

SIGEA - Sezione Puglia

Convegno

"L'attività estrattiva: tra sviluppo economico e tutela del territorio"

***L'attività estrattiva sotterranea:
approcci semplificati e metodi avanzati
di calcolo per le analisi di stabilità***

Piernicola Lollino & Mario Parise

CNR – IRPI, Bari



Lecce, 30 aprile 2013

Schema della presentazione

- Inquadramento del problema
- Metodologie di analisi delle condizioni di stabilità
 1. *approcci di natura empirica*
 2. *metodi di calcolo semplificato*
 3. *metodi di analisi numerica*
- Casi di applicazione dei metodi di analisi numerica
- Discussione in merito alle metodologie di valutazione del rischio

INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA (1)

L'attività estrattiva in sotterraneo può indurre processi di deformazione e sprofondamento (*sinkhole*) nel breve o nel lungo periodo



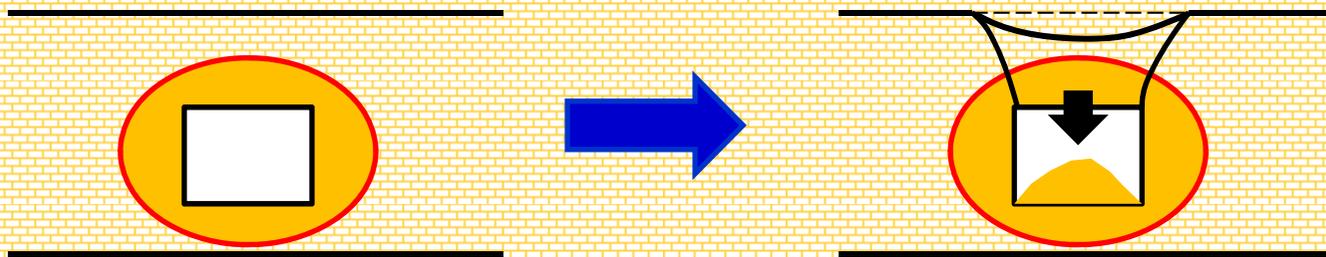
Nelle attività di pianificazione urbanistica e territoriale, a distanza di decenni, spesso si trascura l'esistenza delle cavità per cui nel tempo insorgono problemi di interazione tra le strutture ed infrastrutture in superficie e le cavità sotterranee

INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA (2)

Nella maggioranza dei casi l'instabilità della cavità e lo sprofondamento conseguente avvengono non a seguito di incremento delle condizioni di carico agenti sull'ammasso interessato dall'attività estrattiva



Esse sono piuttosto la conseguenza di variazioni delle condizioni al contorno del problema o di variazioni nel tempo delle proprietà dei materiali a ridosso della cavità



Risulta necessario per un corretto inquadramento del problema la conoscenza dei fattori che possono intervenire fino allo sviluppo del processo che conduce allo sprofondamento vero e proprio

Problemi associati ad un'analisi di stabilità di volte di cavità sotterranee in ammassi rocciosi

- Scarsa conoscenza dell'assetto geostrutturale dell'ammasso
- Scarsa conoscenza delle condizioni delle discontinuità e della relativa risposta
- Cavità antropiche: scarsa conoscenza della storia pregressa, dei processi occorsi nel tempo e dei fattori agenti
- Influenza significativa del fenomeno della alterazione ambientale
- Difficoltà di individuazione dei fattori che controllano la stessa stabilità dell'ammasso



FATTORI SPECIFICI CHE INFLUENZANO LA STABILITÀ DELLA VOLTA DI UNA CAVITÀ ARTIFICIALE

1. ALTERAZIONE CHIMICA DELLA ROCCIA E DEI GIUNTI NEL TEMPO

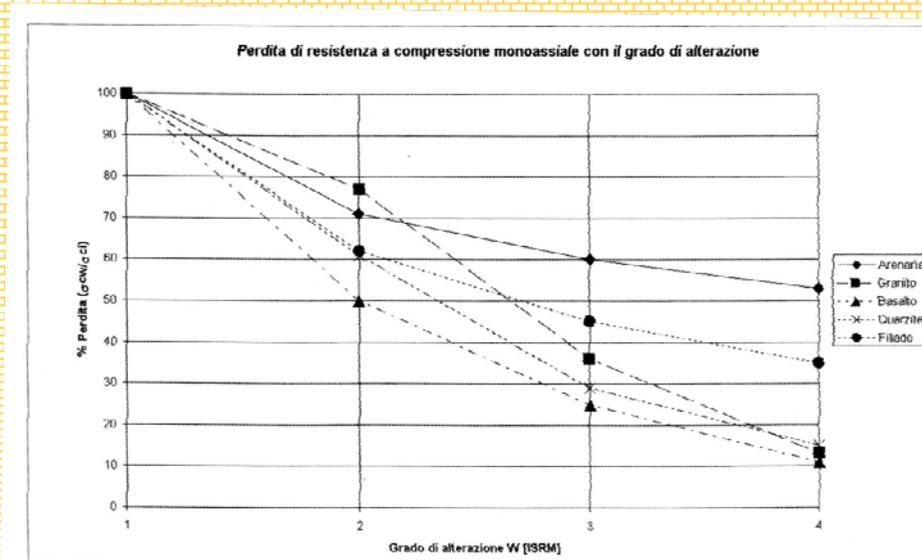


DECADIMENTO PROGRESSIVO DELLA RIGIDEZZA, DELLA RESISTENZA A TRAZIONE E DI QUELLA A COMPRESSIONE DEI MATERIALI NEL BREVE E LUNGO TERMINE (anche CREEP)

Possibile soprattutto per casi di ammassi di roccia tenera maggiormente predisposti a tali processi



COLLASSO DELLA STRUTTURA



FATTORI SPECIFICI CHE INFLUENZANO LA STABILITÀ DELLA VOLTA DI UNA CAVITÀ NATURALE

2. INFLUENZA DEL CONTENUTO D'ACQUA SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DI ALCUNE ROCCE

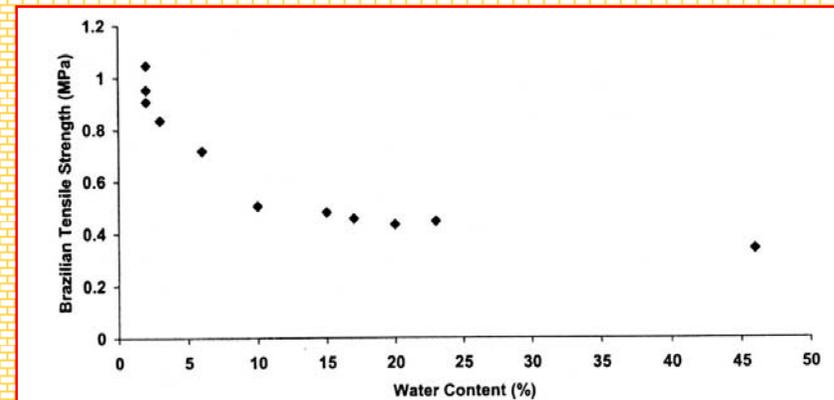
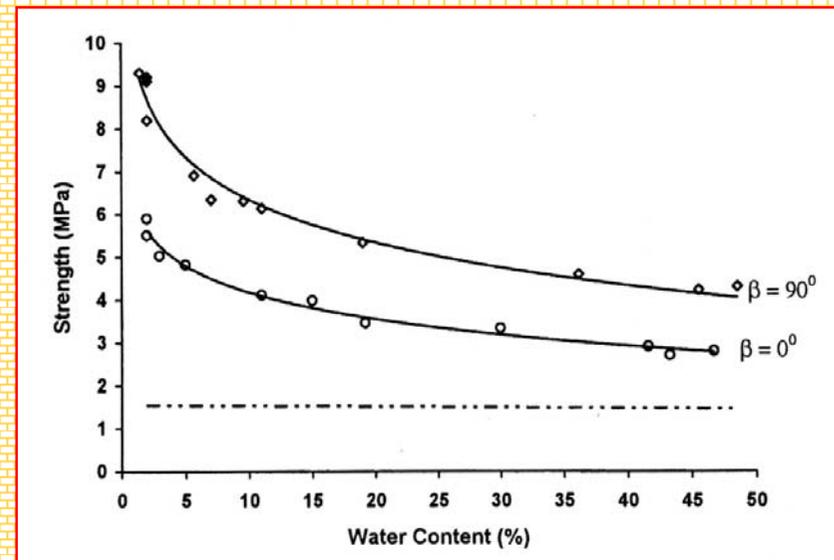


DECADIMENTO DELLA RESISTENZA DEI MATERIALI, ANCHE NEL BREVE TERMINE

(Nova et al. 2003, Castellanza et al. 2008, Andriani e Walsh 2007)



COLLASSO DELLA STRUTTURA



(da Hatzor et al. 2002)

FATTORI SPECIFICI CHE INFLUENZANO LA STABILITÀ DELLA VOLTA DI UNA CAVITÀ NATURALE

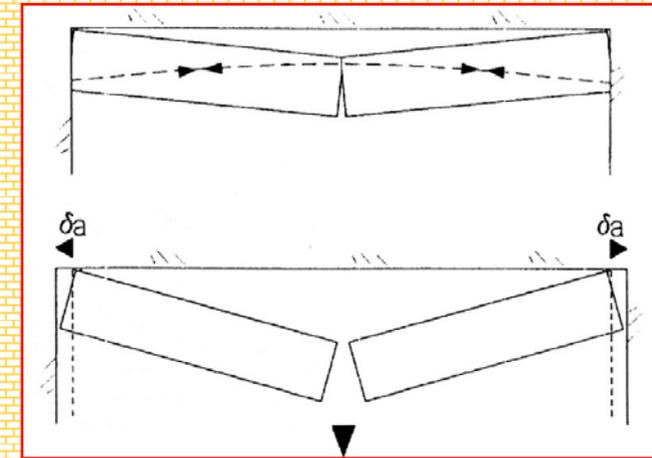
3. RILASSAMENTO TENSIONALE LUNGO LE PARETI



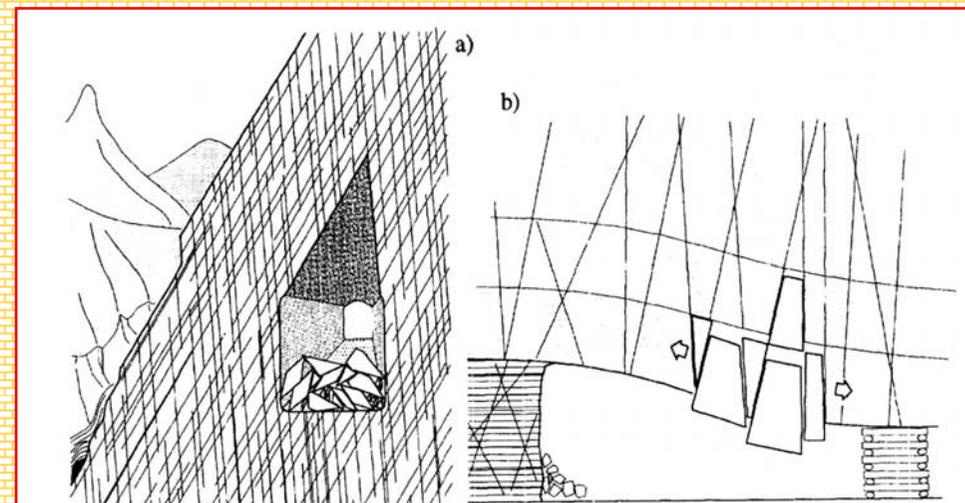
Perdita dello stato di confinamento laterale (riduzione delle tensioni orizzontali) dovuto a variazioni della geometria (sottoescavazione) o spostamenti orizzontali lungo le pareti

Incapacità di trasferire le tensioni lungo le pareti ed alla base della cavità

(Diederichs & Kaiser 1998)



COLLASSO della volta o di porzioni di essa



Analisi delle condizioni di stabilità di una cavità sotterranea

Un approccio completo allo studio delle condizioni di stabilità di una cavità sotterranea richiede:

- analisi geologica e geostrutturale
- analisi geomeccanica (prove di laboratorio e/o prove in sito)
- analisi cinematica (per la valutazione del cinematisimo di instabilità)
- analisi di stabilità (stato attuale e possibile evoluzione), anche attraverso analisi tenso-deformative complesse

Tuttavia, in alcune situazioni può essere utile approcciare il problema secondo uno schema a diversi steps con diverso grado di complessità

Metodi di natura empirica

Sono metodi basati sulle classificazioni geomeccaniche (Bieniawski 1978; Barton 1974; Hoek 2001). I più conosciuti sono:

1. metodo della “*luce scalata della volta*” (Carter 1992)
2. metodi basati sul grafico di stabilità modificato (Potvin e Milne 1992; Diederichs et al. 1999)

Detti metodi sono stati sviluppati a partire da ampi database disponibili circa numerosi casi di studio.

I dati di ingresso sono costituiti da dati di geometria del problema e di qualità dell'ammasso roccioso (es. fattore Q del metodo di Barton); nel caso del metodo di Potvin e Milne anche analisi dello stato tensionale.

Metodo di Carter (1992)

L'instabilità della volta di una cavità è probabile nel caso in cui la luce scalata della volta, C_s , pari a:

$$C_s = S \cdot \sqrt{\frac{S.G.}{T(1 + \frac{S}{L}) \cdot (1 - 0.4 \cos \theta)}}$$

S = luce libera della volta (m)

L = lunghezza della volta (m)

T = spessore della volta (m)

S.G. = gravità specifica dell'ammasso (2.7 ÷ 3.5)

θ = direzione di immersione della stratificazione

risultati maggiore della luce critica, S_c , pari a: $S_c = 3.3 \times Q^{0.43}$

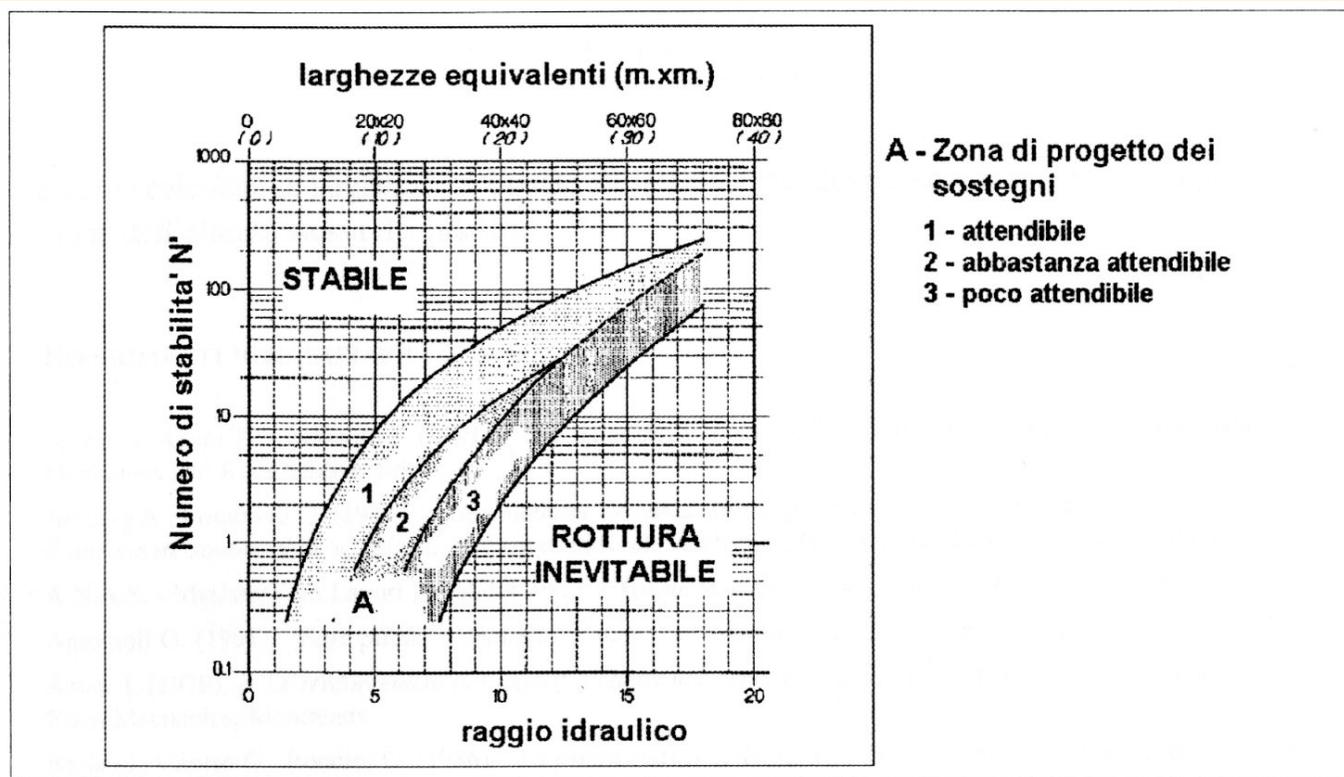
$$C_s > S_c$$



INSTABILITÀ

Metodo di Potvin e Milne (1992)

La valutazione della stabilità della volta deriva da un confronto tra le dimensioni areali della cavità ed un numero di stabilità, N' , che dipende dallo stato tensionale nell'intorno del cavo, dal fattore Q (Barton) e dalle caratteristiche geostrutturali dell'ammasso



Metodi di calcolo semplificato

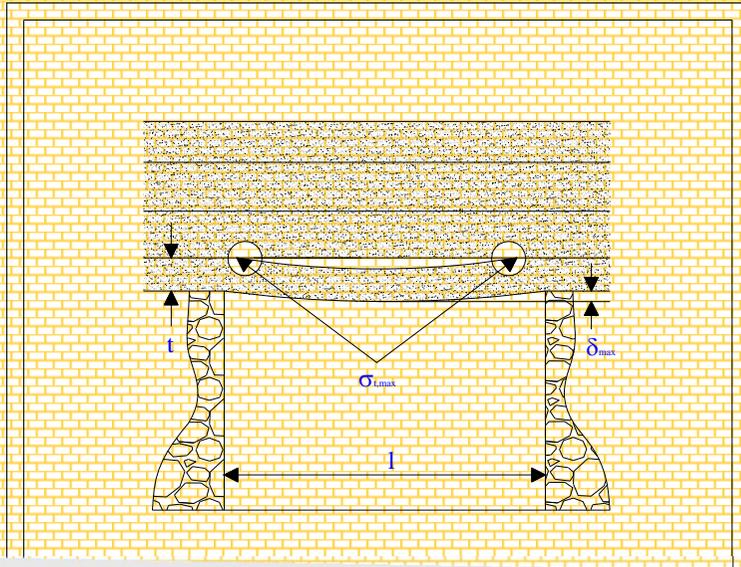
Detti metodi prevedono semplici analisi delle condizioni di collasso nell'ipotesi di

meccanismo di rottura ben definito

Essi includono:

1. Meccanismi di collasso per formazione di blocchi cinematicamente instabili e scorrimento lungo giunti (metodo di Hoek & Brown 1994)
2. Meccanismi di collasso per trave inflessa: metodi sviluppati a partire dalla classica 'teoria della trave elastica', continua o a conci (Diederichs & Kaiser 1999)

Schema di trave elastica continua



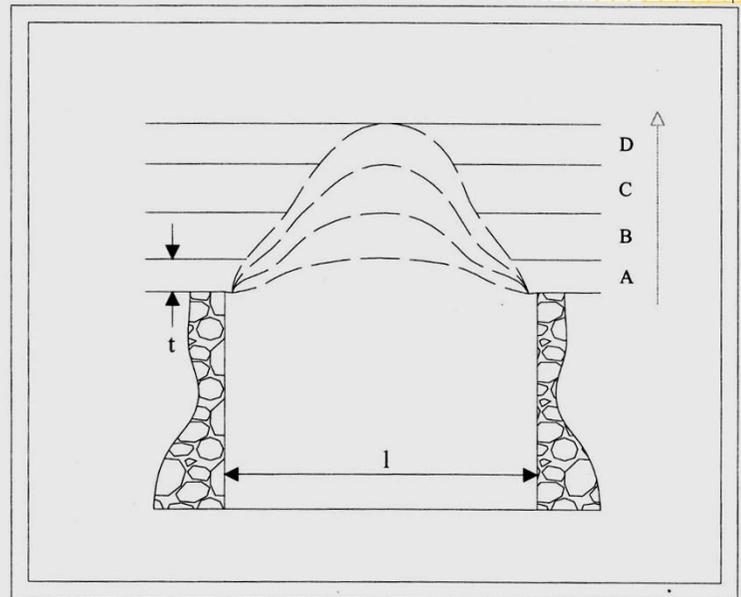
$$\sigma_{t,\max} = \frac{\gamma^2}{2t}$$

Se $\sigma_{t,\max} > r_t$



formazione di
fessure per trazione

Importanza della protezione delle pareti
per ridurre il rischio di un aumento della
luce della cavità

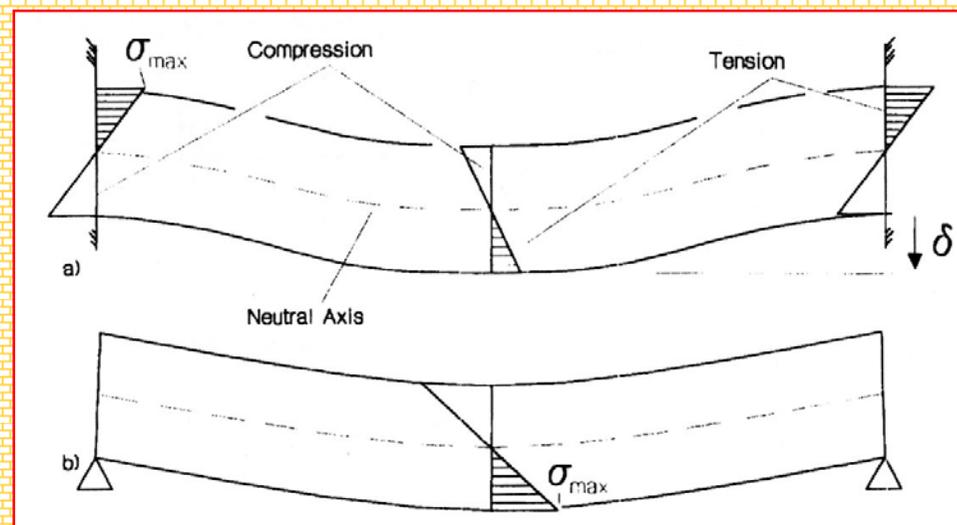
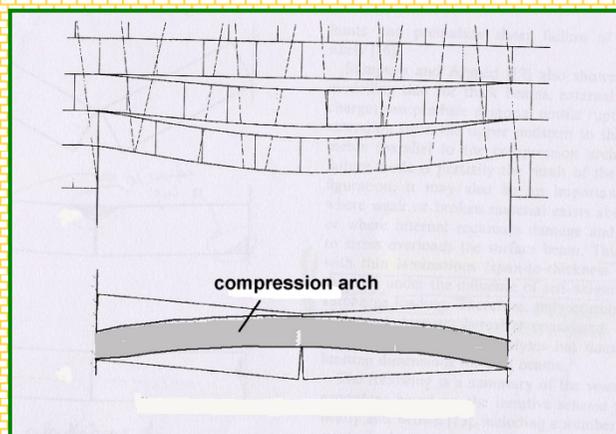


Evoluzione verso una volta con forma
tipica "a cupola" per effetto
dell'instaurarsi dell'effetto arco

Metodo della trave a conci (Diederichs & Kaiser, 1999)

Anche in ammassi stratificati con fessure verticali sono possibili condizioni di stabilità della volta

Generazione di un arco di compressione di spessore sufficiente a garantire l'equilibrio della trave (equivalenza con la trave a conci)



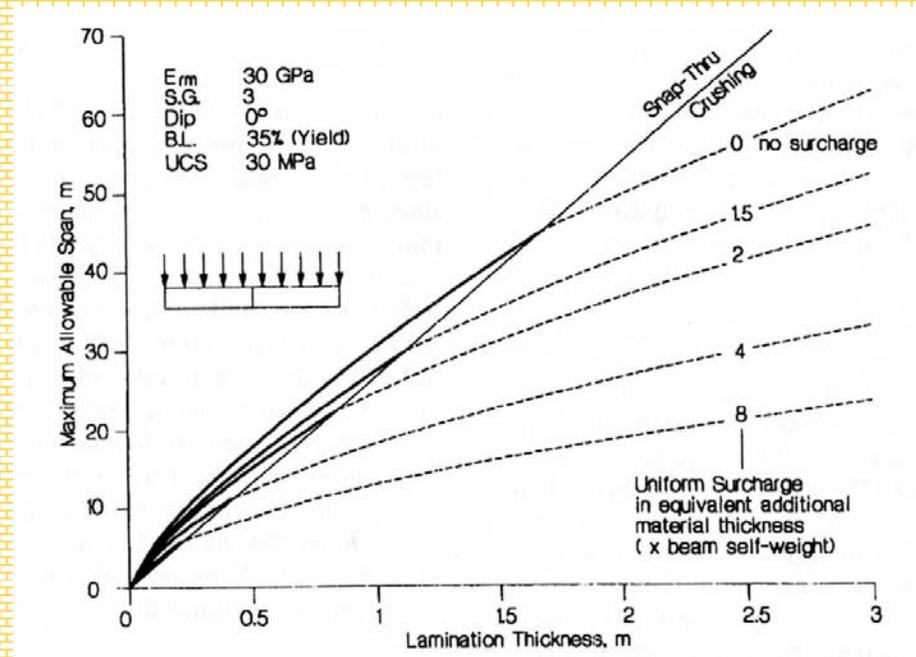
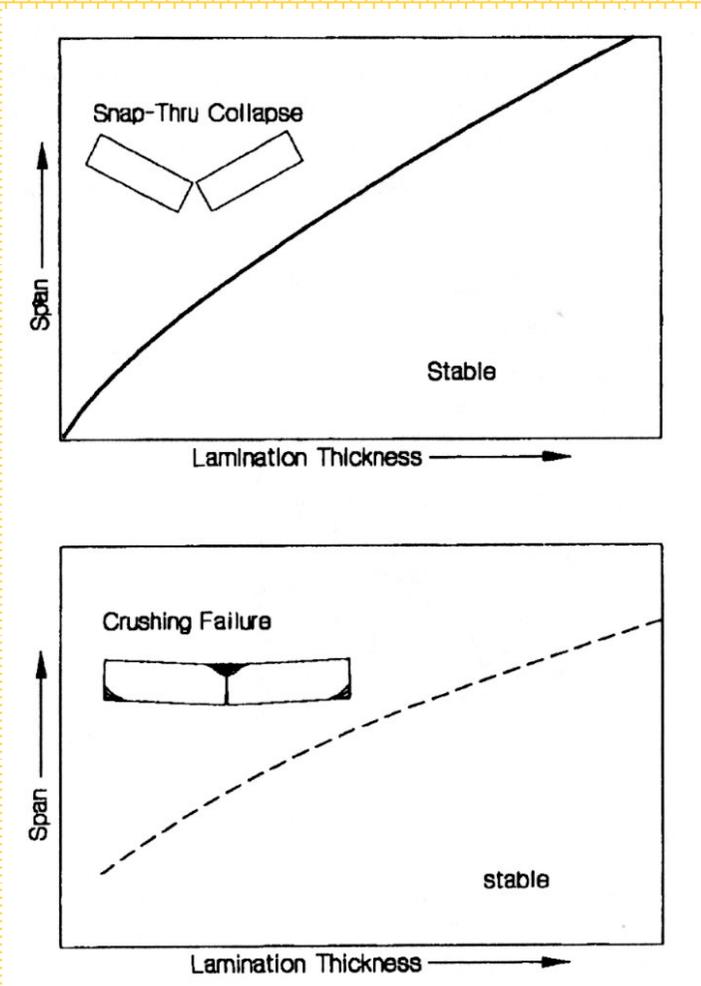
Gli autori propongono un limite di snervamento per la stabilità della trave corrispondente ad un certo valore di spostamento in mezzzeria della trave:

$$f_s = 0.1 \times T$$

ed un limite di collasso ultimo:

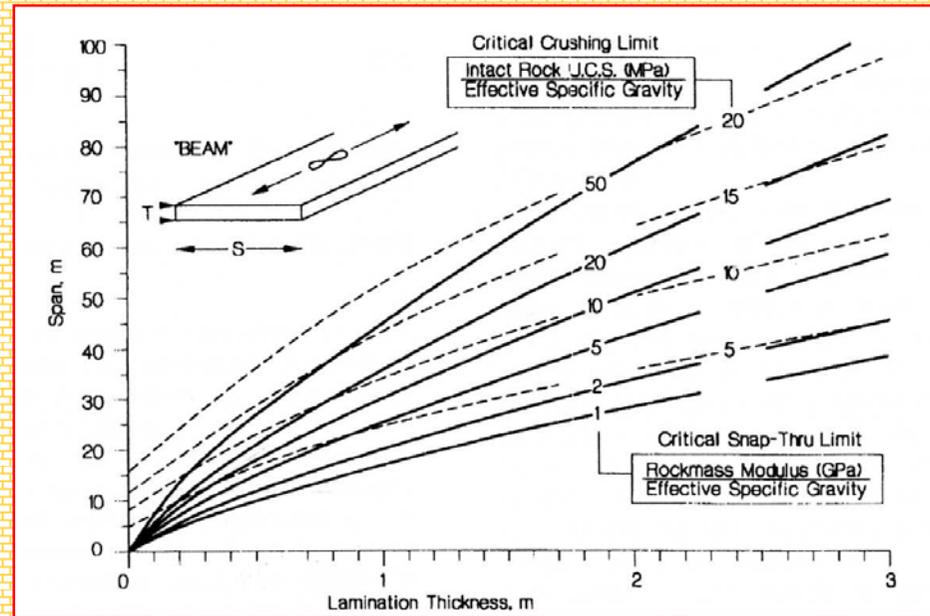
$$f_f = 0.35 \times T$$

Metodo di Diederichs & Kaiser (1999)

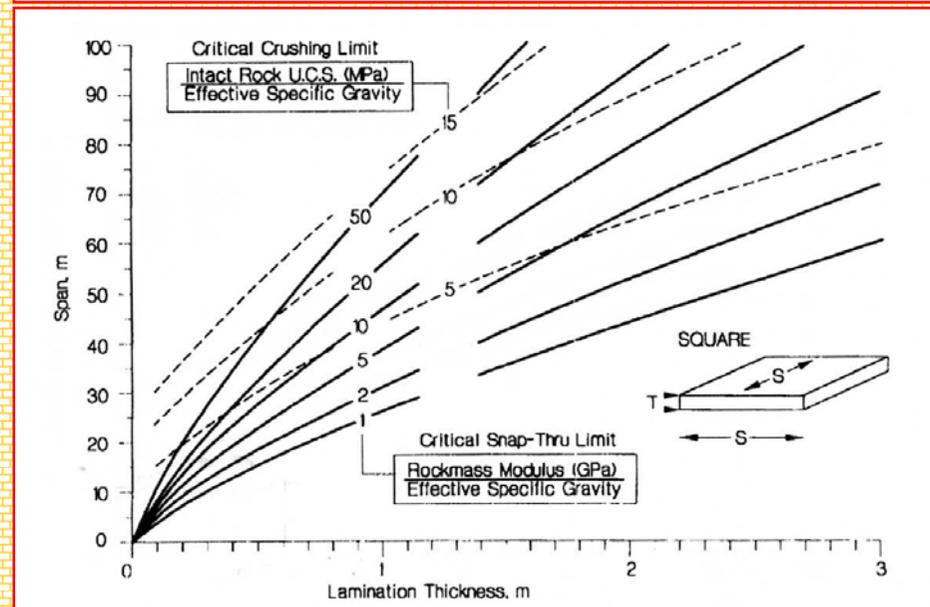


Metodo di Diederichs & Kaiser (1999)

Linee guida per la valutazione della stabilità per casi di **travi di roccia fratturata**



Linee guida per la valutazione della stabilità per casi di **piastre di roccia fratturata**



Metodi di analisi numerica

Detti metodi consentono una analisi tensionale e deformativa completa di un dominio considerato, anche considerando comportamento non lineare dei materiali.

In questo caso, **il meccanismo di collasso** non è ipotizzato a priori, ma **costituisce un risultato dell'analisi**.

Ipotesi di mezzo
continuo



Metodo degli elementi
finiti 2-D e 3-D
(**FEM**)

Ipotesi di mezzo
discontinuo

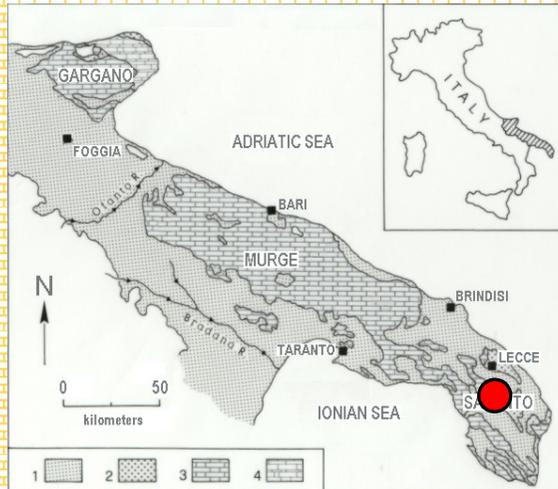


Metodo degli elementi
distinti 2-D e 3-D
(**DEM**)

**MODELLI NUMERICI PER
MEZZI CONTINUI
(Analisi FEM)**

Cavità di Cutrofiano (LE)

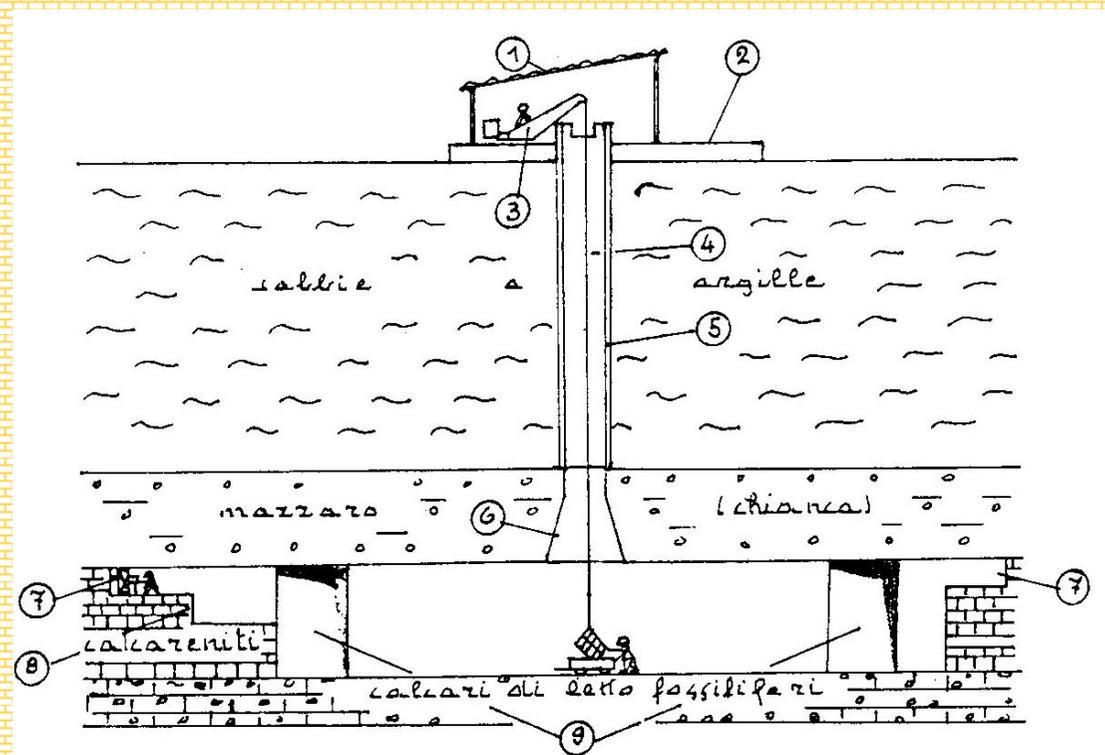
(Parise e Lollino, 2011;
Lollino et al., 2013)



Contesto geologico

L'attività di cava ha coinvolto strati massivi ed intatti di Calcarenite (Pleistocene), che nell'area sono sovrastati da strati di sabbia ed argilla

Schema di cavatura a Cutrofiano: 4) pozzo; 6) pozzo a campana; 7) fronte di avanzamento; 8) strato di calcarenite.



Luigi Lollino & Gianfranco Parise (1986)

CAVITA' DI CUTROFIANO (LE)



Planimetrie delle cavità sotterranee di Cutrofiano, con schema di cavatura secondo gallerie ortogonali

CAVITA' DI CUTROFIANO (LE)

Evidenze in sito dei processi di instabilità



Collassi locali dal tetto

CAVITA' DI CUTROFIANO (LE)

Evidenze in sito dei processi di instabilità

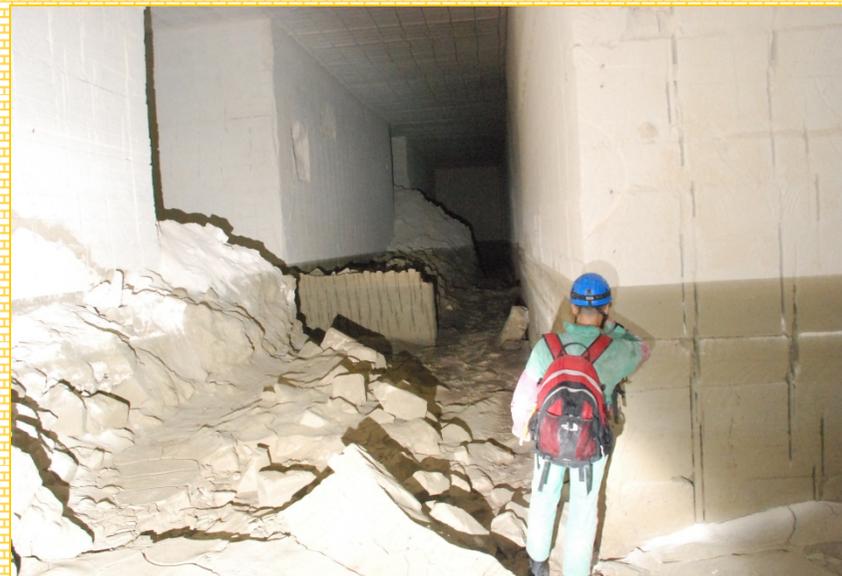


Rotture lungo le pareti laterali



CAVITA' DI CUTROFIANO (LE)

Evidenze in sito dei processi di instabilità



CAVITA' DI CUTROFIANO (LE)

Evidenze in sito dei processi di instabilità



photo: G. Quarta



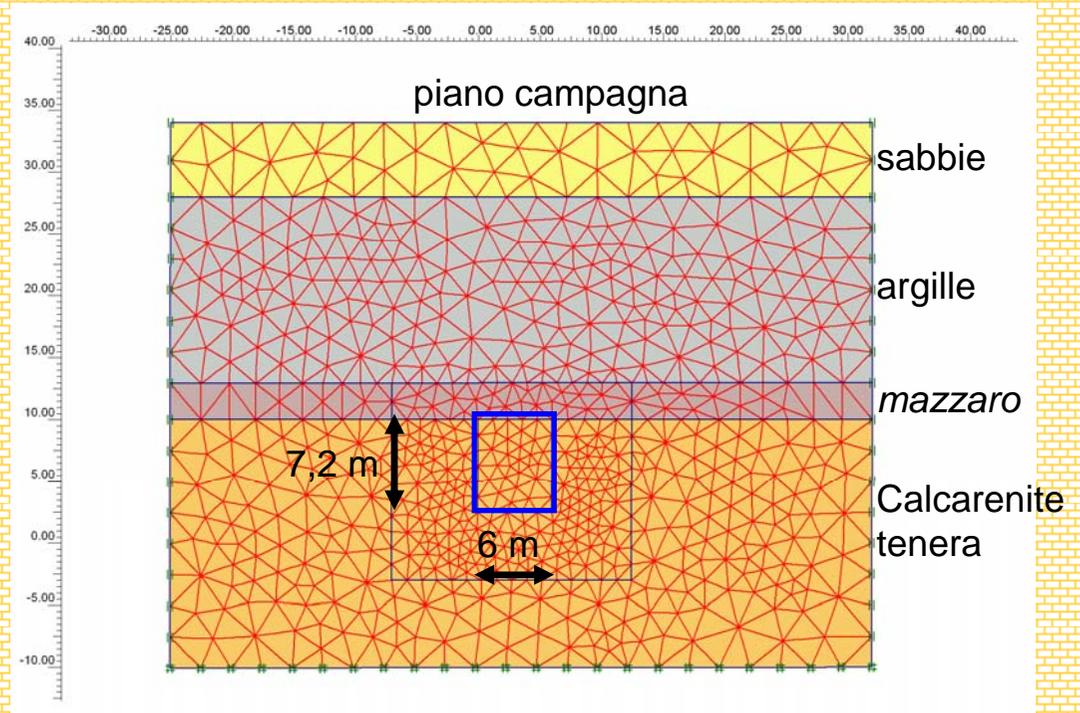
Modello FEM

Ipotesi del modello

Modello elastico perfettamente-plastico con criterio di Mohr – Coulomb e tension cut - off

Analisi in condizioni drenate

Stato tensionale iniziale: $k_0 = 1$



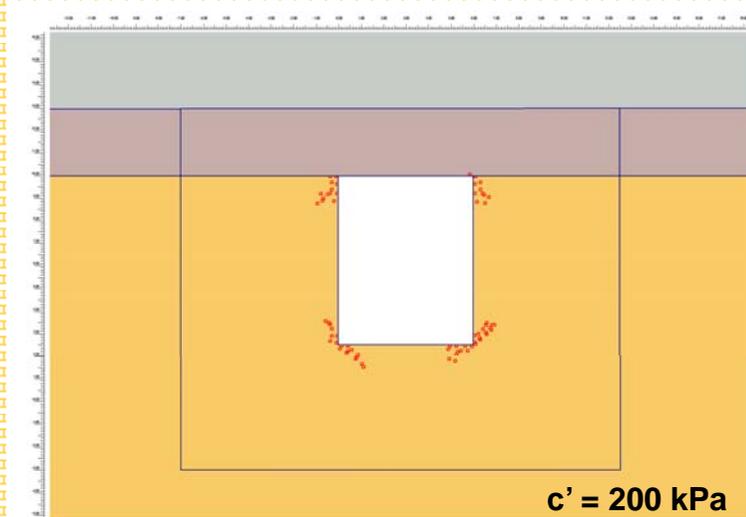
	γ (KN/m ³)	E' (kPa)	ν'	c' (kPa)	ϕ' (°)	σ_t (kPa)	σ_c (kPa)
sabbia	18	70000	0.3	0	28	0	-
argilla	20	40000	0.25	15	20	0	-
Mazzaro	17.5	180000	0.3	360	33	300	2400
Calcarenite	15.5	100000	0.3	160	30	160	1400

Proprietà meccaniche di riferimento

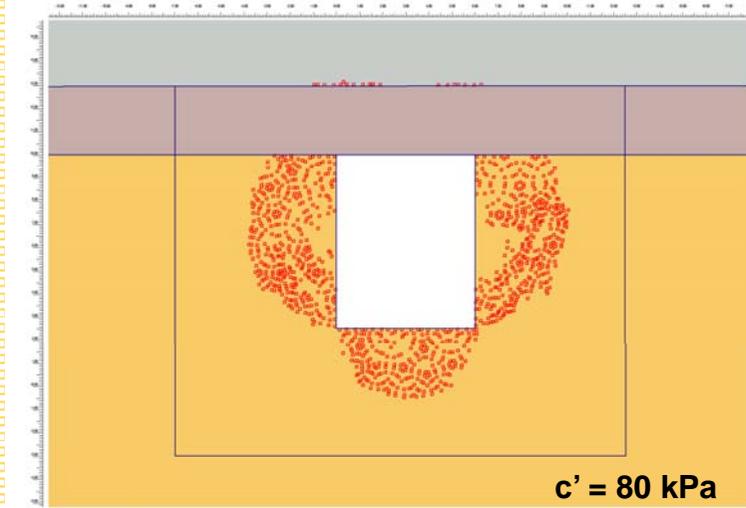
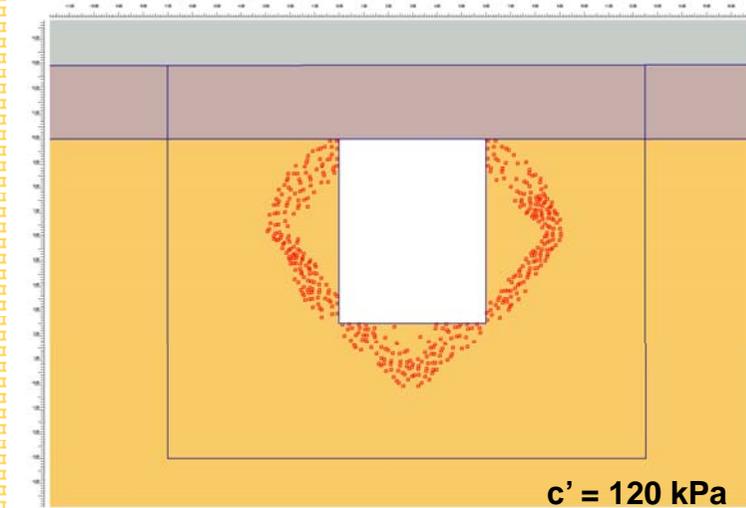
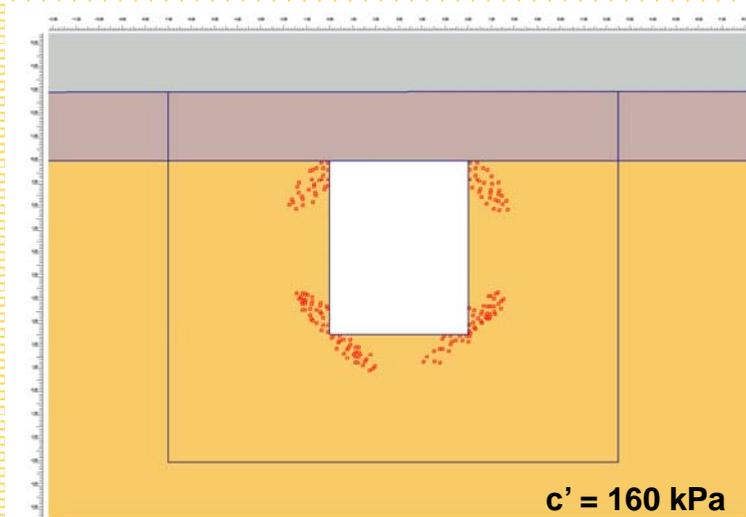
(da Calò et al. 1992, Cherubini & Giasi 1994, Toni & Quartulli 1985)

Modello FEM

ZONE PLASTICHE

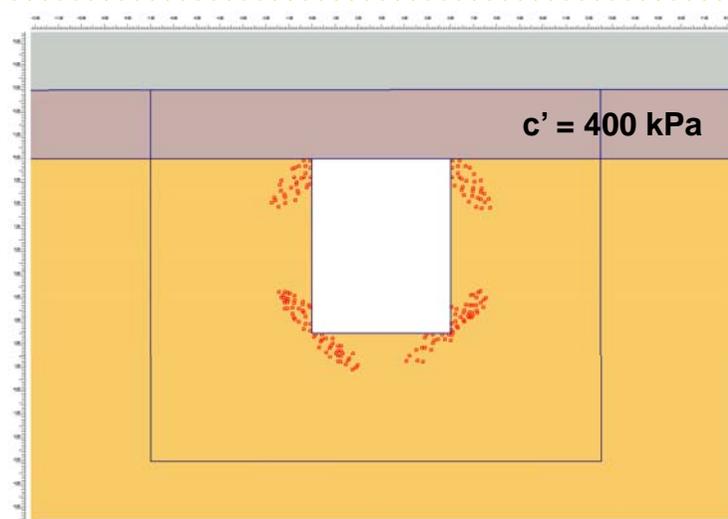


ANALISI DI SENSITIVITA': VARIAZIONE DELLA COESIONE DELLA CALCARENITE

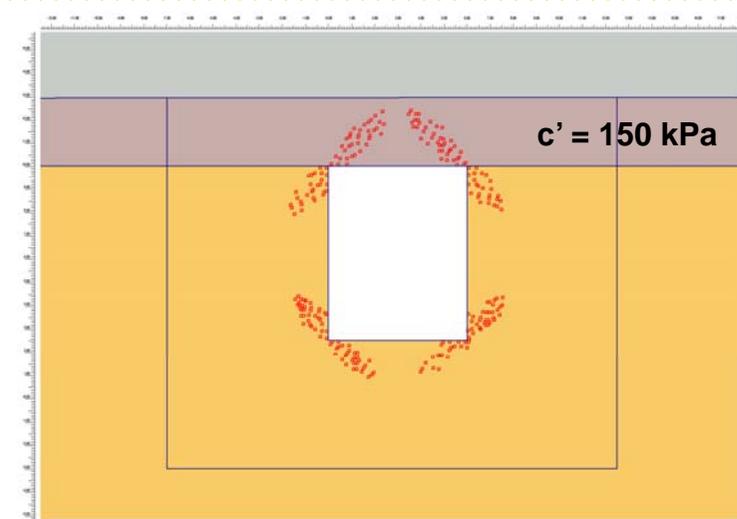


Modello FEM

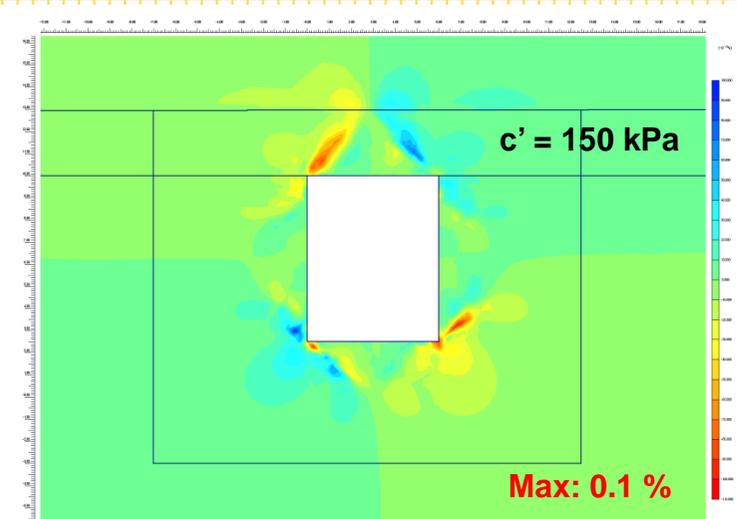
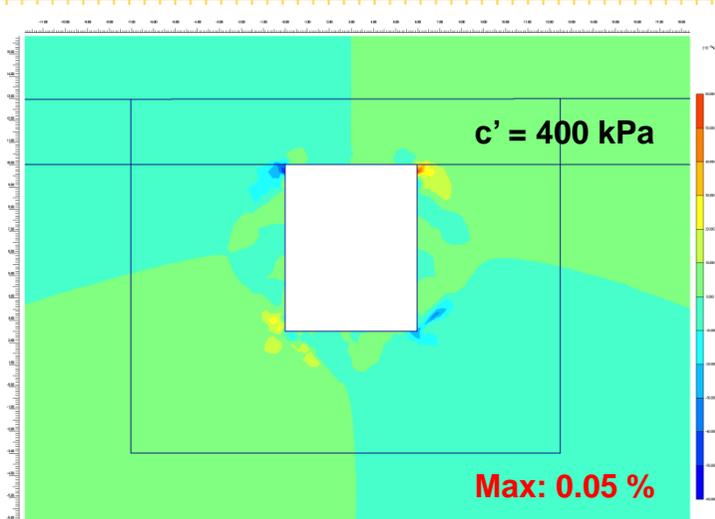
ZONE PLASTICHE



ANALISI DI SENSITIVITA': VARIAZIONE DELLA COESIONE DEL MAZZARO

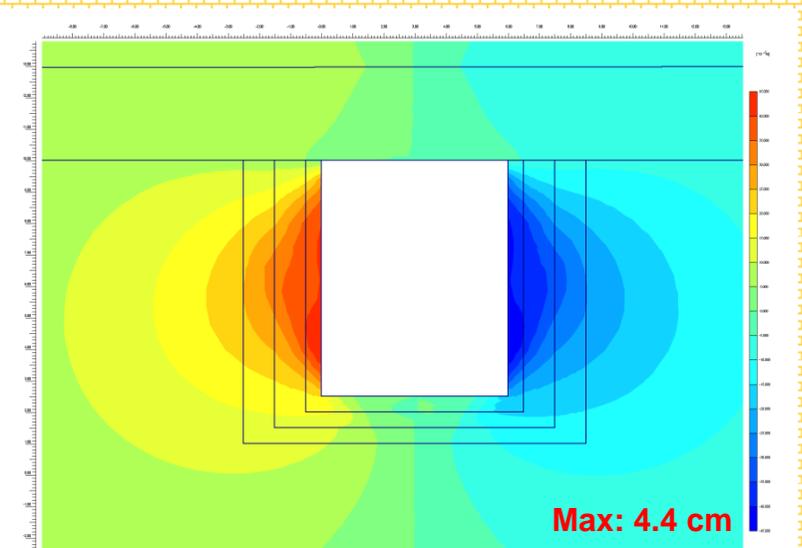
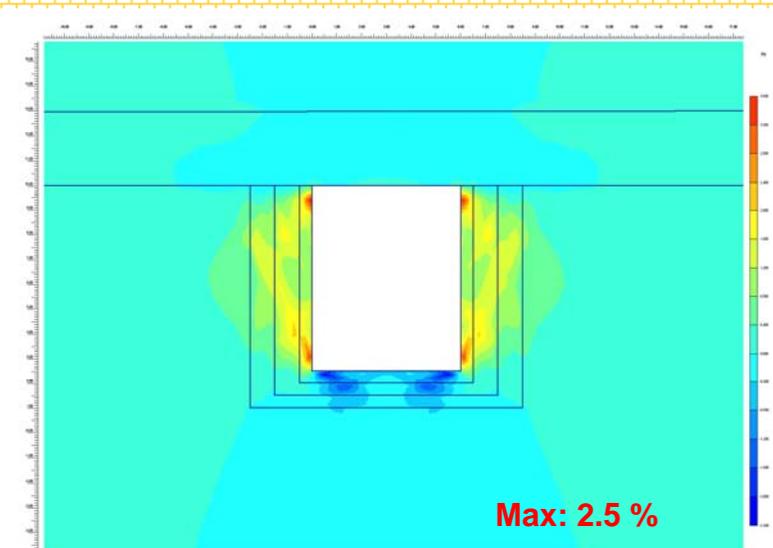
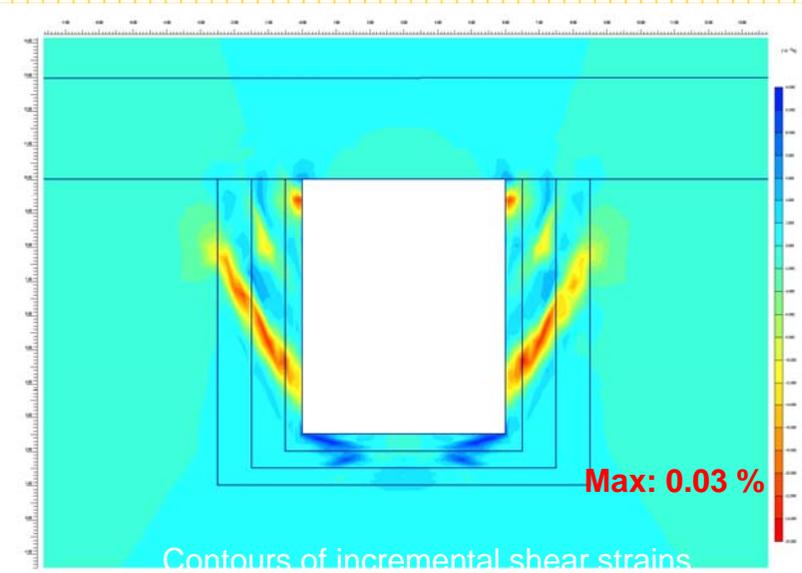
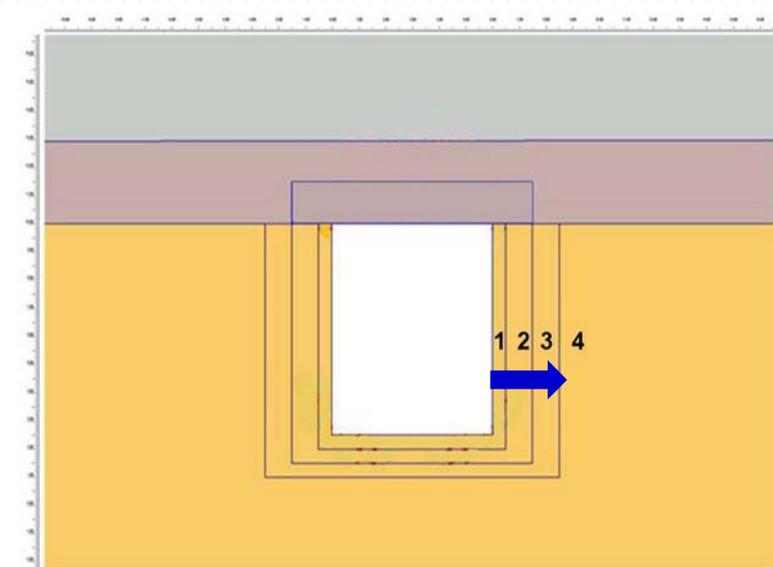


DEFORMAZIONI DI TAGLIO



Modello FEM

DEGRADAZIONE DELLA CALCARENITE LUNGO LE PARETI DELLA CAVITA'

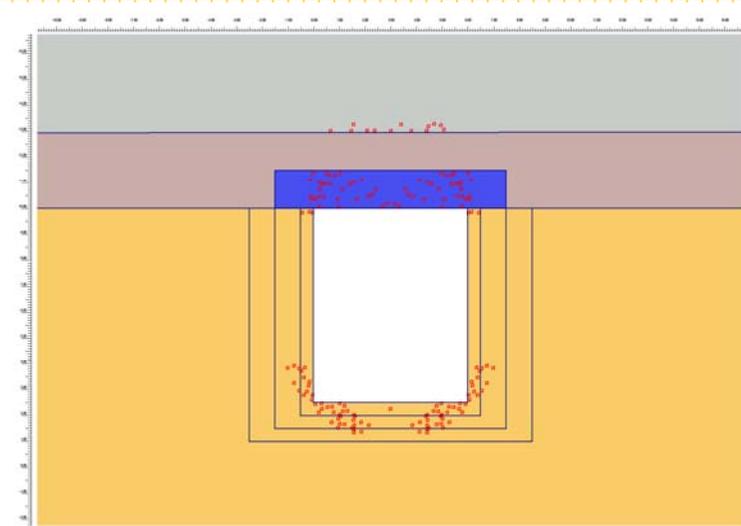


Contours of horizontal strains

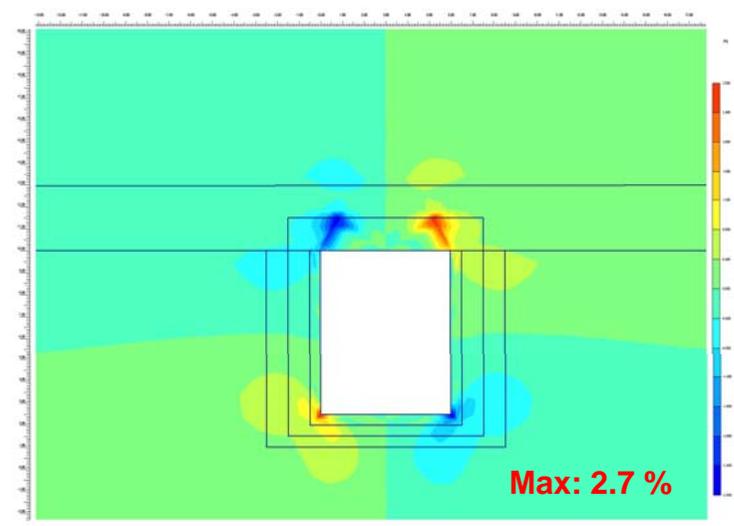
Contours of phase horizontal displacements

Modello FEM

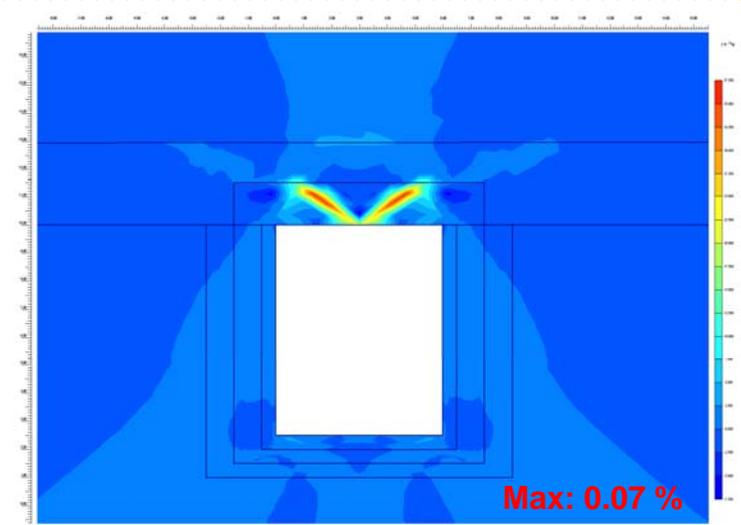
DEGRADAZIONE DEL LIVELLO DEL MAZZARO



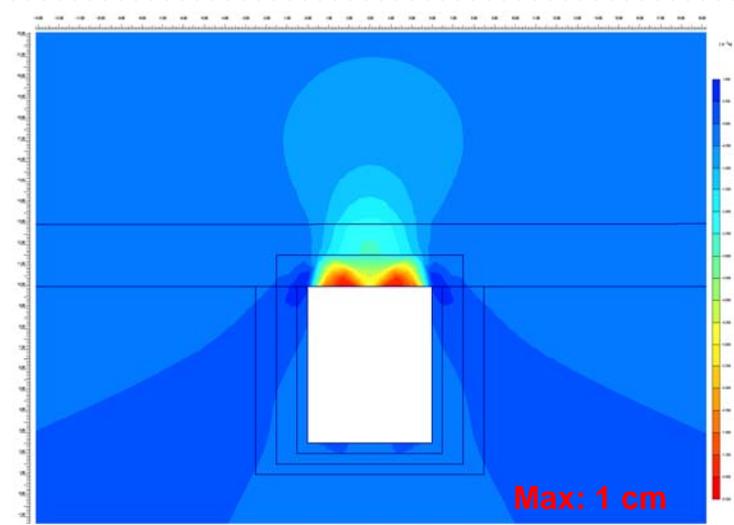
Zone plastiche



Deformazioni di taglio



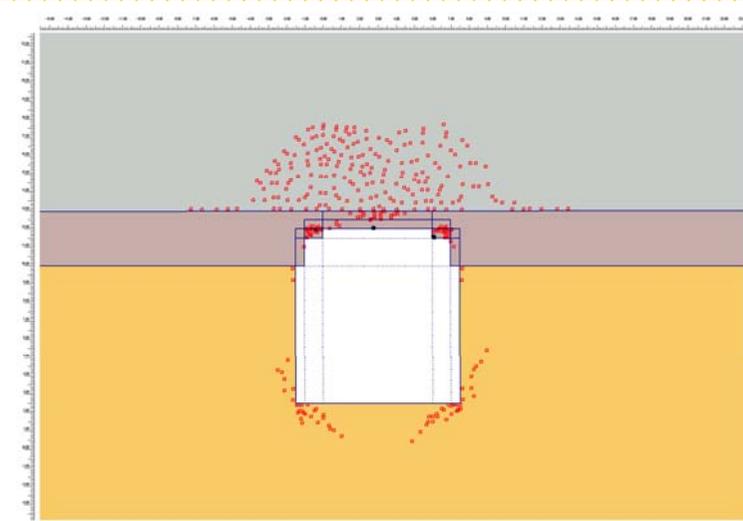
Deformazioni di taglio incrementali



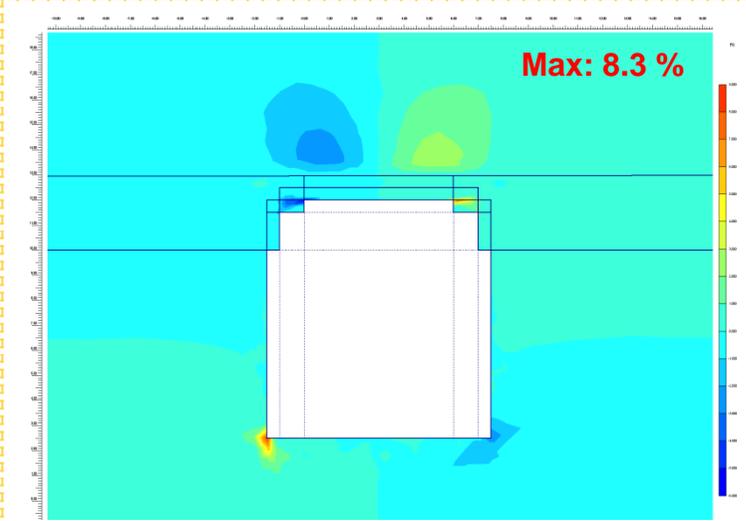
Spostamenti verticali cumulati

Modello FEM

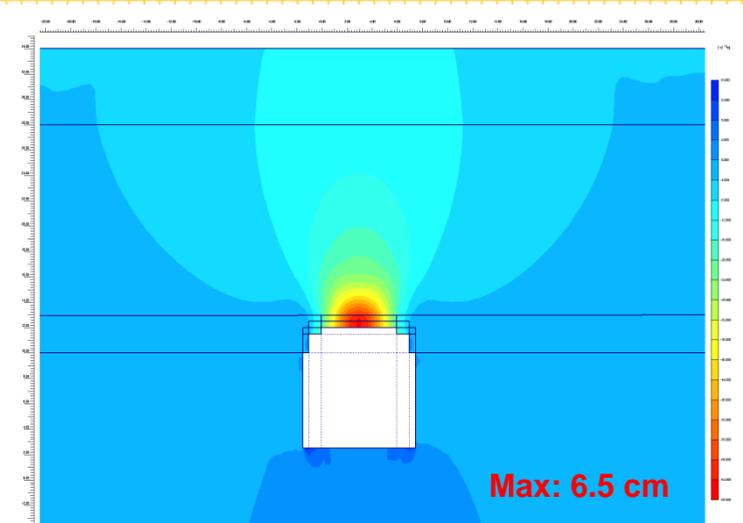
MODELLO CON DIMENSIONE AUMENTATA DEL CAVO – 1° STEP



Zone plastiche



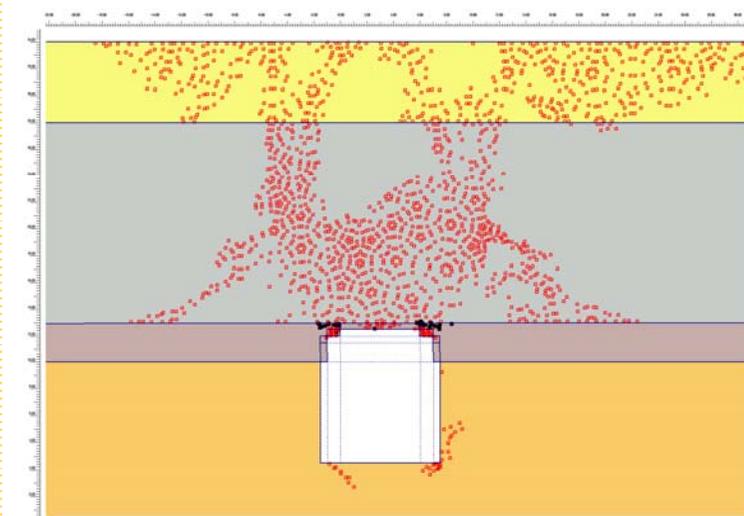
Deformazioni di taglio



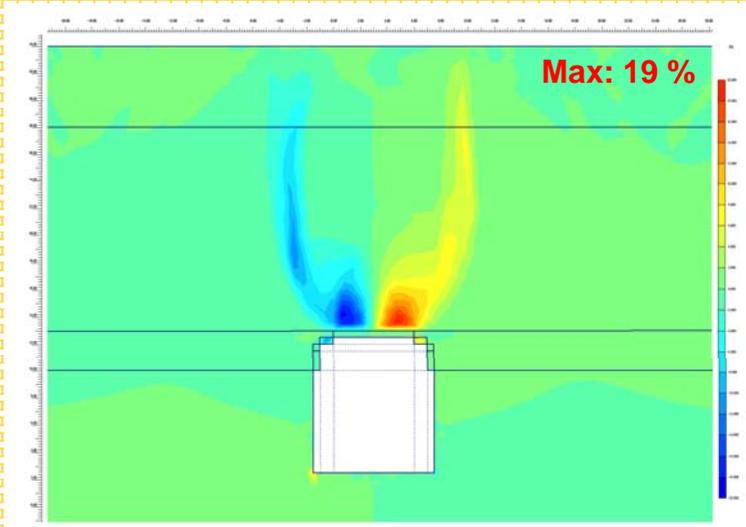
Spostamenti verticali cumulati

Modello FEM

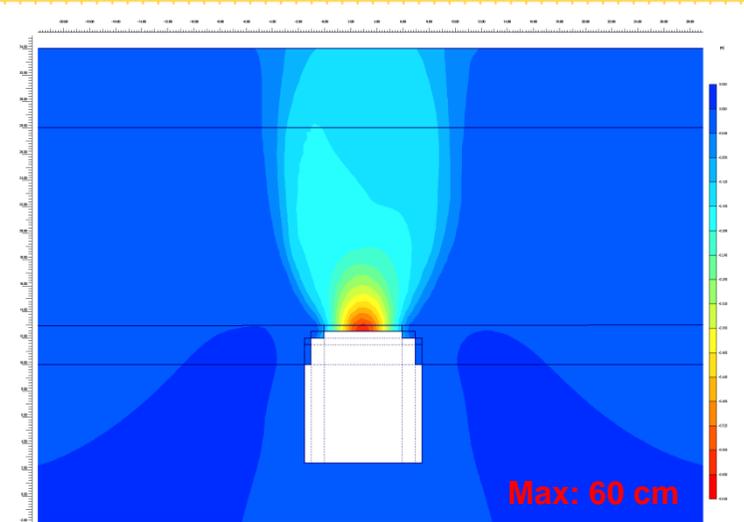
MODELLO CON DIMENSIONE AUMENTATA DEL CAVO – 2° STEP



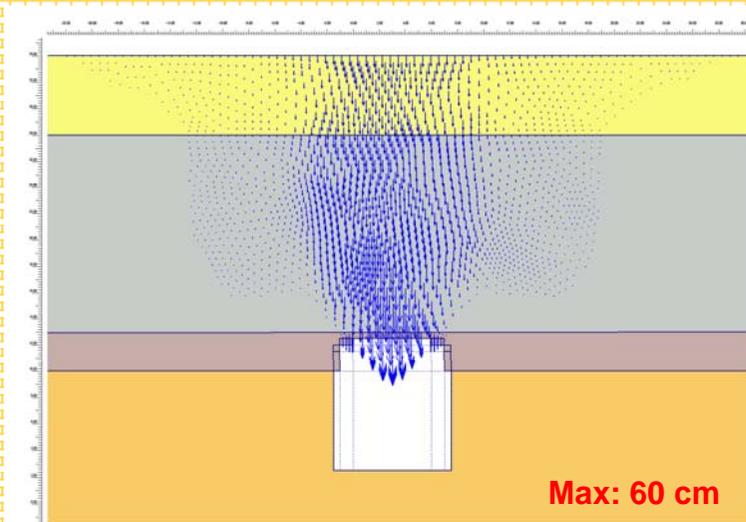
Zone plastiche



Deformazioni di taglio

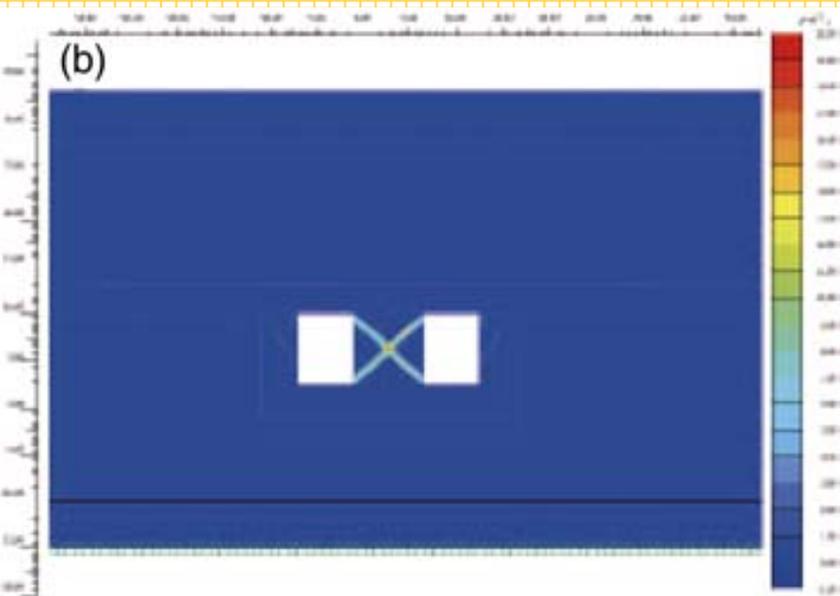
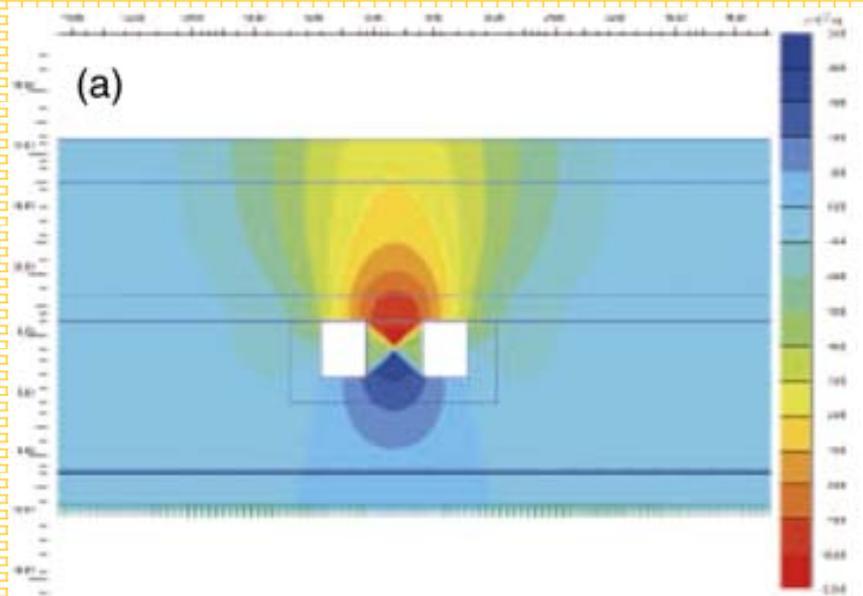
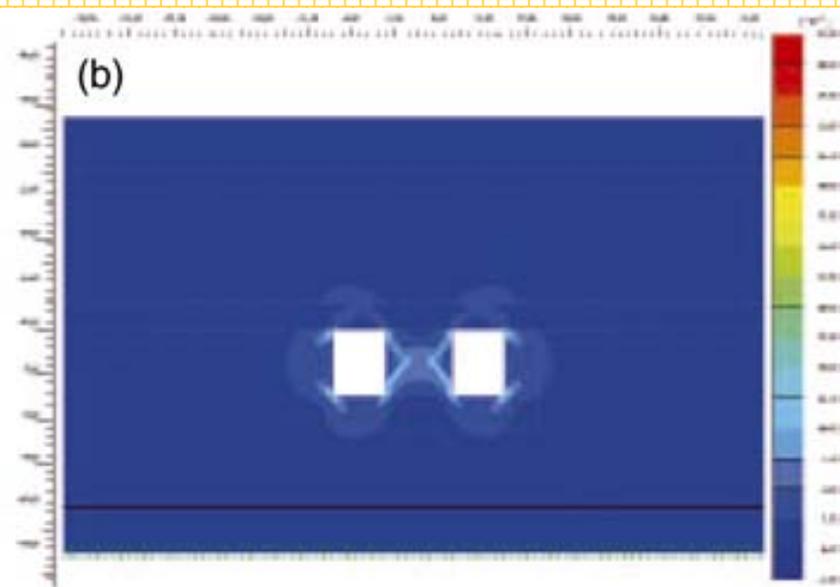
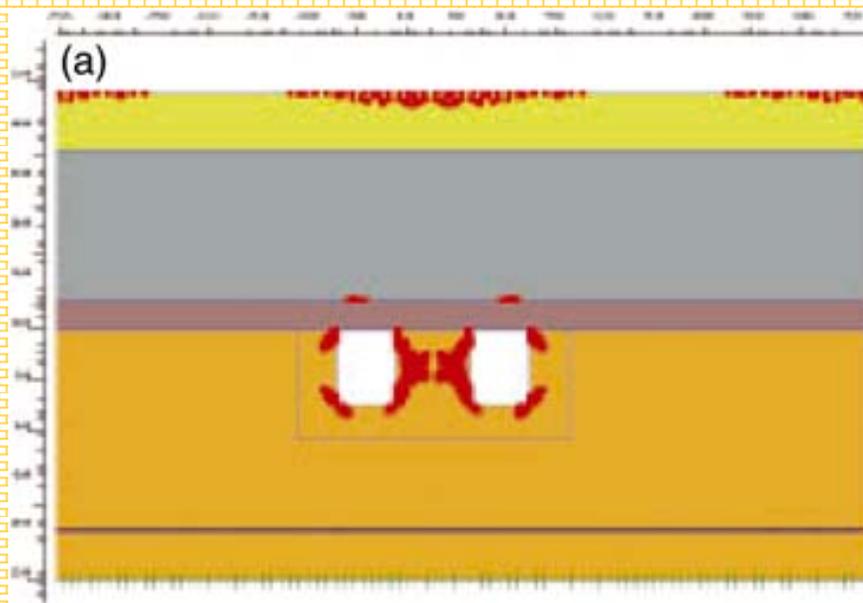


Spostamenti verticali cumulati

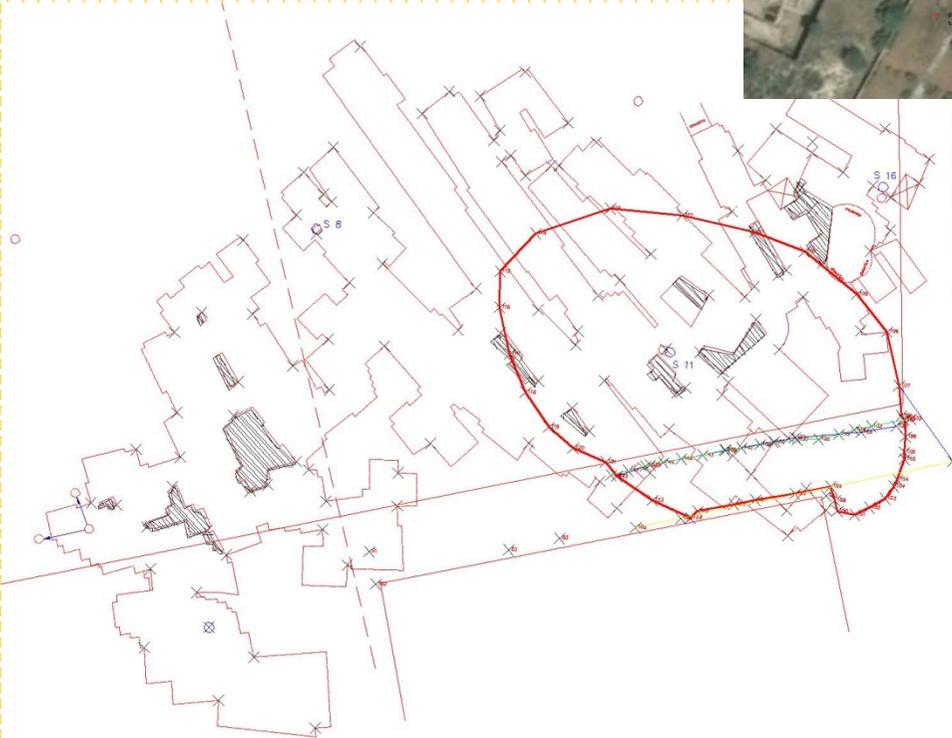
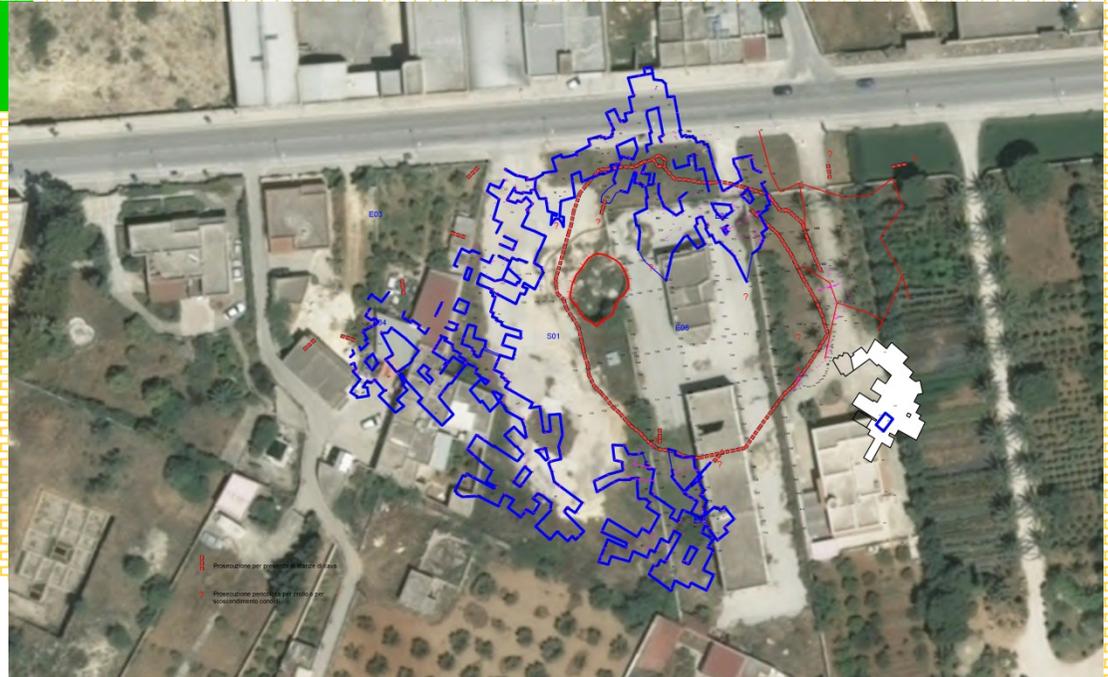


Vettori di spostamento cumulati

MODELLO FEM CON 2 CAVITA' ADIACENTI

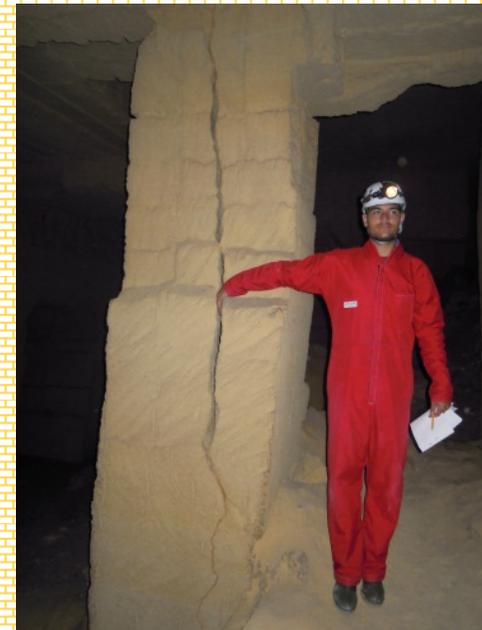


Cave di Marsala

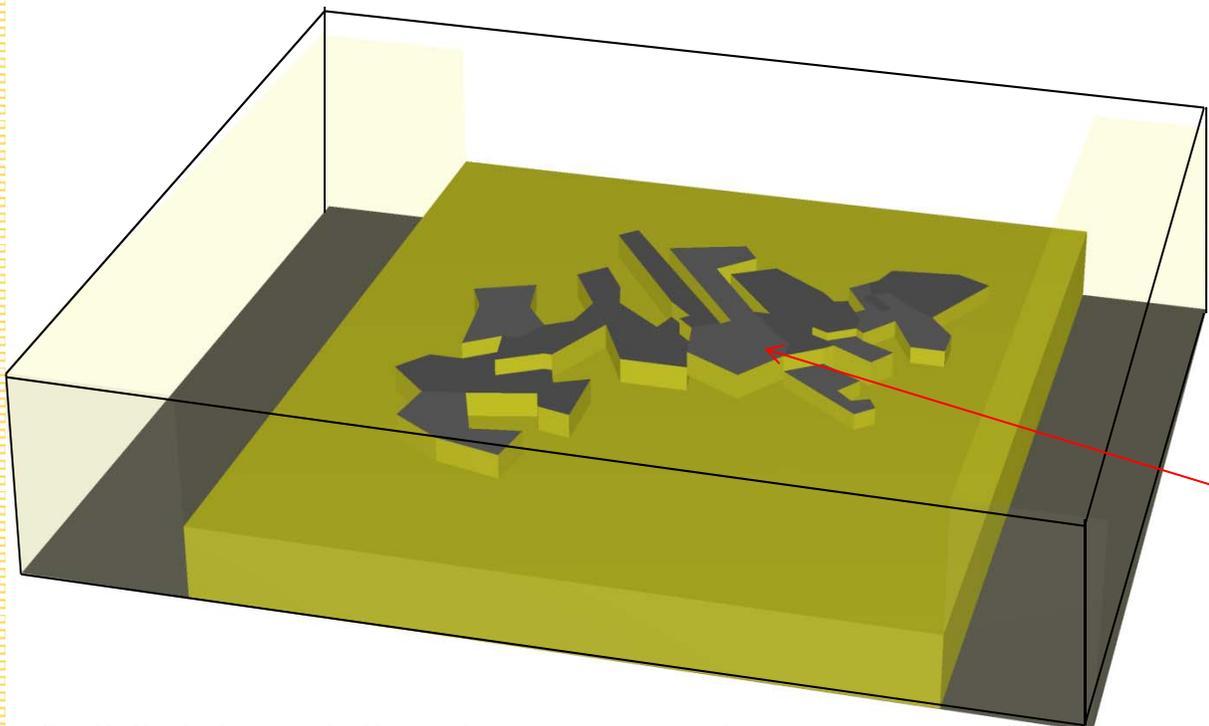




Area sovrastante la cava interessata da subsidenza (in tratteggio) e da sinkhole (tratto continuo)

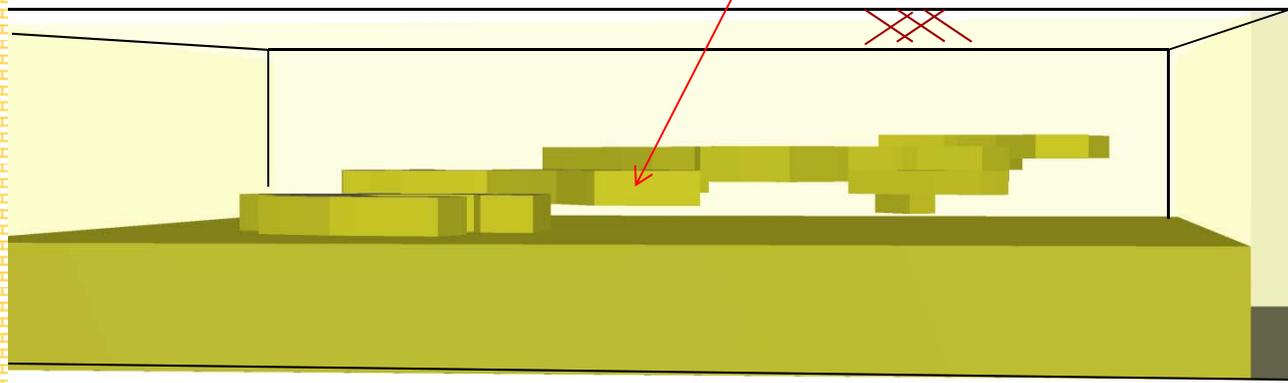


**MODELLO FEM 3D
(Plaxis 3D)**



Solidi del modello: vista prospettica

Solidi del modello
sottoposti a scavo in
fase di modellazione

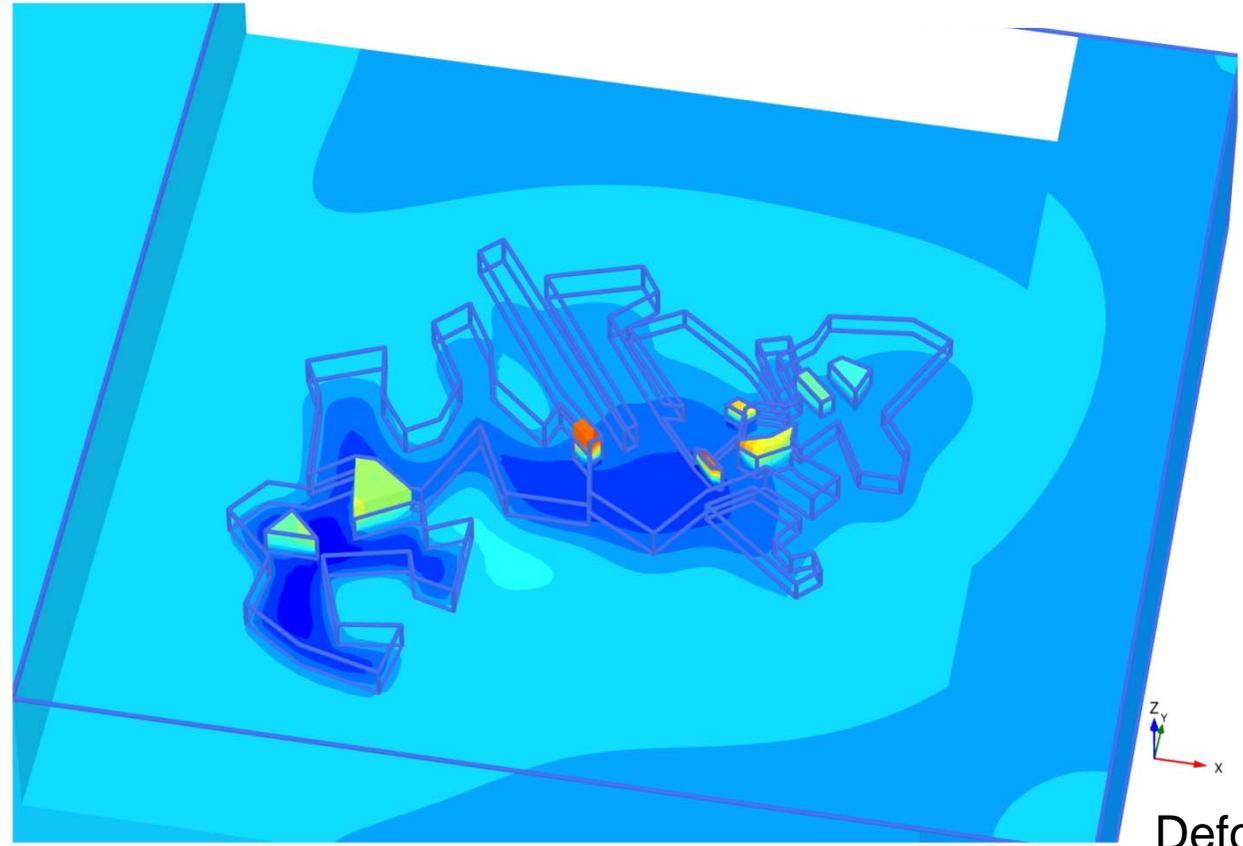
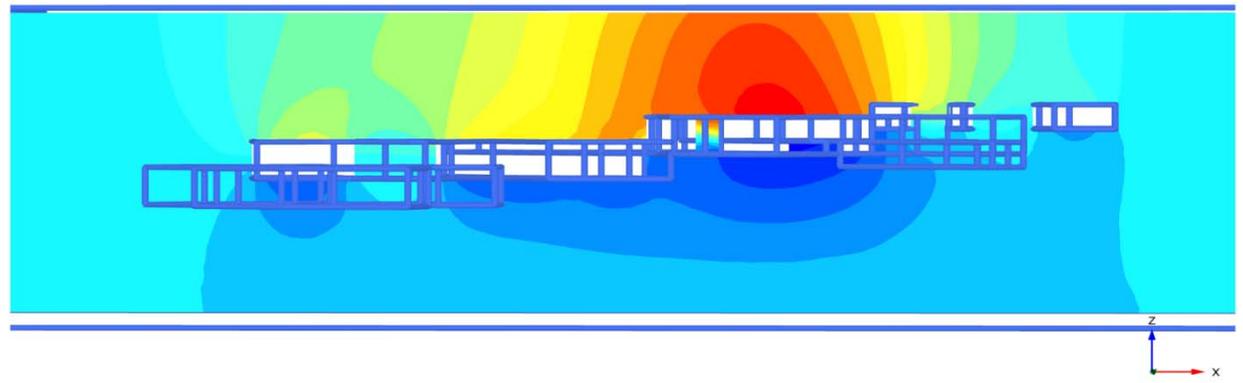


Solidi del modello: vista frontale

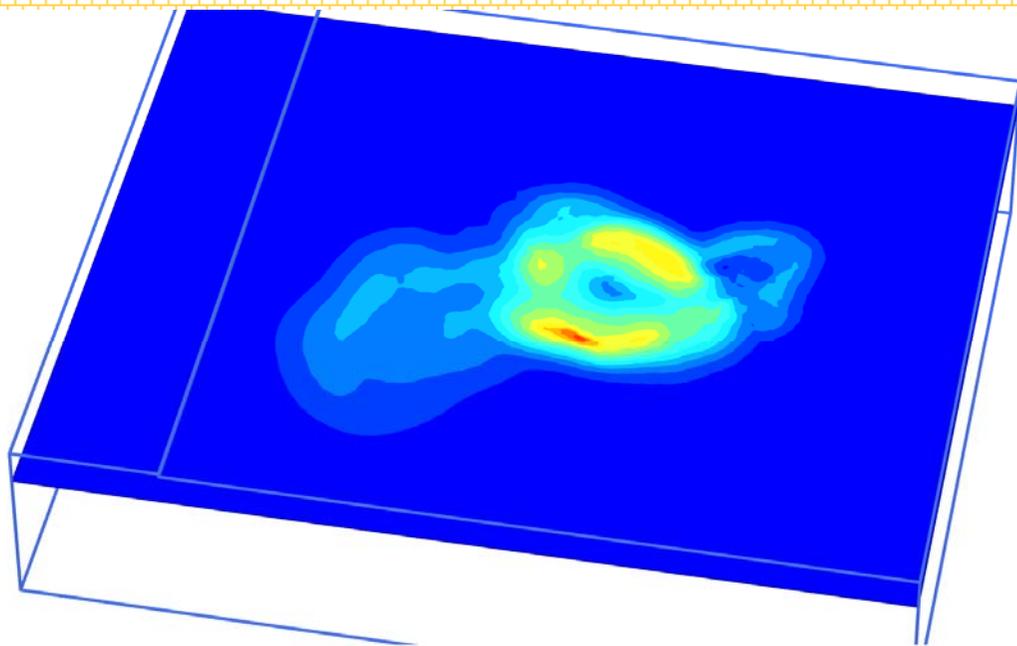
Proprietà meccaniche associate alle tre diverse analisi ipotizzate
(da Arces, Aversa, Lo Cicero e Nocilla 2000)

	Calcarenite asciutta GSI = 95	Calcarenite satura GSI = 95	Calcarenite satura GSI = 80
γ (kN/m ³)	15	15	15
E'_{50} (MPa)	600	300	300
ν'	0.3	0.3	0.3
c' (kPa)	165	110	80
ϕ' (°)	35	35	35
σ_t (kPa)	200	130	130
σ_c (kPa)	2000	1300	1300

Sezione verticale:
spostamenti verticali

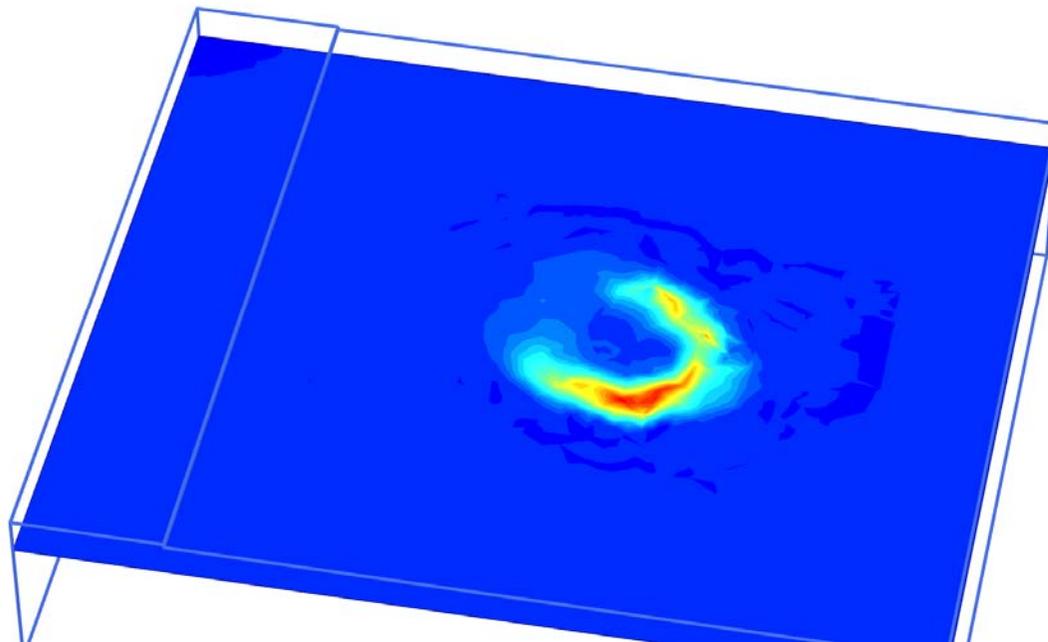


Deformazioni deviatoriche



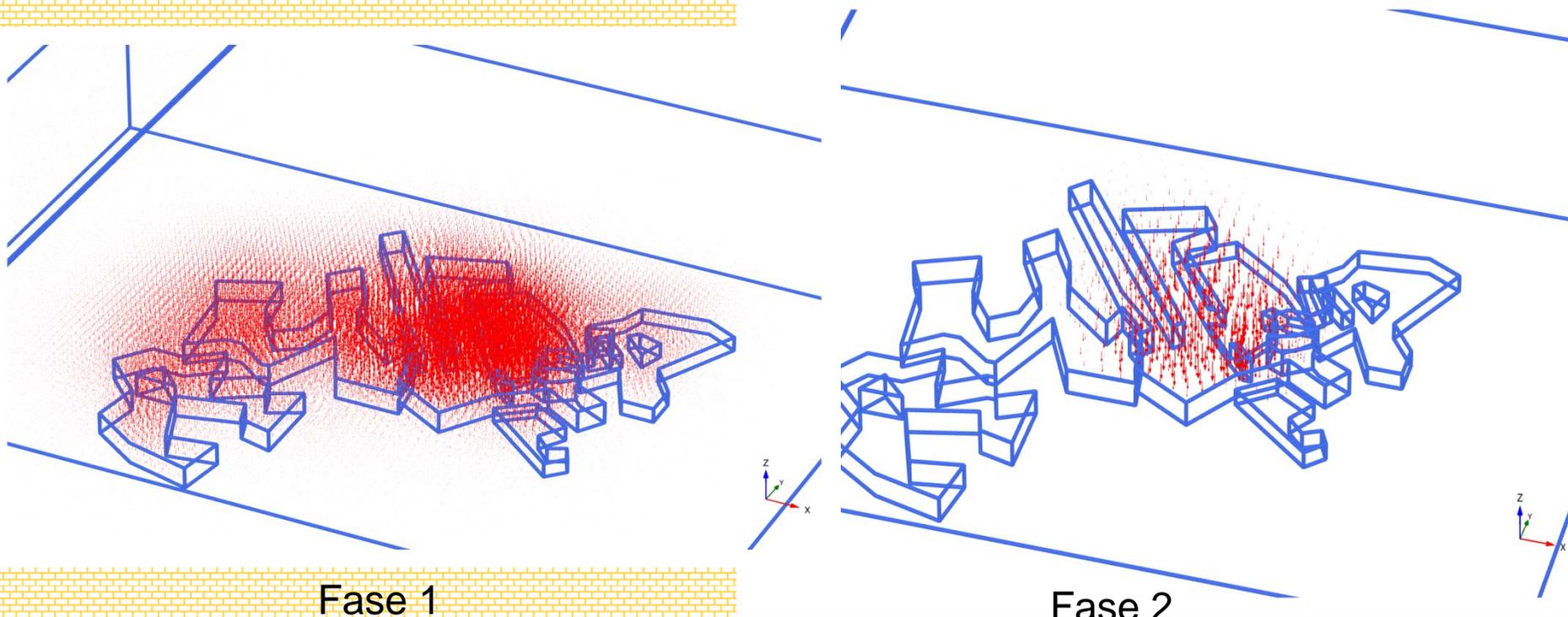
Piano orizzontale al di sopra della cava:
deformazioni deviatoriche

Fase 1



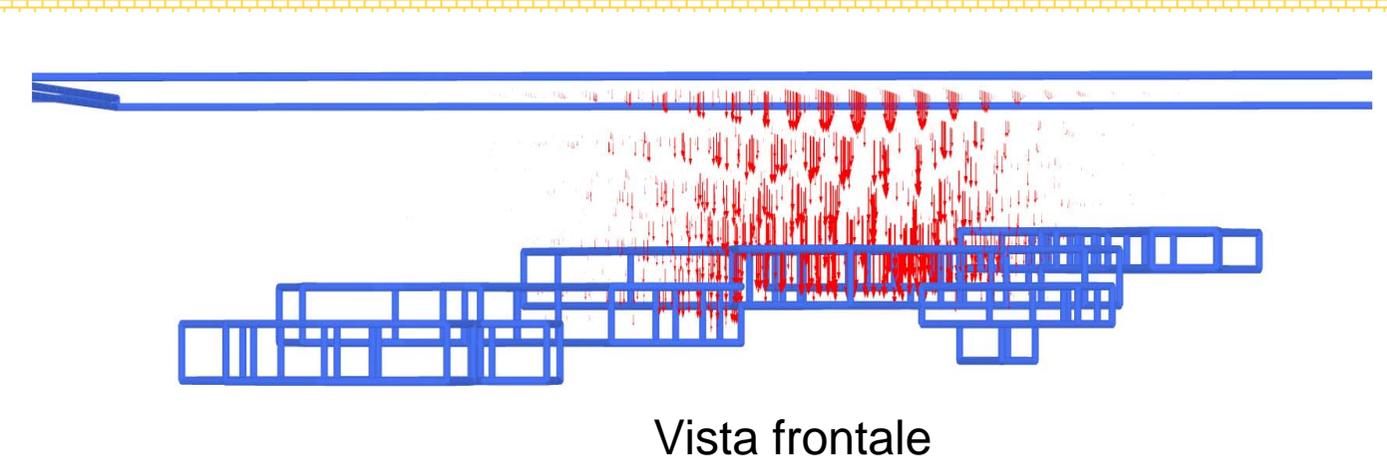
Fase 2

Vettori di spostamento in relazione alla geometria della cava

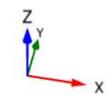
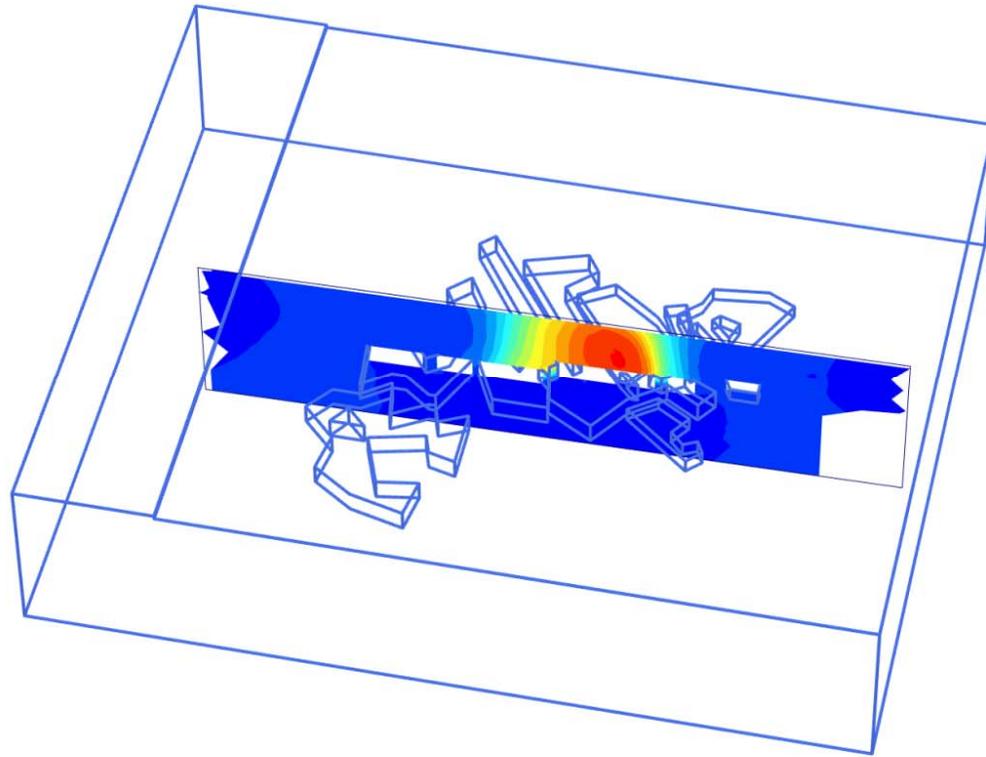


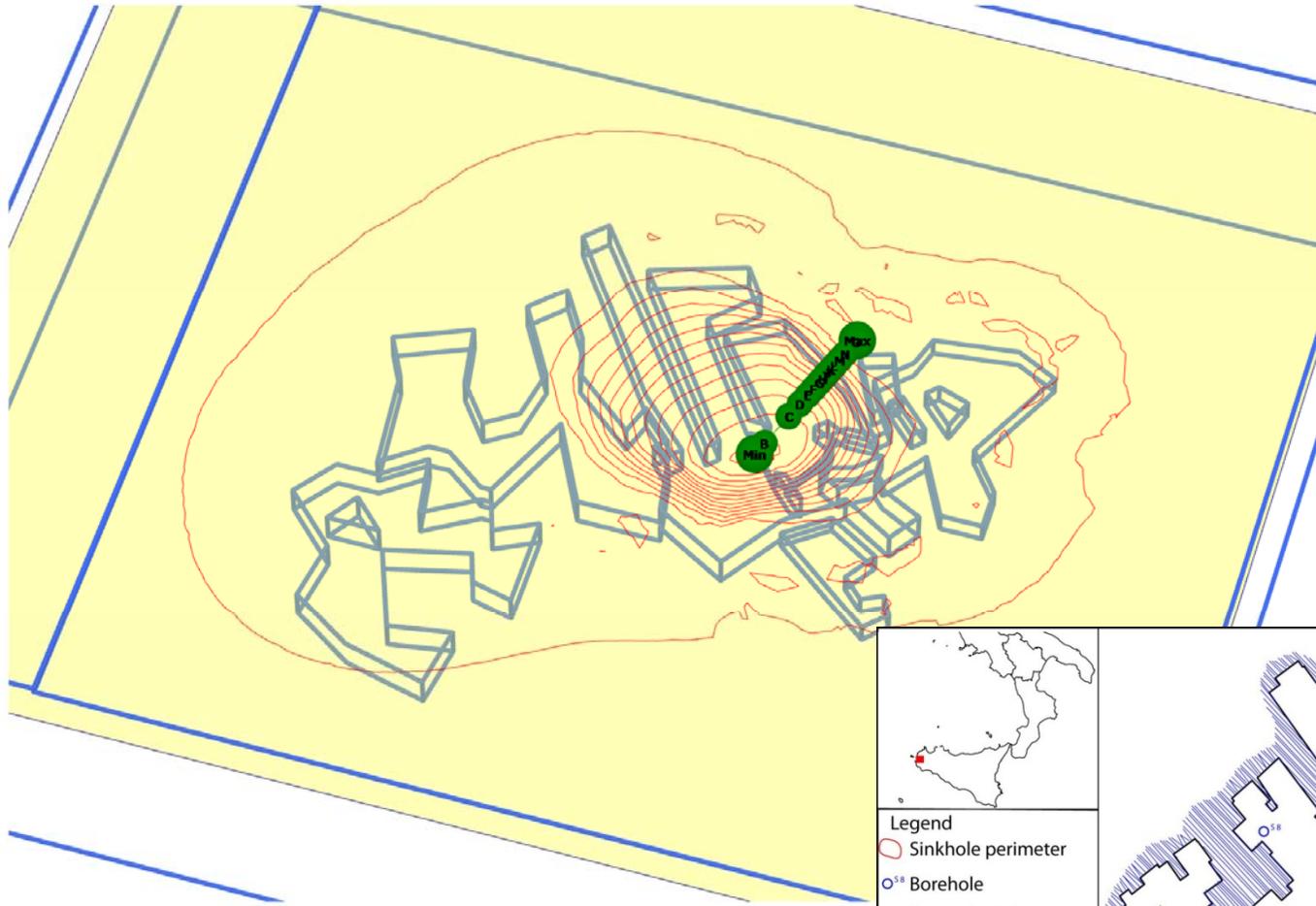
Fase 1

Fase 2

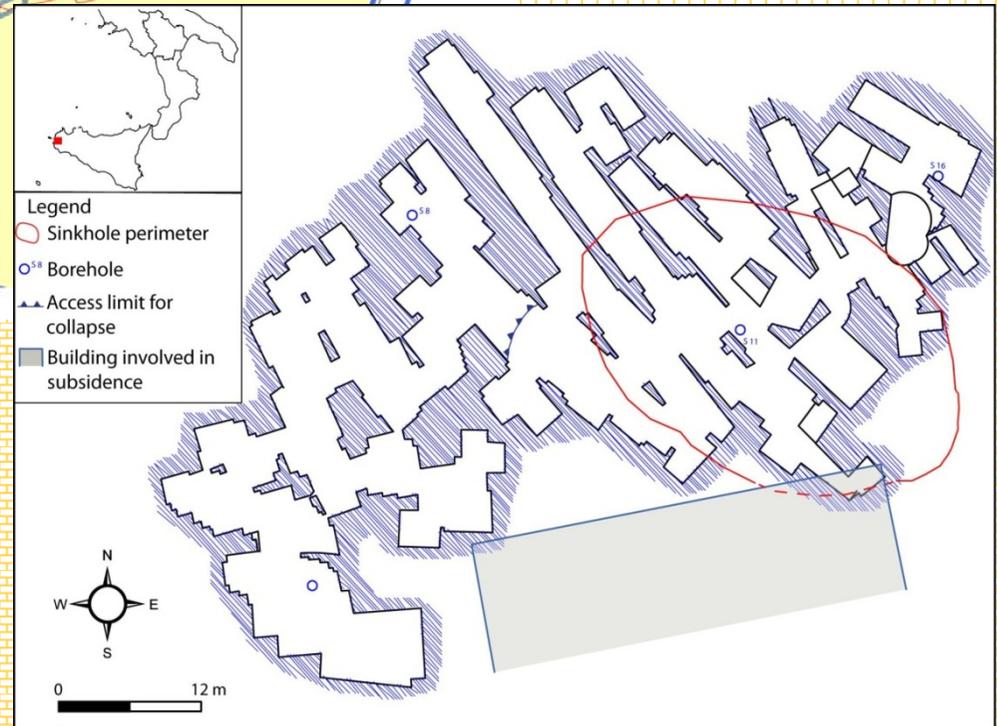


Vista frontale





Isolinee degli spostamenti verticali



Condizioni di stabilità risultanti dal calcolo con il metodo della «riduzione della resistenza» (Matsui & San 1992)

	Calcarenite asciutta GSI = 95	Calcarenite satura GSI = 95	Calcarenite satura GSI = 80
Fattore di stabilità F	1.6	1.3	1.2



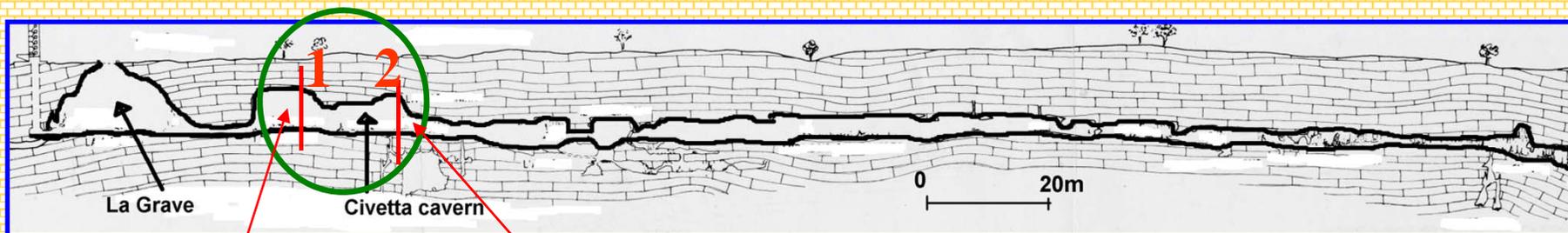
Influenza delle discontinuità esistenti nel controllo delle condizioni di stabilità dell'ammasso?



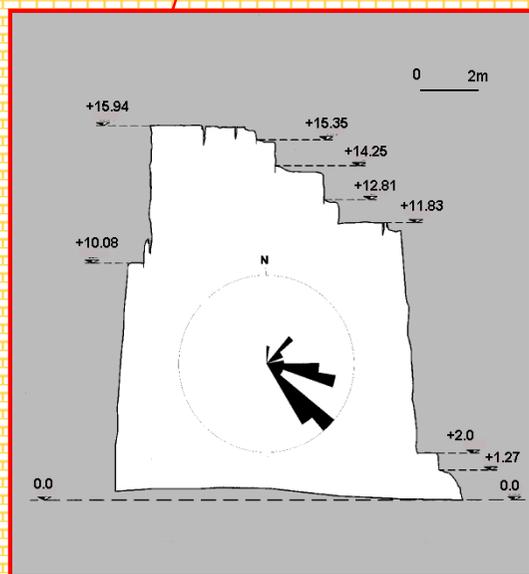
**MODELLI NUMERICI PER
MEZZI DISCONTINUI
(Analisi DEM)**

Grotta della Civetta (Castellana, BA)

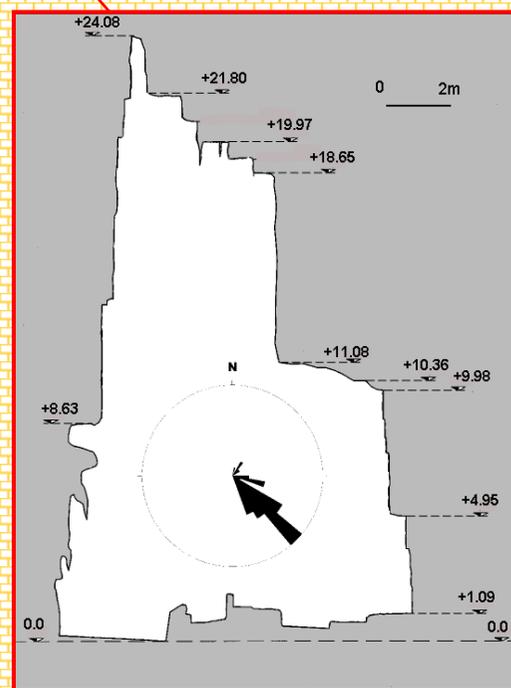
(Lollino et al. 2003)



Sezione longitudinale Grotte di Castellana



Sezione 1



Sezione 2

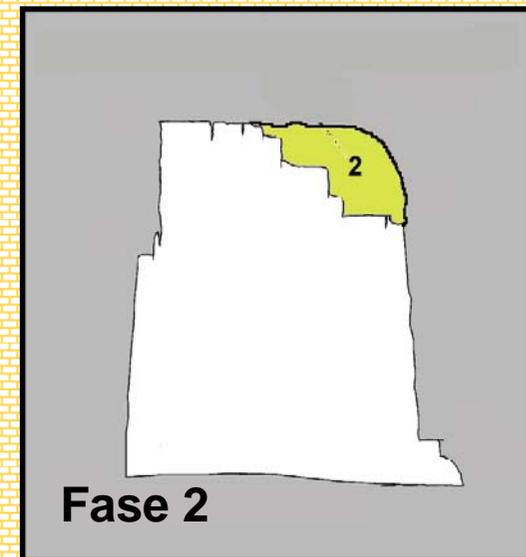
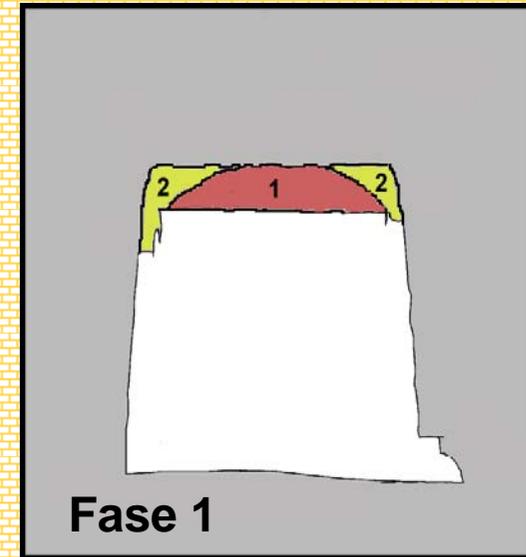
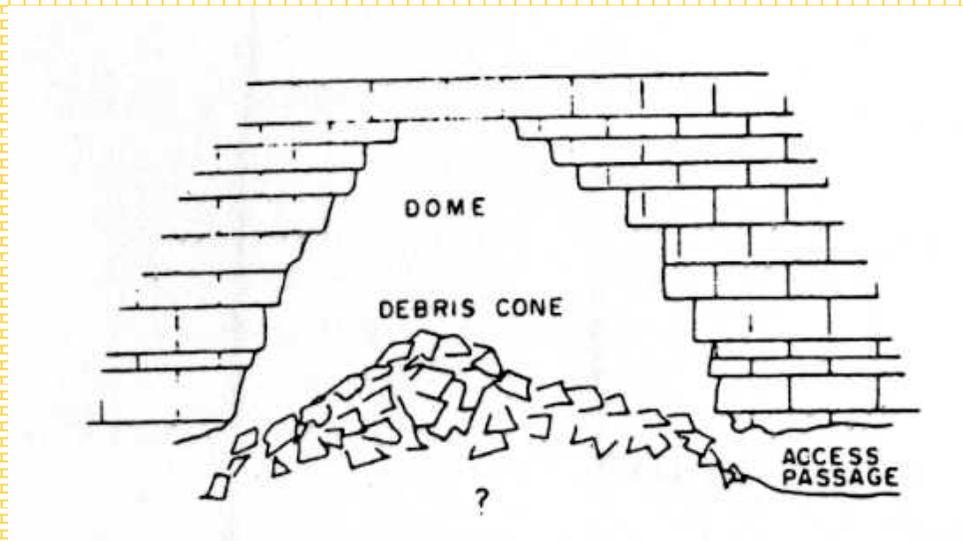
Ammasso carbonatico stratificato

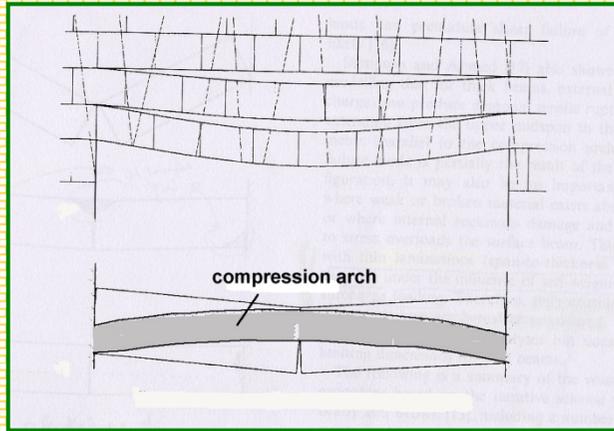
Collasso graduale di porzioni del tetto della grotta alternati a collassi di travi a sbalzo lungo le pareti

IPOTESI FENOMENOLOGICA

Occorrenza ciclica di 2 processi di collasso:

- collasso della volta controllato dai giunti di trazione (1)
- rottura di travi di roccia a sbalzo dalle pareti (2)





Meccanismo osservato:

Propagazione graduale di fratture attraverso gli strati orizzontali di roccia presenti lungo la volta



Collasso di blocchi dalla volta

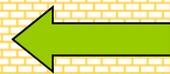


Evoluzione verso l'alto della cavità

Interpretazione del processo:

effetto della degradazione della resistenza a trazione nel tempo per effetto di umidità ed alterazione

Verifica
Analisi UDEC



Analisi numerica per lo studio delle condizioni di stabilità attuali e della evoluzione del fenomeno

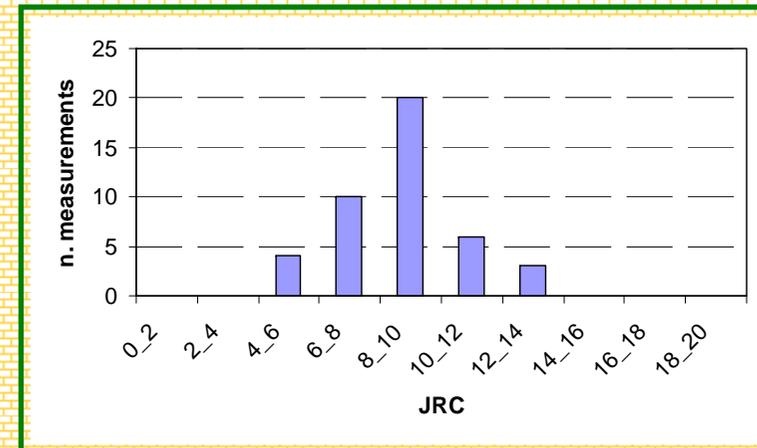
Proprietà meccaniche di roccia e giunti

γ (g/cm ³)	σ_c (MPa)	E (MPa)	ν	S_i (MPa)	ϕ' (°)	σ_t (MPa)
2.7	149	37000	0.3	15	38	4.8

JRC	JCS (MPa)	ϕ'_p (°)	ϕ'_r (°)
8-10	54	46	31

roccia

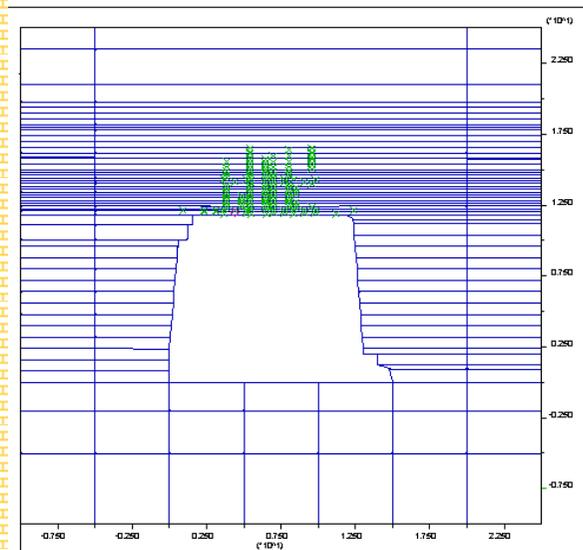
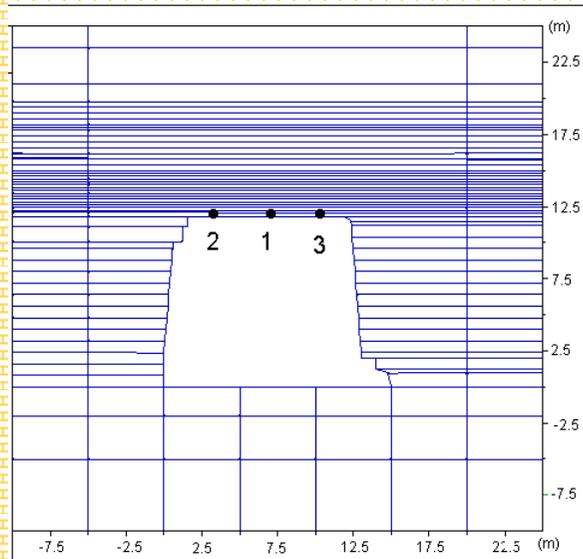
giunti



Modelli costitutivi adottati per roccia e giunti

- modello elastico – perfettamente plastico con criterio di resistenza Mohr-Coulomb e tension cut-off per la **roccia intatta**;
- criterio di rottura secondo Mohr-Coulomb con resistenza a trazione nulla per i **giunti**

Analisi UDEC

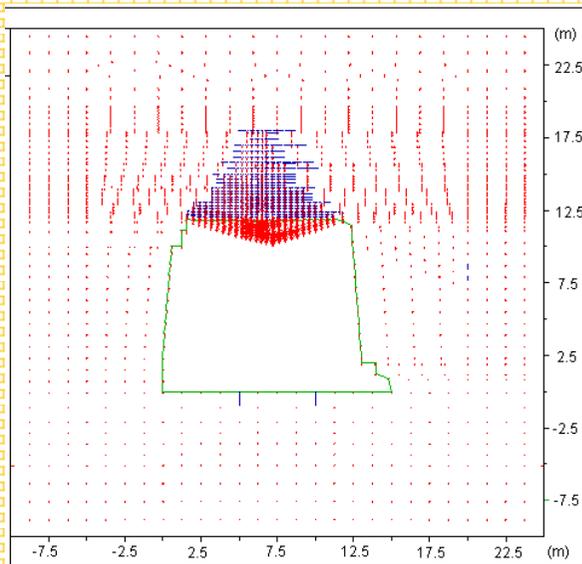
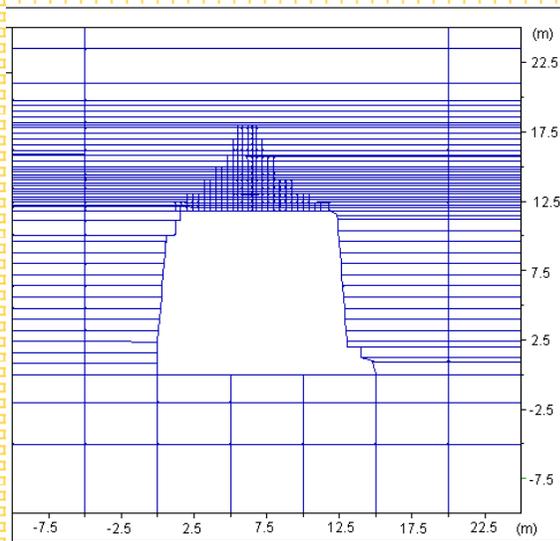


Rotture per trazione - fase 3

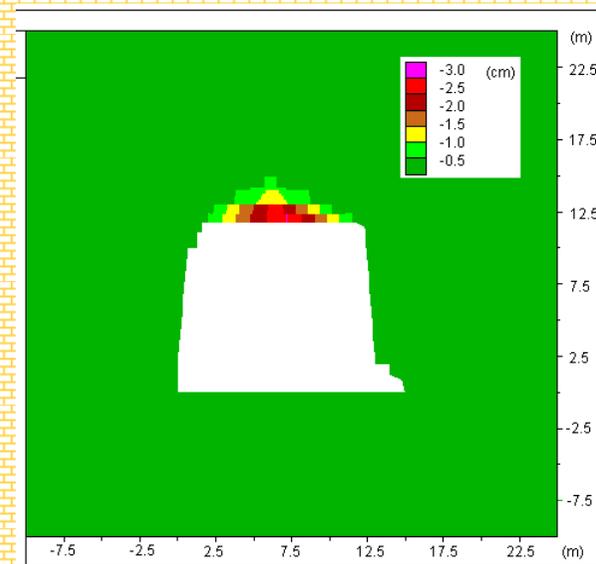
4 fasi di analisi:

1. Equilibrio elastico;
2. Assegnazione delle proprietà reali relative a materiali non alterati;
3. Riduzione graduale della resistenza a trazione nella zona sovrastante la cavità;
4. Analisi di un modello con nuovi giunti verticali nella zona della volta.

Analisi UDEC: risultati

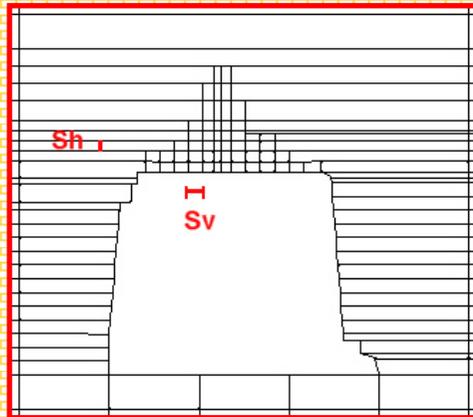


Vettori di spostamento e giunti con sforzo normale nullo – fase 4

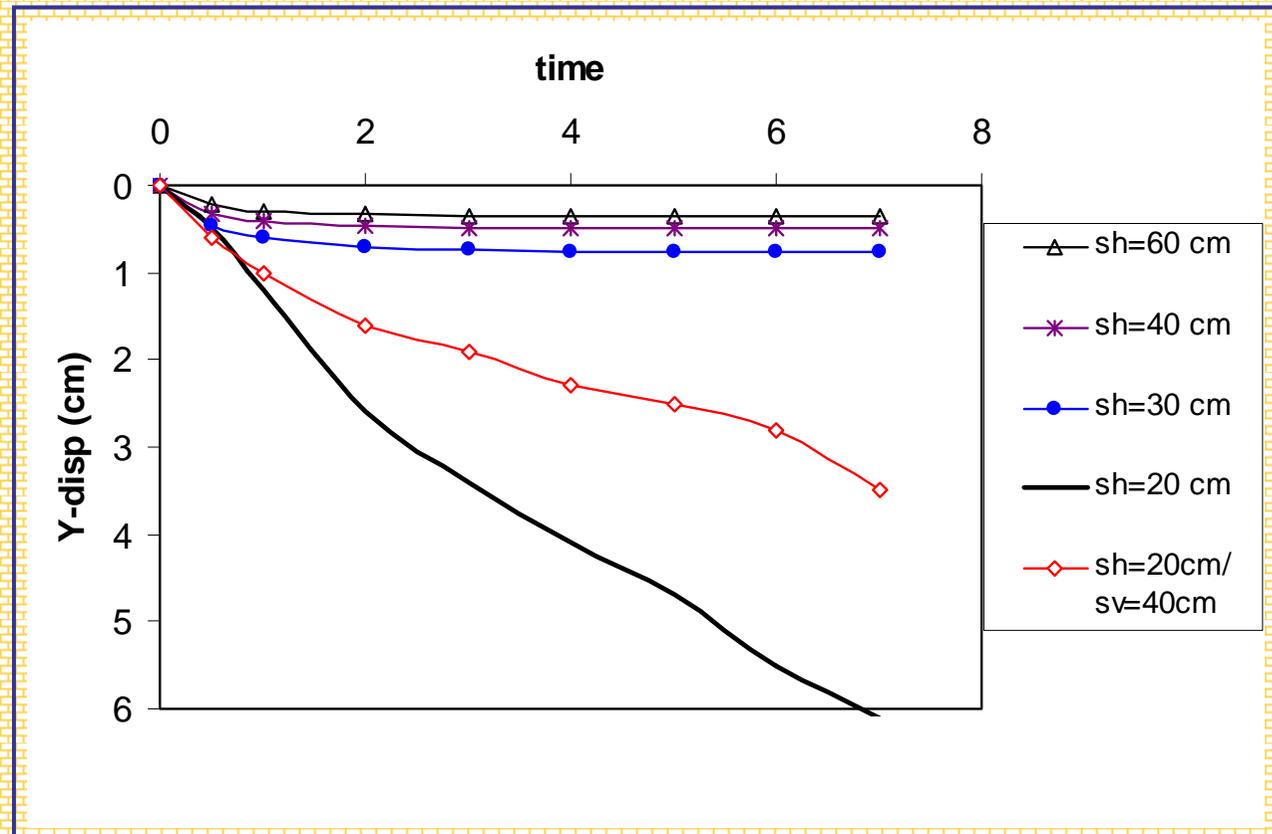


Isolinee degli spostamenti verticali – fase 4

Analisi UDEC: risultati

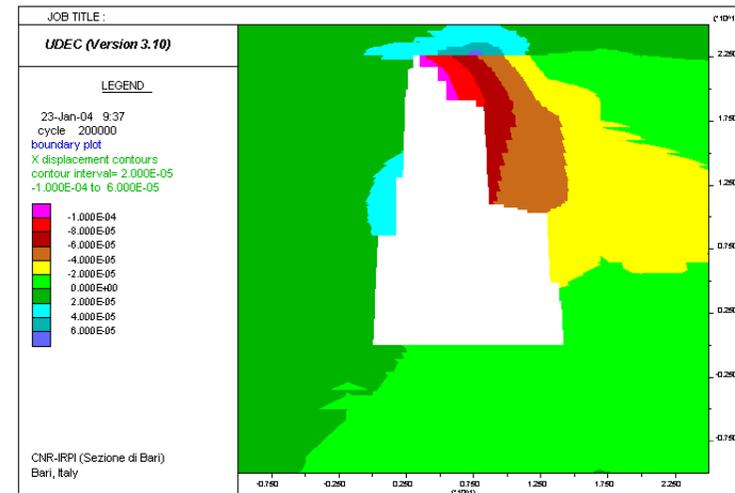
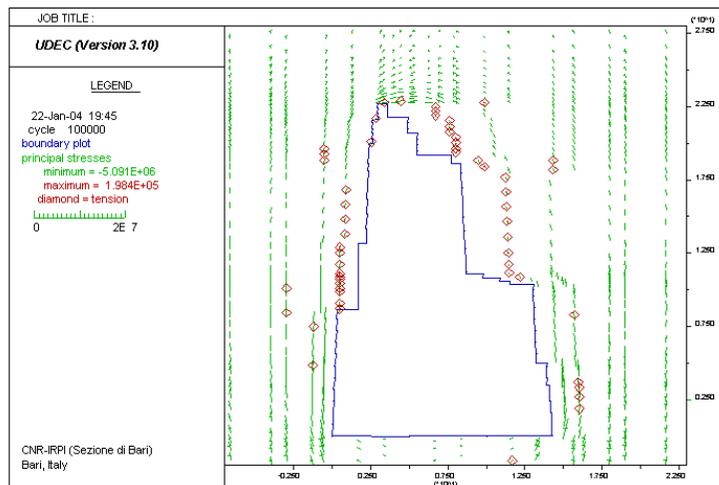
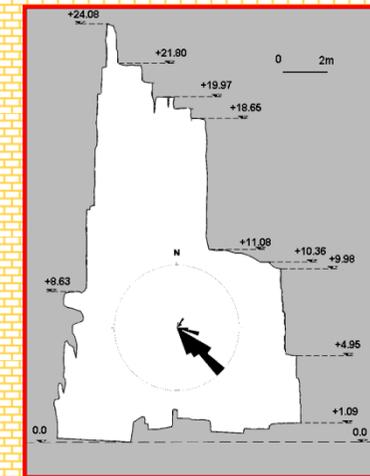
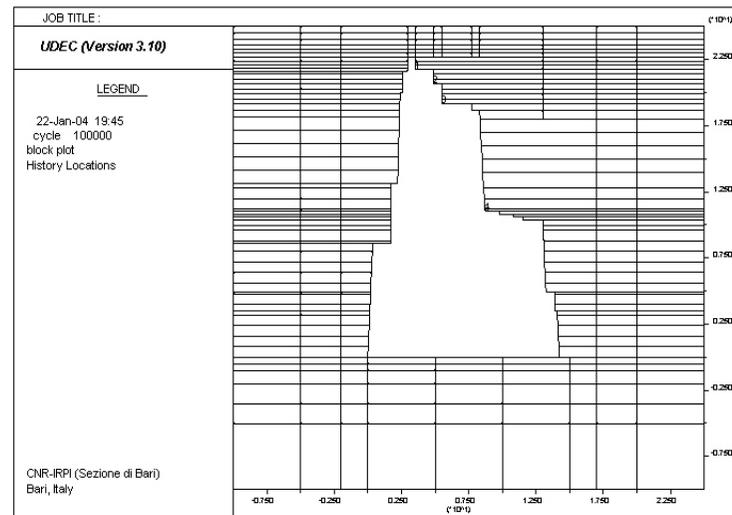


Analisi parametrica



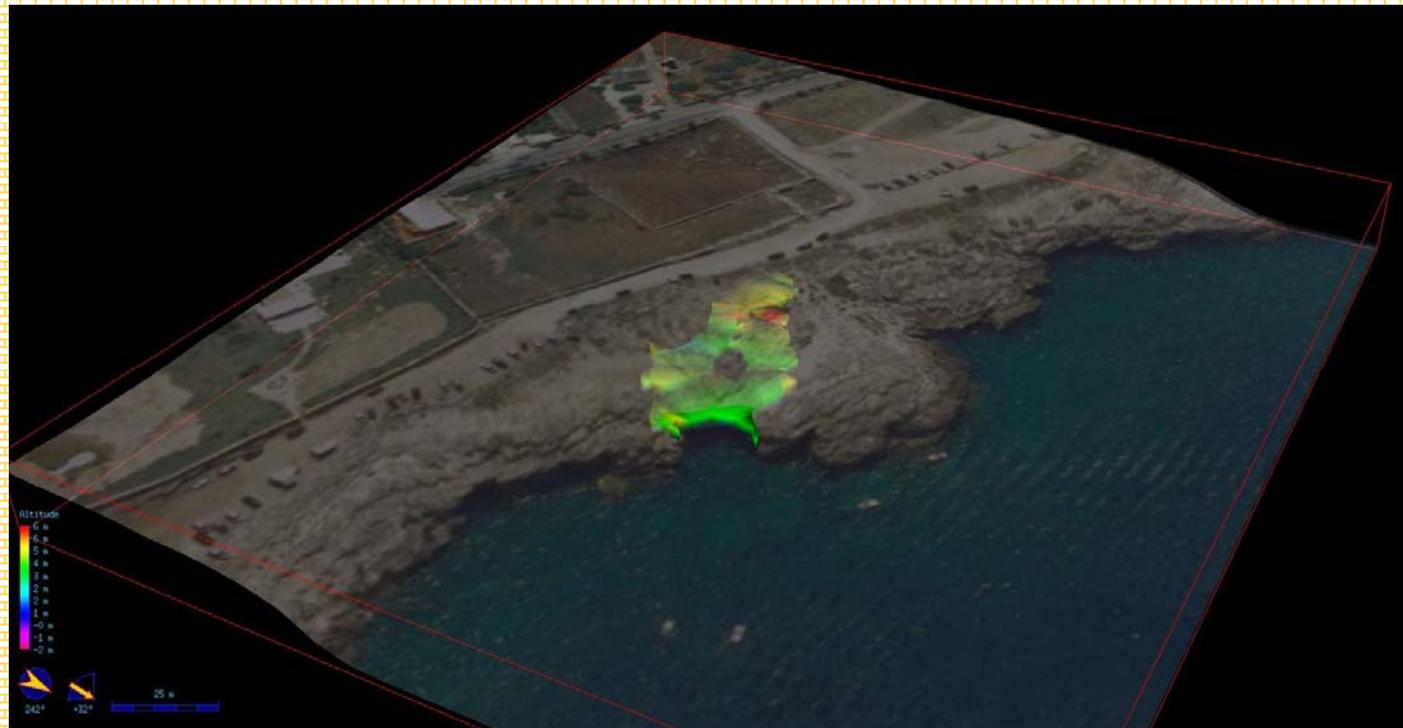
Inflessioni in mezzeria rispetto ai cicli di calcolo per modelli con diverse spaziatore dei piani di stratificazione

Sezione 2: studio delle condizioni di stabilità attuali



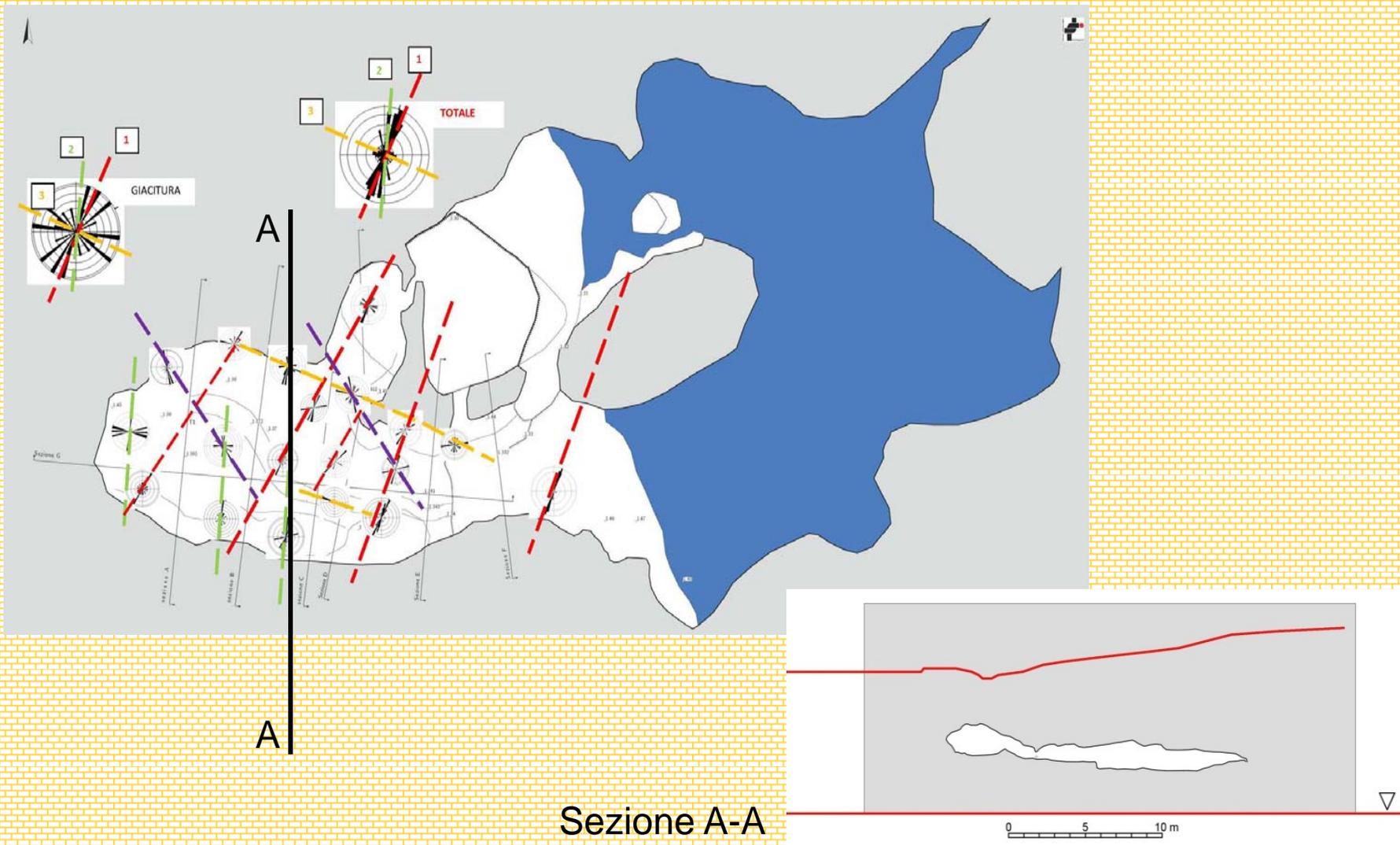
Grotta della Rondinella (Polignano a mare, BA)

(Lollino et al. 2013)



Analisi geo-strutturale

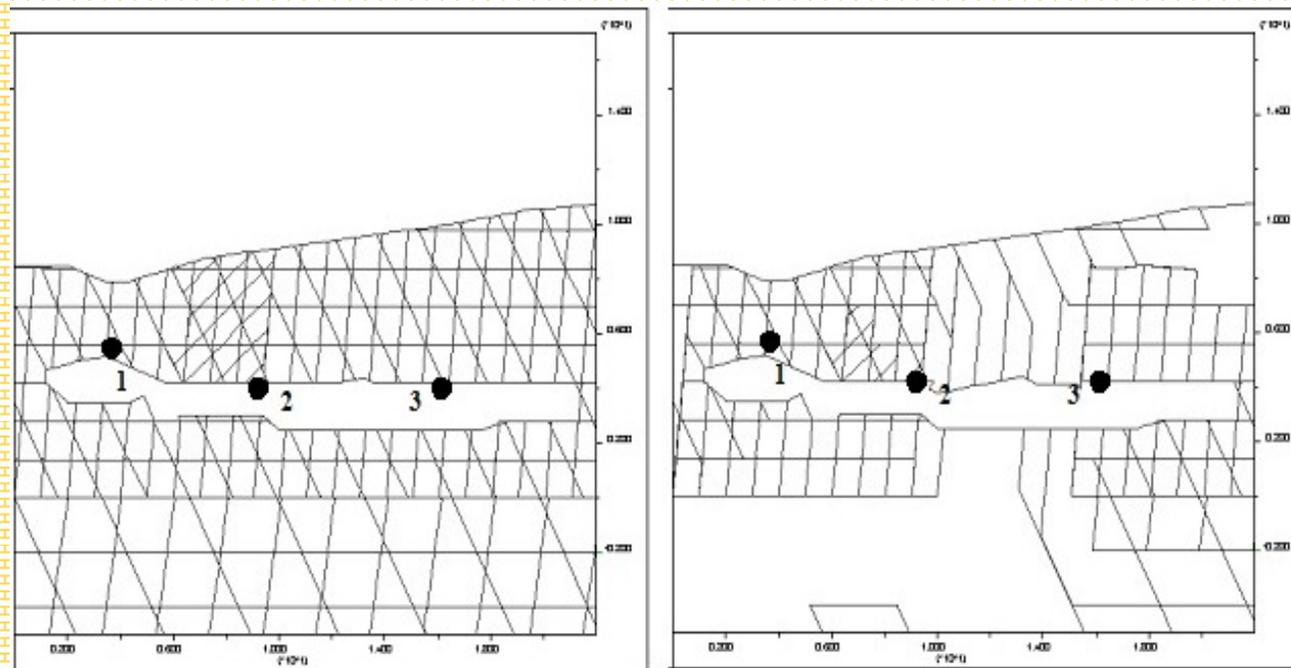
Identificazione delle principali famiglie di discontinuità



Famiglie di discontinuità simulate nel modello

- K1 ($\alpha = 82^\circ$, spacing = 2 m)
- K2 ($\alpha = 115^\circ$, spacing = 2.4 m)
- K3 ($\alpha = 45^\circ$, spacing = 0.8 m),
- S ($\alpha = 0^\circ$, spacing = 2.0 m)

Punti di monitoraggio 1, 2 e 3 per la valutazione della stabilità della volta



Block grid with infinitely persistent joints (left), and with non-persistent joints (right).

Surveying the carbonate rock mass and the breccia deposits in the Rondinella Cave by means of Schmidt hammer and Barton profilometer.

JRC = 6 – 14

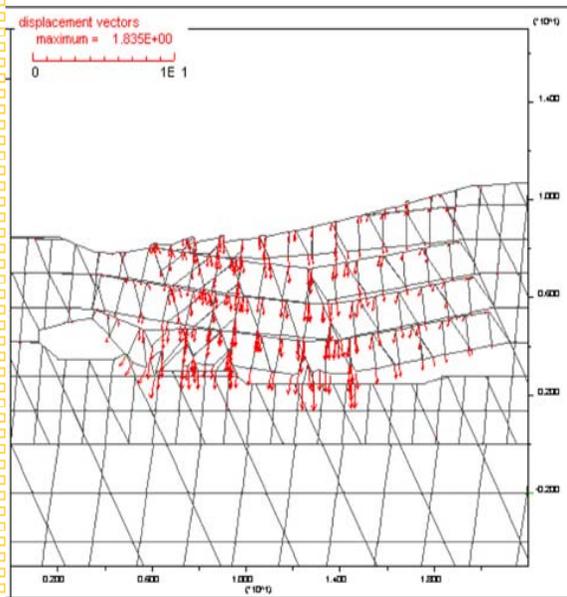
JCS = 60 – 80 MPa (giunti alterati)

JCS = 100 – 140 MPa (giunti non alterati)

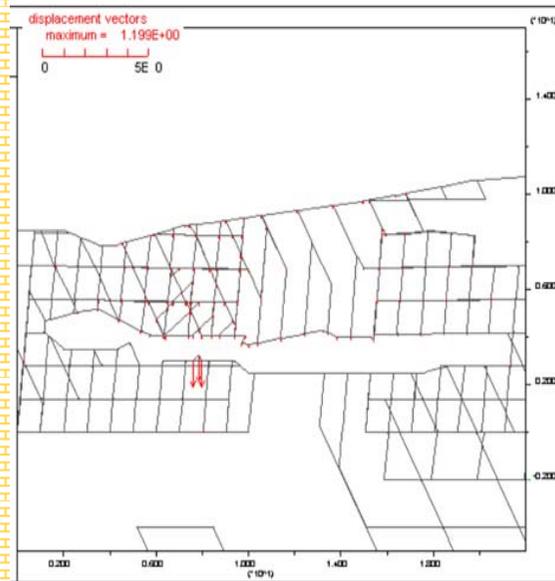
Joints behaviour according to a Coulomb law (null cohesion, friction angle 50°); Barton criterion, min values of JRC and JCS ($\phi_b = 35^\circ$). Intact rock: elastic-perfectly plastic constitutive model, Mohr-Coulomb strength envelope with parameters: $c' = 0.8$ MPa, $\phi' = 35^\circ$, $\sigma_t = 1$ MPa. Initial stress assigned by means of a gravity loading procedure.



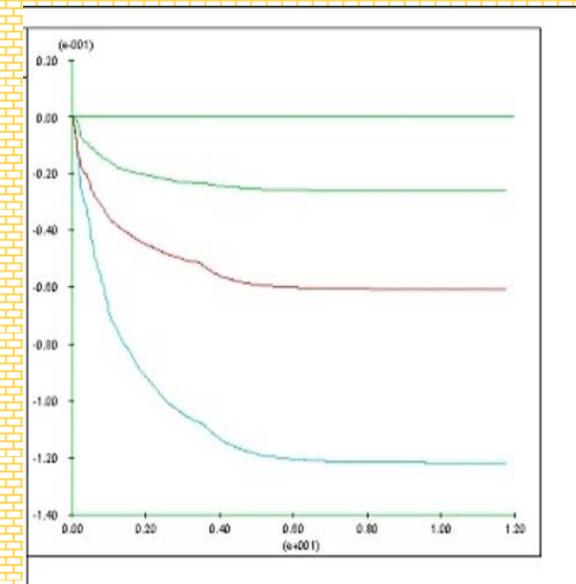
Risultati del modello DEM



Modello con giunti persistenti



Modello con giunti non persistenti



Curve di spostamento verticale rispetto ai cicli di calcolo (modello non persistente)

Confronto tra i vari metodi di analisi

I **metodi semplificati** sono caratterizzati da facilità ed immediatezza di applicazione, ma forniscono risultati che sono affetti da un grado significativo di approssimazione

I **metodi sofisticati** richiedono estrema accuratezza nella analisi e tempi di esecuzione lunghi, tuttavia forniscono risultati attendibili a condizione che i dati di ingresso siano affidabili



Punti critici

Necessità di:

- Maggiore accuratezza nelle procedure di simulazione dell'ammasso e delle condizioni al contorno
- Maggiore accuratezza nella caratterizzazione dei materiali (variabilità geologica, attendibilità delle prove per caratterizzare i materiali)

Approccio esaustivo nelle analisi di un problema di stabilità di volte di cavità sotterranee

Seguire diversi approcci

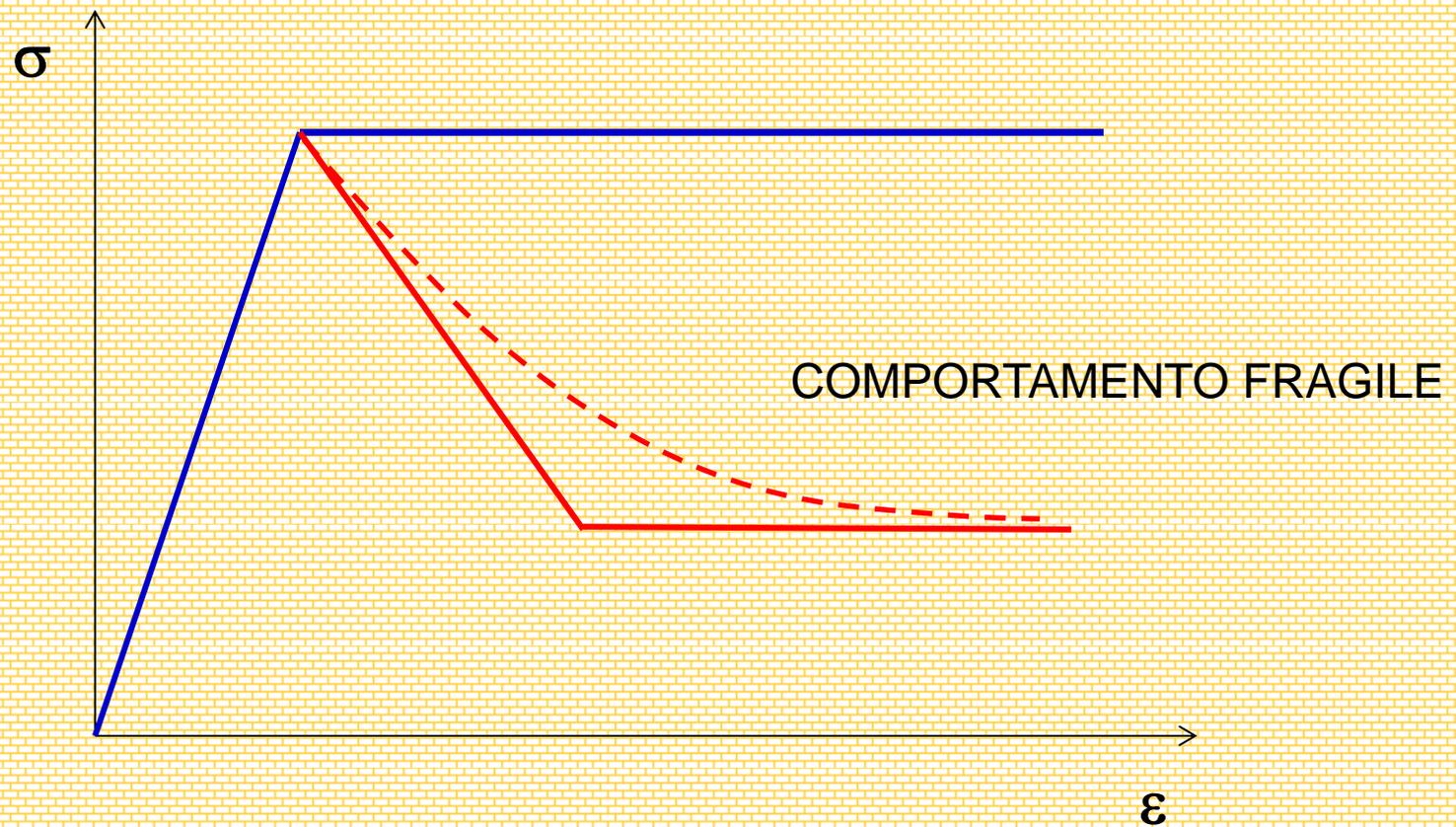
dal più semplice a quello più complesso e confrontare i vari risultati per avere una sensibilità circa la loro attendibilità

Auspicabile:

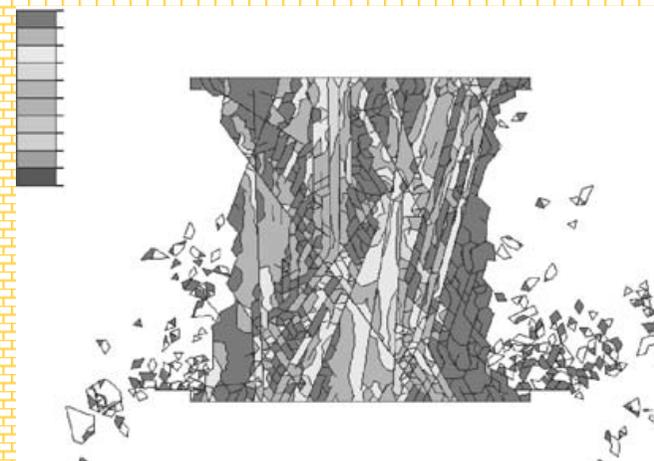
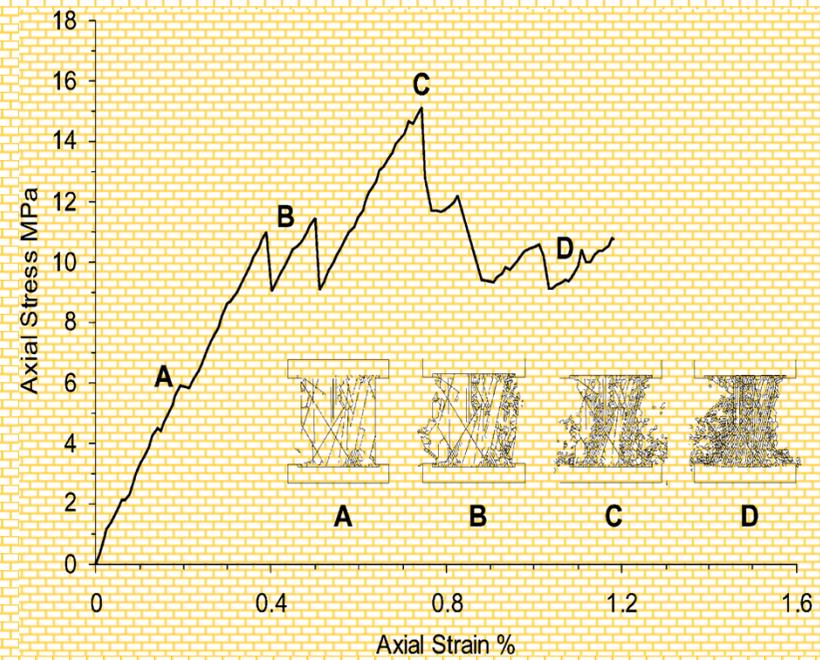
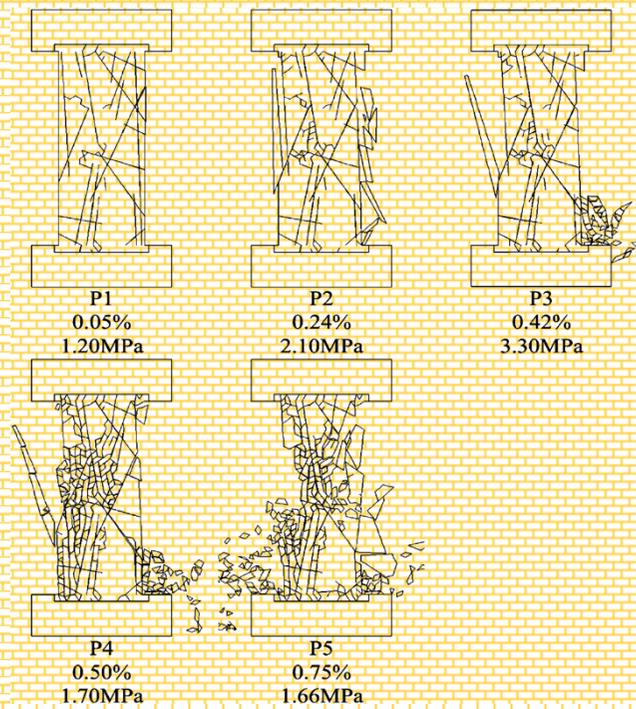
Piano di monitoraggio strutturale con acquisizione in continuo:
utile per avere un quadro realistico della evoluzione del sistema
cavità

Limite dei modelli costitutivi a plasticità perfetta:

- Non contemplano la caduta di resistenza dei materiali dopo il raggiungimento della rottura
- L'eventuale implementazione di modelli tipo 'softening' presentano rischi di stabilità della soluzione numerica

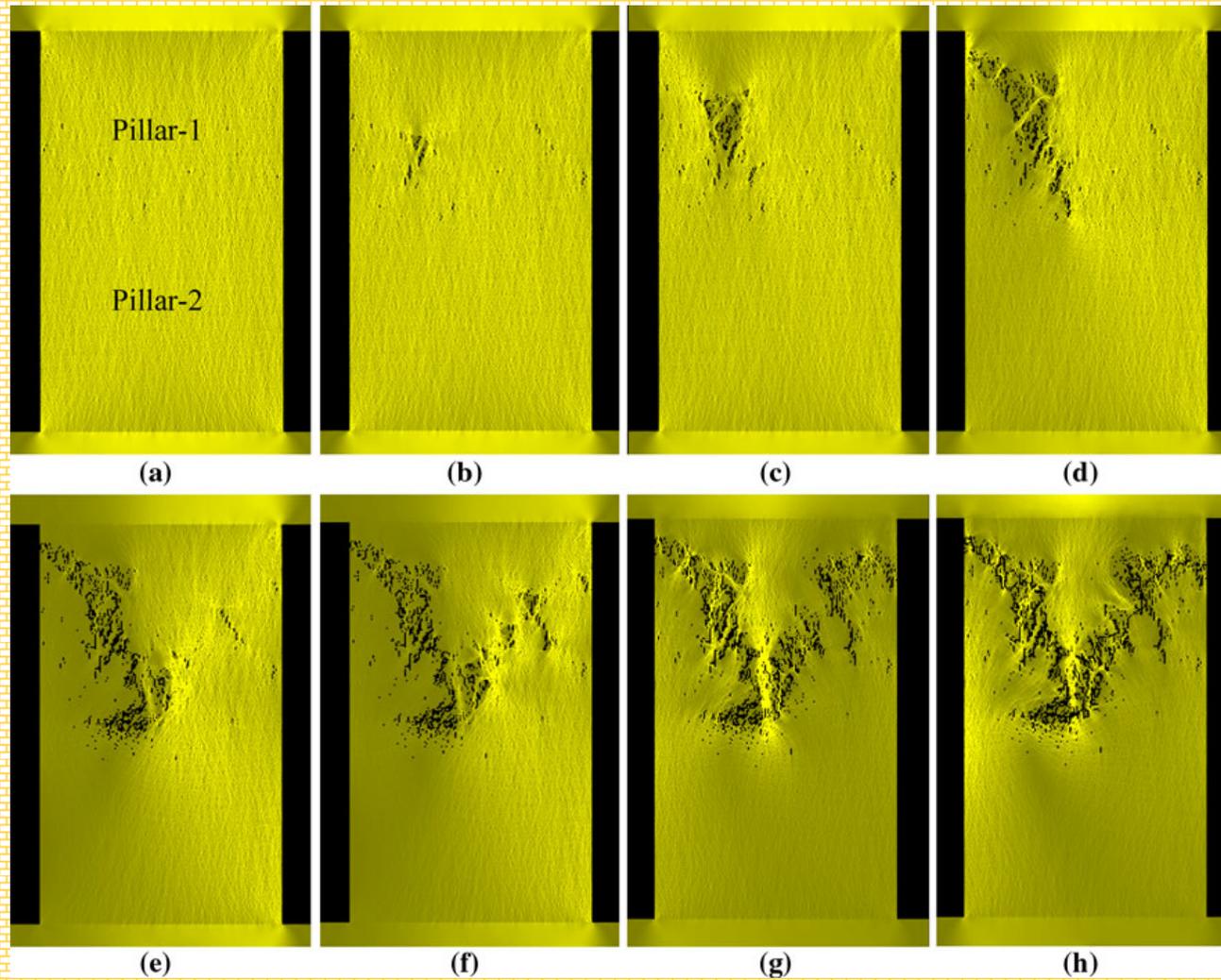


Prospettive di ricerca: applicazione di modelli ibridi FEM/DEM



da Pine et al. 2006

Prospettive di ricerca: applicazione di modelli di micromeccanica (RFPA)



da Wang et al. 2011