



*4° Corso SIIV di
Alta Formazione alla Ricerca*



***CARATTERISTICHE STRUTTURALI
DELLE PAVIMENTAZIONI
STRADALI E AEROPORTUALI***

Prof. Marco Pasetto

***UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
Facoltà di Ingegneria – DCT
ICAR 04/ STRADE, FERROVIE, AEROPORTI***



CARATTERISTICHE STRUTTURALI (PORTANZA)

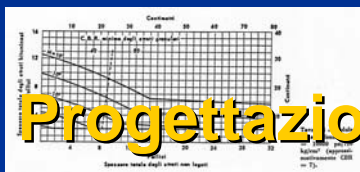


Attitudine della sovrastruttura a sopportare i carichi del traffico e la loro ripetizione nel tempo (CNR 125/88)



CARATTERISTICHE STRUTTURALI

1. Progettazione



2. Costruzione



3. Esercizio



4. Manutenzione





CARATTERISTICHE STRUTTURALI



CARATTERISTICHE FUNZIONALI

Regolarità
Aderenza
Rumorosità



CARATTERISTICHE STRUTTURALI





CARATTERISTICHE STRUTTURALI

Metodi di progettazione

Soluzioni costruttive (economia, sicurezza)

Materiali (tipologia, proprietà)

Monitoraggio climatico

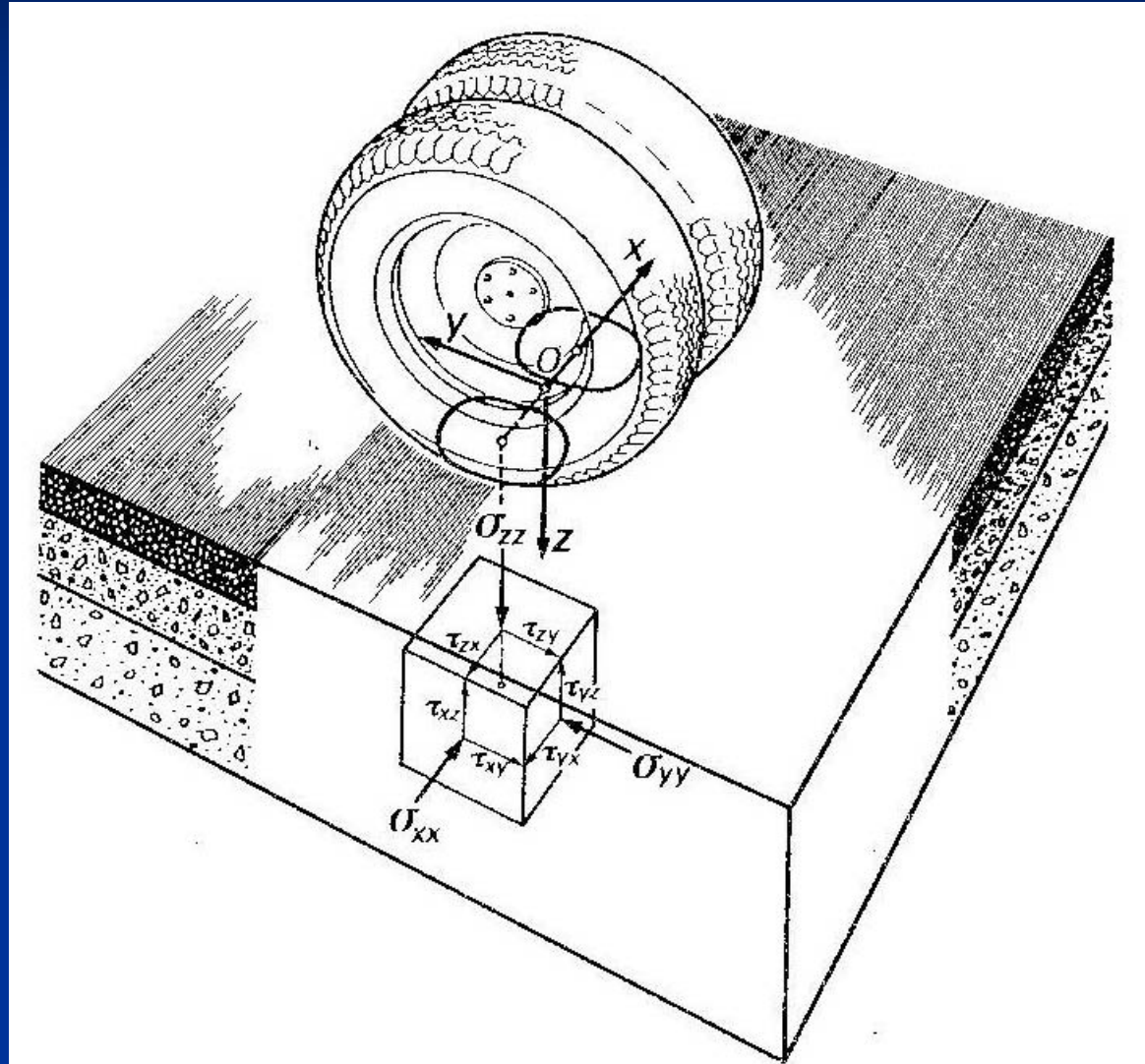
Parametrizzazione del traffico (stradale, aeroportuale)

Terotecnologia stradale (monitoraggio delle sovrastrutture, tecniche di manutenzione...)

Metodi di progettazione

- Metodi empirici, empirico/teorici (AASHTO Guide) – Si basano sull'osservazione diretta del comportamento in esercizio delle pavimentazioni reali/sperimentali.
- Metodi razionali (Modelli multistrato, analisi FEM)
Consentono di analizzare schemi strutturali complessi, utilizzando idonei modelli (*implementazione delle leggi costitutive*) per descrivere il comportamento dei materiali e di pervenire alla determinazione dello stato tensionale e deformativo indotto dalle sollecitazioni meccaniche e ambientali.
E' possibile "valutare" la resistenza alla fatica e alle deformazioni permanenti (ormaiamento) della pavimentazione, sottoposta alle azioni cicliche e combinate dei carichi di traffico e dei gradienti termici.

Metodi di progettazione



Metodi di progettazione

ATTENZIONE!

Non tutti i metodi sono ugualmente efficaci e applicabili alla generica situazione: deve essere fatta un'analisi critica che porti a individuare la procedura di calcolo/verifica più idonea.

Es. Il catalogo C.N.R. (B.U. n. 178/1995) non prevede materiali diversi da quelli "tradizionali".

Es. AASHTO Guide e Metodo Bucchi non prevedono coefficienti di equivalenza per materiali innovativi.

Metodi di progettazione

Es. mePADS (mechanistic Pavement Analysis and Design Software, CSIR Transportek, ZA), sofisticato ma...

mePADS - B-B-E7a.mpd

File Help Tools

Pavement Structure | Loads and Evaluation Points | Design Parameters | Pavement Life | Contour Plot | Profile Plot | Calculation Table

Number of Layers: 5 | Number of Phases: 2 | Default input: On

Phase 1

Material	Thickness	E-Modulus	Poisson's Ratio
AG	30	3000	0.44
BC	90	5000	0.44
C4	200	1500	0.35
Soil	150	120	0.35
Soil	1000	70	0.35

Material	E-Modulus	Poisson's Ratio
AG	3000	0.44
BC	5000	0.44
EG6	200	0.35
Soil	120	0.35
AC	70	0.35

Climatic Region: Dry | Terminal rut: 20 mm

Road Category: B | Design Traffic class: ES3

Technical support: Hechter Theyse (email: htheyse@csir.co.za), Marshall Muthen (email: mmuthen@csir.co.za)

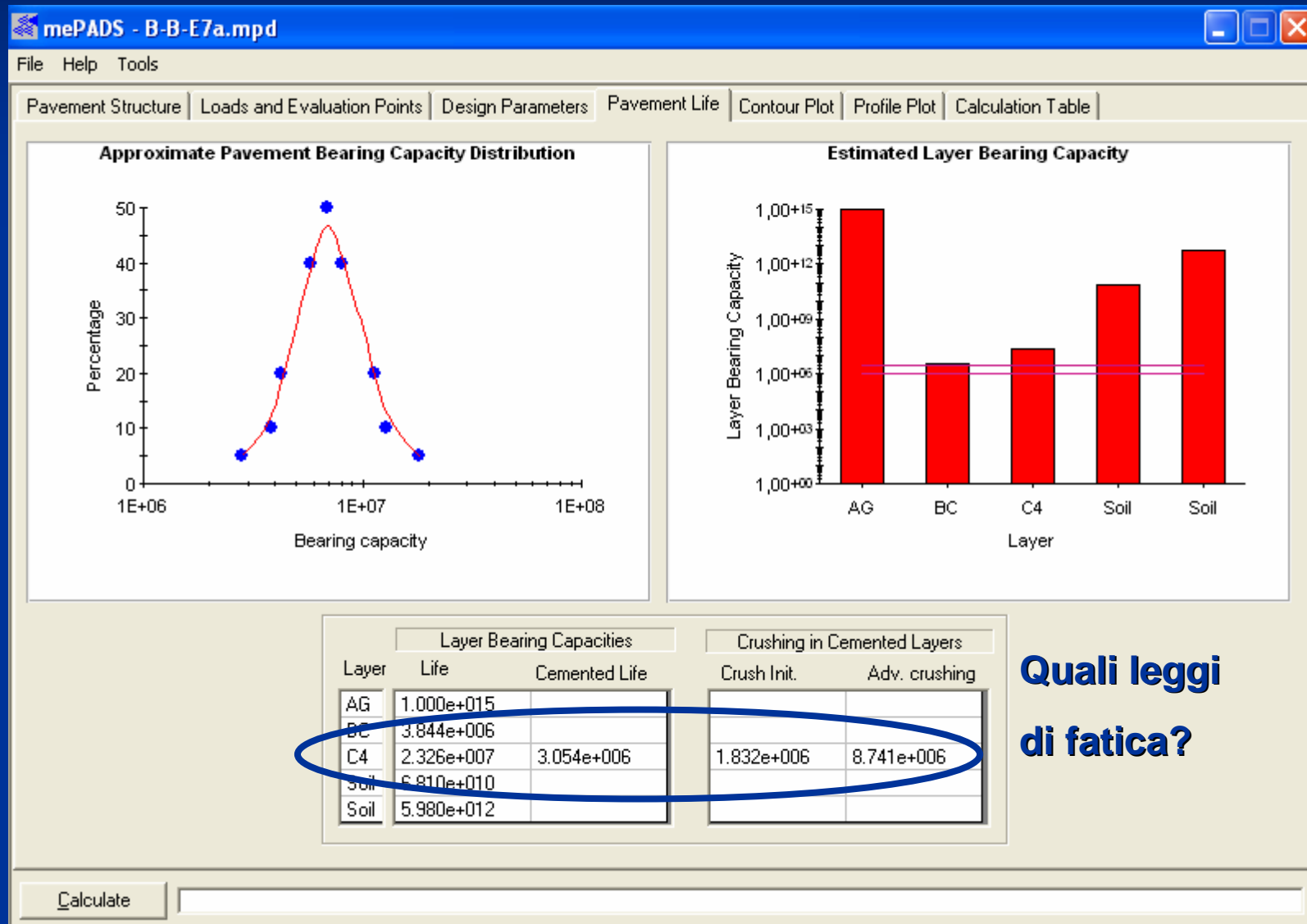
Software support: Johan du Toit (email: jadutoit@csir.co.za)

Calculate

Quale l'origine dei parametri?

Metodi di progettazione

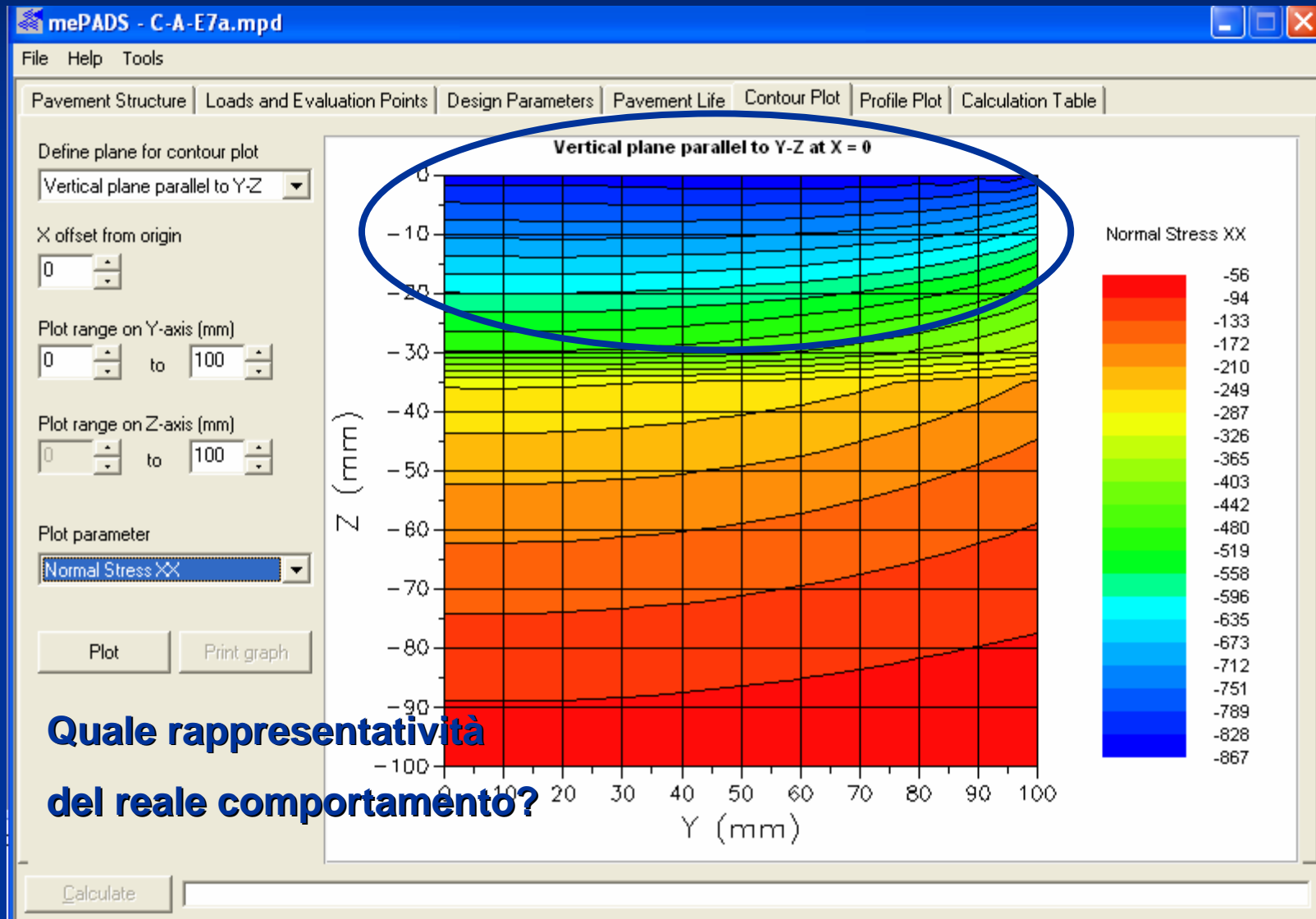
Es. mePADS (2)



Quali leggi
di fatica?

Metodi di progettazione

Es. mePADS (3)





Alcune ulteriori riflessioni sulla progettazione (cfr. SIIV 2003)

- Utilizzo della sperimentazione per calibrare il modello e verificare la teoria.
- Considerazione dell'aleatorietà di taluni parametri di calcolo.
- Individuazione di leggi di densità di probabilità per definire le variabili progettuali.
- Introduzione del concetto di affidabilità (probabilità che un sistema funzioni correttamente per fissate condizioni di impiego e per un intervallo temporale prestabilito).
- Ottenimento di risultati "spendibili".

**METODOLOGIA DI
SVILUPPO MODELLO
COSTITUTIVO
GENERALIZZATO**



**MODELLAZIONE
COSTITUTIVA**



**INDAGINE
SPERIMENTALE DI
LABORATORIO**

**FORMULAZIONE
DEL MODELLO
COSTITUTIVO**

TEST ad "HOC"



CALIBRAZIONE

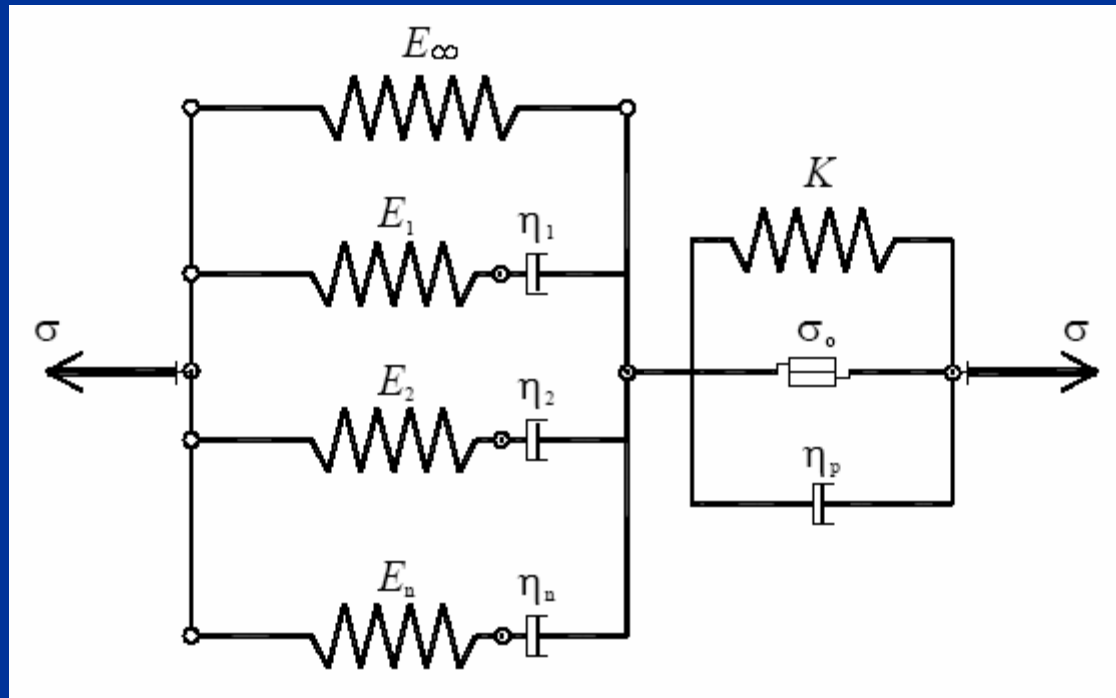
**TEST
"PRESTAZIONALI"**



VALIDAZIONE

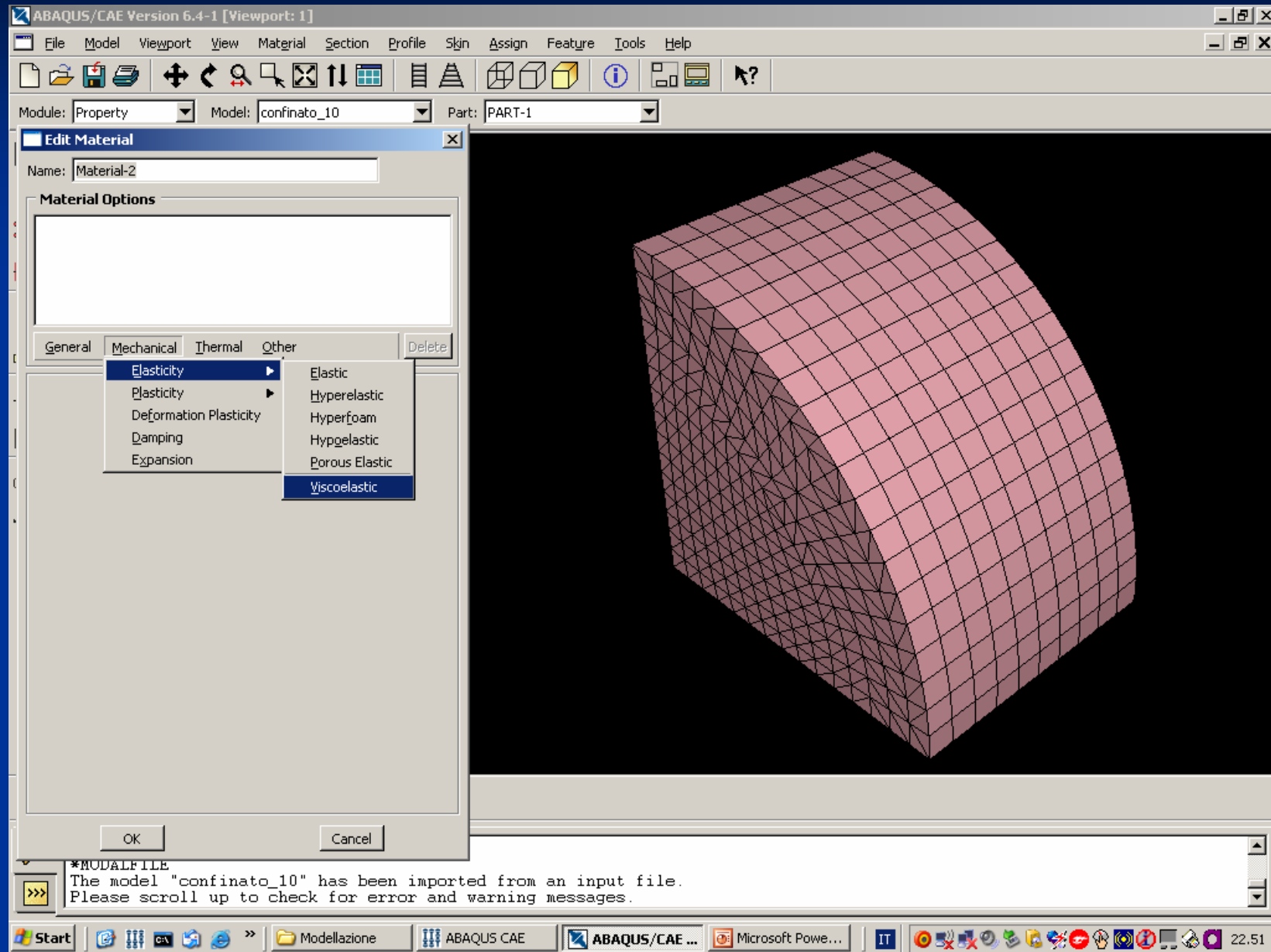
IL CASO DELLE MISCELE BITUMINOSE: Le Leggi Costitutive

Modellazione monodimensionale (EL/VEL/[VEP])
Modelli Micromeccanici

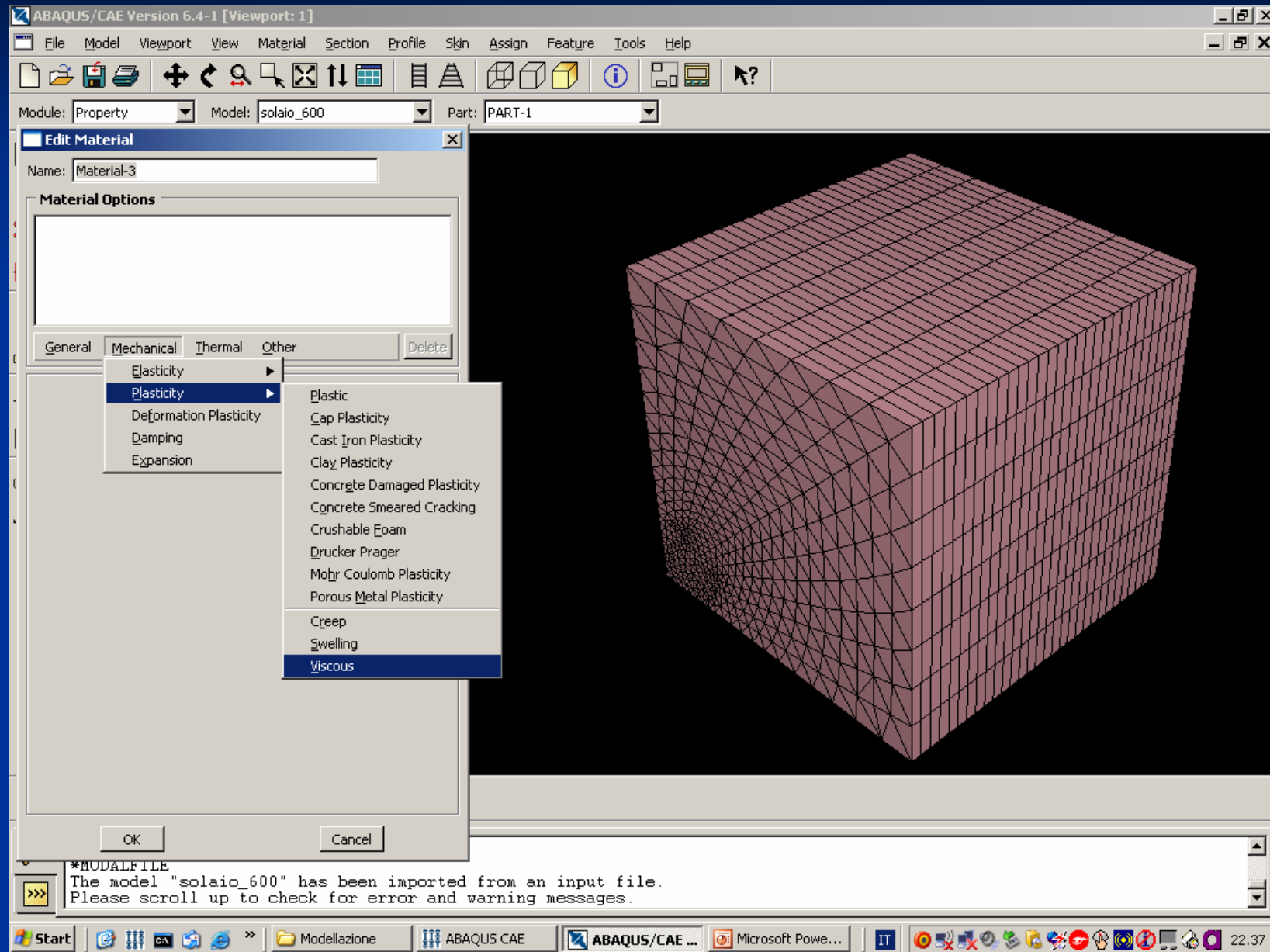


Ma per un'analisi tridimensionale ...

Modellazione FEM VISCO-ELASTICA



Modellazione FEM VISCO-PLASTICA



Formulazione **Energetica** del Modello Visco-Elastico (VEL)

Energia libera di
Helmholtz

$$\psi(\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{q}_i) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{D}^0 : \boldsymbol{\varepsilon} - \sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i : \boldsymbol{\varepsilon}$$

Disuguaglianza dissipativa di
Clausius-Duhem

$$\boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\psi} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{\sigma} = \frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}$$

Evoluzione dello
stato tensionale

$$\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{q}_i; t) = \boldsymbol{\sigma}^0(\boldsymbol{\varepsilon}; t) - \sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i(t)$$
$$\boldsymbol{\sigma}^0(\boldsymbol{\varepsilon}; t) = \mathbf{D}^0 \boldsymbol{\varepsilon}(t)$$

Legge di evoluzione
delle variabili interne

$$\mathbf{q}_i(t) = \frac{\gamma_i}{\tau_i} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t-s)}{\tau_i}\right] \boldsymbol{\sigma}^0(s) ds$$

Modello Visco-Elasto-Plastico (VEP)

Introduzione del
comportamento Plastico

$$\psi(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}^p, \mathbf{q}_i) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^{ve} : \mathbf{D}^0 : \boldsymbol{\varepsilon}^{ve} - \sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i : \boldsymbol{\varepsilon}^{ve}$$
$$\boldsymbol{\varepsilon}^{ve} = \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p$$

Introduzione del criterio
di snervamento

$$\phi(\boldsymbol{\sigma}, \lambda) = \pi(\boldsymbol{\sigma}) - \sigma_y(\lambda) \leq 0$$

$$\pi(\boldsymbol{\sigma}) = (\boldsymbol{\sigma}^0)_{VM}$$

$$\sigma_y = \sigma_y^0 + K\lambda$$

Modello Visco-Elasto-Plastico (VEP)

$$\boldsymbol{\varepsilon}^p = \lambda \mathbf{m}$$

$$\phi \dot{\lambda} = 0, \quad \dot{\phi} \dot{\lambda} = 0$$

$$\mathbf{m} = \frac{\partial \pi}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$$



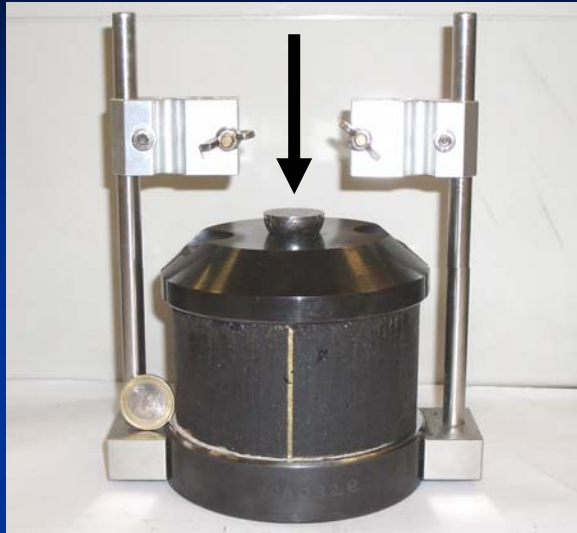
$$\dot{\lambda} = \left[\frac{1 - \mathbf{m} : \mathbf{D}_0 : \mathbf{m}}{\mathbf{m} : \mathbf{D}_0 : \mathbf{m} + K} \right]^{-1} \frac{\mathbf{m} : \mathbf{D}_0 : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{ve}}}{\mathbf{m} : \mathbf{D}_0 : \mathbf{m} + K}$$

Formulazione
visco-elasto-plastica dello
stato tenso-deformativo

$$\mathbf{D}_{\text{ep}} = \left[\mathbf{D}_0 - \frac{(\mathbf{D}_0 : \mathbf{m}) \otimes (\mathbf{m} : \mathbf{D}_0)}{\mathbf{m} : \mathbf{D}_0 : \mathbf{m} + K} \right]$$

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = \int_{-\infty}^t \mathbf{D}_{\text{ep}} \boldsymbol{\varepsilon} ds - \sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i(t)$$

$$\mathbf{q}_i(t) = \frac{\gamma_i}{\tau_i} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t-s)}{\tau_i}\right] \boldsymbol{\sigma}^0(s) ds$$

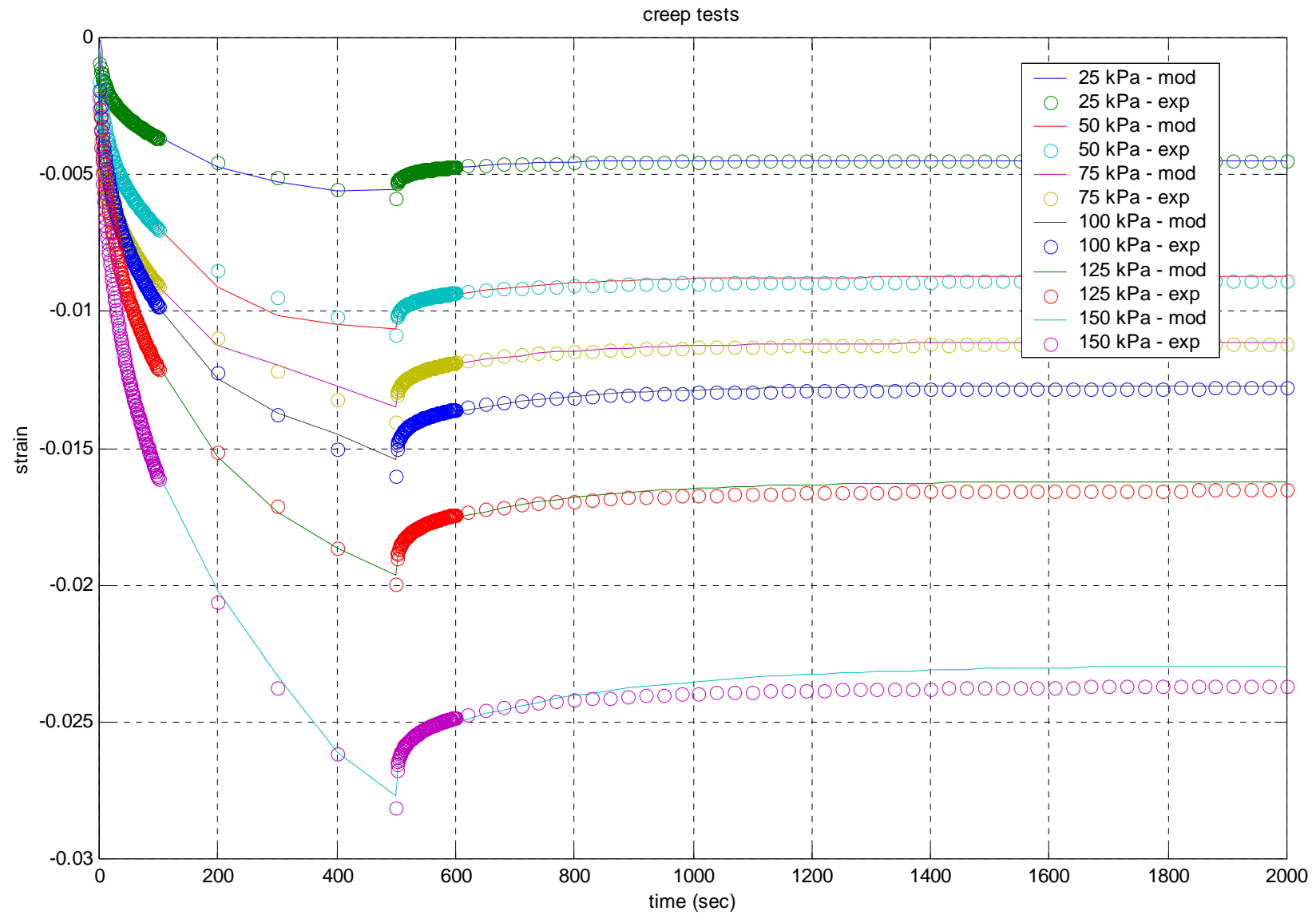


CALIBRAZIONE

CREEP STATICO **NON CONFINATO**

- Tempo di carico: 500 s
- Tempo di scarico: 1500 s
- Geometria dei Provini: $\Phi = 100\text{mm}$, $H = 60\text{mm}$
- Temperatura di prova: 40°C, 20°C, 10°C, 5°C
- Tensione di carico: 25kPa, 50kPa, 75kPa,
100kPa, 125kPa, 150kPa

CALIBRAZIONE



Modello Visco-Elasto-Plastico (VEP)

Parametri costitutivi	
E^0 (MPa)	ELASTICITA'
ε_y^0	PLASTICITA'
K (MPa)	
γ_1	VISCOSITA'
τ_1 (sec)	
γ_2	
τ_2 (sec)	
γ_3	
τ_3 (sec)	
γ_4	
τ_4 (sec)	

VALIDAZIONE

CREEP STATICO

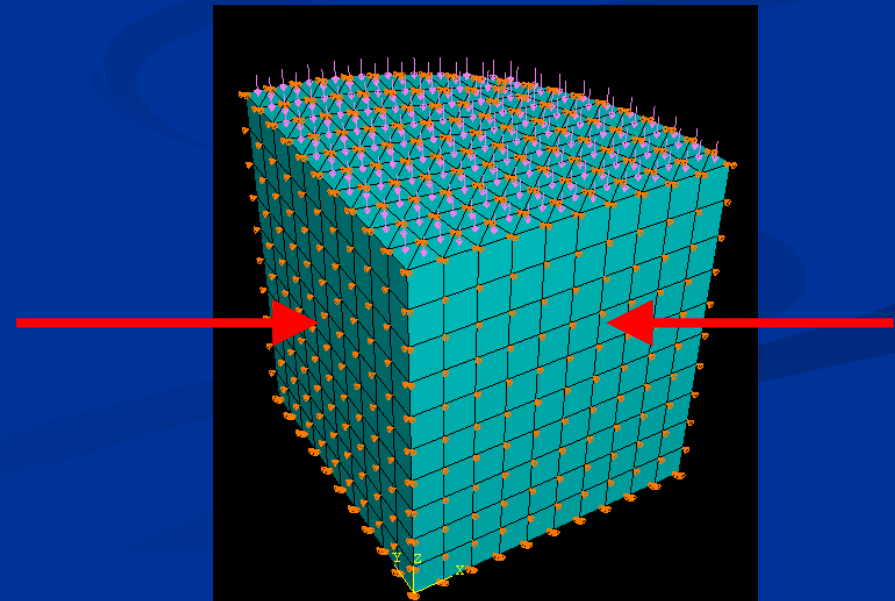
PROVA SPERIMENTALE

- Tempo di carico: 3600 s
- Tempo di scarico: 3600 s
- Provini: $\Phi = 100\text{mm}$ H = 60mm
- T di prova: 40°C, 20°C, 10°C, 5°C
- Tensione di carico: 100kPa

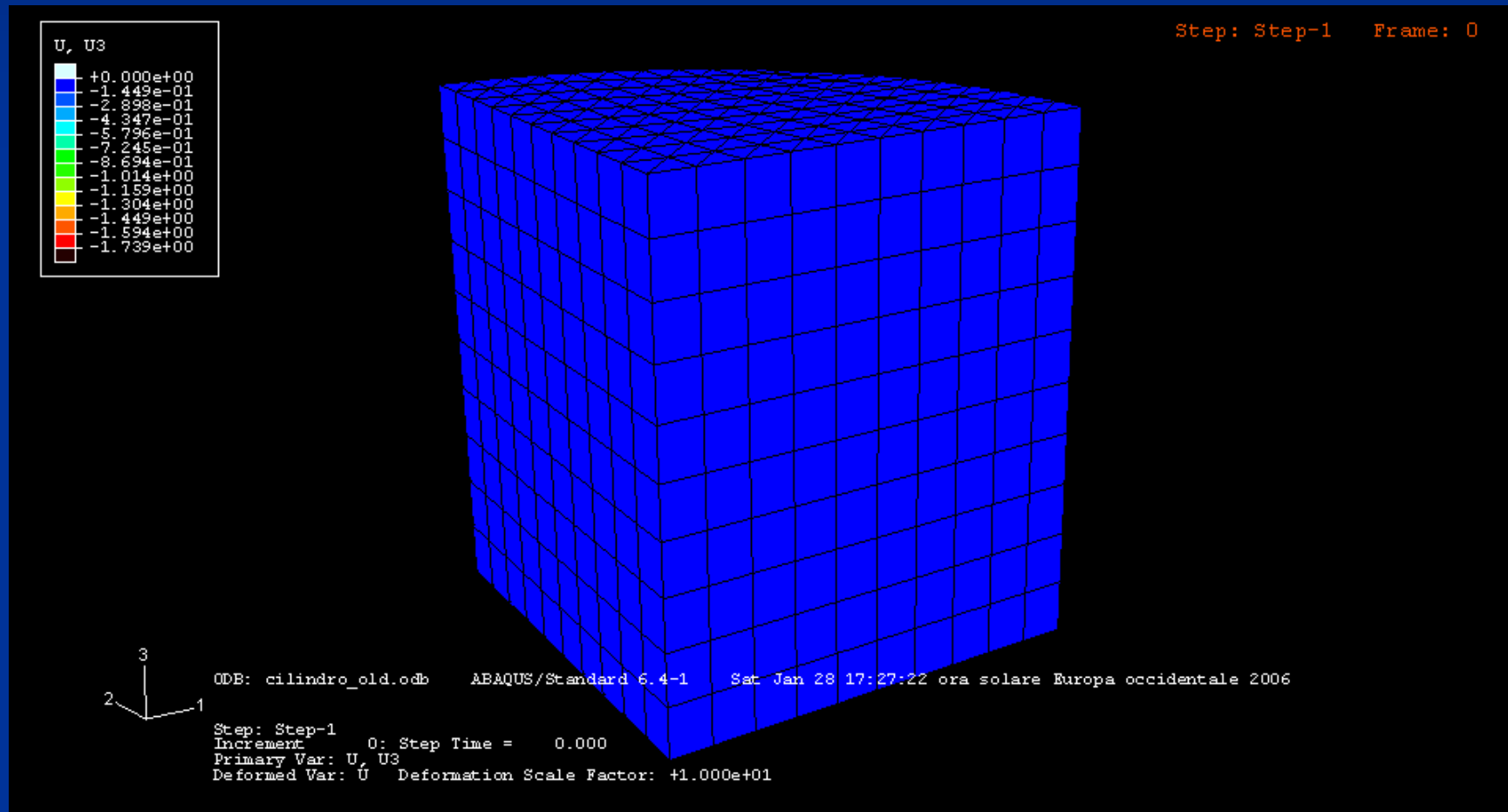


MODELLO FEM

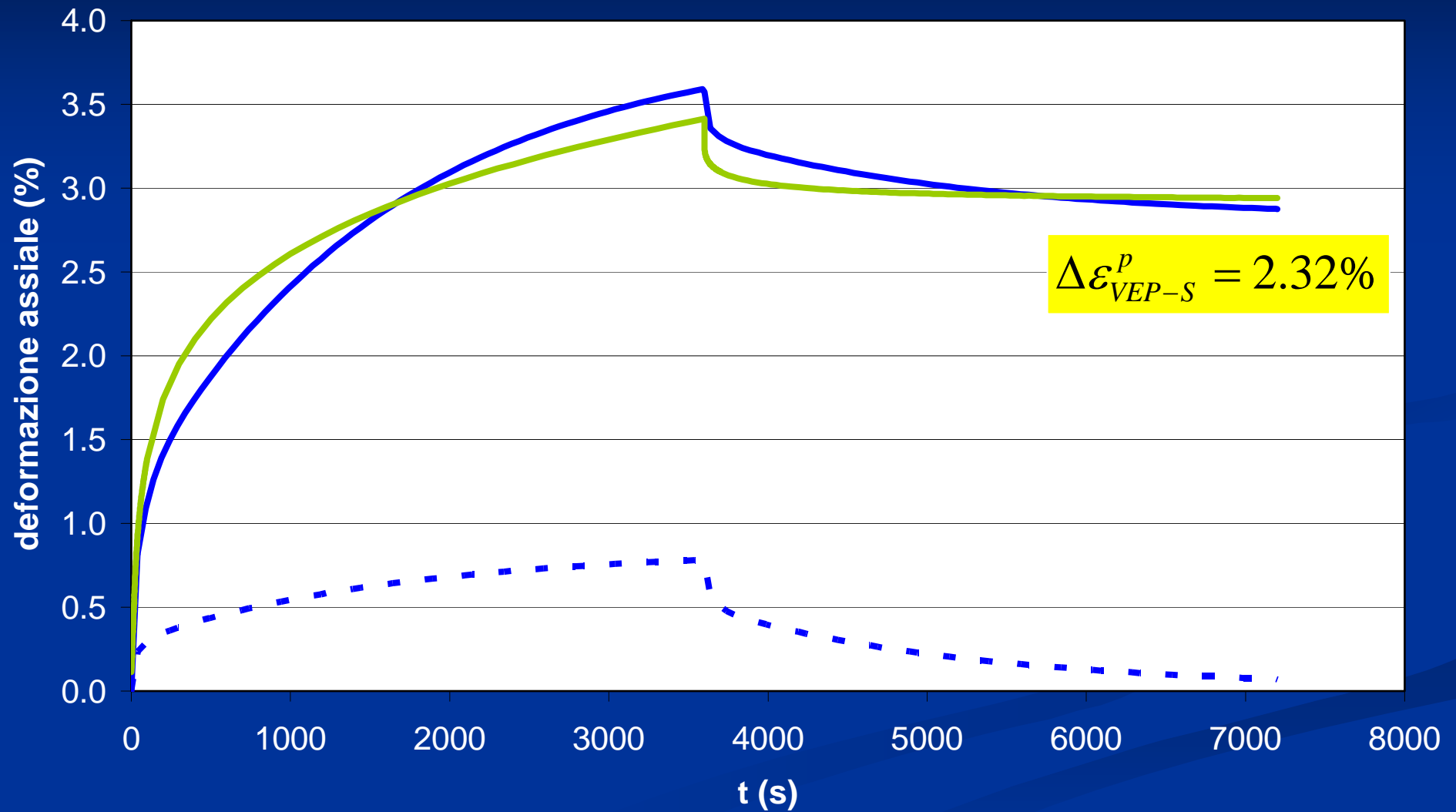
- DOPPIA SIMMETRIA
- 1/4 di Cilindro 100mm
- 1331 nodi
- 2000 elementi



Modello VEP 40°

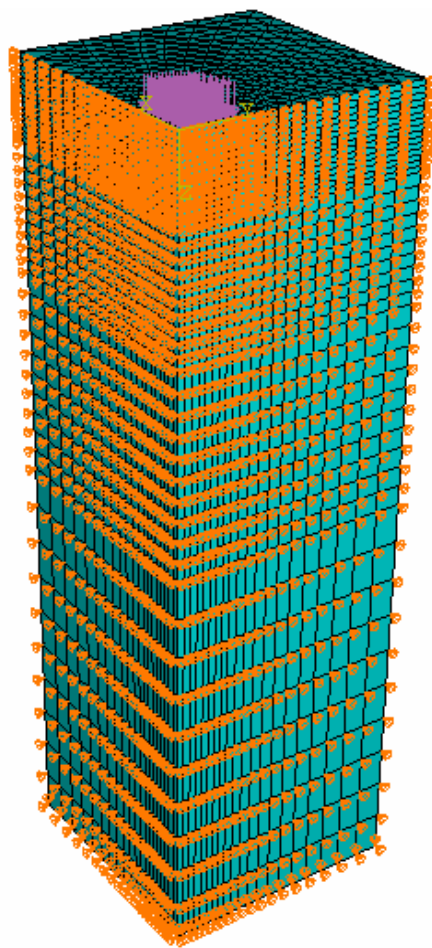


CREEP Non Confinato 40°

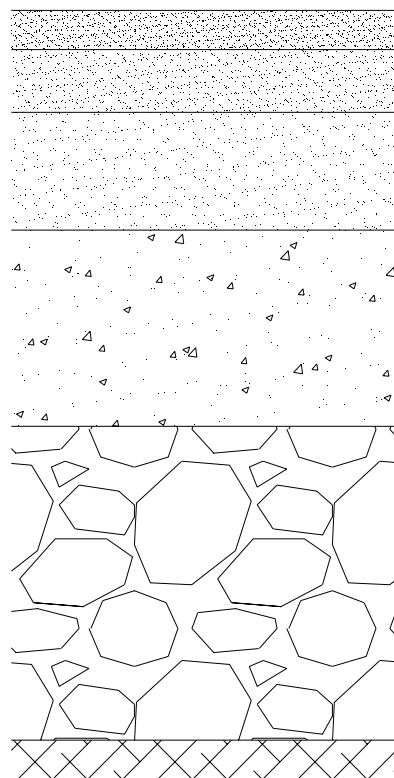


— FEM VEP - - FEM VEL — SPERIMENTALE

ANALISI STRUTTURALE FEM



PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE



Usura
Binder

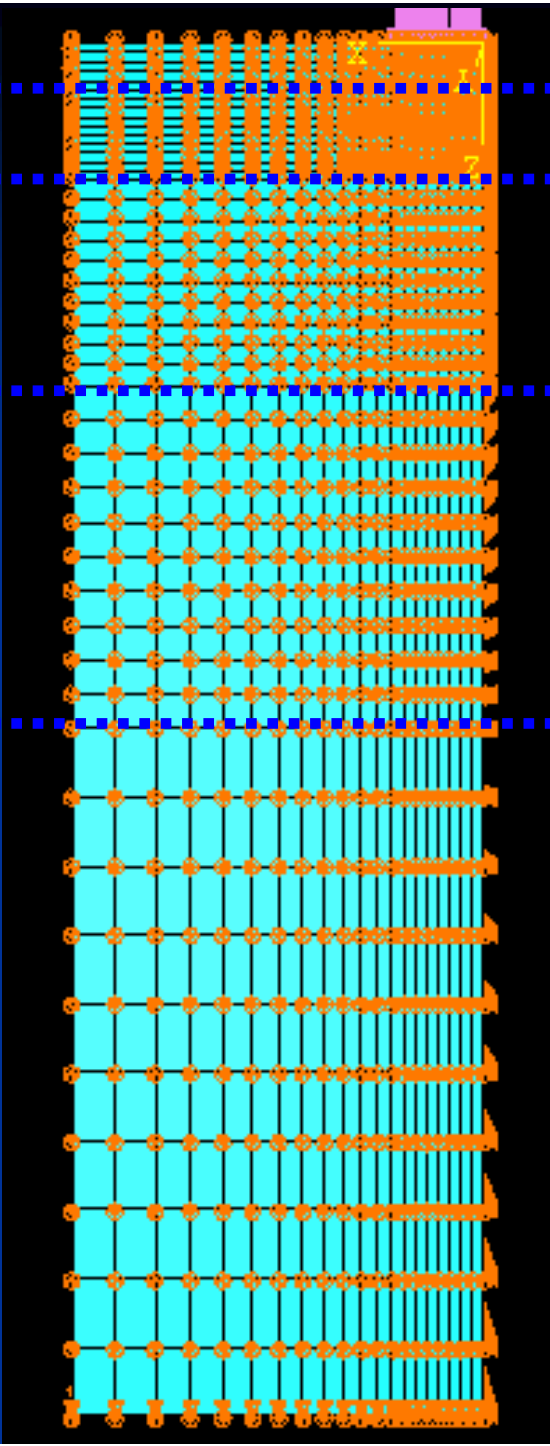
Base

Fondazione

Sottofondo

SIMULAZIONE FEM

Modello di Sovrastruttura Flessibile



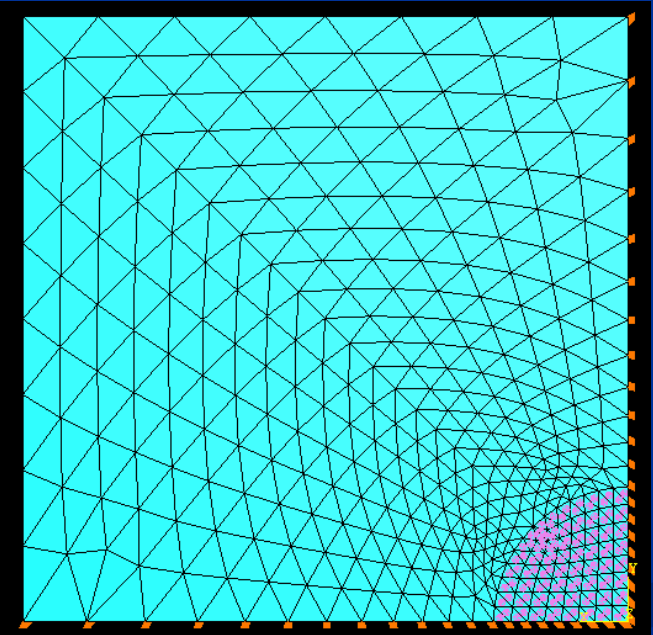
Usura: 35mm

Binder: 65mm

Base: 150mm

Fondazione:
250mm

Sottofondo:
500mm



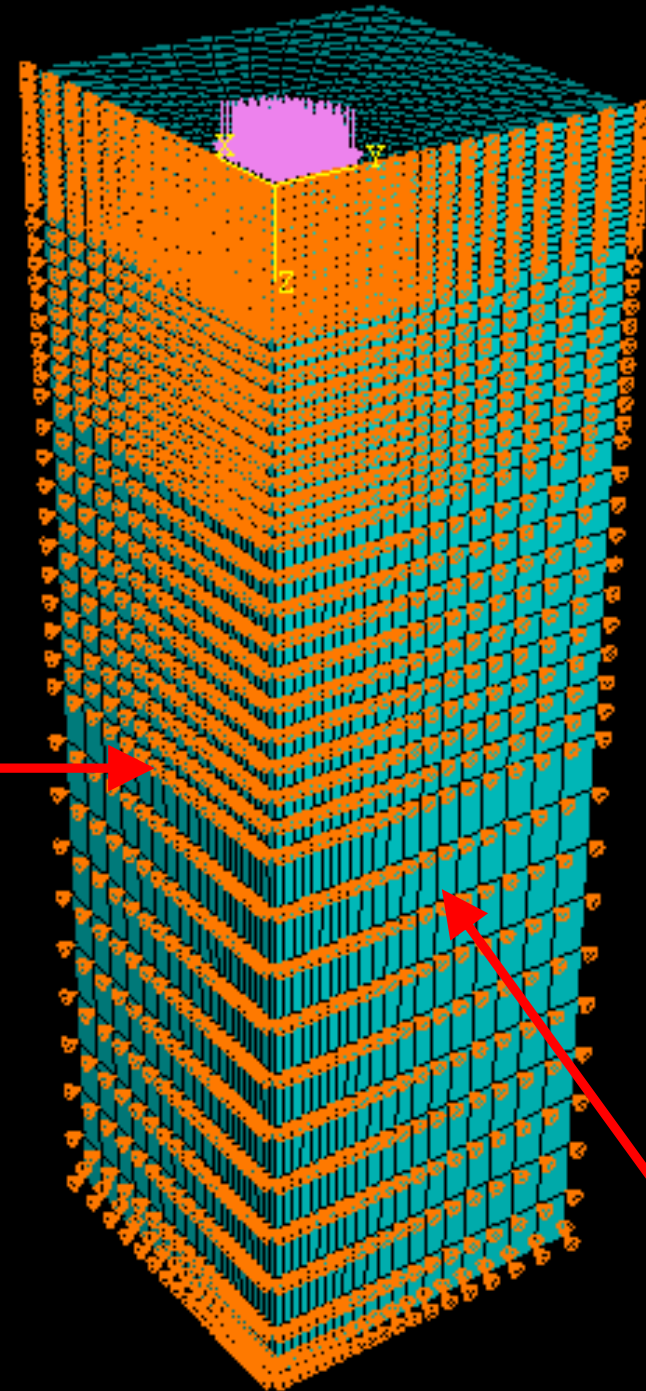
67mm

300mm

SIMULAZIONE

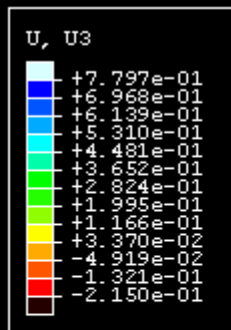
MODELLO FEM

- DOPPIA SIMMETRIA
- 17342 nodi
- 31320 elementi
- Usura: modello VEP
- Binder, Base, Fondazione
- Sottofondo : modello elastico (E, ν)

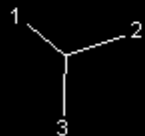
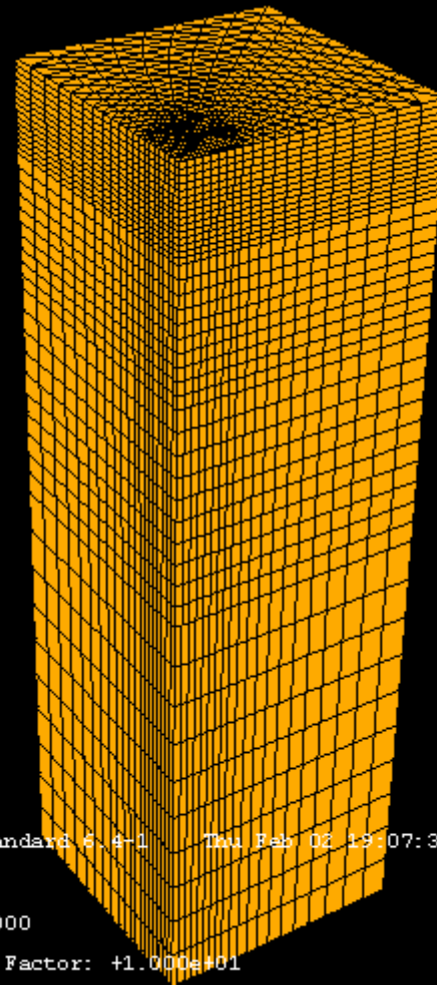


MULTISTRATO

$t_{\text{carico}}: 600\text{s} \div t_{\text{scarico}}: 600\text{s}$
Tensione di carico = 286 kPa



Step: Step-1 Frame: 0

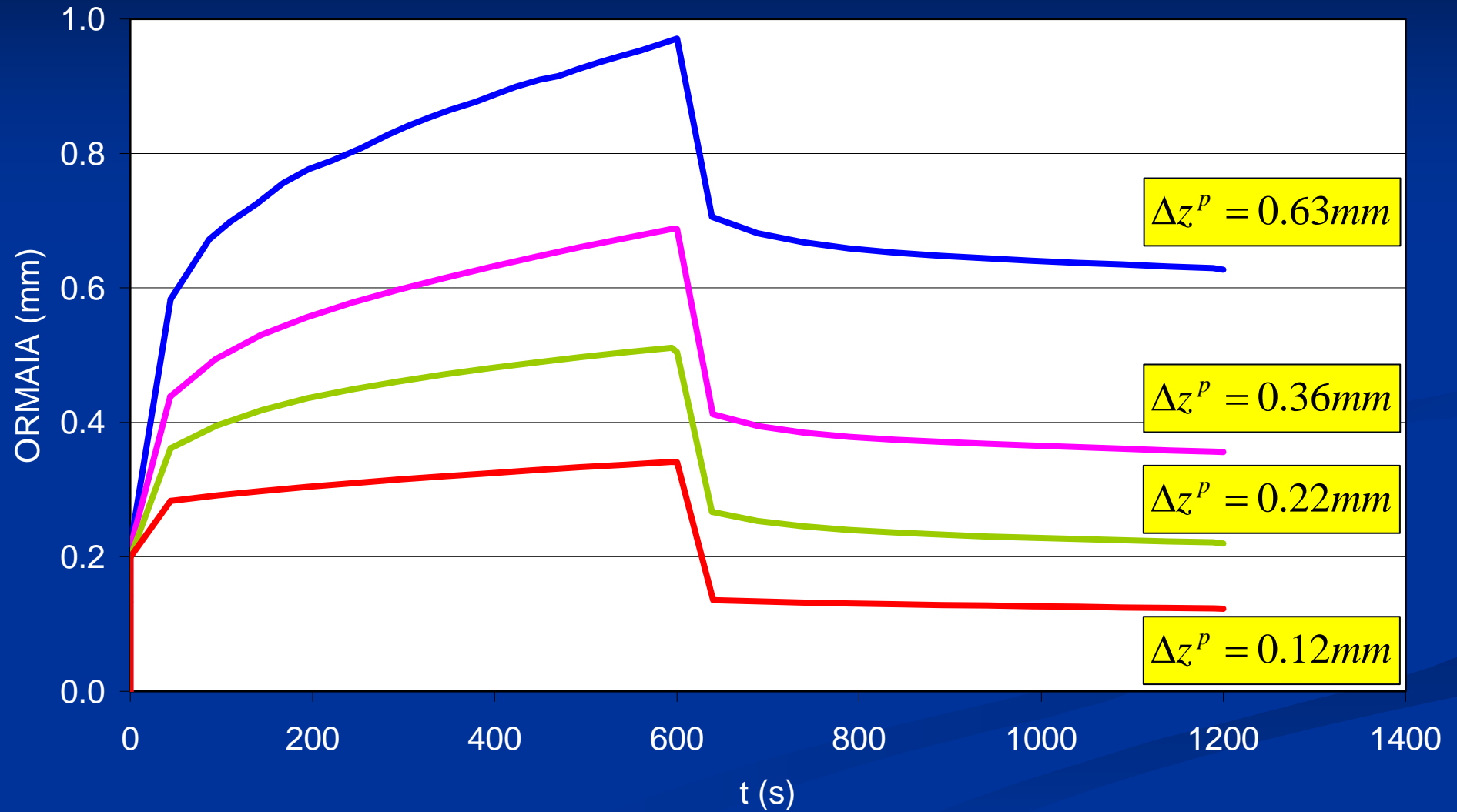


ODB: solaio_multi2.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Thu Feb 02 19:07:33 ora solare Europa occidentale 2006

Step: Step-1
Increment 0: Step Time = 0.000
Primary Var: U, U3
Deformed Var: \hat{U} Deformation Scale Factor: +1.000e+01

MULTISTRATO

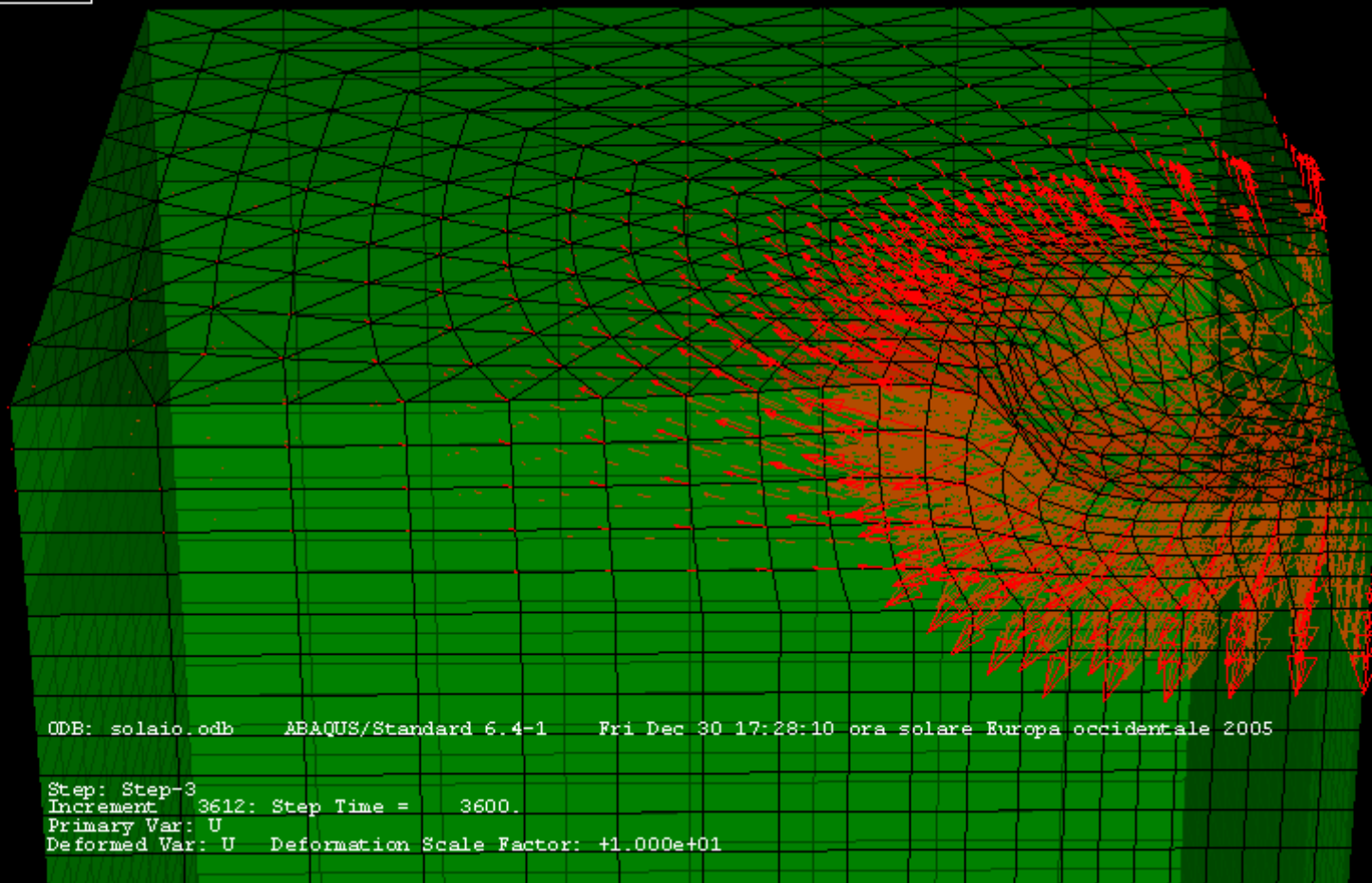
Carico: 600s ÷ Scarico: 600s



— FEM VEP 40° — FEM VEP 20° — FEM VEP 10° — FEM VEP 5°

PUNZONAMENTO E RIFLUIMENTO LATERALE FLUSSI VISCO-PLASTICI

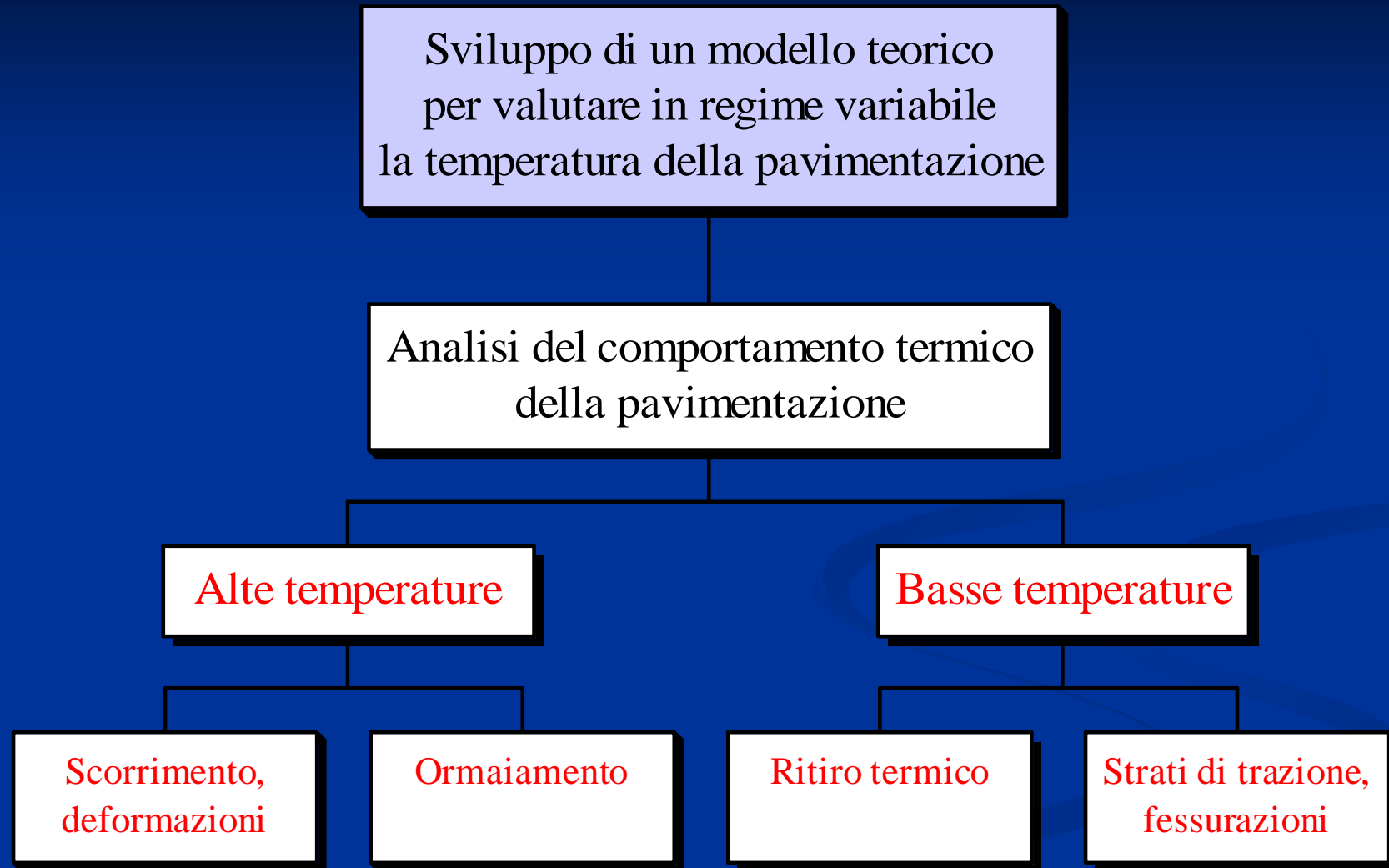
U, Resultant



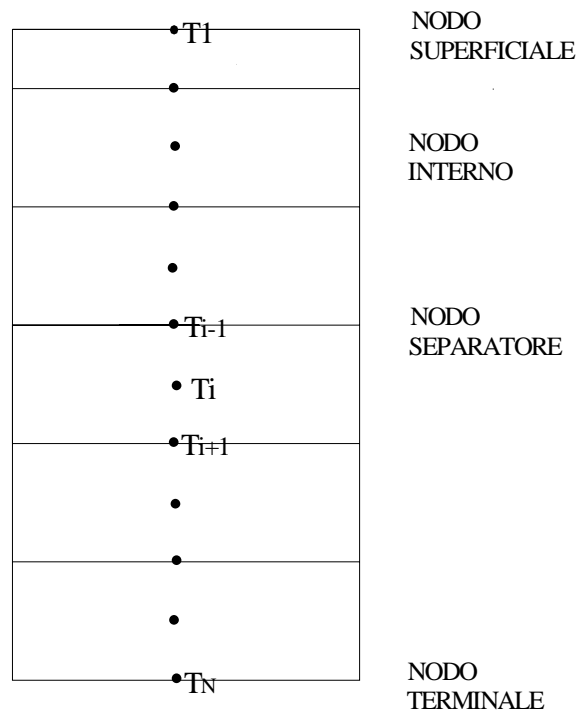
Il modello permette di stimare l'attitudine della
pavimentazione alle deformazioni permanenti
(ormaiamento) e alla fatica.



IL COMPORTAMENTO TERMICO DELLA PAVIMENTAZIONE

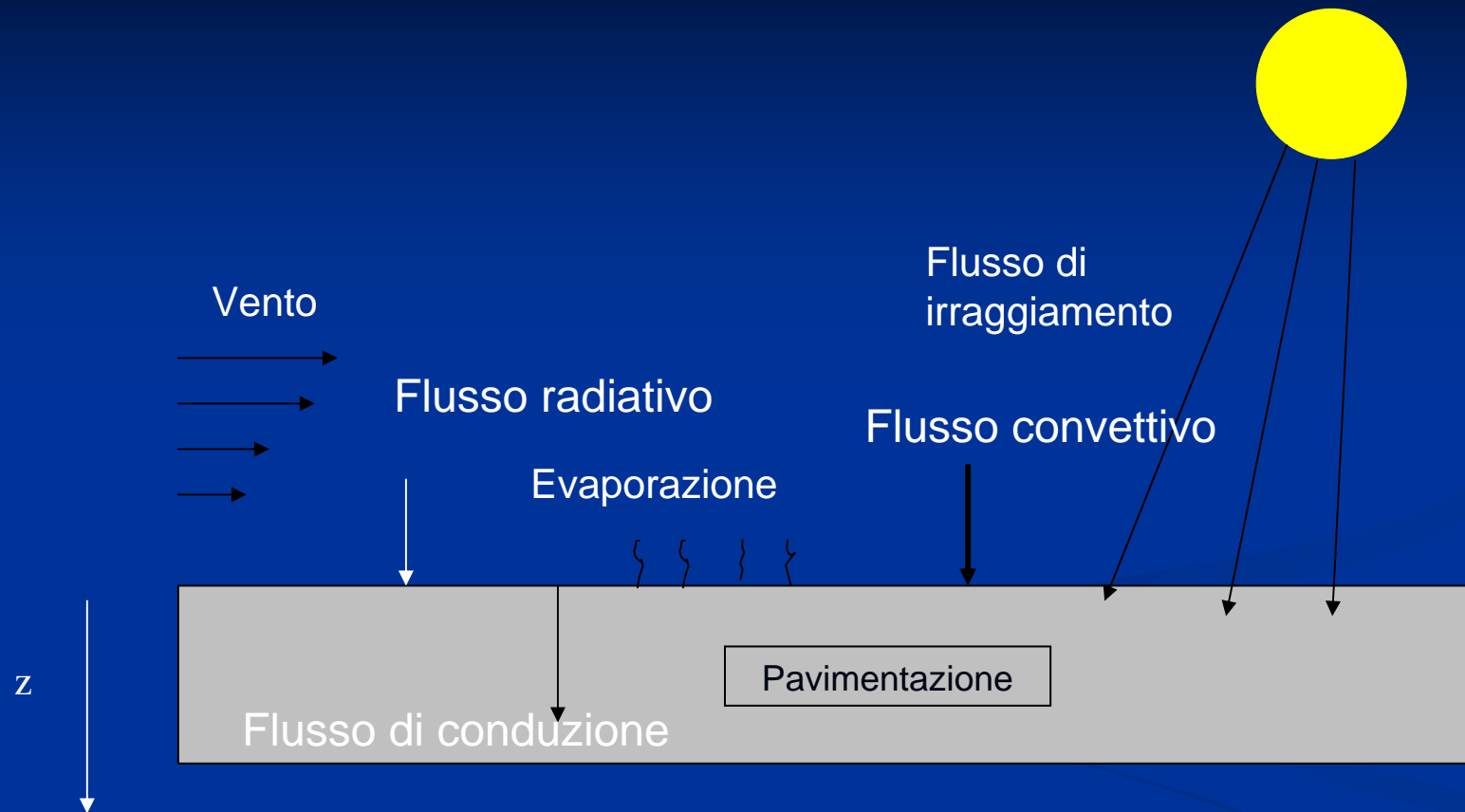


Schema della pavimentazione e basi del modello



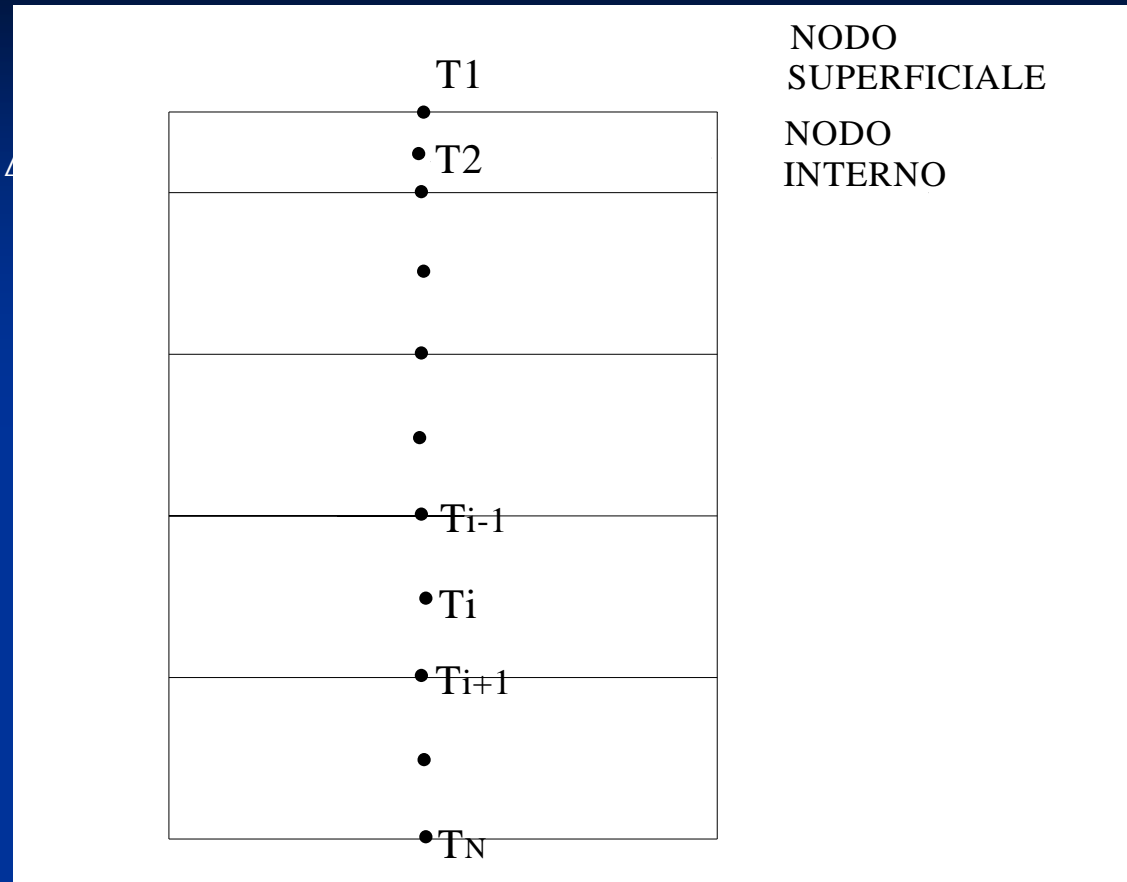
- Pavimentazione pluristrato
- Mezzo omogeneo ed isotropo strato per strato
- Proprietà termo-fisiche indipendenti dalla temperatura
- Trasmissione del calore monodimensionale
- Metodo numerico alle differenze finite con schematizzazione temporale “fully-implicit”
- Forma e dimensioni degli elementi nodali diversi da strato a strato
- Comportamento adiabatico del nodo terminale

Schematizzazione dei flussi termici



$$a G_s + \alpha (T_{\text{air}} - T_s) + \varepsilon \sigma \left[(T_{\text{sky}})^4 - (T_s)^4 \right] + \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$$

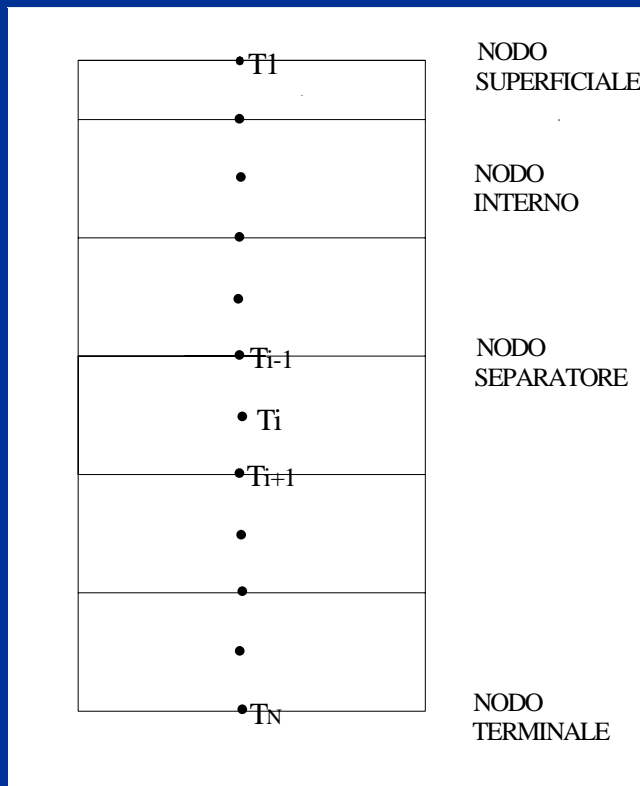
Condizioni al contorno del nodo superficiale



Equazione espressa in termini finiti

$$a G_s \Delta\tau + \alpha (T_{\text{air}} - T_1') \Delta\tau + \varepsilon \sigma \left[(T_{\text{sky}})^4 - (T_1')^4 \right] \Delta\tau + \frac{\lambda}{\Delta z} (T_2' - T_1') \Delta\tau = c \rho \frac{\Delta z}{2} (T_1' - T_1)$$

Bilancio termico dei nodi della pavimentazione



$$-Fo T'_{i-1} + (1 + 2 Fo) T'_i - Fo T'_{i+1} = T_i$$

$$-\frac{\lambda_1 \Delta\tau}{S \Delta z_1} T'_{i-1} + \frac{\Delta\tau}{S} \left(\frac{\lambda_1}{\Delta z_1} + \frac{\lambda_2}{\Delta z_2} + \frac{S}{\Delta\tau} \right) T'_i - \frac{\lambda_2 \Delta\tau}{S \Delta z_2} T'_{i+1} = T_i$$

$$-2 Fo T'_{N-1} + (1 + 2 Fo) T'_N = T_N$$

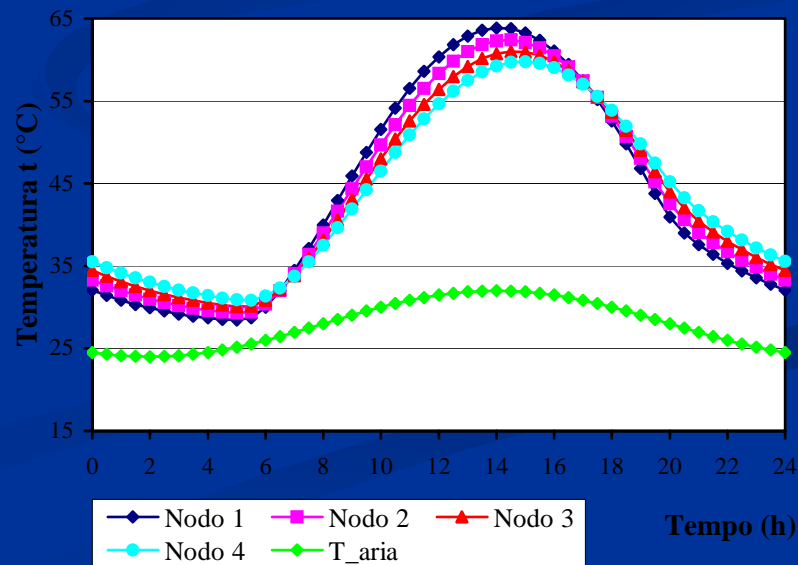
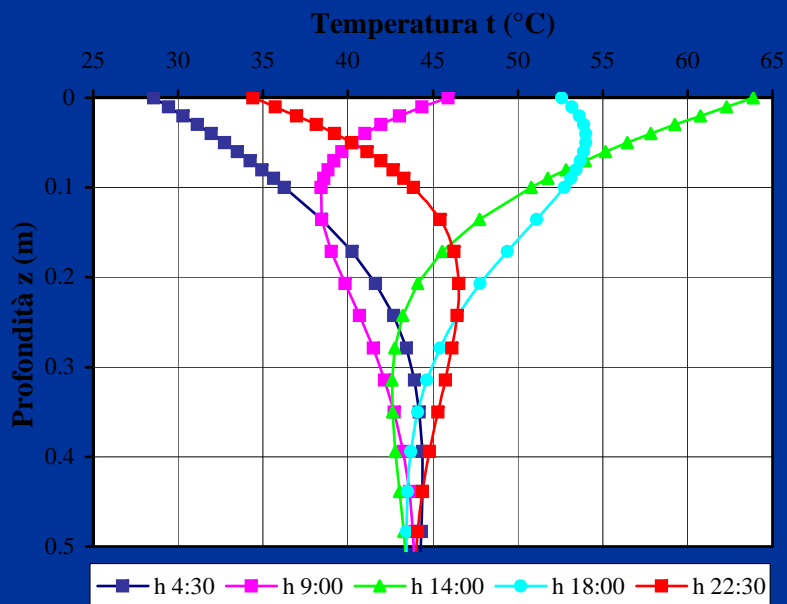
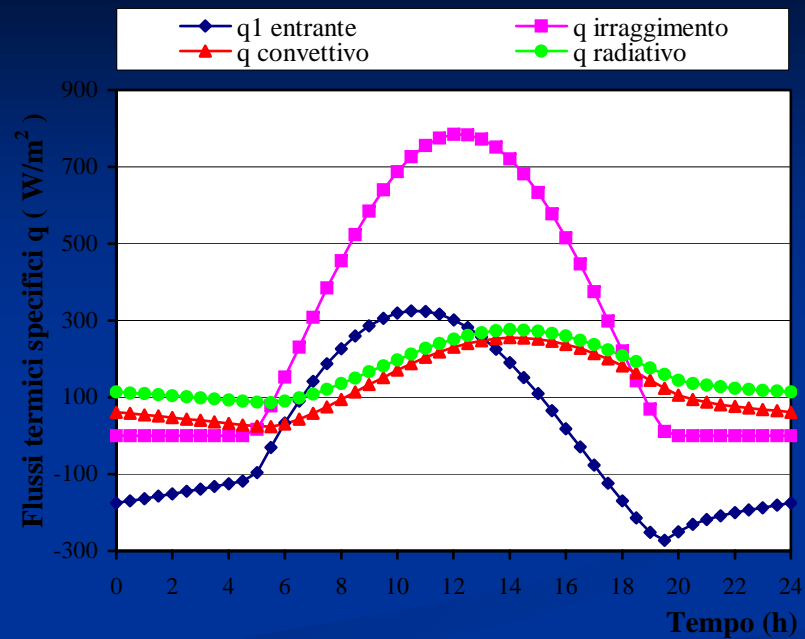
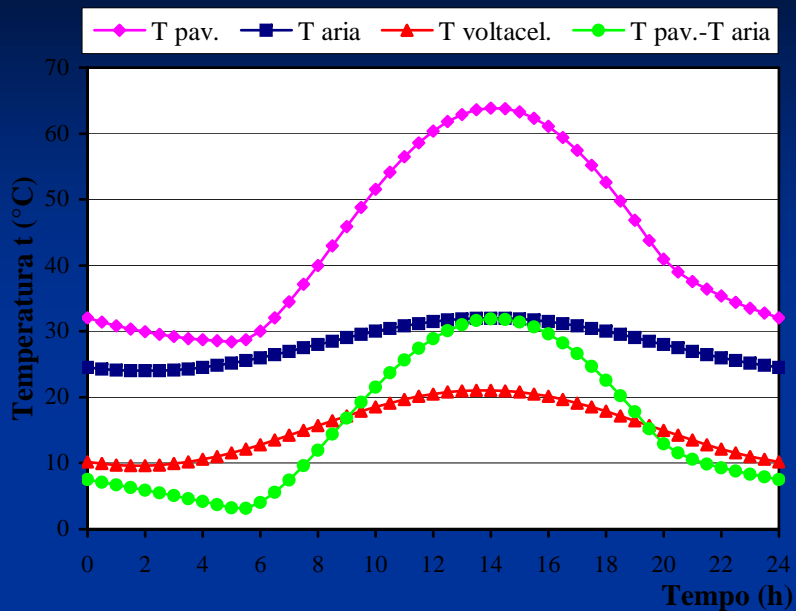
Dati di input per il Modello

- Proprietà termofisiche degli strati (c , ρ , λ)
- Caratterizzazione geografica della località prescelta
- Giorno e mese dell'anno
- Andamento giornaliero della temperatura atmosferica
- Caratterizzazione spaziale dei nodi
- Incremento temporale

Dati di output per il Modello

- Temperatura atmosferica e temperatura della volta celeste
- Declinazione solare, angolo orario ed altezza solare
- Intensità dell'irradiazione solare totale (diffusa+diretta)
- Vettore soluzione delle temperature
- Flussi termici: radiativo, convettivo ed irraggiamento

21 Giugno CONDIZIONE DI CIELO SERENO Venezia

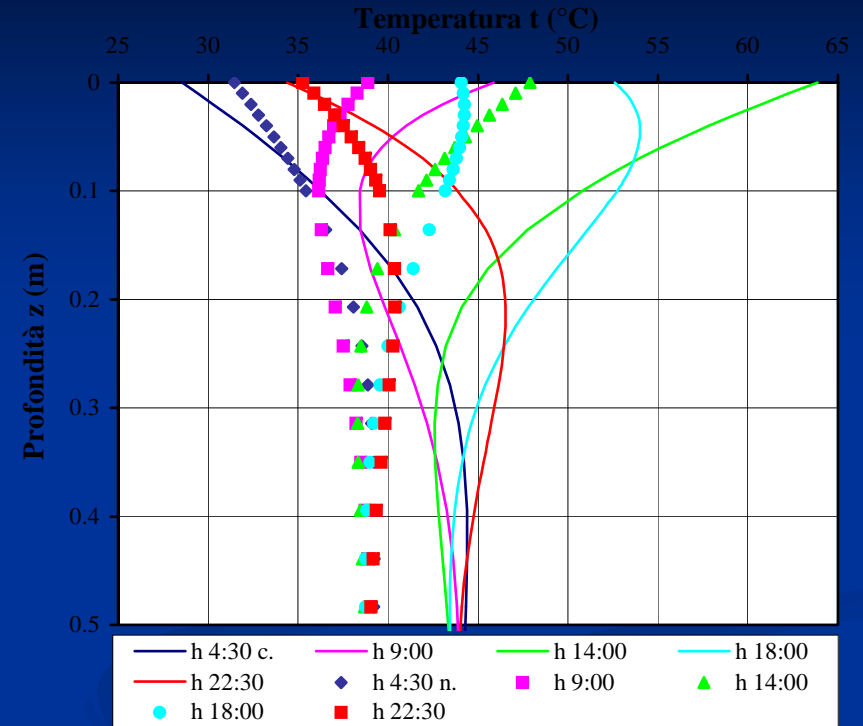
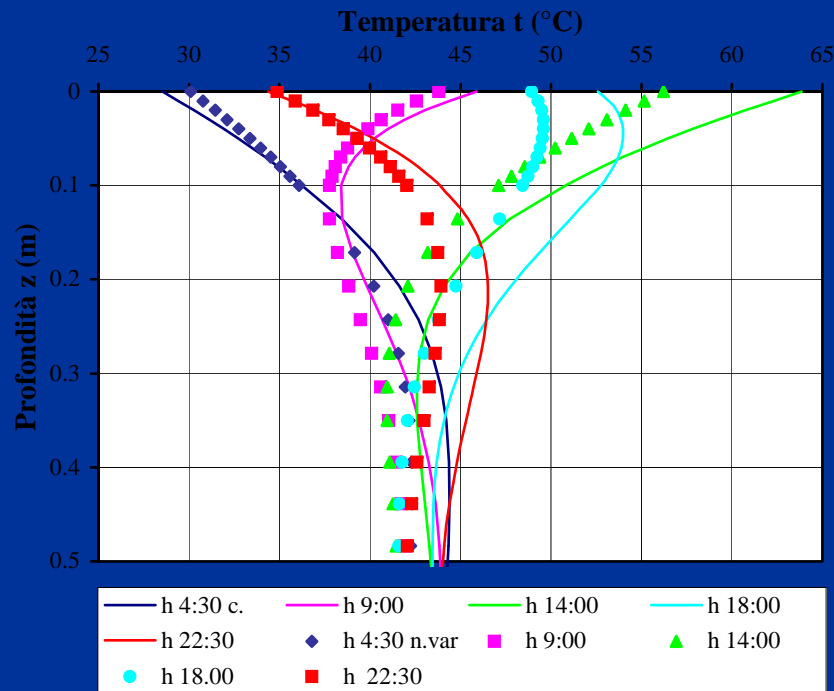


21 Giugno

CONFRONTI

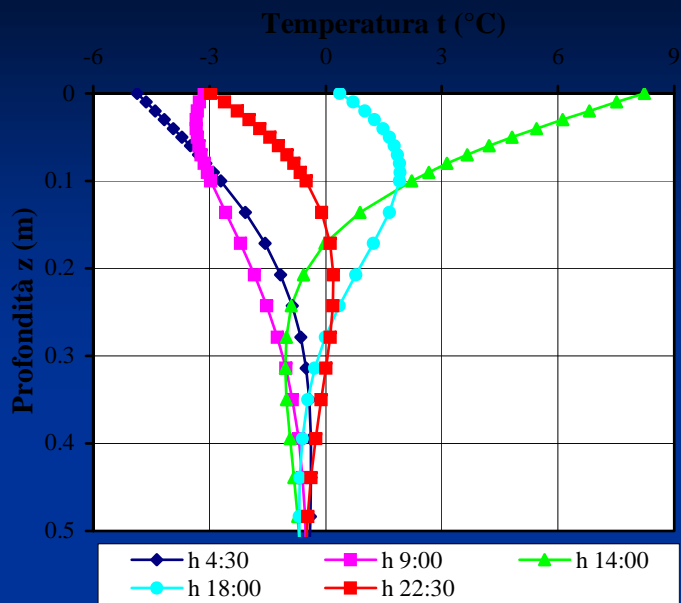
Venezia

Cielo
SERENO-NUVOLOSO

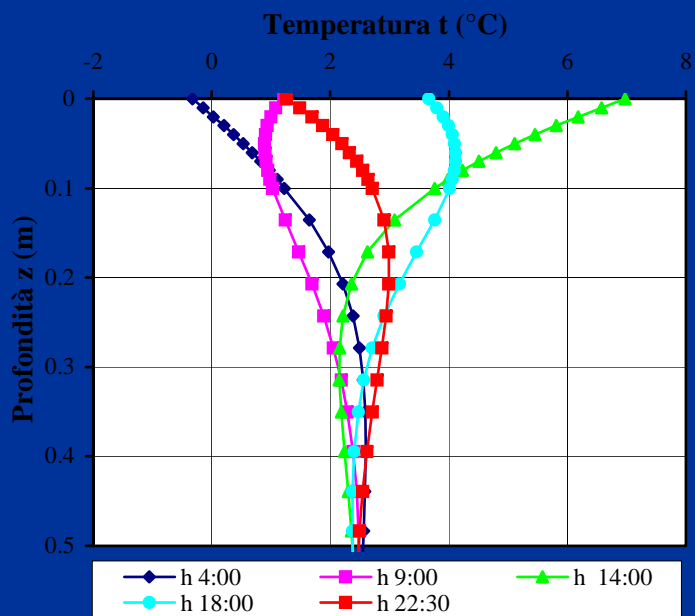


Cielo
SERENO-VARIABILE

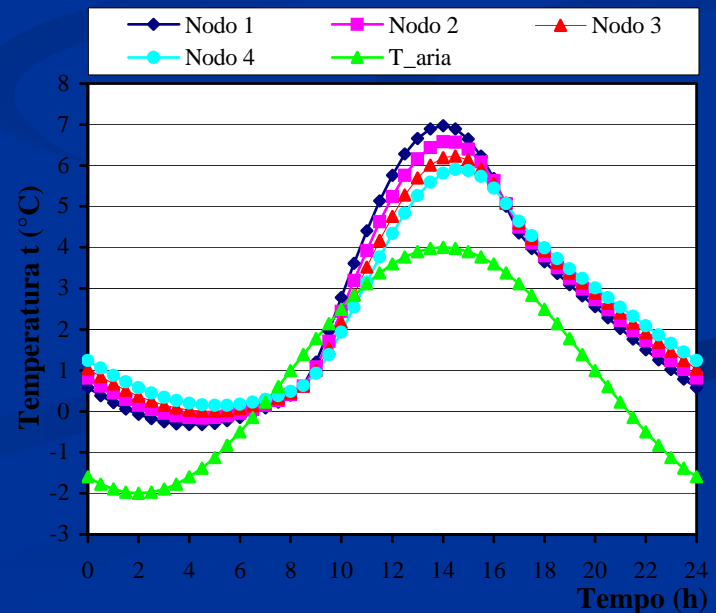
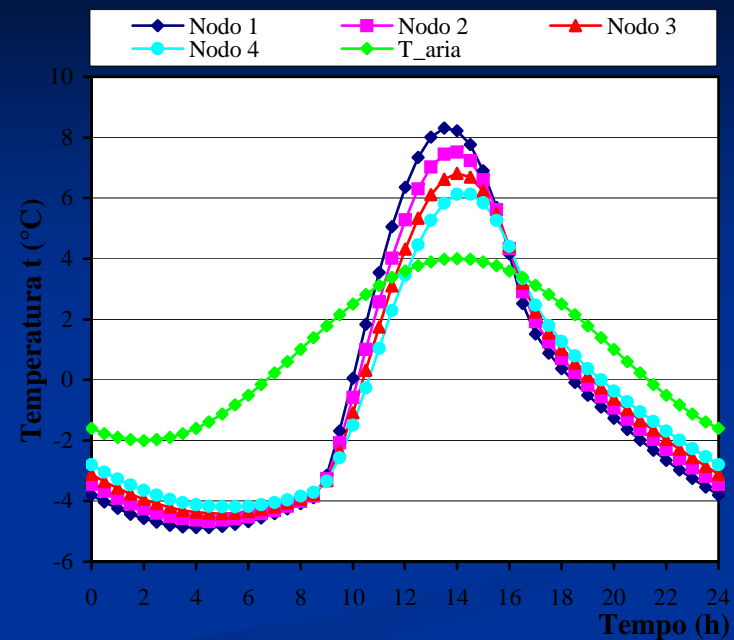
21 Dicembre Venezia



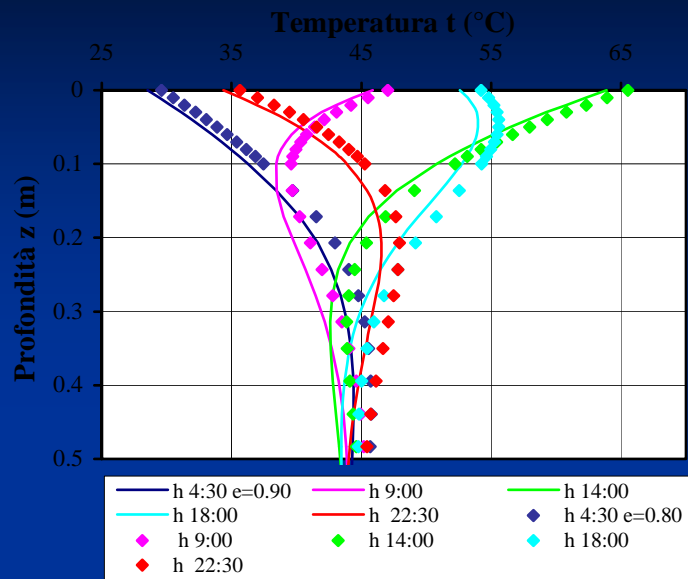
Cielo
Sereno



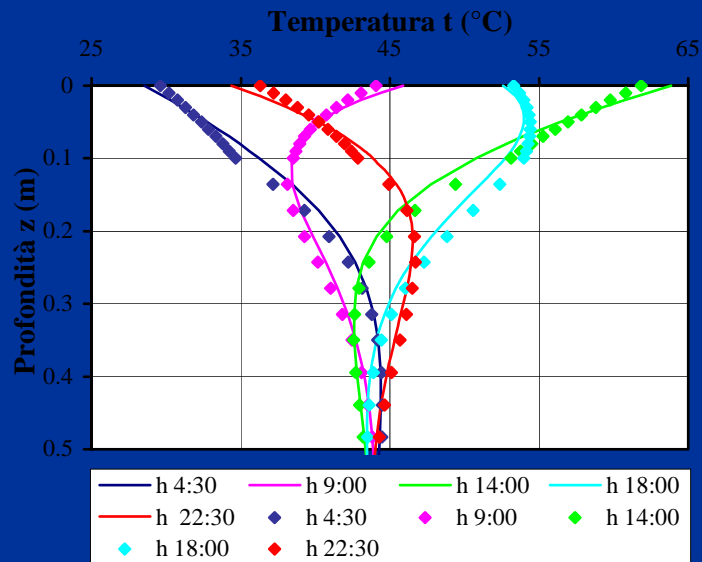
Cielo
Nuvoloso



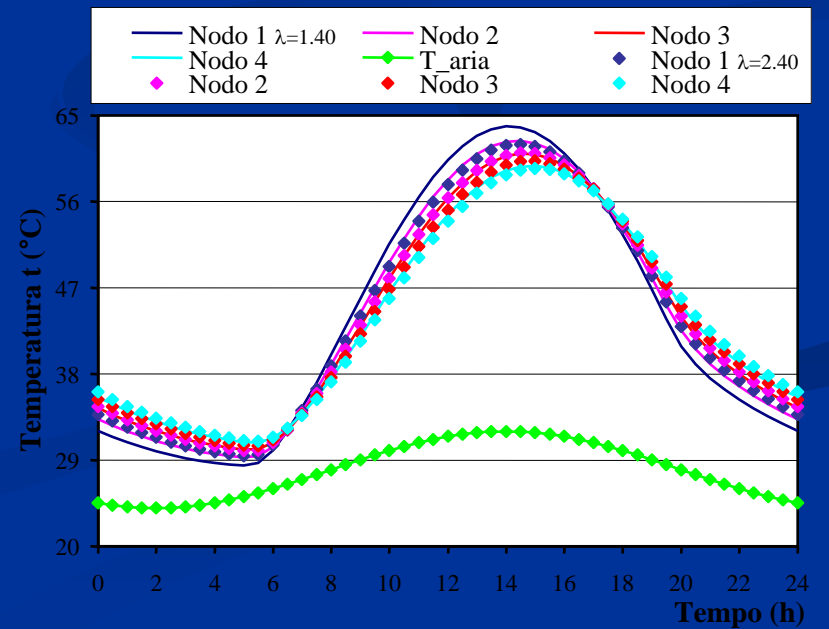
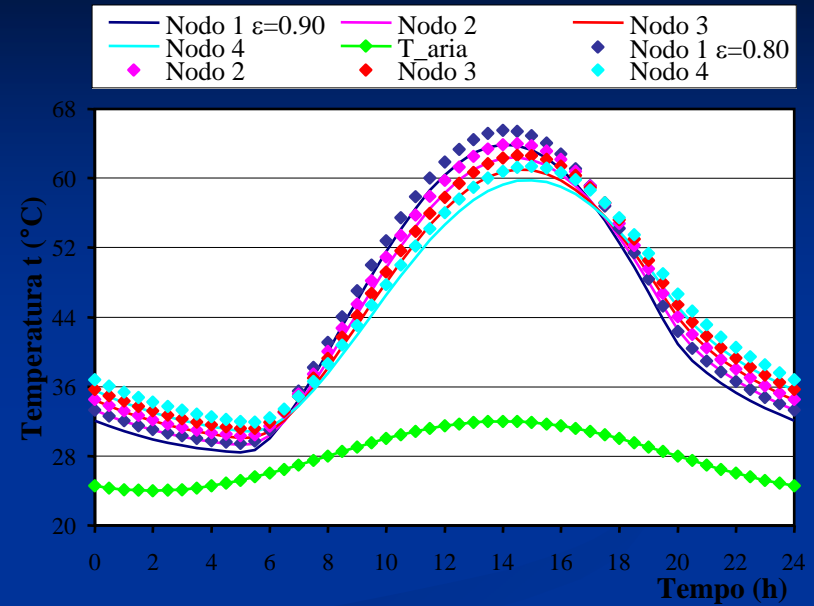
21 Giugno ANALISI DI SENSIBILITA' DEI PARAMETRI CIELO SERENO



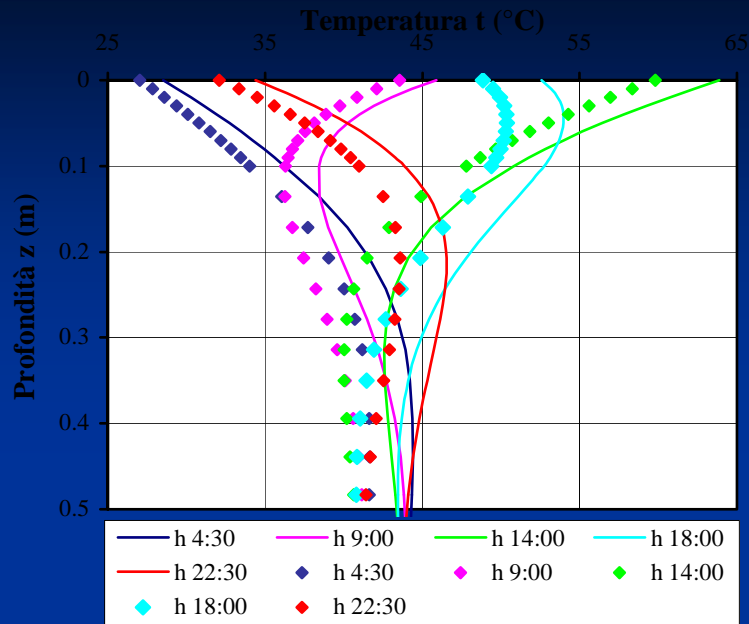
Emissività
 $\epsilon = 0.90$
 $\epsilon = 0.80$



Conduttività
 $\lambda_1 = 1.40$ W/(m K)
 $\lambda_1 = 2.40$ W/(m K)



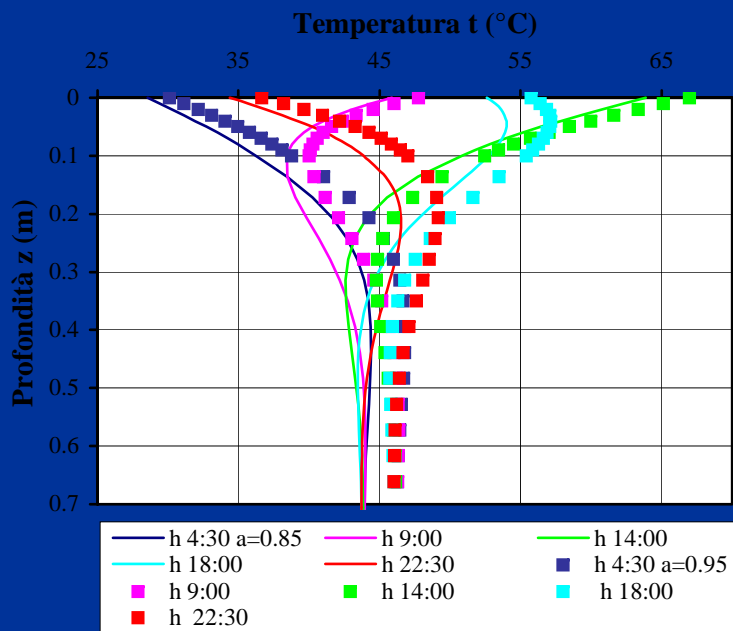
21 Giugno ANALISI DI SENSIBILITA' DEI PARAMETRI CIELO SERENO



Coeff. Convezione

$\alpha=8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

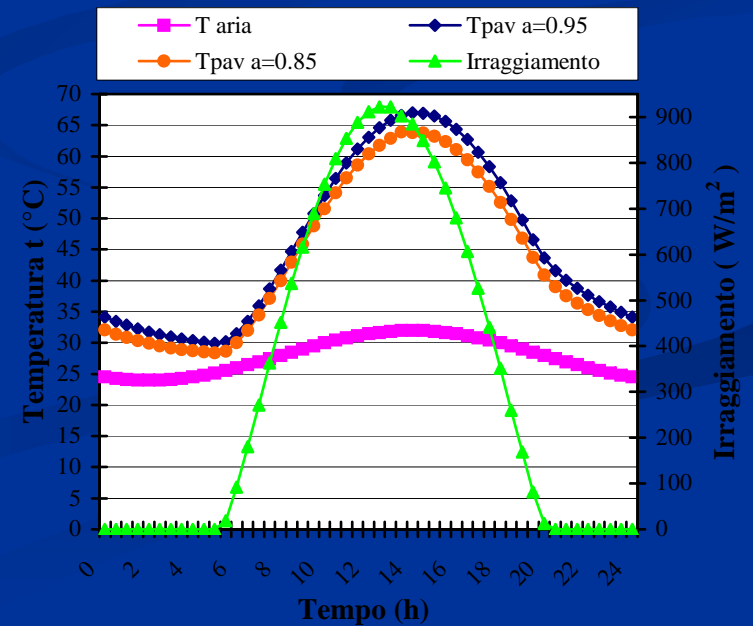
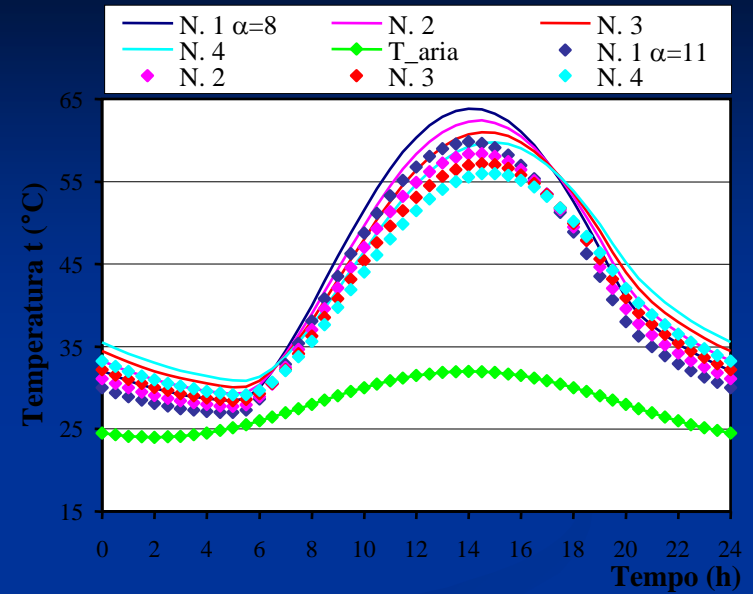
$\alpha=11 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$



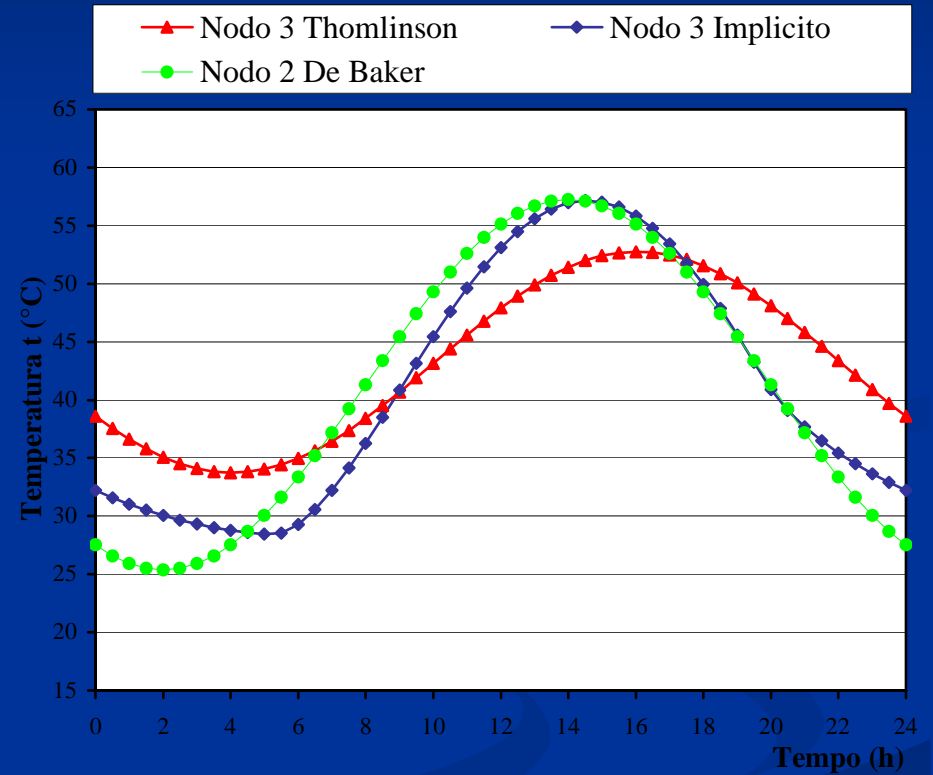
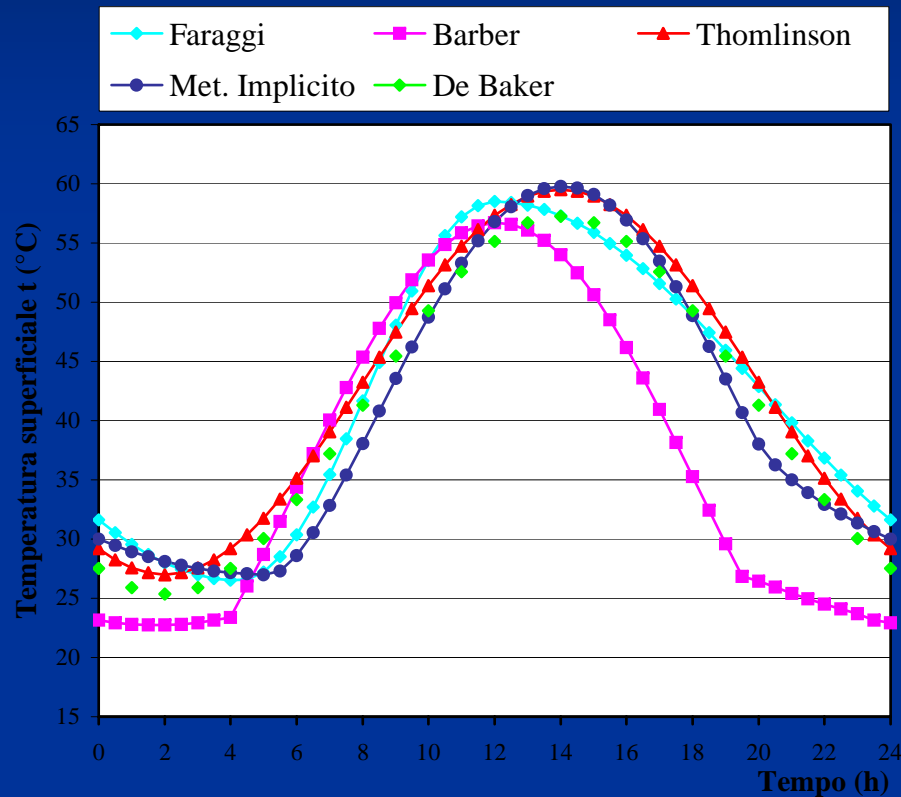
Coeff. Assorbimento

$a=0.85$

$a=0.95$



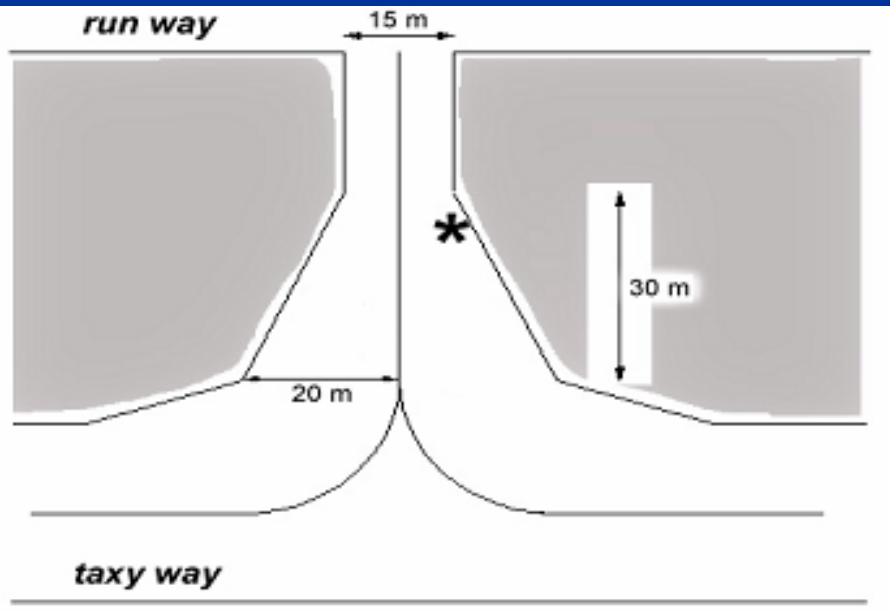
Confronto tra Modello e letteratura



21 Giugno cielo sereno

Validazione del modello

Sonde inserite sul raccordo tra la pista di volo e quella di rullaggio

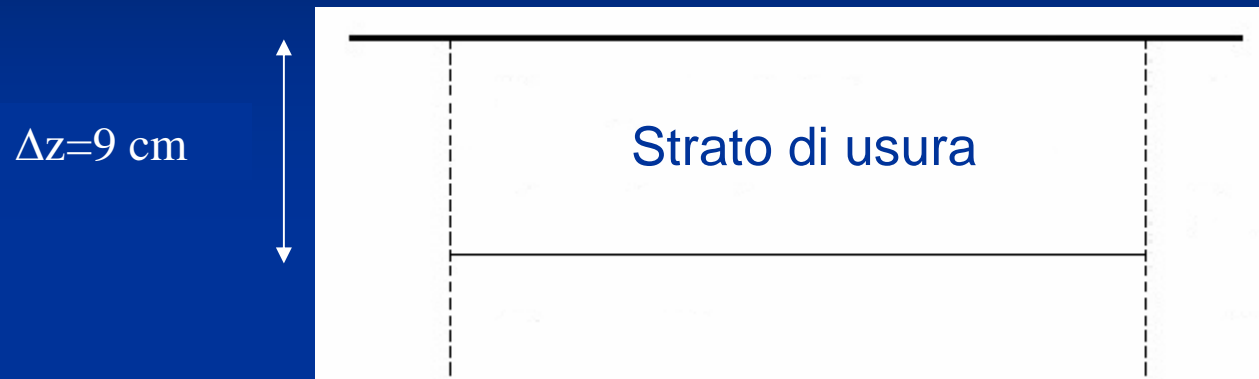


Carotaggi

Inserimento sonda



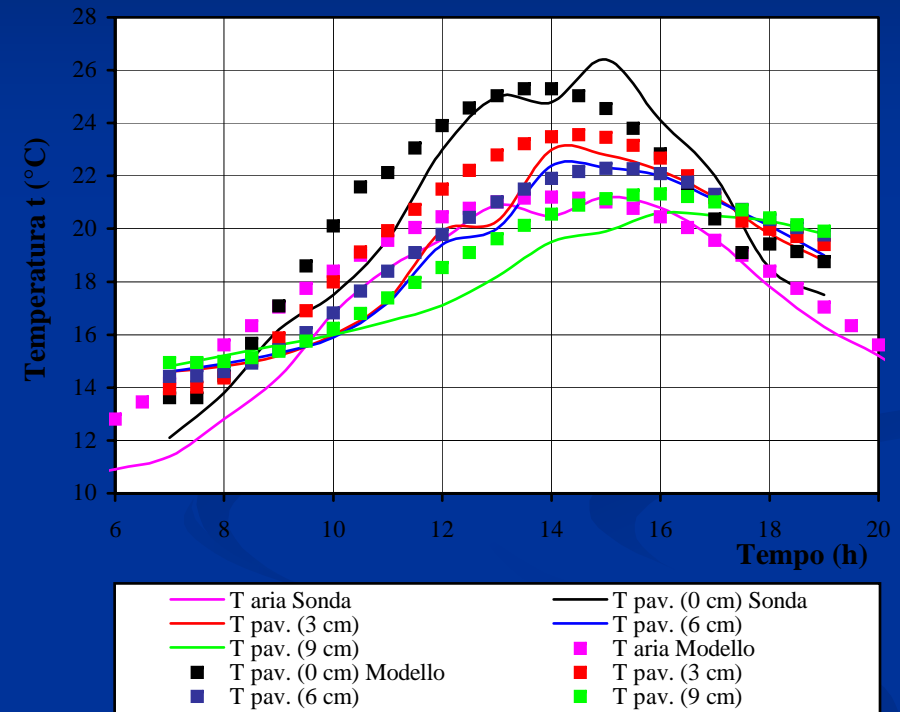
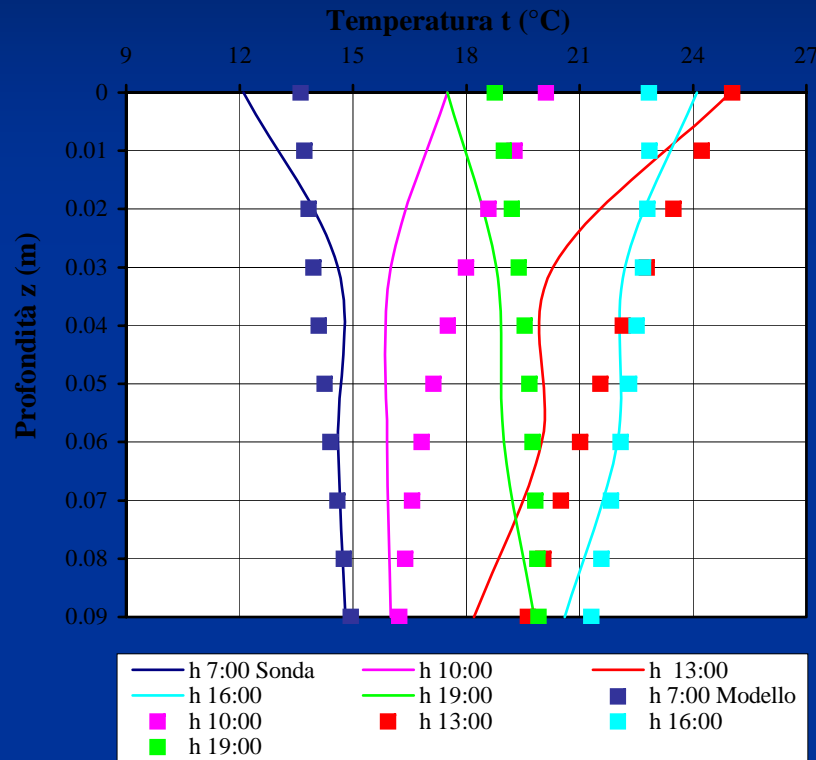
Schematizzazione semirigida della pavimentazione dell'aeroporto militare "Ancillotto" (TV)



- Strato d'usura in conglomerato bituminoso
- Strato in misto cementato (macadam)
- Altezza nodale pari a 1 cm

23 Ottobre, Aeroporto militare "Ancillotto" (TV)

Confronto tra i risultati sperimentali e modello



CONDIZIONI DI CIELO VARIABILE

($T_{\text{amax}}=21.2^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amin}}=10^{\circ}\text{C}$)

APPLICABILITA' DEL MODELLO NELLA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE PAVIMENTAZIONI

Il modello di partenza, corretto per tener conto di:

- variabilità delle pavimentazioni;
- disomogeneità dei materiali e anisotropia;
- variabilità delle condizioni climatiche;
- trasporto d'umidità;

permette di ricostruire attendibilmente lo stato termico delle
pavimentazioni, dal quale le proprietà strutturali dipendono.