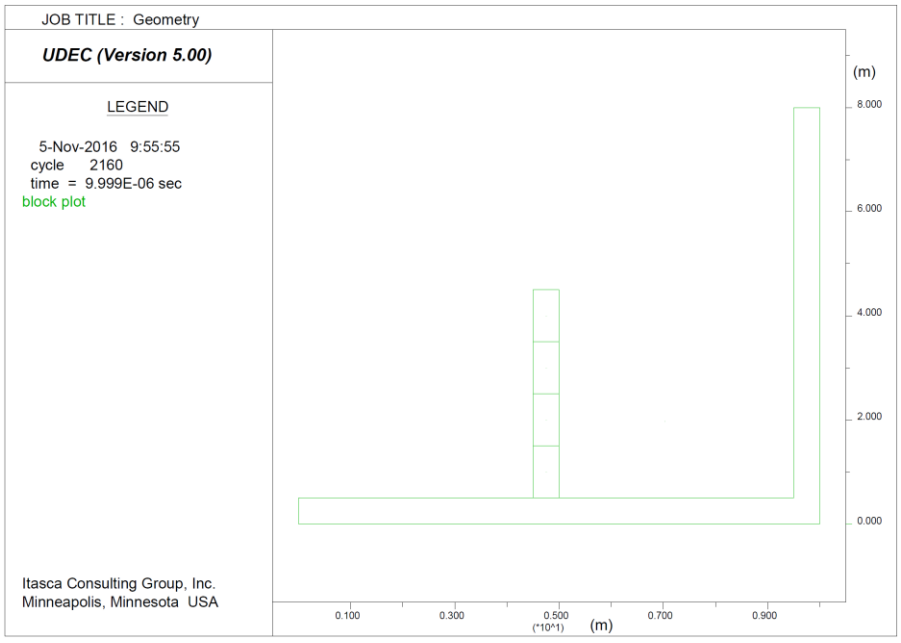


Fig.5: Geometria del modello e blocco fisso di contenimento

- *Definizione dell'accelerazione di gravità:* Il programma consente di settare un valore di accelerazione che verrà mantenuto per tutte le analisi condotte nel modello, per la geometria in esame è stato settato il valore comune di g = 9.81 m/s^2.

3.5 Lettura dei dati ed esecuzione delle istruzioni

I punti descritti nel paragrafo precedente riguardano solamente gli esercizi svolti per prendere famigliarità con il software durante il periodo di tirocinio, le potenzialità del programma sono ben più estese e complesse.

Dati e istruzioni riportati nel paragrafo 3.4 possono essere letti/eseguiti mediante due modalità:

- *Interfaccia grafica*

  Rappresenta sicuramente la via più intuitiva per realizzare la geometria del problema, in quanto consente di tenere costantemente sott'occhio ogni azione, verificando che venga effettivamente eseguita nel modo voluto.

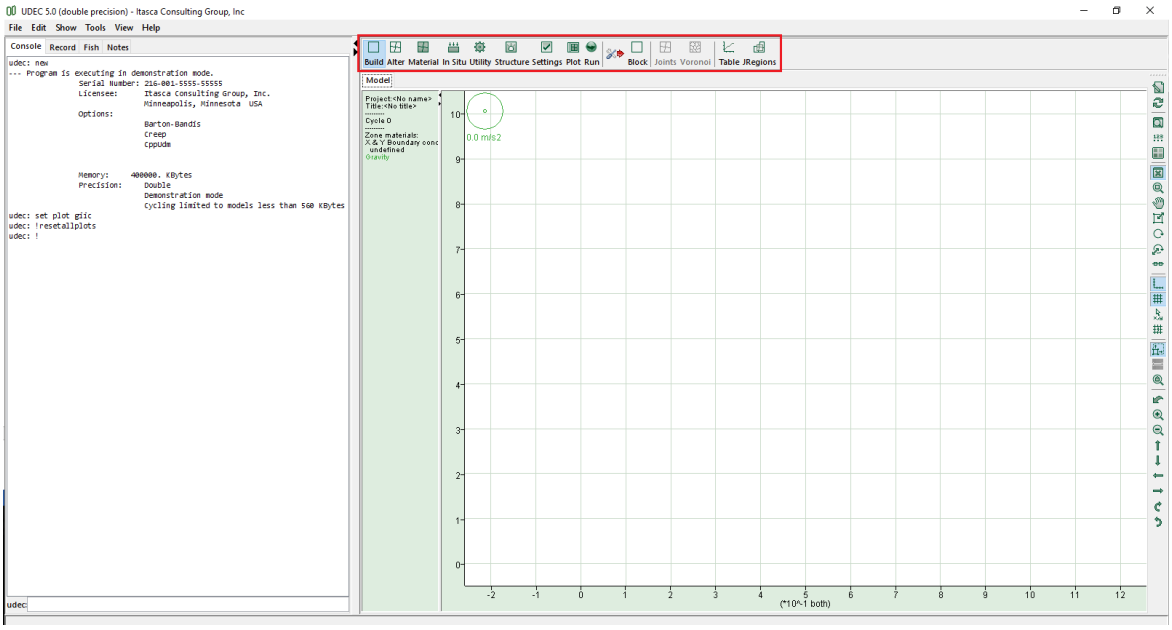


Fig.6: Interfaccia grafica

Utilizzando la barra superiore (evidenziata in rosso nella figura soprastante) è possibile disegnare blocchi e giunti, definirne le caratteristiche e stabilire le condizioni iniziali e al contorno.

- *File di testo*

  In alternativa all'interfaccia grafica possono essere utilizzati uno o più file di testo all'interno dei quali saranno scritte tutte le istruzioni da eseguire per creare il modello, per richiamarne uno basta utilizzare il percorso "file → call data file → selezionare il file .txt desiderato".

Questo modo di operare, seppur macchinoso e poco intuitivo (soprattutto per i principianti), risulta molto pratico quando si vogliono apportare modifiche solamente ad alcune

parti/parametri del modello in quanto consente di richiamare molto velocemente il file sul quale si sta lavorando senza essere costretti a ri-eseguire manualmente le istruzioni di creazione del modello dall'inizio.

A titolo di esempio si riporta il file di testo utilizzato per la generazione del modello illustrato al paragrafo 3.4.

geometria.dat - Blocco note

File Modifica Formato Visualizza ?

```
config
round 1e-2
edge 2e-2

*definizione dei blocchi*
block 0,0 0,0.5 4.5,0.5 4.5,4.5 5,4.5 5,0.5 9.5,0.5 9.5,8 10,8 10,0
crack (4.5,0.5) (5,0.5)
crack (4.5,1.5) (5,1.5)
crack (4.5,2.5) (5,2.5)
crack (4.5,3.5) (5,3.5)
jdelete


*proprietà dei blocchi*
change mat 1 range 4.0594,8.0835 -0.2906,4.125
property mat 1 density 1834.86

*proprietà dei giunti*
group joint 'User:giunto base' range 4.4227,5.2511 0.3976,0.5663
joint model area jks 0.5E10 jkn 1.04167E10 jfriction 30 jtension 0 range group 'User:giunto base'
group joint 'User:giunti comuni' range 4.4722,5.5543 1.2537,4.5072
joint model area jks 0.5E10 jkn 1.04167E10 jfriction 8 jtension 0 range group 'User:giunti comuni'


*accelerazione di gravita*
set gravity=0.0 -9.81


*condizioni al contorno*
fix range 6.7891,7.5914 1.5776,2.6093

*smorzamento per analisi statica*
damp auto
```

Fig.7: Esempio file di testo per la generazione del modello

3.6 Utilizzo delle FISH

Il contenuto dei paragrafi 3.4 e 3.5 è relativo esclusivamente alla generazione del modello sul quale successivamente potranno essere condotte le analisi di interesse.

UDEC presenta al suo interno un linguaggio di programmazione chiamato FISH che permette all'utente di definire nuove variabili e funzioni: i programmi scritti in questo linguaggio vengono sempre richiamati sotto forma di file di testo, tradotti in liste di istruzioni e immagazzinate all'interno della memoria.

Ogni qual volta viene richiamato il nome di una fish, a patto che questa sia stata precedentemente letta, verranno eseguite tutte le istruzioni contenute al suo interno; di seguito si riporta una semplice fish relativa ad una analisi di push-over per la struttura descritta al paragrafo 3.4.

push_over.dat - Blocco note

File Modifica Formato Visualizza ?

```
def forza               ;Definizione del nome della fish
dac=0.001
velo_max=2E-02
ncicli=30

;punto di controllo
testa=b_near(4.75,4)    ;restituisce l'indice del blocco di testa
xcentroidetesta=4.75    ;fisso l'ascissa del centroide del blocco di testa

;calcolo massa totale
bi=block_head
loop while bi#0
if b_fix(bi)=0
dmassa=b_mass(bi)
else
dmassa=0
endif
massa=massa+dmassa
bi=b_next(bi)
endloop

;PUSH OVER
n=1
table(2,1)=0
xtable(2,1)=0
loop while maxvelo_blocco <= velo_max
n=n+1
acc=acc+dac
;applicazione forze ai blocchi
bi=block_head
loop while bi#0
dmassa=b_mass(bi)
b_xload(bi)=dmassa*acc
bi=b_next(bi)
endloop
ff=massa*acc
table(2,n)=ff
cicloiniz=cycle
COMMAND
solve cycle 100
ENDCOMMAND

ciclosolve=cycle

;aggiornamento del delta accelerazione
deltaciclo=ciclosolve-cicloiniz
if deltaciclo < ncicli
dac=1.1*dac
else
dac=dac*0.9
endif

;calcolo velocita blocchi
bi=block_head
loop while bi#0
velo_blocco=b_xvel(bi)
maxvelo_blocco=max(maxvelo_blocco,abs(velo_blocco))
bi=b_next(bi)
endloop
comemipare=out('VELOCITA')
stampa=out(string(maxvelo_blocco))
ss=b_x(testa)-xcentroidetesta
xtable(2,n)=ss
comemipare=out('DAC')
stampa=out(string(dac))
comemipare=out('DELTACICLO')
stampa=out(string(deltaciclo))
end_loop
end

forza               ;Richiamo del nome della fish per far eseguire
                     al programma le istruzioni contenute al suo interno
```

Fig.8: Esempio di FISH

Scopo delle FISH è proprio quello di rendere l'utente in grado di implementare un qualsiasi tipo di analisi, statica o dinamica che sia, utilizzando le istruzioni elementari precaricate nel programma (ES. assegnazione di forze concentrate nei centroidi dei blocchi, settaggio dell'accelerazione di gravità, condizioni di vincolo, ecc...).

4. Applicazioni numeriche

Una volta assunto un buon livello di dimestichezza e familiarità con le principali funzionalità del software si è proceduto con l'applicazione delle nozioni apprese al campo più strettamente ingegneristico-strutturale, nel caso in esame legato allo studio e all'analisi di strutture in muratura, al fine di comprendere le filosofie di ragionamento del software e di sviluppare qualche semplice procedura di analisi.

Sono stati quindi affrontati quattro principali argomenti, di seguito riportati:

- Modellazione e calibrazione di semplici strutture in muratura
- Validazione dei modelli in campo elastico lineare
- Modellazione in ambito non-lineare per la stima dell'accelerazione ammissibile (analisi di Push-Over a "controllo di forza")
- Modellazione in ambito non-lineare per la stima della duttilità ultima delle strutture (analisi di Push-Over a "controllo di spostamento")

Si andrà quindi di seguito a descrivere nel dettaglio tali argomenti.

4.1 Modellazione e calibrazione di semplici strutture in muratura

In prima battuta si sono svolte attività di modellazione di semplici strutture in muratura, cercando di calibrare correttamente le loro caratteristiche meccaniche.

La struttura principale sulla quale si è deciso di effettuare queste prove di calibrazione è una semplice struttura a quattro blocchi; da tale essenziale struttura di base sono scaturiti tre modelli, sinteticamente raffigurati in fig.9, denominati modello "semplice", modello "raffinato" e modello "elastico".

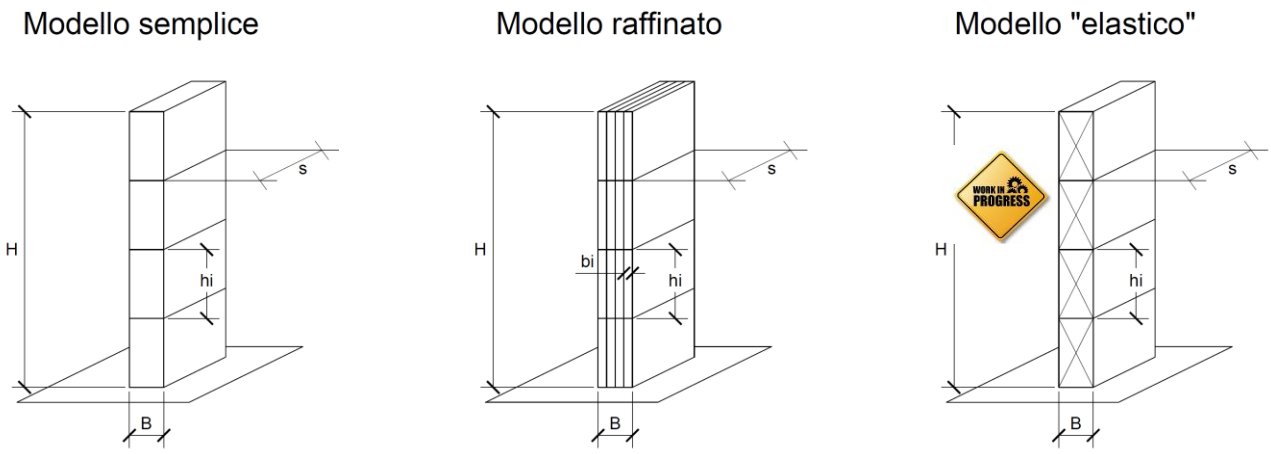


Fig.9: Modelli d'analisi

Prima di procedere con la descrizione delle caratteristiche di ciascuno di essi si vuole precisare la principale differenza tra i tre sopracitati modelli, risiedente nella tipologia dei blocchi utilizzati; per il modello semplice e quello raffinato sono stati infatti utilizzati blocchi rigidi, mentre invece per il modello elastico si è ricorso a blocchi deformabili.

Si vuole inoltre rendere noto che l'utilizzo di blocchi deformabili prevede un onere computazionale e tempistiche d'analisi nettamente superiori rispetto a quelli necessari per l'utilizzo di blocchi rigidi; pertanto la trattazione e la calibrazione del modello "elastico", relativamente all'attività di tirocinio svolta, resta incompleta, in quanto limitata alla sola modellazione della struttura. Sarà scopo del lavoro di tesi quello di concentrarsi, se necessario, su un più accurato studio ed una più accurata comprensione dei blocchi deformabili.

Nelle immagini che seguono sono riportate la tipologia e le caratteristiche geometriche dei blocchi utilizzati nei tre modelli in esame.

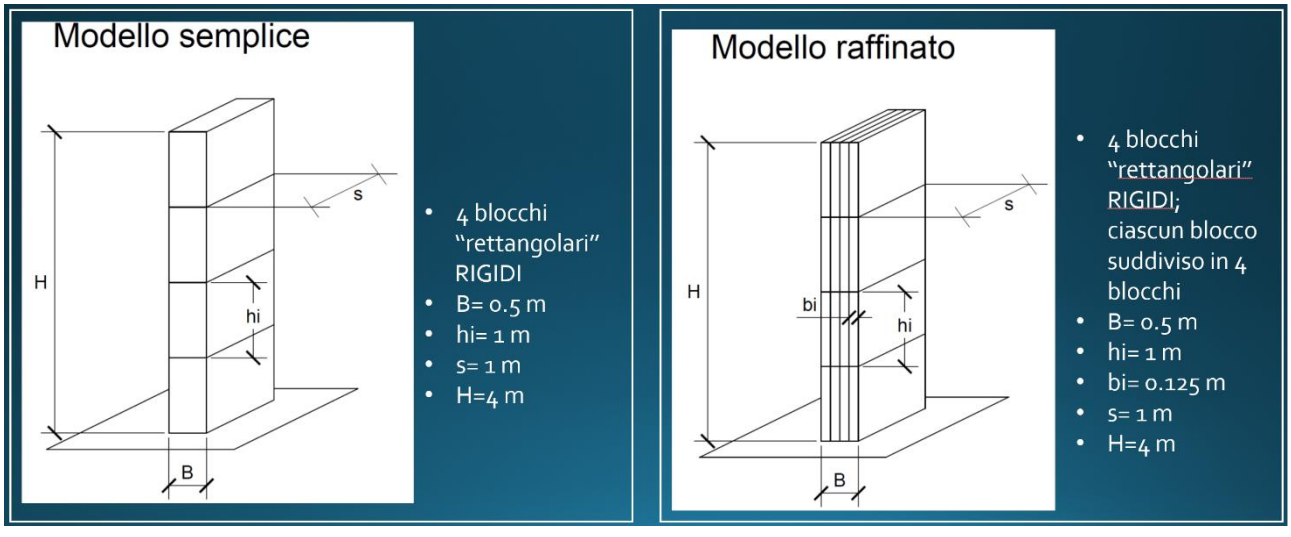


Fig.10: Tipologia e caratteristiche geometriche dei blocchi modelli "semplice" e "raffinato"

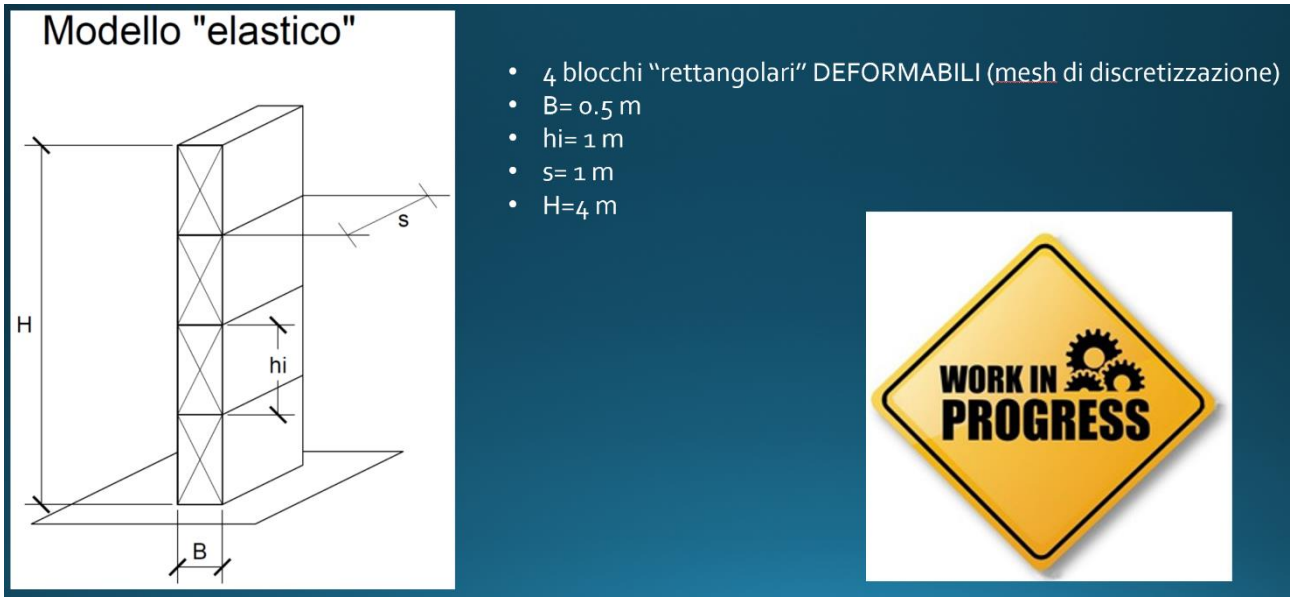


Fig.11: Tipologia e caratteristiche geometriche dei blocchi modello "elastico"

Si prosegue quindi con la parte relativa alla calibrazione dei modelli "semplice" e "raffinato", con particolare attenzione al calcolo della rigidezza da assegnare ai giunti, punto nevralgico per una corretta implementazione.

Prima di addentrarsi però nel discorso relativo alle caratteristiche di rigidezza è opportuno riportare e ribadire alcune caratteristiche generali cui si è fatto ricorso nello studio dei due modelli, ossia:

- Sistema delle unità di misura
- Tipologia dei blocchi
- Tipologia dei giunti

Il sistema di unità di misura adottato è quello internazionale, nello specifico quello che prevede l'utilizzo del metro [m] per le lunghezze, del chilogrammo [kg] per le masse, del secondo [s] per il tempo e del Pascal [Pa] per le forze per unità di superficie.

Per quanto concerne il secondo punto, come già detto in precedenza, si è fatto ricorso ai blocchi rigidi; a seguito di questa scelta, l'unica caratteristica del materiale costituente il blocco che il software chiede di assegnare è la densità ρ [kg/m^3] del materiale stesso.

Relativamente ai giunti si è deciso di utilizzare la tipologia "joint area contact-Coulomb slip", per i quali vale appunto il ben noto criterio di resistenza di Mohr Coulmb. Le caratteristiche di rigidezza e i parametri di resistenza del giunto che il software richiede di immettere sono:

- Jkn: rigidezza Normale [Pa/m]
- Jks: rigidezza a taglio [Pa/m]
- Jfrict: Angolo d'attrito [°]
- Jcoh: coesione [Pa]
- Jtens: resitenza a trazione [Pa]

La legge costitutiva utilizzata per i giunti è quella illustrata in fig.12, per cui si ha un comportamento infinitamente elastico a compressione e assenza di resistenza a trazione in direzione normale al giunto e comportamento elastico-perfettamente plastico in direzione tangenziale [UDEC manual – Constitutive models]

Fig.12: Relazioni costitutive dei giunti

Come accennato in precedenza, particolare attenzione è stata posta nel corretto calcolo della rigidezza dei giunti. Il software richiede di inserire i valori di rigidezza normale "jkn" e tangenziale "jks" in [Pa/m], il che equivale all'inserimento di un valore di densità di rigidezza. Nelle immagini che seguono viene chiaramente riassunto l'iter che ha portato al ricavo della corretta espressione per il calcolo di tale grandezza.

In fig.13 sono riportate le note espressioni che si utilizzano per il calcolo della rigidezza normale e di quella a taglio di una trave, riadattate per i blocchi costituenti i nostri modelli

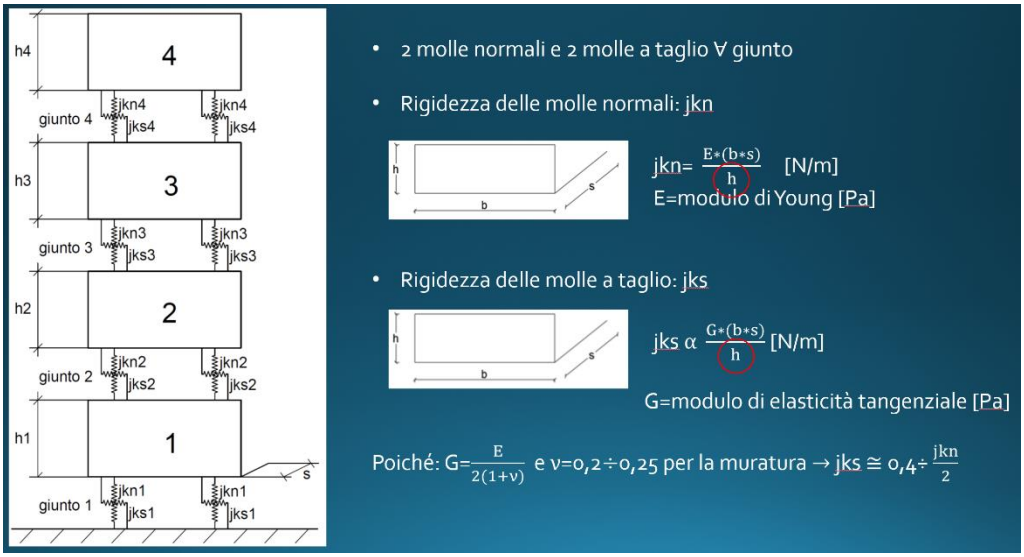


Fig.13: Espressioni "classiche" della rigidezza normale e a taglio

Caso di studio è stato capire quale fosse il valore di "h" di competenza di ciascuna interfaccia; tale dubbio viene risolto dalla fig.14 in cui, per ogni posizione del giunto all'interno della struttura, viene riportato il corretto valore di "h" da utilizzare.

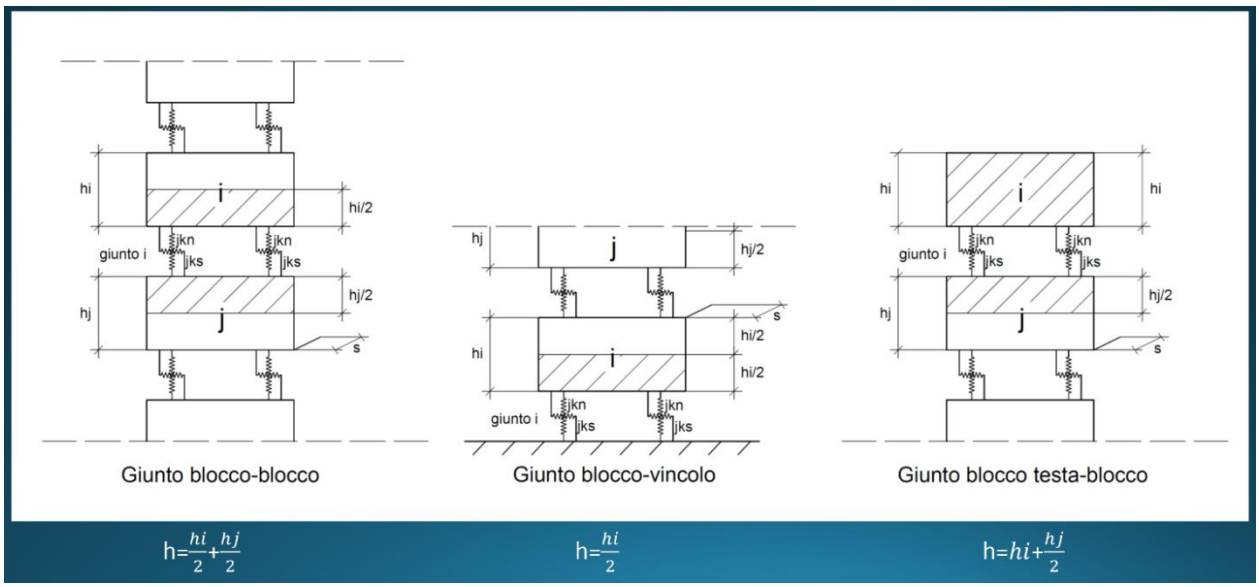


Fig.14: Atezza di competenza del giunto in base alla posizione dello stesso

Ciò che infine è stato dedotto è che, operativamente, l'espressione per il calcolo della rigidezza normale da utilizzare (e similmente quella per la rigidezza tangenziale a meno del fattore 0.4-0.5) è quella per cui il valore di "h" da utilizzare per ciascun giunto è relativo all'altezza del blocco sovrastante, come illustrato chiaramente in fig.15.

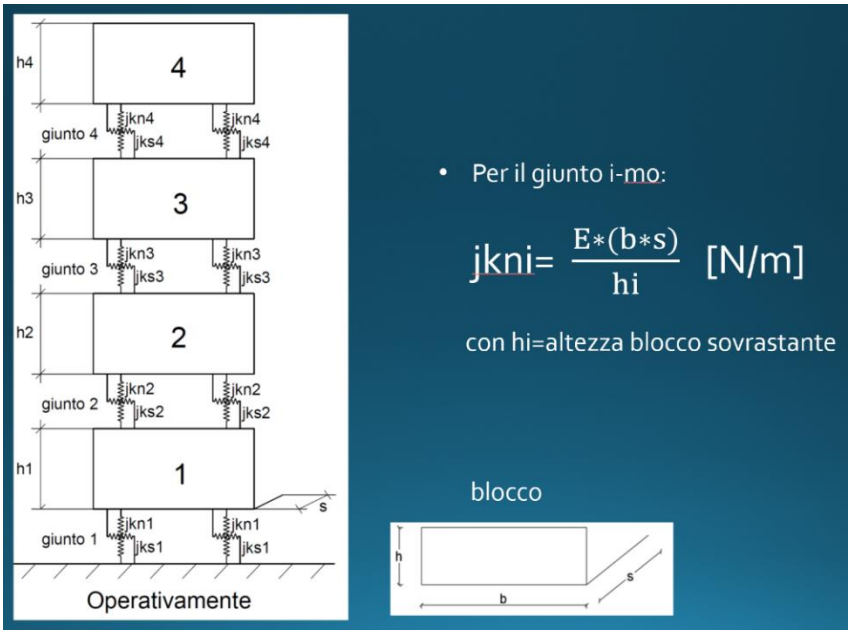


Fig.15: espressione di jkn per il giunto i-mo

A seguito di diverse prove (a compressione) si è riusciti a ricavare l'espressione della densità di rigidezza da inserire nel software, riportata in fig.16

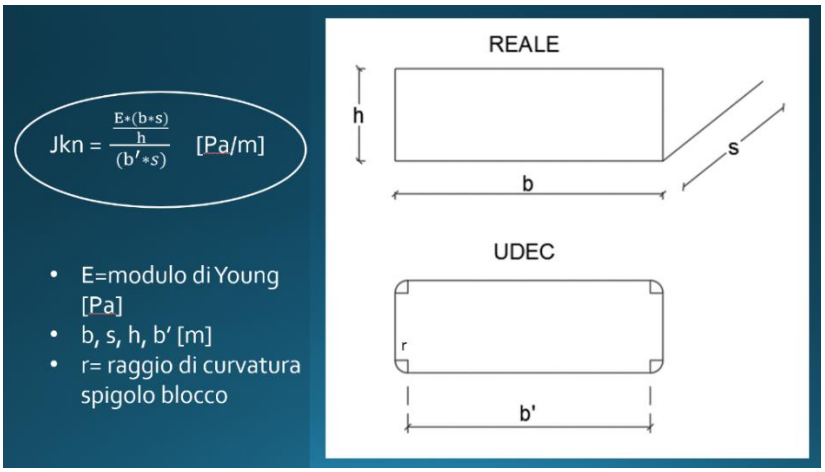


Fig.16: espressione di jkn per il giunto i-mo, da inserire in UDEC

4.2 Validazione dei modelli in campo elastico lineare

Una volta calibrati i vari modelli si è andati a validarne il comportamento in campo elastico lineare, andando ad effettuare una prova di compressione ("Push-down") sul modello "semplice" ed una prova di carico orizzontale sul modello "raffinato" e confrontando i risultati con quelli relativi ad una trave sottoposta alle medesime condizioni di carico.

Per quanto riguarda la prova di **Push-down** sul modello semplice vengono riportate nelle immagini che seguono le caratteristiche della struttura a blocchi implementata in UDEC e quelle della trave

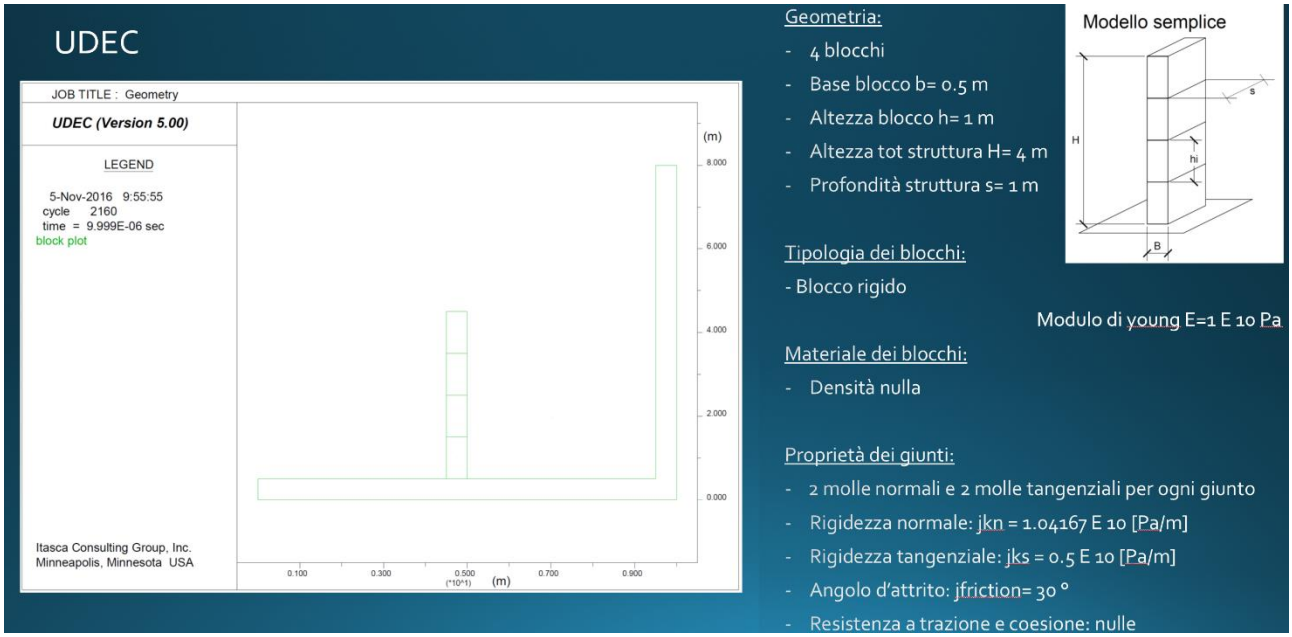


Fig.17: Prova di Push-Down: caratteristiche della struttura a blocchi

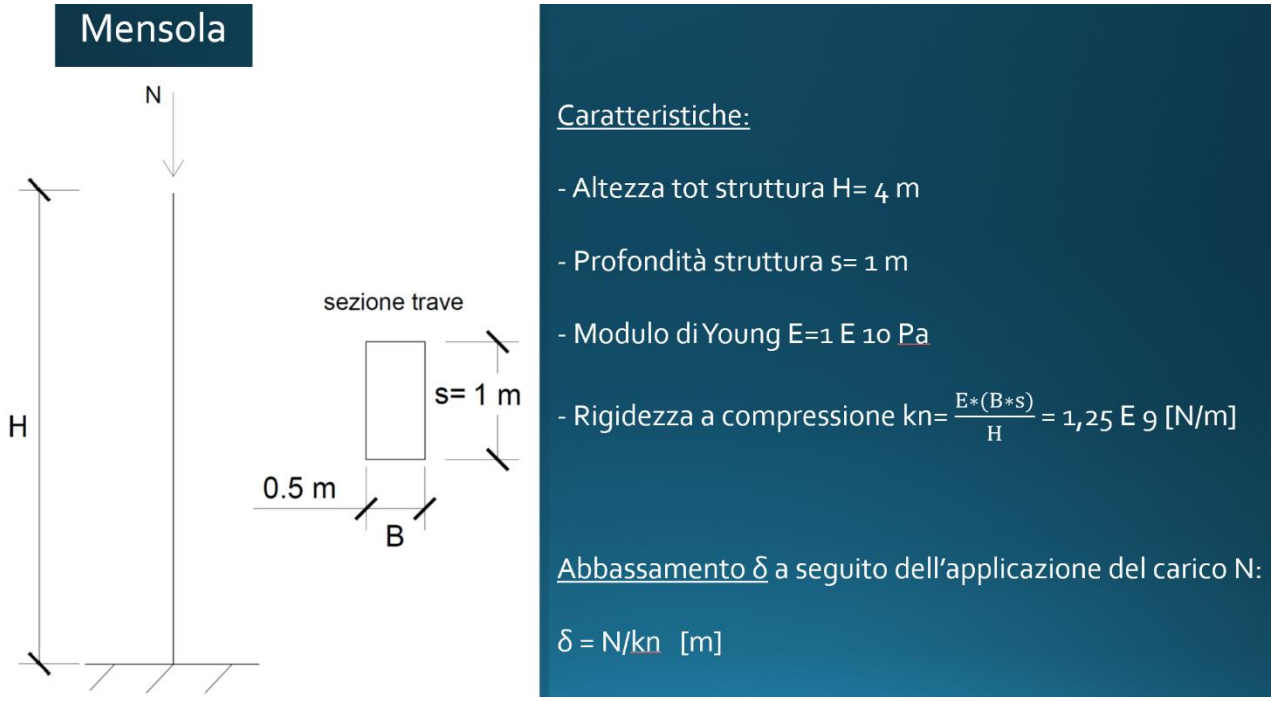


Fig.18: Prova di Push-Down: caratteristiche della trave a mensola

La prova è consistita nell'applicazione di una variazione di carico verticale ΔF=100 N in sommità alla struttura, fino al raggiungimento di una forza massima pari a 1000 N, andando a registrare gli abbassamenti del punto sommitale della struttura ad ogni step. Gli output dell'analisi sono riassunti nelle seguenti figure dalle quali è possibile evincere come i risultati relativi alla prova di carico verticale sulla struttura a blocchi coincidano perfettamente con quelli relativi alla trave a mensola, il che va a validare appieno l'espressione della densità di rigidezza verticale poc'anzi riportata (e di conseguenza anche l'espressione della densità di rigidezza a taglio).

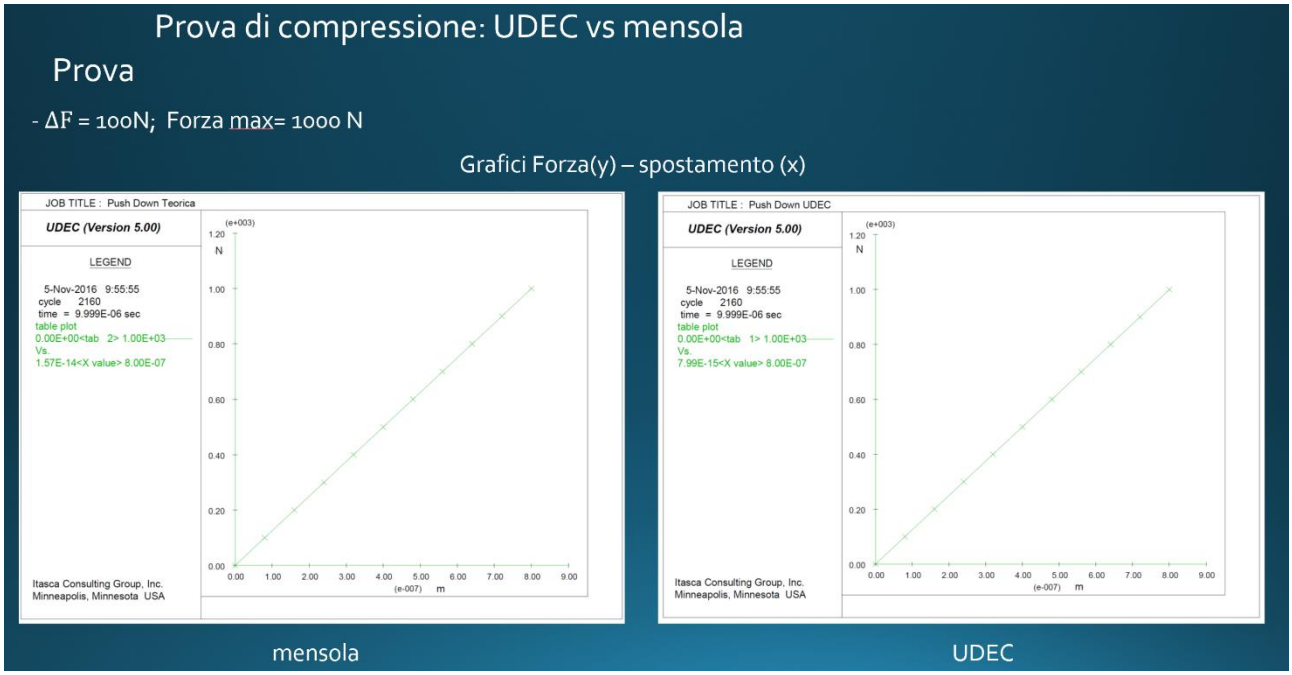


Fig.19: Prova di Push-Down: curve Forza-spostamento mensola (sx) e struttura a blocchi (dx)

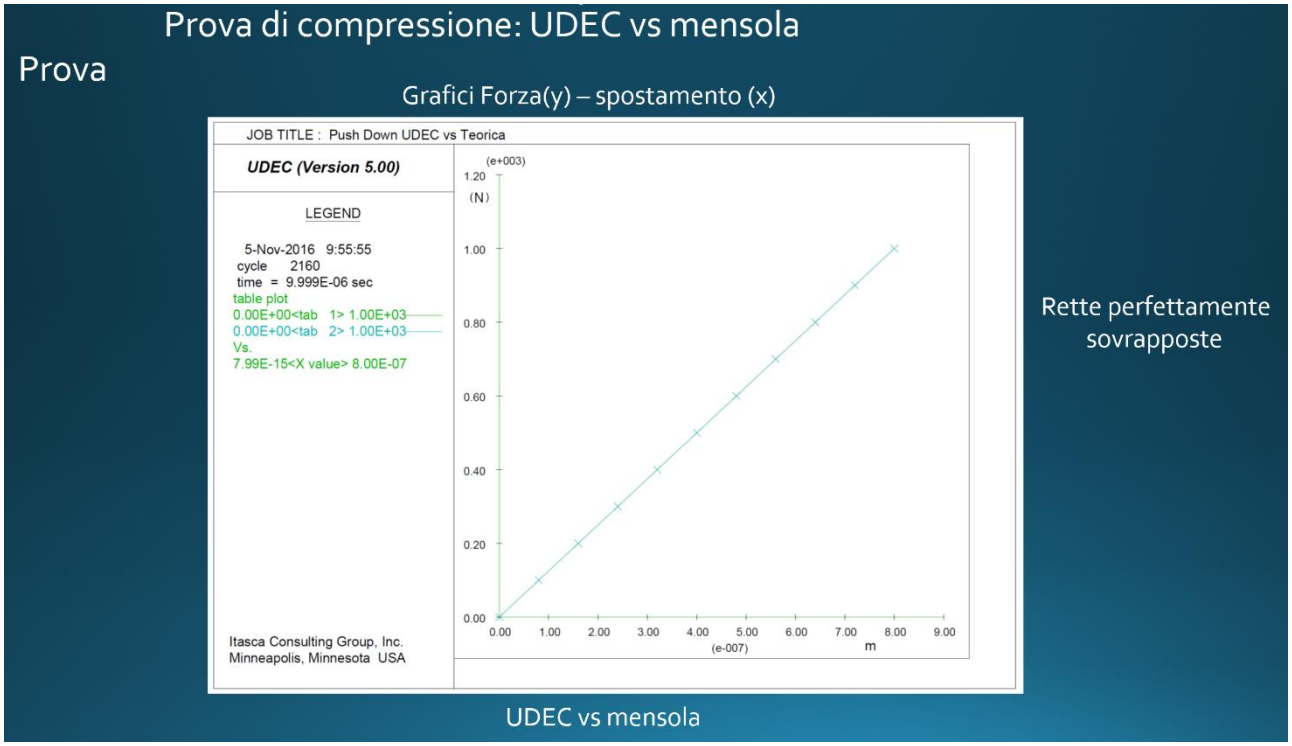


Fig.20: Prova di Push-Down: curve Forza-spostamento mensola (celeste) vs struttura a blocchi (verde)

Passando alla **prova di carico orizzontale**, si è deciso di effettuarla sul modello "raffinato" in quanto è quello che meglio simula il comportamento flessionale di una trave a mensola.

La prova è stata effettuata mantenendo costante il carico verticale (pari al peso proprio della struttura) ed aumentando incrementalmente il carico orizzontale di 4 N, fino al raggiungimento di una forza F pari a 400 N.

Nelle immagini che seguono sono riportate tutte le specifiche ed i risultati relativi alla prova.

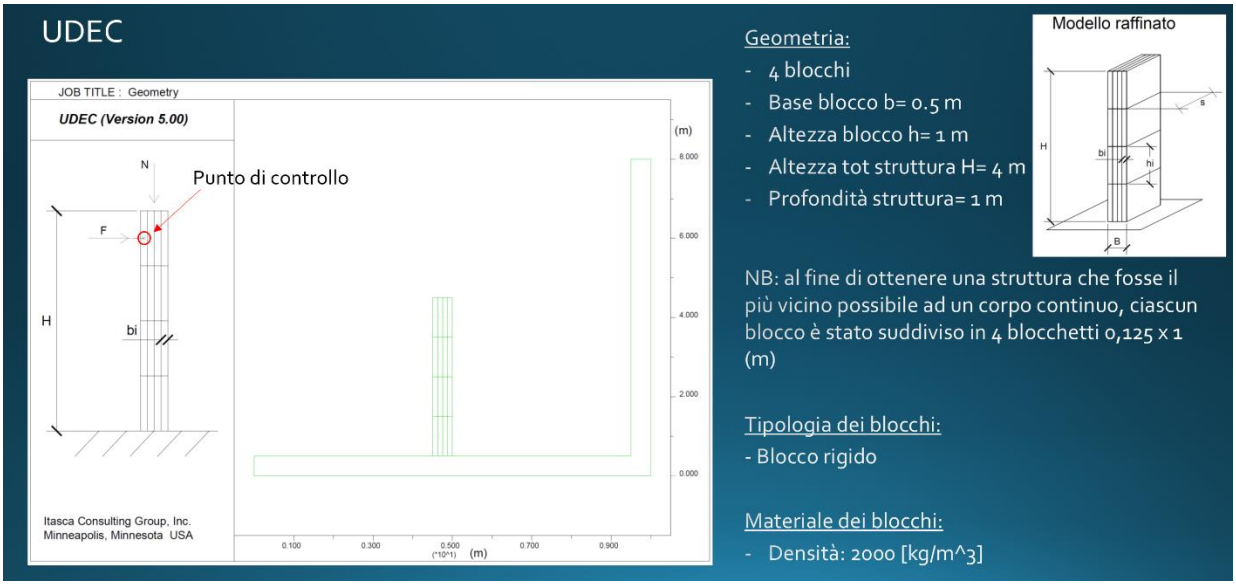


Fig.21: Prova di carico orizzontale: caratteristiche della struttura a blocchi

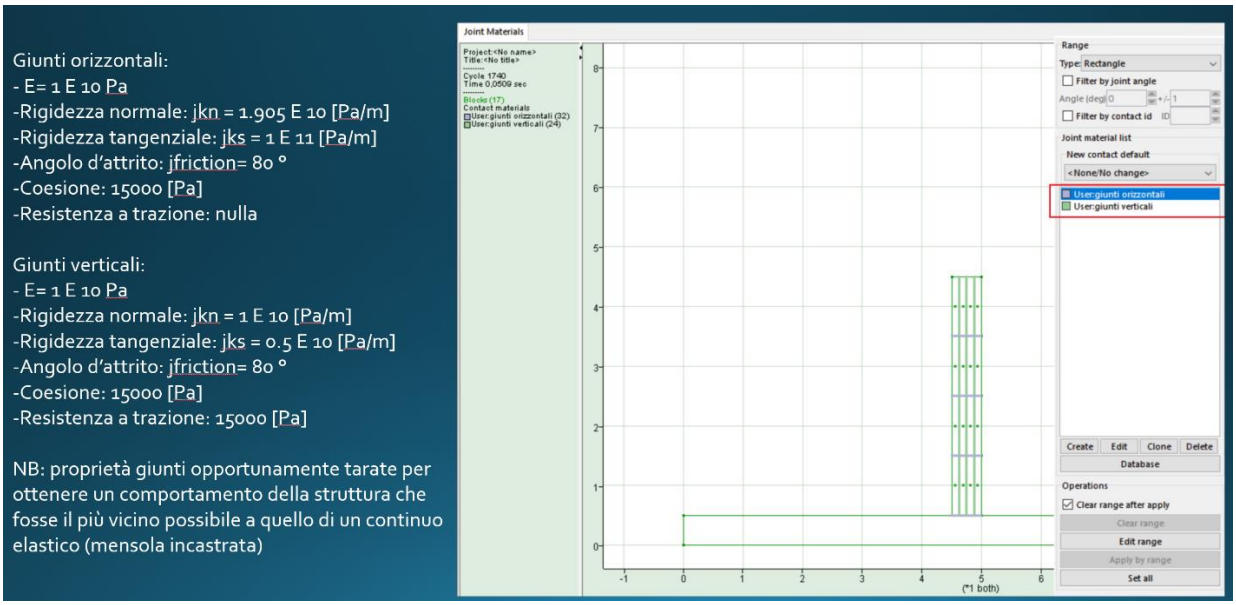


Fig.22 : Prova di carico orizzontale: caratteristiche della struttura a blocchi

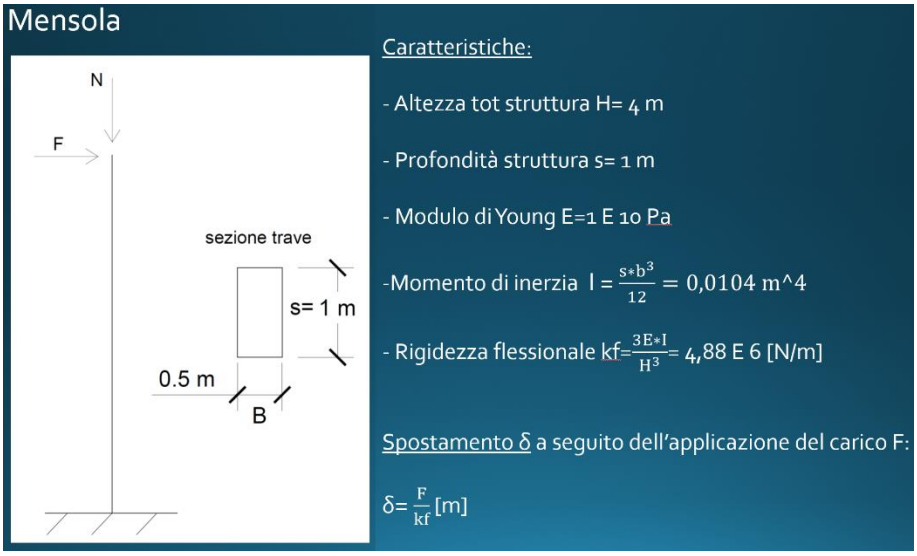


Fig.23: Prova di carico orizzontale: caratteristiche della trave a mensola

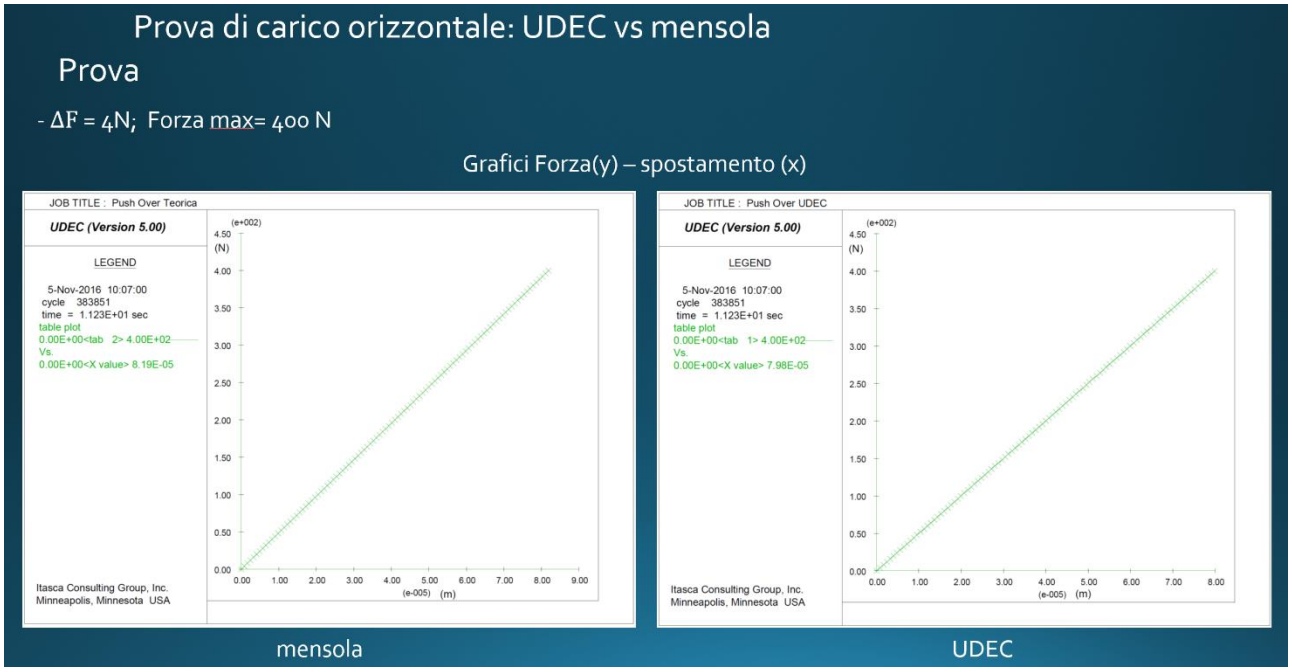


Fig.24: Prova di carico orizzontale: curve Forza-spostamento mensola (sx) e struttura a blocchi (dx)

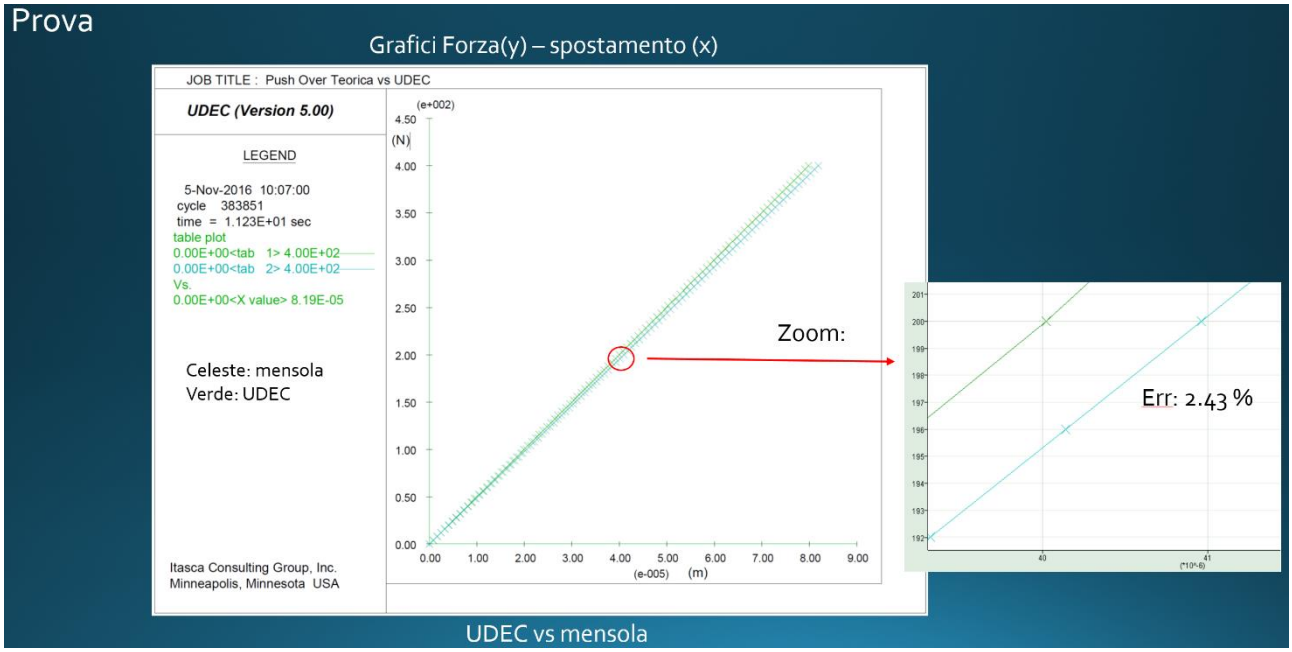


Fig.25: Prova di carico orizzontale: curve Forza-spostamento mensola (celeste) vs struttura a blocchi (verde)

Dalla fig.25 è possibile notare come il comportamento flessionale in campo lineare della struttura a blocchi nel modello "raffinato" non è tanto dissimile da quello di un continuo elastico come la trave a mensola, il che continua ad affermare una corretta calibrazione delle caratteristiche dei modelli precedentemente descritti.

4.3 Push-over di prima implementazione a controllo di forze

4.3.1 Il programma

Piuttosto che riportare tutti i file di testo con le istruzioni relative alla procedura si è reputato più opportuno illustrare un più chiaro e intuitivo diagramma a blocchi che descrive in maniera sintetica i passaggi logici e la struttura del programma.

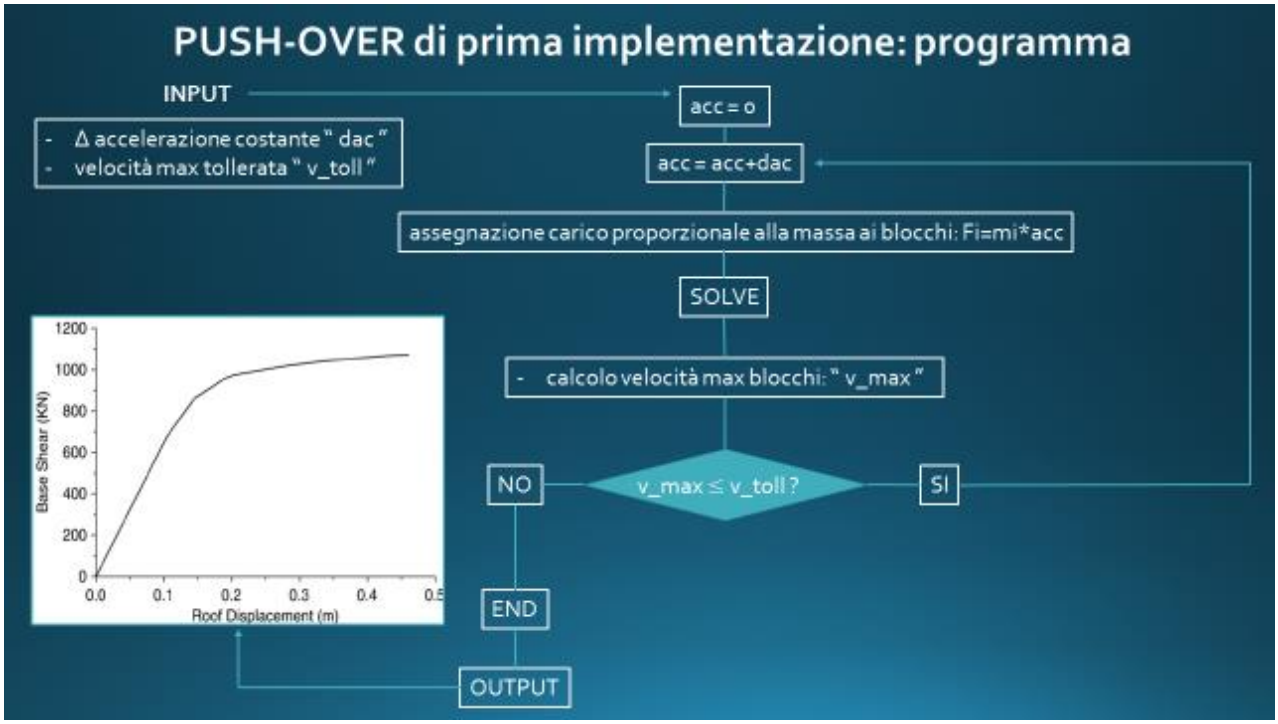


Fig.26: PUSH-OVER di prima implementazione: programma

Dopo aver risolto la struttura sotto l'azione dei soli carichi gravitazionali il programma inizia a tracciare la curva di capacità della struttura assegnando, ad ogni blocco, carichi orizzontali proporzionali alla massa (*Fi*).

L'analisi procede per incrementi di accelerazione costanti (*dac*), ad ogni step, dopo aver raggiunto la configurazione di equilibrio mediante il *SOLVE* del programma, viene letta la massima tra le velocità di tutti i blocchi (*v_max)* se questa risulta essere minore di una velocità massima tollerata definita dall'utente (*v_toll*) allora si procederà ad incrementare ulteriormente l'accelerazione per giungere allo step successivo, altrimenti il loop di applicazione delle forze si arresterà e restituirà in output la curva di push-over con i punti di equilibrio trovati sino a quell'istante.

La velocità massima tollerata (*v_toll*) deve essere opportunamente definita dall'utente, la figura che segue ne chiarifica il significato.

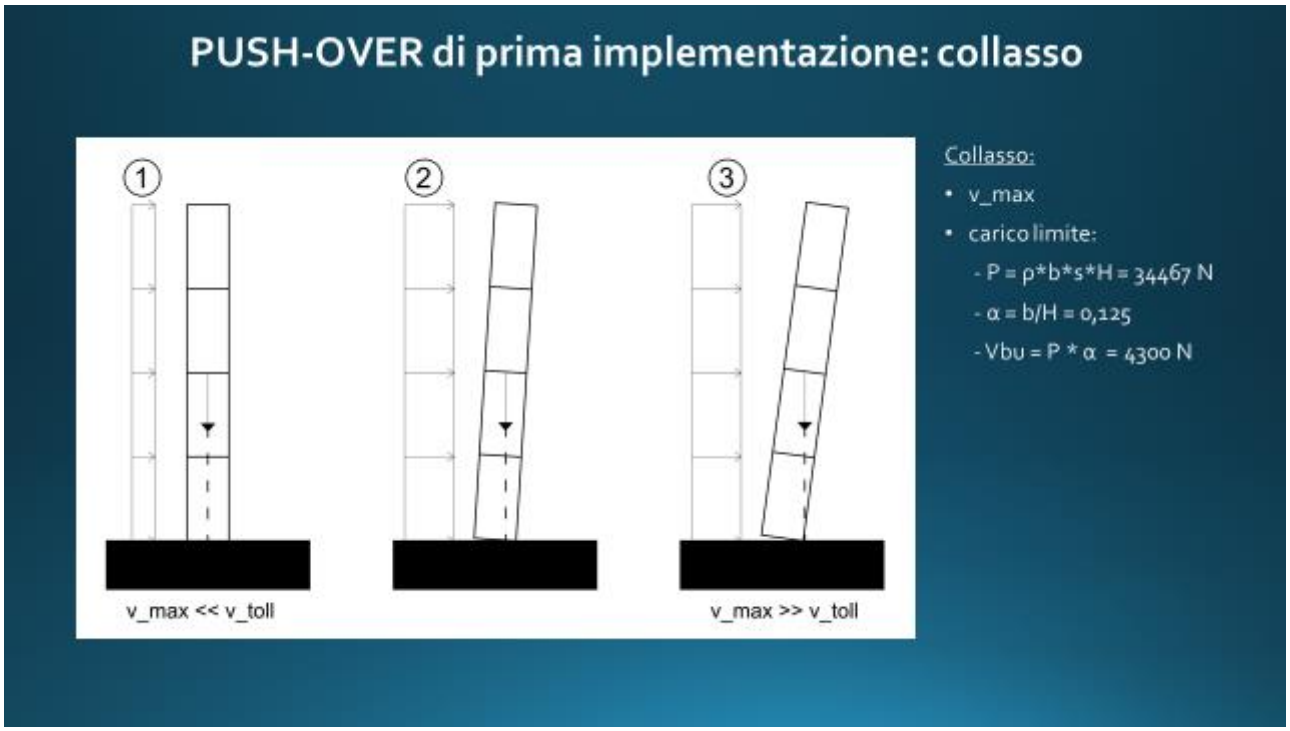


Fig.27: PUSH-OVER di prima implementazione: collasso

La velocità massima tollerata è quella che si registra nel momento in cui la struttura, anche rimuovendo i carichi esterni applicati, non risulta più essere in equilibrio; ossia è quella velocità massima registrata nella configurazione in cui la verticale passante per il baricentro dell'intera struttura cade al di fuori del punto di rotazione della stessa (spigolo in basso a destra, vedi figura).

Conoscere il valore di questa velocità prima di eseguire l'analisi è molto difficile, dunque questa procedura di prima implementazione presuppone che venga lanciato il programma una prima volta per monitorare i valori di velocità e ricercare quello massimo per il quale non si è più in una configurazione di equilibrio stabile; quanto descritto rappresenta sicuramente un grosso limite che rende la procedura non automatica e non universale

4.3.2 I risultati

Nelle figure seguenti vengono riportati i risultati ottenuti con la procedura sopra descritta, applicata sul modello semplice (4 blocchi) e su quello raffinato (con una maggiore discretizzazione), è presente anche un confronto grafico con i risultati ottenuti mediante il software agli elementi finiti HISTRA.

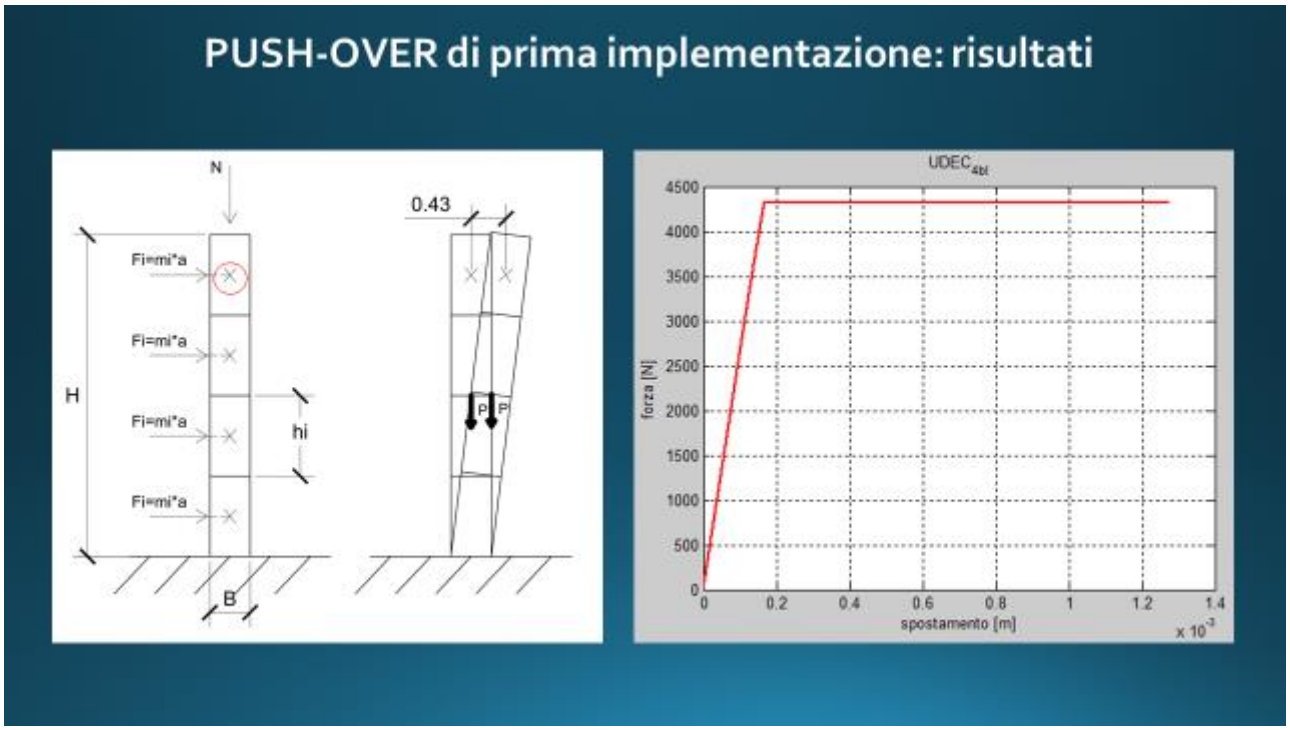


Fig.28: PUSH-OVER di prima implementazione: risultati

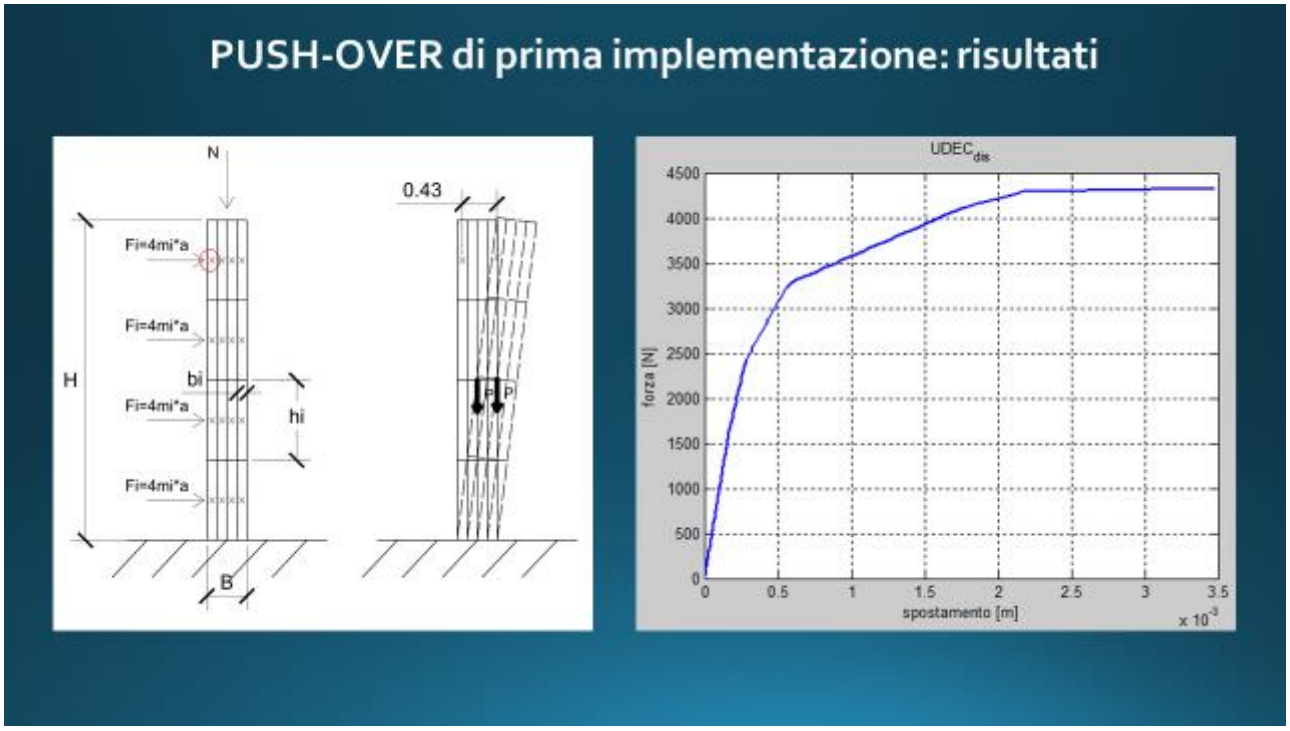


Fig.29: PUSH-OVER di prima implementazione: risultati

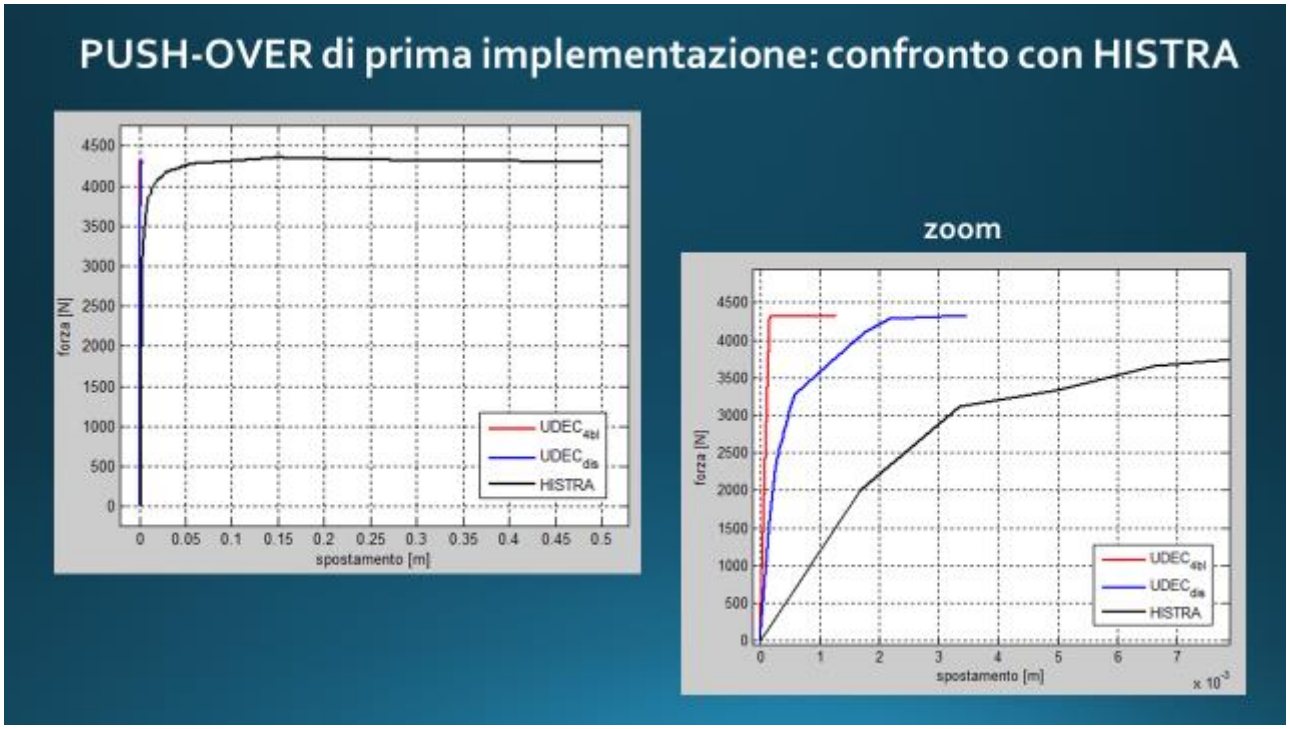


Fig.30: PUSH-OVER di prima implementazione: confronto con HISTRA

Come si può notare dall'ultimo grafico la procedura implementata in UDEC fornisce valori attendibili per quanto riguarda il valore di carico ultimo (4400 N), confermato anche dai risultati in HISTRA; totalmente in disaccordo è invece lo spostamento ultimo registrato dalla struttura (UDEC 3mm HISTRA 50mm).

La sensibilità della struttura al numero dei contatti su ogni giunto è testimoniata dalla minore rigidezza del modello discretizzato, molto meno rigido di quello semplice, ma sempre più rigido del modello in HISTRA che possiede un numero di contatti nettamente maggiore ad entrambi i modelli implementati in UDEC.

Si può ragionevolmente concludere che, discretizzando ulteriormente la struttura, con il software agli elementi distinti si potranno ottenere risultati comparabili con quelli forniti da HISTRA anche in termini di rigidezza.

Analizzando i risultati forniti dalla procedura è possibile verificare come questa sia molto attendibile per valori di carico bassi (ramo iniziale della curva di push-over) e poco accurata in prossimità del carico di collasso e dello spostamento ultimo.

In particolare il grafico seguente mostra come, se si procede per incrementi di accelerazione costanti, il programma raggiunga la condizione di equilibrio in un numero di cicli di calcolo sempre maggiore.

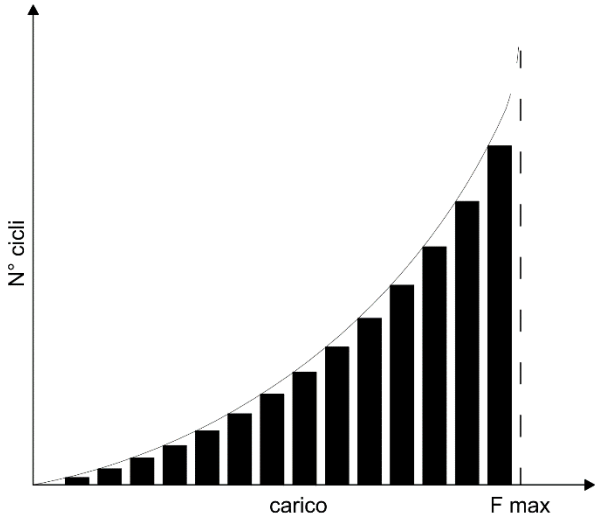


Fig.31: Cili necessari per raggiungere l'equilibrio al variare del carico orizzontale

In corrispondenza del valore di *F_max* si ha un asintoto in quanto non è più possibile raggiungere alcuna condizione di equilibrio.

Da quanto detto si evince che un miglioramento necessario, che consentirebbe di determinare in maniera molto più accurata la condizione di equilibrio ultima (in termini sia di carico limite che di spostamento ultimo), è sicuramente rappresentato dall'utilizzo di incrementi di accelerazioni variabili; nella fattispecie più ci si avvicina al carico ultimo più gli incrementi di accelerazione dovrebbero diminuire.

4.4 Push-over automatica a controllo di forze

In questo paragrafo verrà descritta la procedura di push-over successiva a quella di prima implementazione, molto simile a quest'ultima ma con alcuni utili miglioramenti.

4.4.1 Il programma

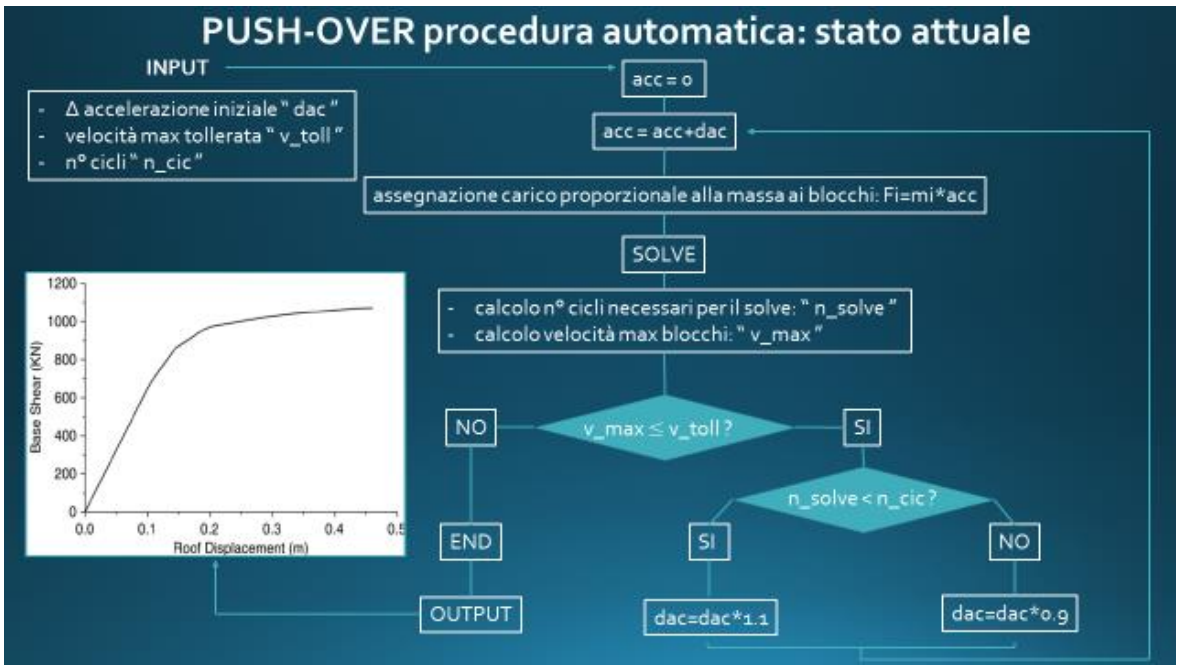


Fig.32: PUSH-OVER procedura automatica: stato attuale

Il corpo del programma è sostanzialmente identico a quello descritto al punto 4.3.1, l'unica differenza consiste nell'utilizzo di una ulteriore variabile di input *n_cic:* il numero di cicli ottimale in cui l'utente vuole raggiungere la condizione di equilibrio.

Dopo aver fatto il check relativo al valore massimo della velocità tollerata (determinato esattamente come descritto al punto 4.3.1) viene registrato anche il numero di cicli impiegato per raggiungere la condizione di equilibrio (*n_solve*), se questo è maggiore al valore di *n_cic* allora il valore dell'incremento di accelerazione (*dac*) da utilizzare per lo step successivo sarà pari al precedente moltiplicato per 0.9, altrimenti, se *n_solve* < *n_cic* allora il valore del *dac* da utilizzare per lo step successivo sarà pari a quello precedente moltiplicato per 1.1.

In questo modo l'analisi procede in maniera automatica incrementando o decrementando il valore della variabile *dac* in maniera tale che la condizione di equilibrio venga raggiunta in un numero di cicli molto vicino al valore *n_cic* immesso dall'utente; l'utilità di questa modifica è apprezzabile soprattutto in prossimità del carico ultimo dove UDEC "fa fatica" a raggiungere la condizione di equilibrio, necessita

di un elevato numero di cicli, di conseguenza diminuirà il valore del *dac* e la condizione di equilibrio ultimo verrà determinata con elevata accuratezza.

4.4.2 I risultati

Nelle figure seguenti vengono riportati i risultati ottenuti con la procedura sopra descritta, applicata sul modello semplice (4 blocchi) e su quello raffinato (con una maggiore discretizzazione), è presente anche un confronto grafico con i risultati ottenuti mediante il software agli elementi finiti HISTRA.

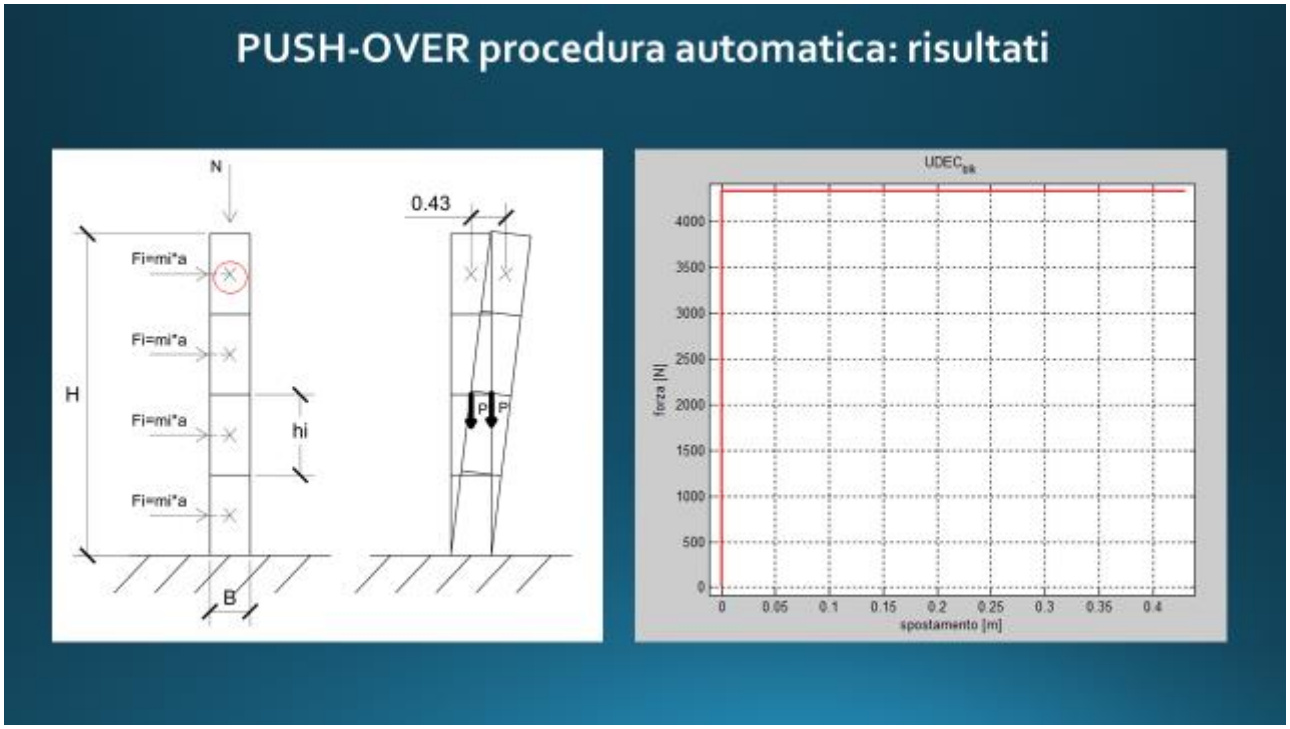


Fig.33: PUSH-OVER procedura automatica: risultati

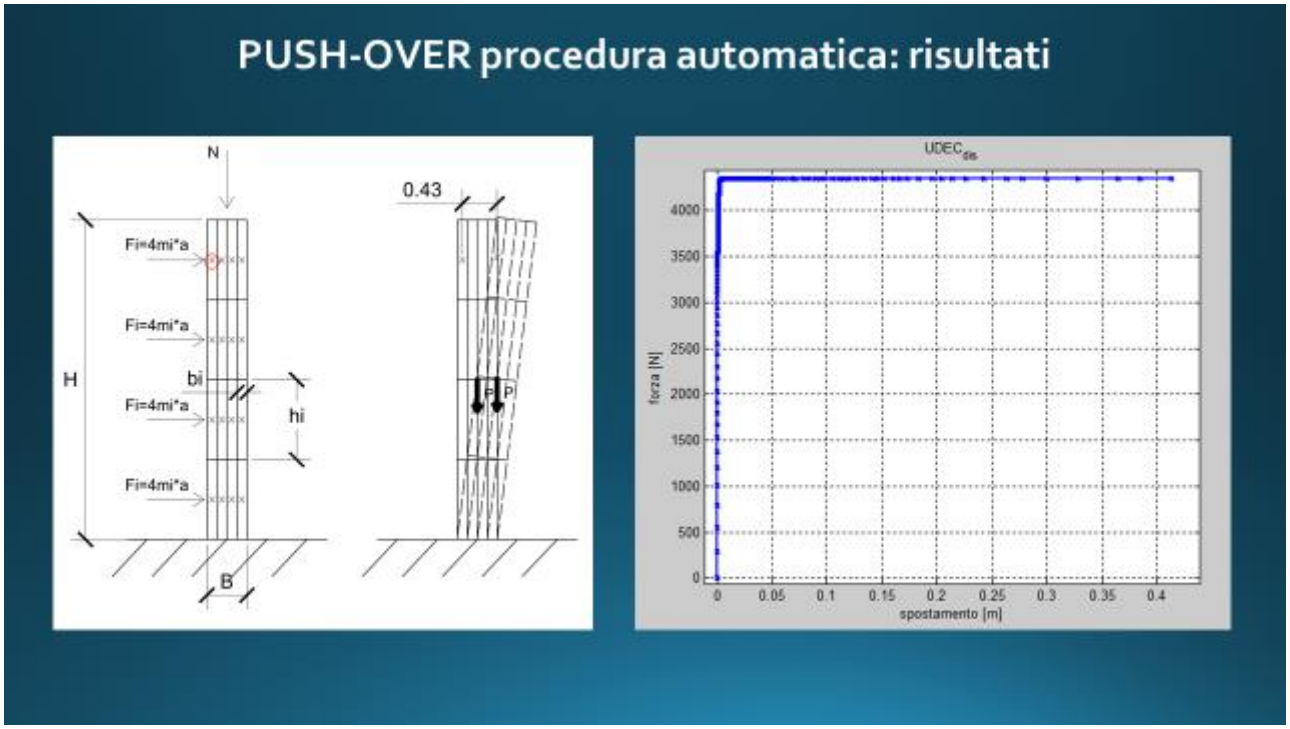


Fig.34: PUSH-OVER procedura automatica: risultati

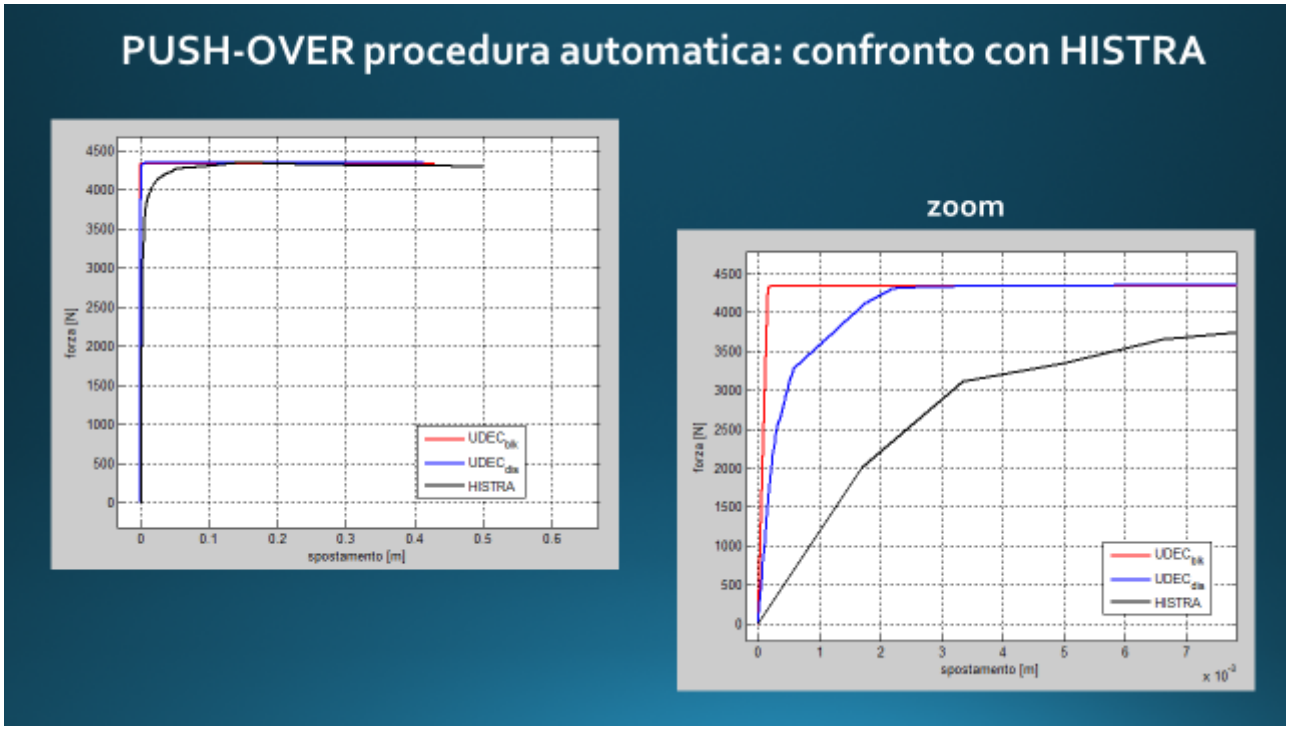


Fig.35: PUSH-OVER procedura automatica: confronto con HISTRA

Osservando gli ultimi grafici presentati è possibile notare come i miglioramenti apportati alla procedura di prima implementazione consentano di determinare con maggiore accuratezza la condizione ultima di collasso, sia in termini di carico limite che in termini di spostamento ultimo (UDEC 43cm HISTRA 50cm).

Le considerazioni riguardanti la rigidezza dei vari modelli restano esattamente le stesse esposte nel paragrafo 4.3.2.

Anche la procedura di push-over automatica presenta alcuni limiti sui quali lavorare per raggiungere la completa automatizzazione e universalità:

- La difficoltà nella determinazione del valore da attribuire alla variabile *v_toll* già descritta nel paragrafo 4.3.1.
- La difficoltà nella determinazione del valore da attribuire alla variabile *n_cic;* anche questo parametro è ignoto all'utente, prima di lanciare l'analisi non si conosce quale sia il numero ottimale di cicli per raggiungere la condizione di equilibrio; dunque è necessaria una prima analisi degli output del programma per determinarne il valore corretto.

  Se si assegna un valore a *n_cic* troppo alto l'analisi procede molto rapidamente ma si rischia raggiungere la condizione di equilibrio ultimo con un pessimo livello di accuratezza, al contrario, se si assegna un valore a *n_cic* troppo basso, l'analisi sarà molto accurata, ma procederà molto lentamente.

4.5 Push-Over a controllo di spostamento

Oltre alle analisi di Push-Over condotte a controllo di forza, in cui si va ad applicare una sollecitazione esterna alla struttura in termini di forza e si registra lo spostamento orizzontale di un punto di controllo appartenente alla struttura stessa, si sono sviluppate delle semplici procedure atte a riprodurre analisi di Push-Over a "controllo di spostamento". In questa seconda tipologia d'analisi la "sollecitazione esterna" applicata alla struttura non è più un carico, bensì uno spostamento imposto ad uno o più punti della struttura (a seconda di come questa è composta ed articolata) e quello che si va a registrare è, ad esempio, il valore del taglio alla base della struttura che insorge a seguito dell'imposizione di tale valore di spostamento.

In particolare, nel periodo di tirocinio, ci si è limitati ad implementare una procedura di Push-Over a controllo di spostamento per la stima della duttilità ultima di un blocco di muratura avente una base pari a 0,5 m ed un'altezza pari a 3 m ed ad applicare poi tale procedura su strutture lievemente più articolate come il "modello semplice" a quattro blocchi di cui si è ampiamente discusso nelle pagine precedenti.

Senza entrare troppo nel merito e nelle istruzioni della procedura, si vuole precisare che in UDEC non è possibile imporre direttamente uno spostamento; per riuscire in questo intento bisogna aggirare il problema, andando ad imporre una velocità ai blocchi tale per cui, integrando una volta, si ottenga lo spostamento desiderato.

Nelle pagine che seguono sono riportate delle immagini che illustrano il comportamento della struttura e l'output finale della procedura, ossia le curve Taglio alla base(N) – spostamento punto di controllo (m).

- Prova di Push-Over in controllo di spostamento: MONOBLOCCO

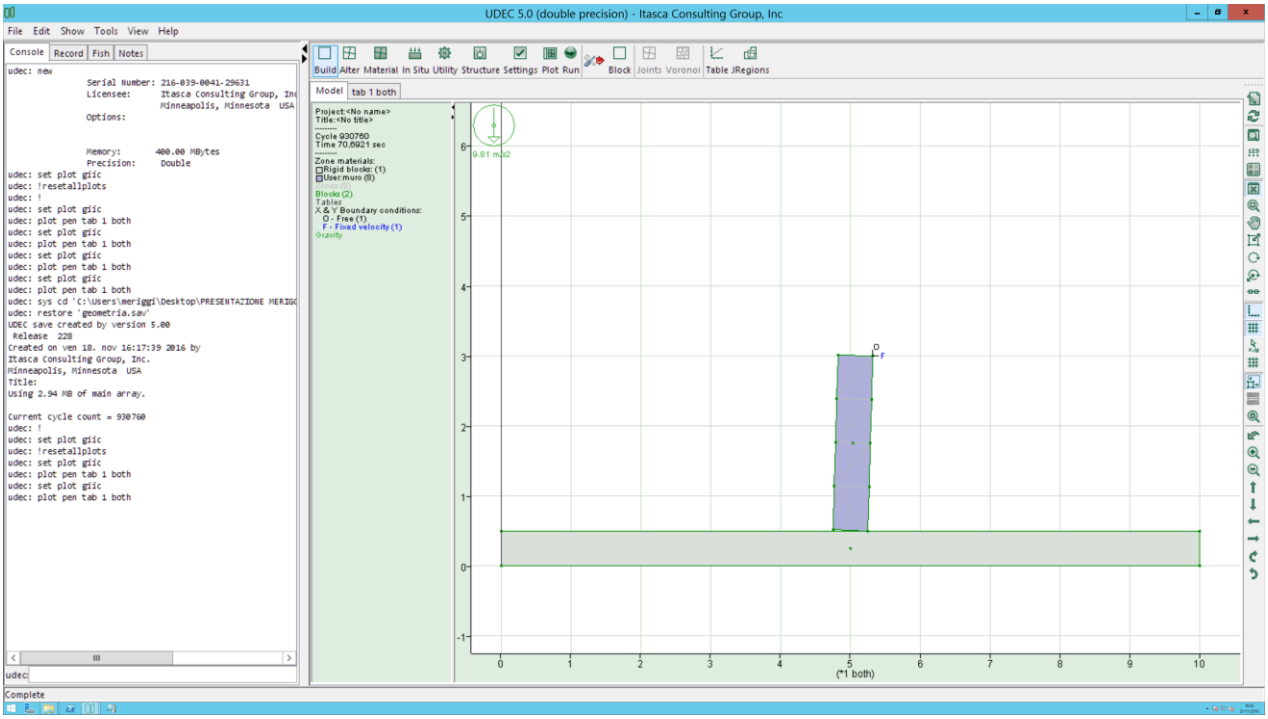


Fig.36: Geometria monoblocco e punto di applicazione della velocità (corner in alto a destra)

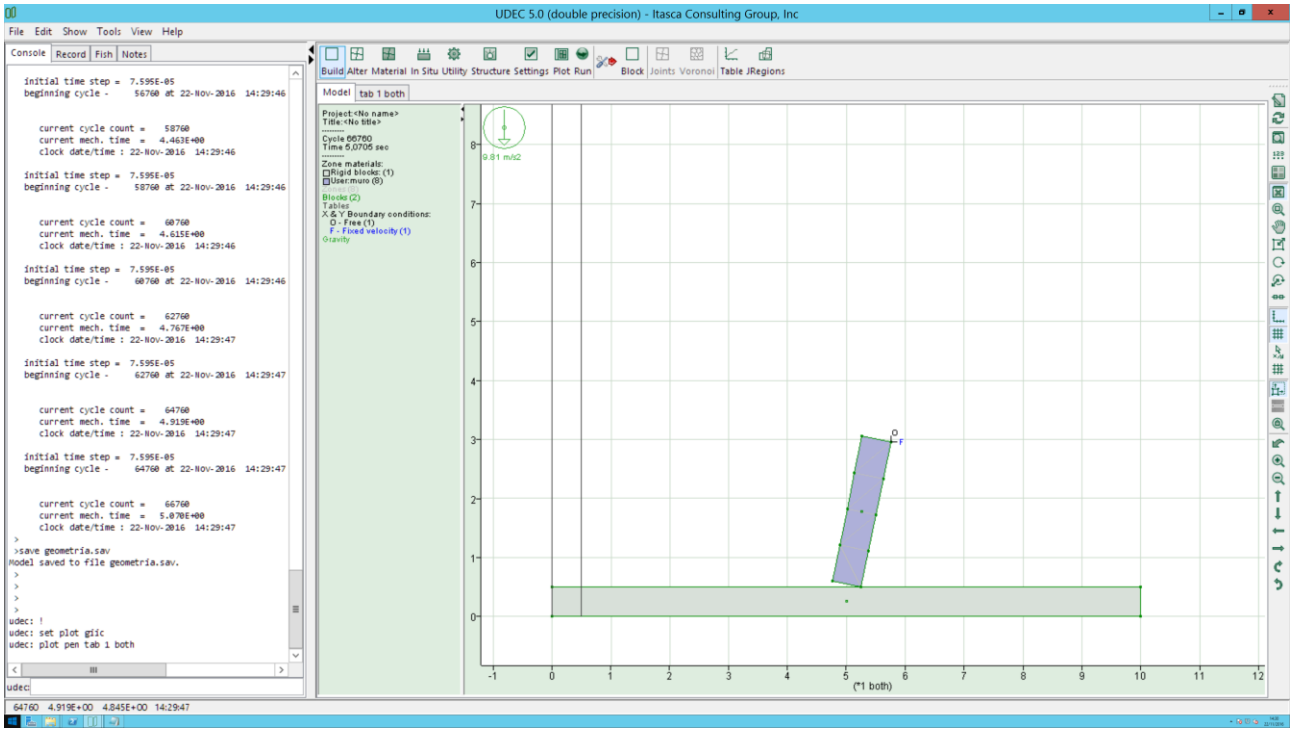


Fig.37: meccanismo di collasso del monoblocco

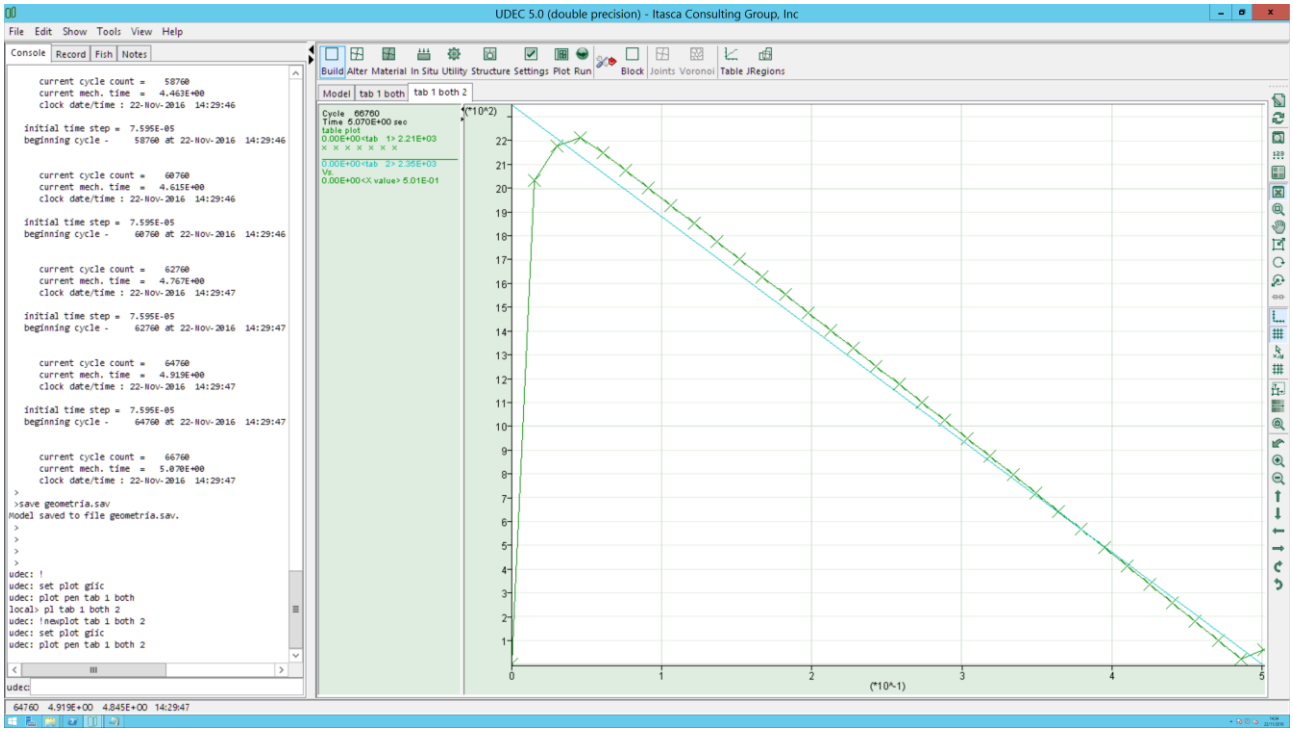


Fig.38: Curva di capacità comprensiva del ramo post-picco: in verde la curva ricevuta in output dal software e in celeste i risultati teorici di letteratura (retta che unisce il valore noto del carico ultimo e quello dello spostamento ultimo)

- Prova di Push-Over in controllo di spostamento: “modello semplice”

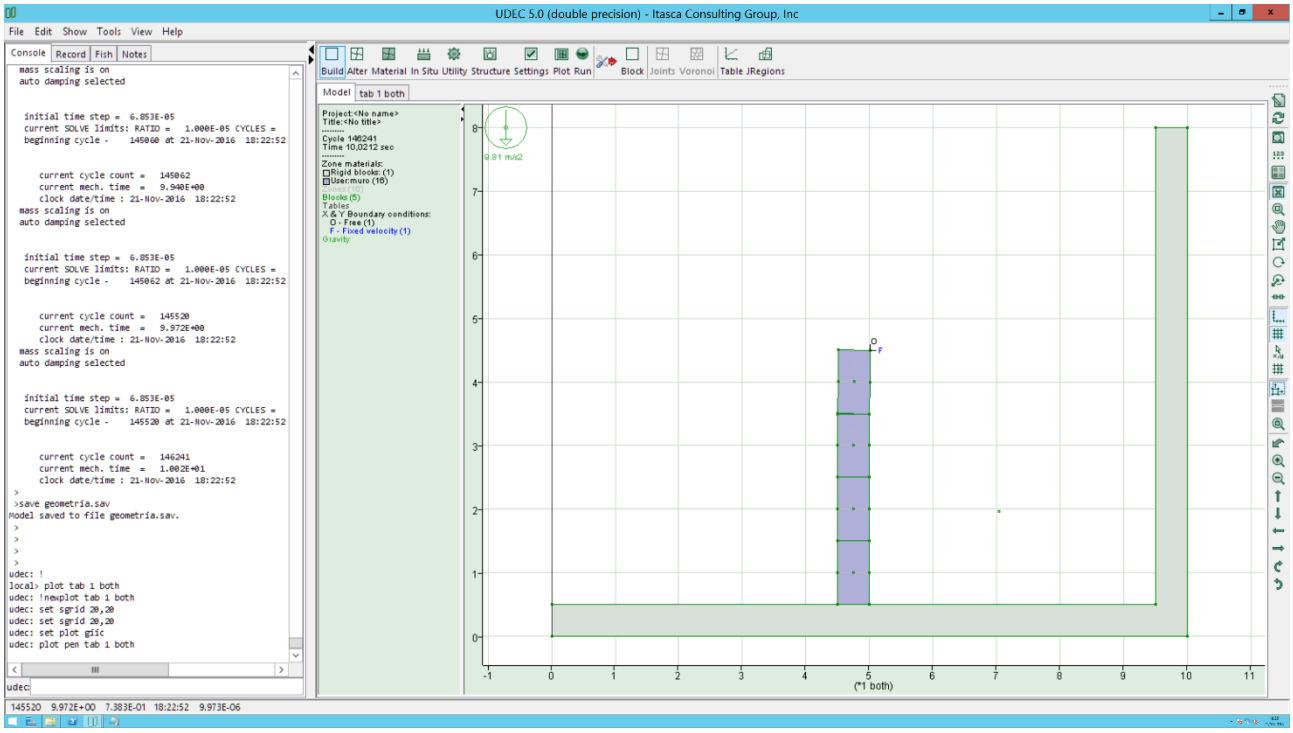


Fig.39: Geometria modello semplice e punto di applicazione della velocità (corner in alto a destra)

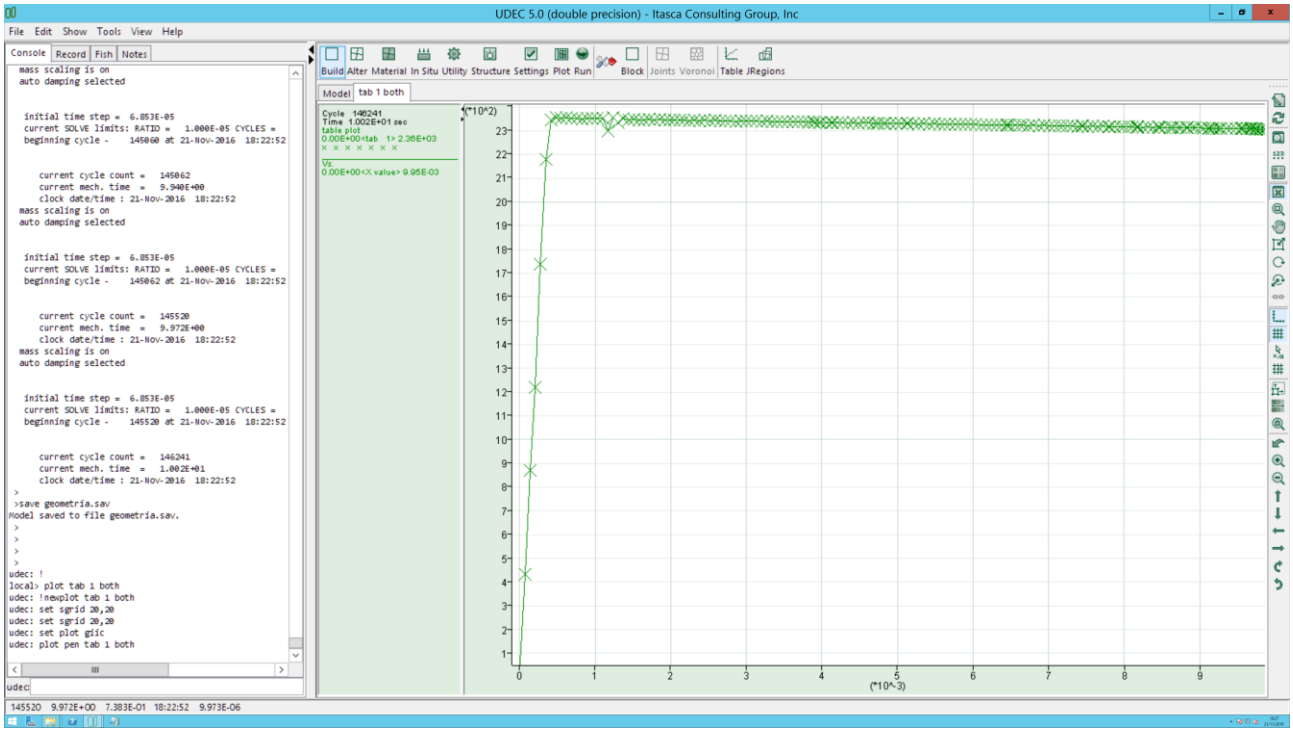


Fig.40: Stralcio della curva di capacità comprensiva del ramo post-picco

5. Conclusioni e sviluppi futuri

Al termine del periodo di tirocinio sono state acquisite buone conoscenze riguardo:

- Teoria agli elementi distinti (capitolo 2)
- Funzionamento del software UDEC (capitolo 3)

Per quanto riguarda le applicazioni descritte nel capitolo 4 va precisato che si tratta di primi esperimenti, certamente non ancora definitivi; le procedure di push-over implementate, sia a controllo di forze che a controllo di spostamento, sono ben lontane dall'ottimizzazione e dalla completa automatizzazione.

Gli obiettivi da raggiungere per completare il futuro lavoro di tesi possono essere suddivisi in due macro argomenti principali:

1) Sviluppo di una procedura di push-over (a controllo di forze o a controllo di spostamento) che sia rapida, efficiente, universale, automatica e applicabile a strutture reali, ben più complesse dei semplici modelli illustrati nel capitolo 4.
   Il comportamento di qualsiasi struttura dovrà essere indagato non soltanto fino al valore del carico ultimo (ramo ascendente della curva forza-spostamento) ma anche oltre: dovrà essere accuratamente determinato anche il ramo di softening della curva, sino al valore di spostamento ultimo.

2) Sviluppo di modelli che riproducano fedelmente il comportamento dinamico sotto carico sismico dei provini in muratura testati il 22 Dicembre 2016 presso il laboratorio di strutture del centro ricerche ENEA CASACCIA di Anguillara (RM).

Riferimenti

UDEC manual – User's Guide

UDEC manual – Theory and background

UDEC manual – Constitutive models

Handbook of Research on Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures (Panagiotis G. Asteris Vagelis Plevris)

Sito internet ITASCA: http://www.itascacg.com/software/udec