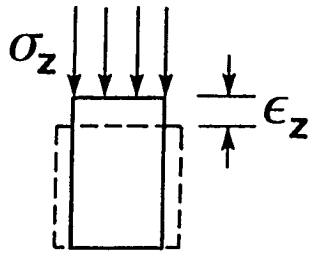


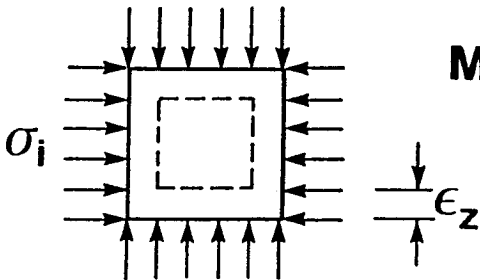
# **COMPRESSIBILITA', DEFORMABILITA'**

# PARAMETRI DI DEFORMABILITA' DI UN MEZZO ELASTICO ED ISOTROPO



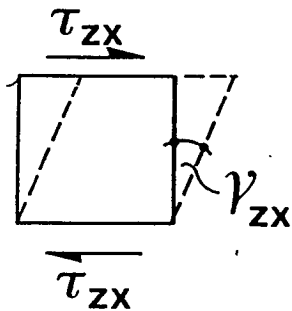
**MODULO DI YOUNG E**

$$E = \frac{\sigma_z}{\epsilon_z}$$



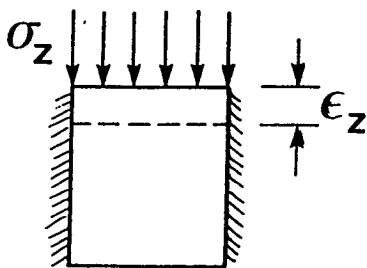
**MODULO DI DEFORMAZIONE CUBICA K**

$$K = \frac{\sigma_i}{\epsilon_v} \quad ; \quad \epsilon_v = 3\epsilon_z$$



**MODULO DI DEFORMAZIONE PER TAGLIO G**

$$G = \frac{\tau_{zx}}{\gamma_{zx}}$$



**MODULO EDOMETRICO M**

$$M = E_{ed} = \frac{\sigma_z}{\epsilon_z}$$

# MODELLO ELASTICO LINEARE ISOTROPO

## (1)

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_y + \sigma_x)]$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \tau_{xy}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \tau_{yz}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \tau_{zx}$$

# MODELLO ELASTICO LINEARE ISOTROPO

(2)

$$\{\varepsilon\} = [C] \cdot \{\sigma\}$$

$$[C] = \frac{1}{E} \begin{array}{ccc|ccc} \mathbf{1} & -\nu & -\nu & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\nu & \mathbf{1} & -\nu & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\nu & -\nu & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{2} \cdot (\mathbf{1} + \nu) & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{2} \cdot (\mathbf{1} + \nu) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{2} \cdot (\mathbf{1} + \nu) \end{array}$$

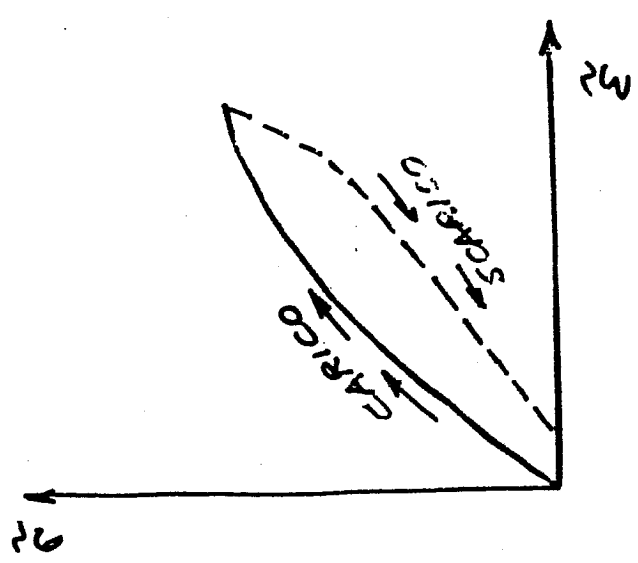
# MODELLO ELASTICO LINEARE ISOTROPO

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{D}_{11} \quad \mathbf{D}_{12} \quad \mathbf{D}_{13} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \\
 \mathbf{D}_{21} \quad \mathbf{D}_{22} \quad \mathbf{D}_{23} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \\
 \mathbf{D}_{31} \quad \mathbf{D}_{32} \quad \mathbf{D}_{33} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \\
 \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{D}_{44} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \\
 \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{D}_{55} \quad \mathbf{0} \\
 \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{D}_{66}
 \end{array}
 \left| \vphantom{\begin{array}{c} \mathbf{D}_{11} \\ \mathbf{D}_{21} \\ \mathbf{D}_{31} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{array}} \right.
 \{\sigma\} = [\mathbf{D}] \cdot \{\varepsilon\}$$

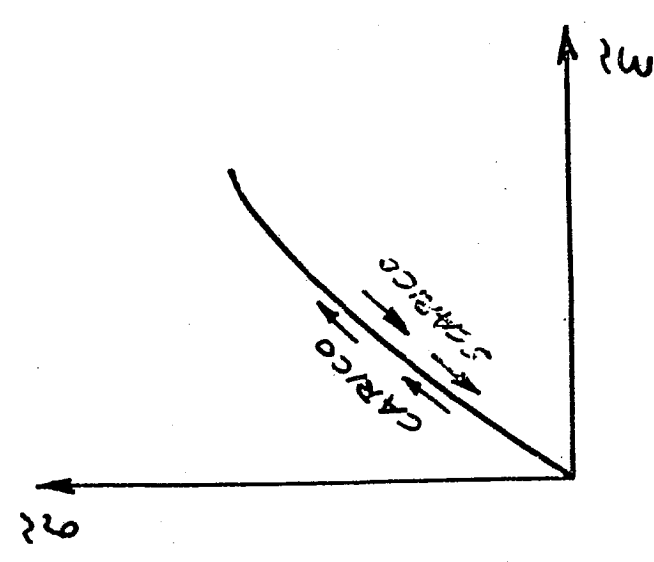
$$\mathbf{D}_{11} = \mathbf{D}_{22} = \mathbf{D}_{33} = \lambda + 2\mathbf{G} = \mathbf{M} = \frac{\mathbf{E} \cdot (1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \quad (\text{modulo edometrico})$$

$$\mathbf{D}_{44} = \mathbf{D}_{55} = \mathbf{D}_{66} = \mathbf{G} = \frac{\mathbf{E}}{2 \cdot (1 + \nu)} = (\text{modulo di taglio})$$

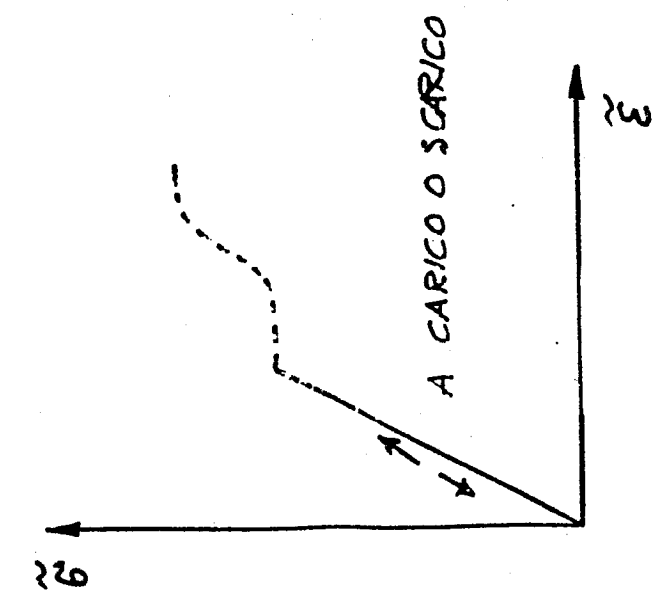
$$\mathbf{D}_{12} = \mathbf{D}_{21} = \mathbf{D}_{13} = \mathbf{D}_{31} = \mathbf{D}_{23} = \mathbf{D}_{32} = \mathbf{D}_{11} - 2 \cdot \mathbf{D}_{44} = \lambda = \frac{\mathbf{E}\nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}$$



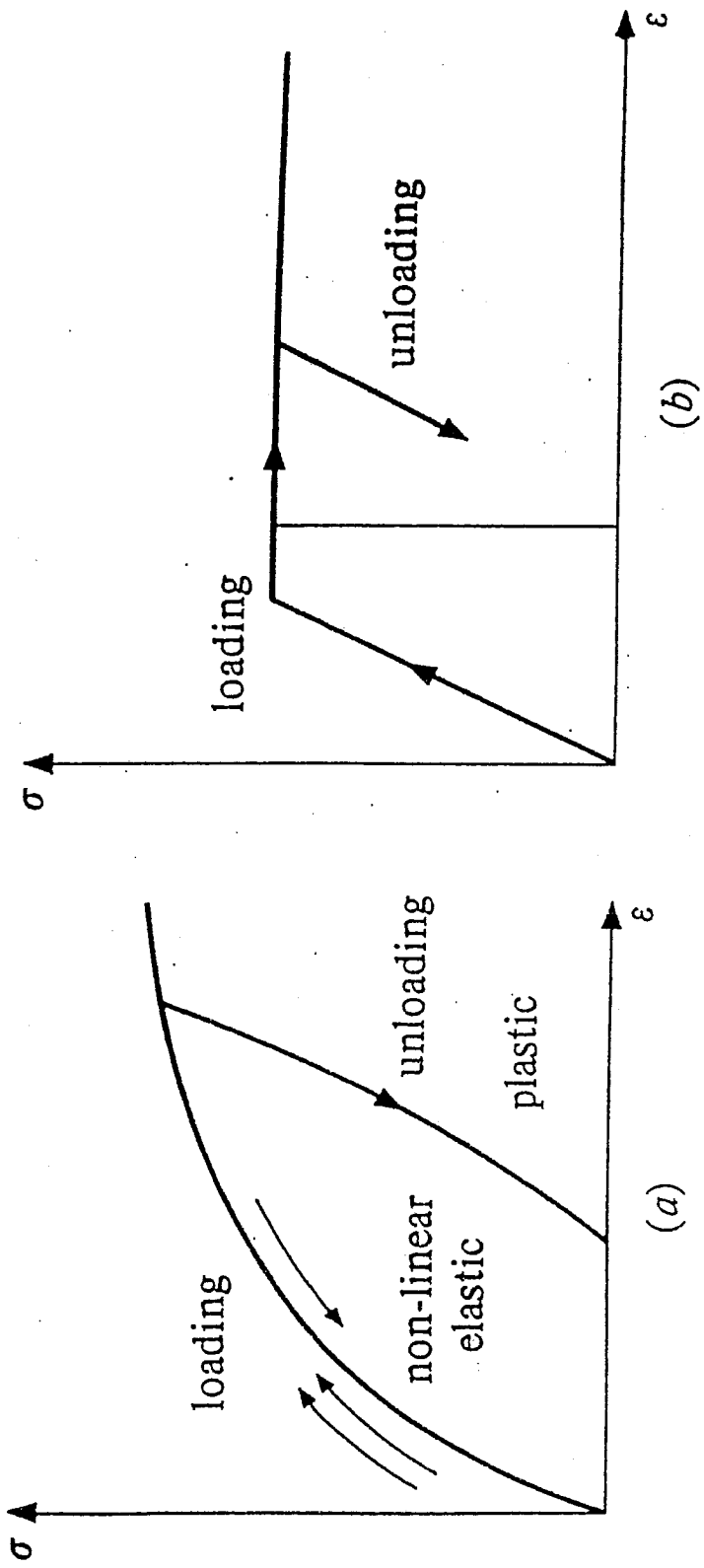
ELASTICO LINEARE (LE)



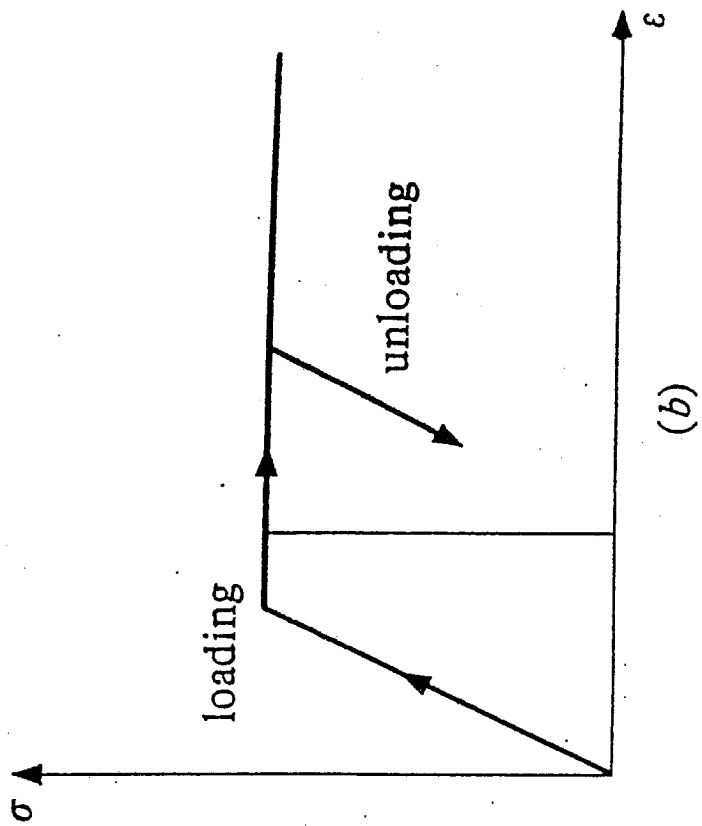
ELASTICO NONLINEARE (NON-LE)



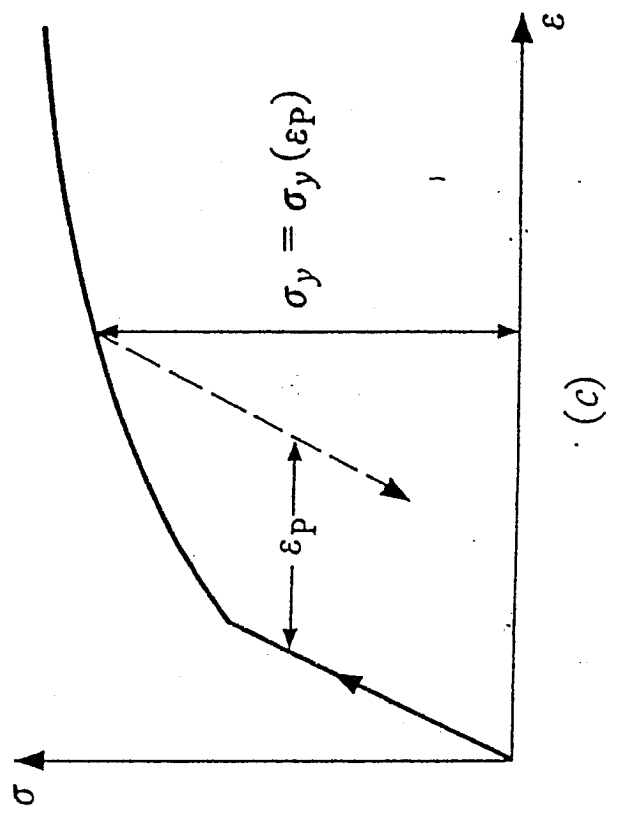
ELASTICO ANELASTICO (ELPLA)



(a)



(b)

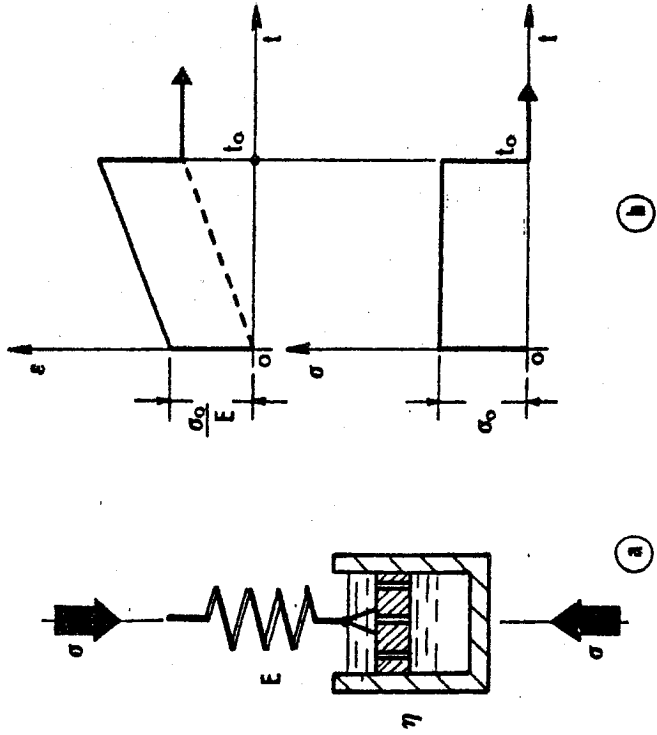


(c)

# MODELLI REOLOGICI: MAXWELL

$$- \varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^v \quad \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^v \quad \varepsilon^e = \sigma / E, \quad \dot{\varepsilon}^v = \sigma / \eta$$

$$- \dot{\varepsilon} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} t \quad \sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{E}{\eta}(t_1 - t)}$$



(b)

(a)

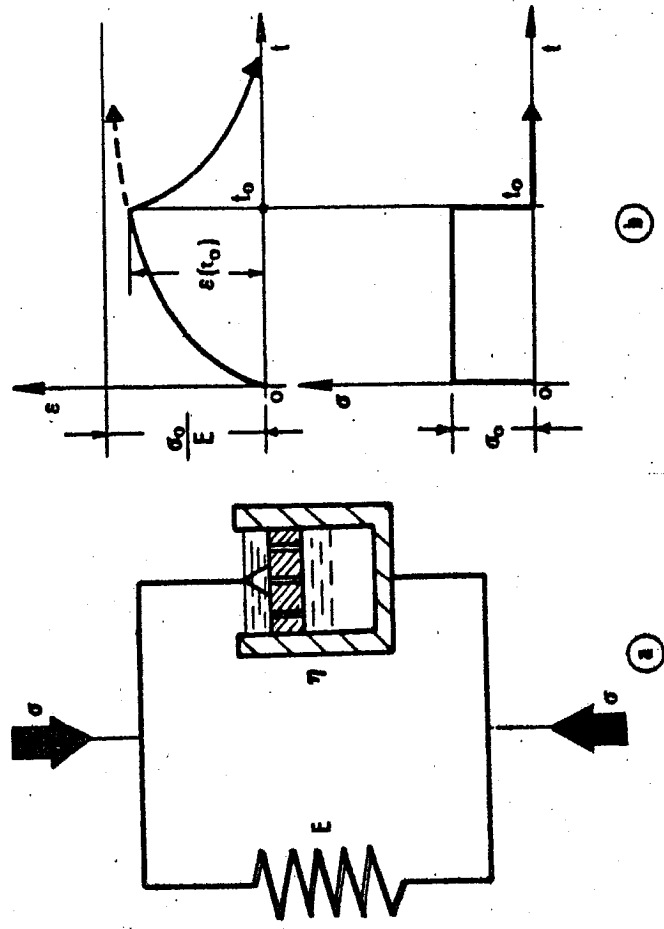


# MODELLI REOLOGICI: KELVIN

$$- \sigma = \sigma^e + \sigma^v \quad \sigma_0 = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{E \cdot t}{\eta}}} \right)$$

$$- \sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1 = \sigma_0 \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{E \cdot t_1}{\eta}}} \right)$$



# MODELLI REOLOGICI: BURGERS

$$- \quad \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{E_1 t}{\eta_1}}} \right) + \frac{\sigma_0 t}{\eta_2} \quad \varepsilon = \sigma_0 \left[ \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{E_1 t}{\eta_1}}} \right) + \frac{t}{\eta_2} \right]$$

$$- \quad \bar{E} = (E_1 + E_2) / (E_1 \cdot E_2) \quad E_2$$

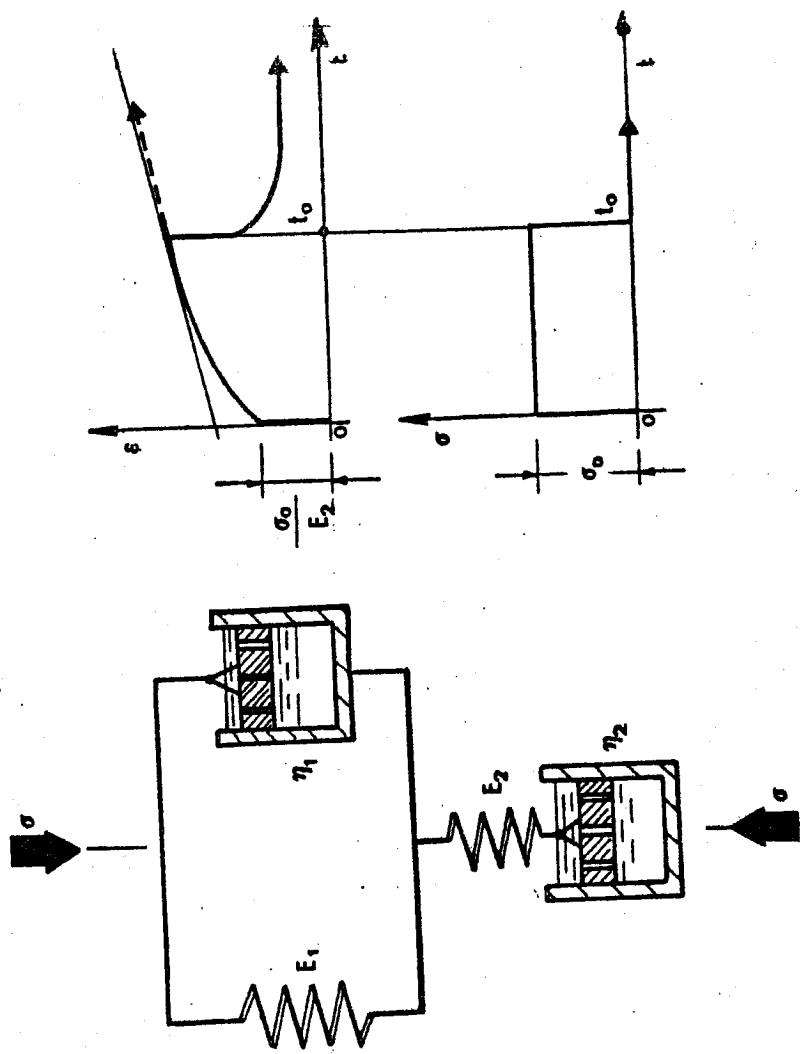
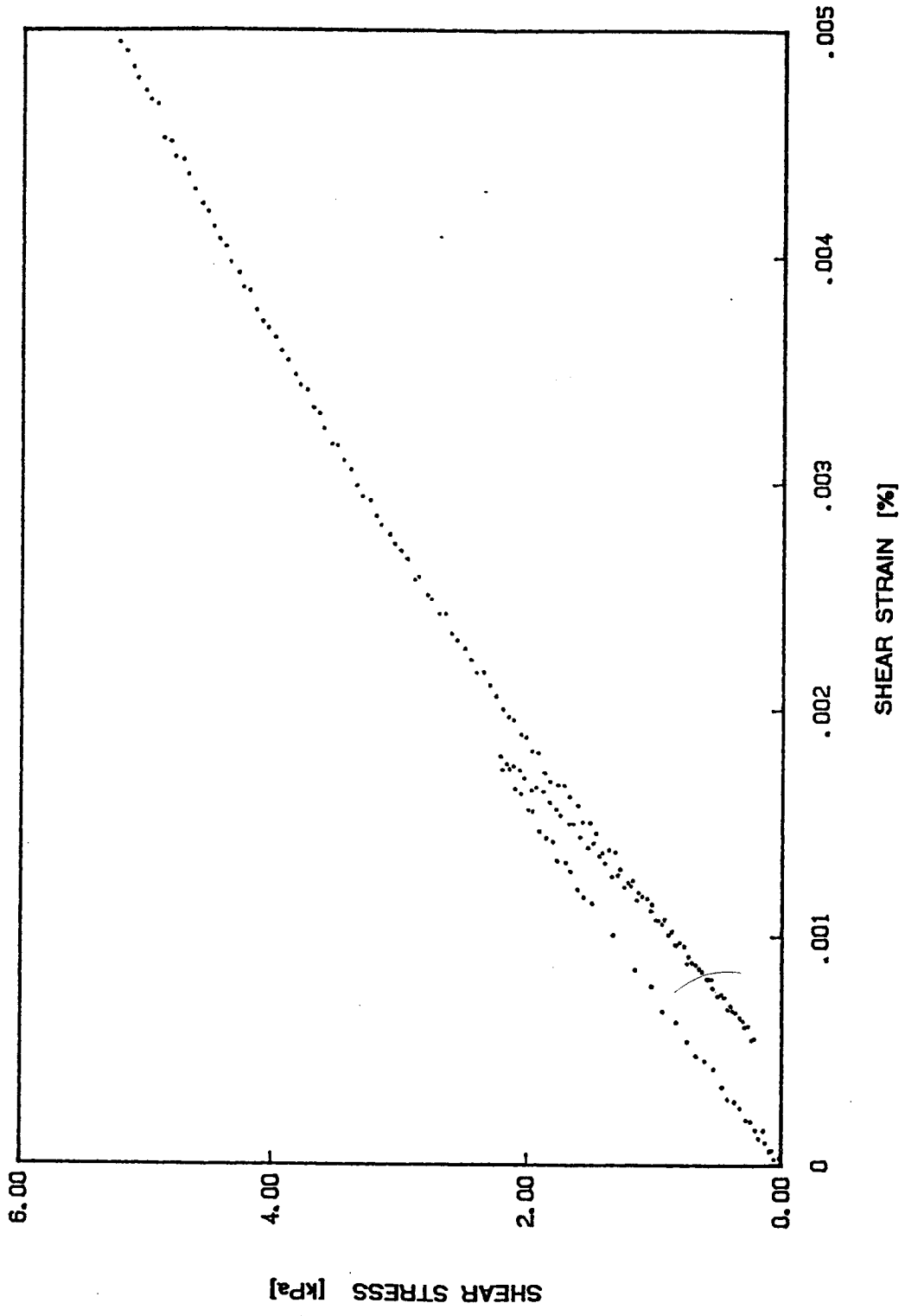
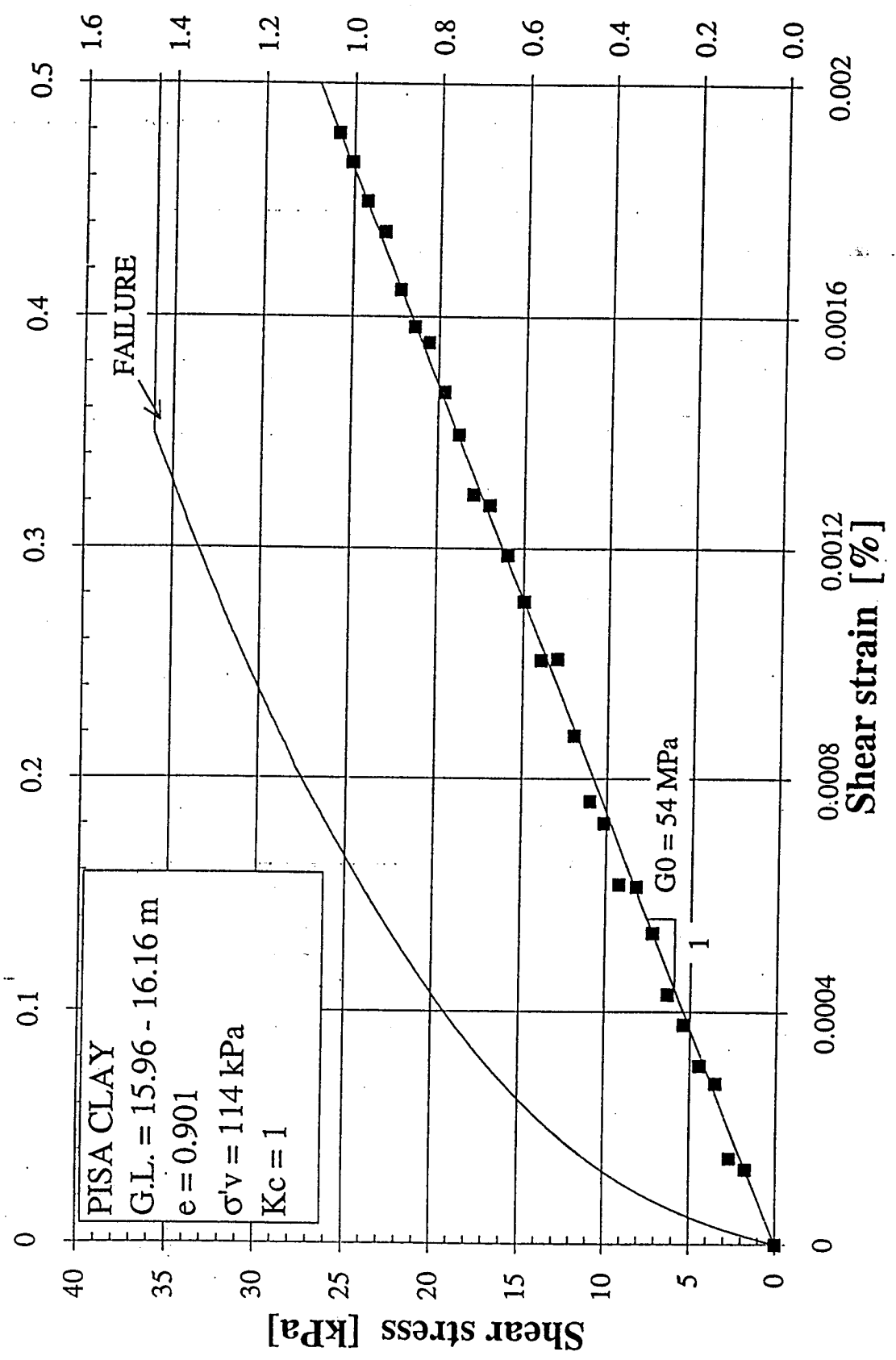
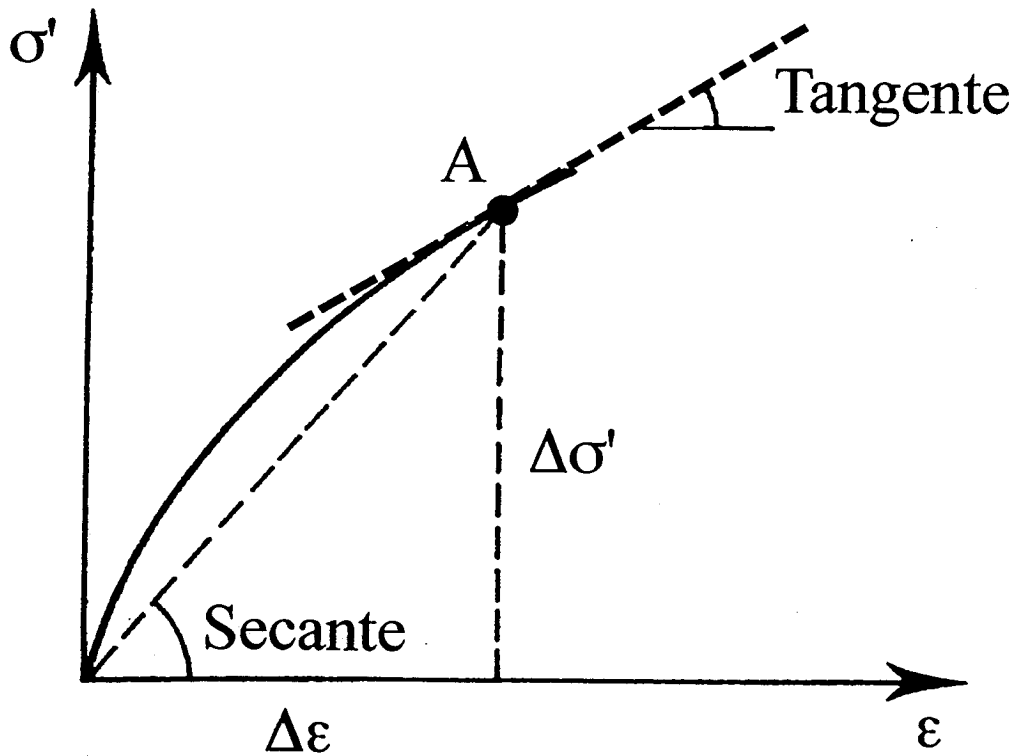


FIG. 11 STRESS - STRAIN CURVE OF TICINO SAND FROM MONOTONIC TORSIONAL SHEAR TEST (AFTER ARMANDI 1991)





# RIGIDEZZA TANGENTE E SECANTE



Nel punto A la rigidezza (modulo di deformazione)

$$\text{Tangente} = \frac{d\sigma'}{d\epsilon} \quad ; \quad \text{secante} = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\epsilon}$$

- MODELLI NON LINEARI . IMPIEGANO LA LEGGE DI HOOKE IN FORMA INCREMENTALE

$$\{\Delta \epsilon\} = [d] \{\Delta \sigma\}$$

$$\epsilon_{ij} = d_{ijkl} \sigma_{kl}$$

•• Esempi → Legge Iperbolica

$$\begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_x \\ \Delta \epsilon_y \\ \Delta \epsilon_z \\ \Delta \gamma_{yz} \\ \Delta \gamma_{zx} \\ \Delta \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & & & \\ -\nu & 1 & -\nu & & & \\ -\nu & -\nu & 1 & & & \\ & & & 2(1+\nu) & & \\ & & & & 2(1+\nu) & \\ & & & & & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \sigma_z \\ \Delta \tau_{yz} \\ \Delta \tau_{zx} \\ \Delta \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

Quali E e  $\nu$  ?

NEI PROBLEMI DI ELASTO-PLASTICITÀ LA  
DEFINIZIONE DI UNA RELAZIONE  $\sigma \leftrightarrow \varepsilon$   
COMPORTA DI DEFINIRE:

- (a) RELAZIONE IN CAMPO ELASTICO
- (b) CONDIZIONE (O CRITERIO) DI PLASTICIZZAZIONE CHE INDICA IL LIVELLO DI SFORZO PER CUI SI HANNO DEFORMAZIONI PLASTICHE
- (c) RELAZIONE SFORZO-DEFORMAZIONE IN CAMPO PLASTICO

PER MATERIALI INCRUDENTI ANCHE UNA  
"LEGGE DI INCRUDIMENTO"

# **DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DEI MODULI DI DEFORMAZIONE**

## **TERRENI CAMPIONABILI (GRANA FINE)**

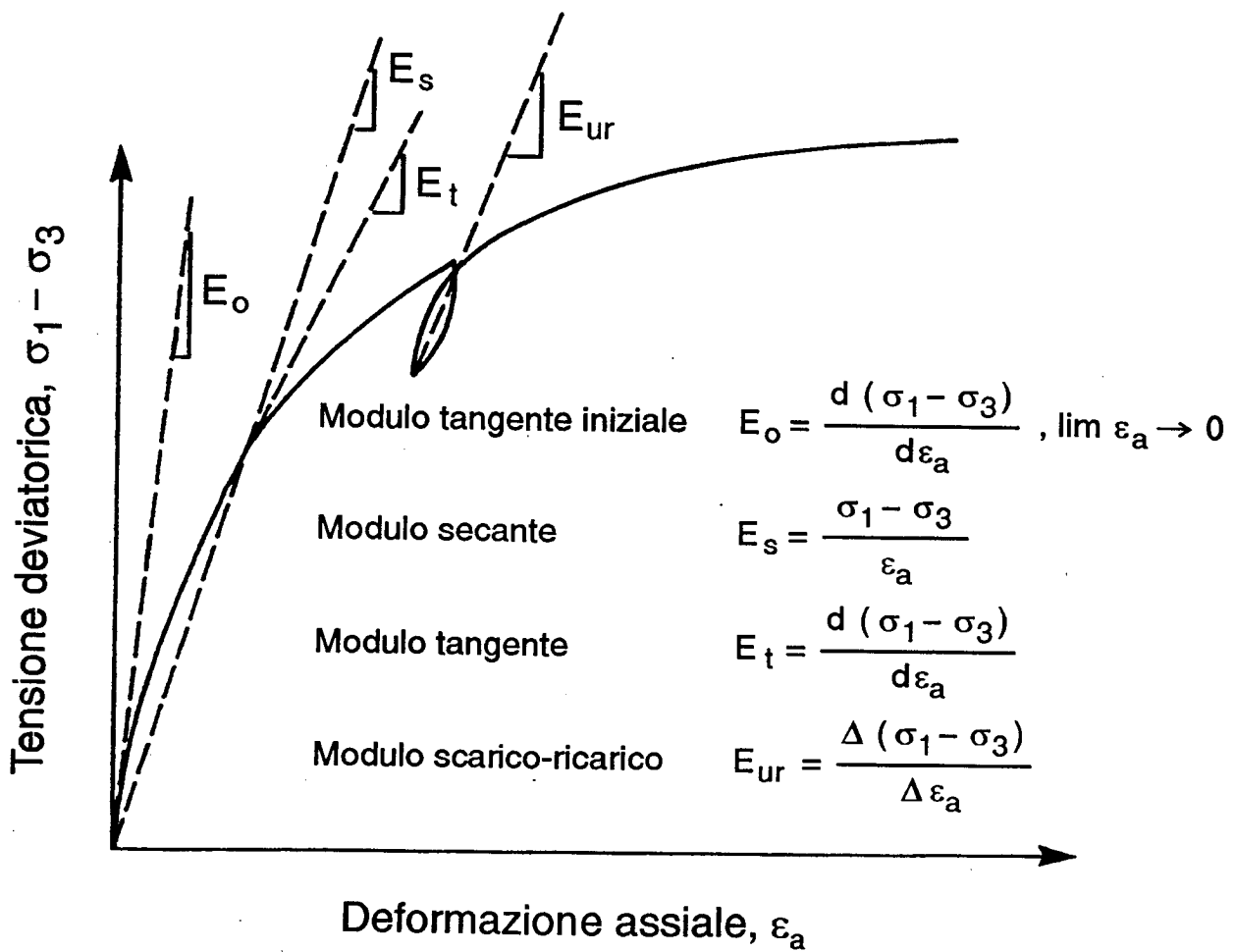
- Edometro
- Triassiale
- Colonna Risonante – Taglio torsionale

## **TERRENI DIFFICILMENTE CAMPIONABILI**

- Penetrometriche (SPT, DP, CPT)
- Geofisiche (Sismiche)
- Cariso su piastra (PLT)



## DEFINIZIONE DEI MODULI DI DEFORMAZIONE PROVA DI COMPRESSIONE TRIASSIALE



# DETERMINAZIONE DELLA RIGIDEZZA DA PROVE TRIASSIALI

Prova di compressione per carico CKoD:

$$E' = \frac{d\sigma_a}{\varepsilon_a}; \quad d\sigma_a = \sigma_a - \sigma_{ac}; \quad \nu' = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}$$

Prova di compressione per carico CKoU:

$$E_u = \frac{d\sigma_a}{\varepsilon_a}; \quad \nu_u = 0.5$$

Stress-Path qualsiasi – drenato o non drenato

$$G = \frac{q - q_o}{3 \cdot \varepsilon_s}; \quad q = \sigma_a - \sigma_r; \quad q_o = \sigma_{ac} - \sigma_{rc}; \quad \varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_a - \varepsilon_r)$$

$$\text{Fattore di mobilitazione: } f = \frac{q - q_o}{q_{\max} - q_o}$$

TRASDUTTORE DI PROSSIMITA'  
PER LA MISURA DELLA  
DEFORMAZIONE ASSIALE

TRASDUTTORE DI PROSSIMITA'  
PER LA MISURA DELLA ROTAZIONE

BOBINE  
MAGNETI

CAMPIONE CAVO

TRASDUTTORE DI PROSSIMITA'  
PER LA MISURA DELLA  
DEFORMAZIONE RADIALE

SUPPORTO PER SISTEMA  
DI TRASMISSIONE DELLE SOLLECITAZIONI  
(MOTORE DI STOKOE)

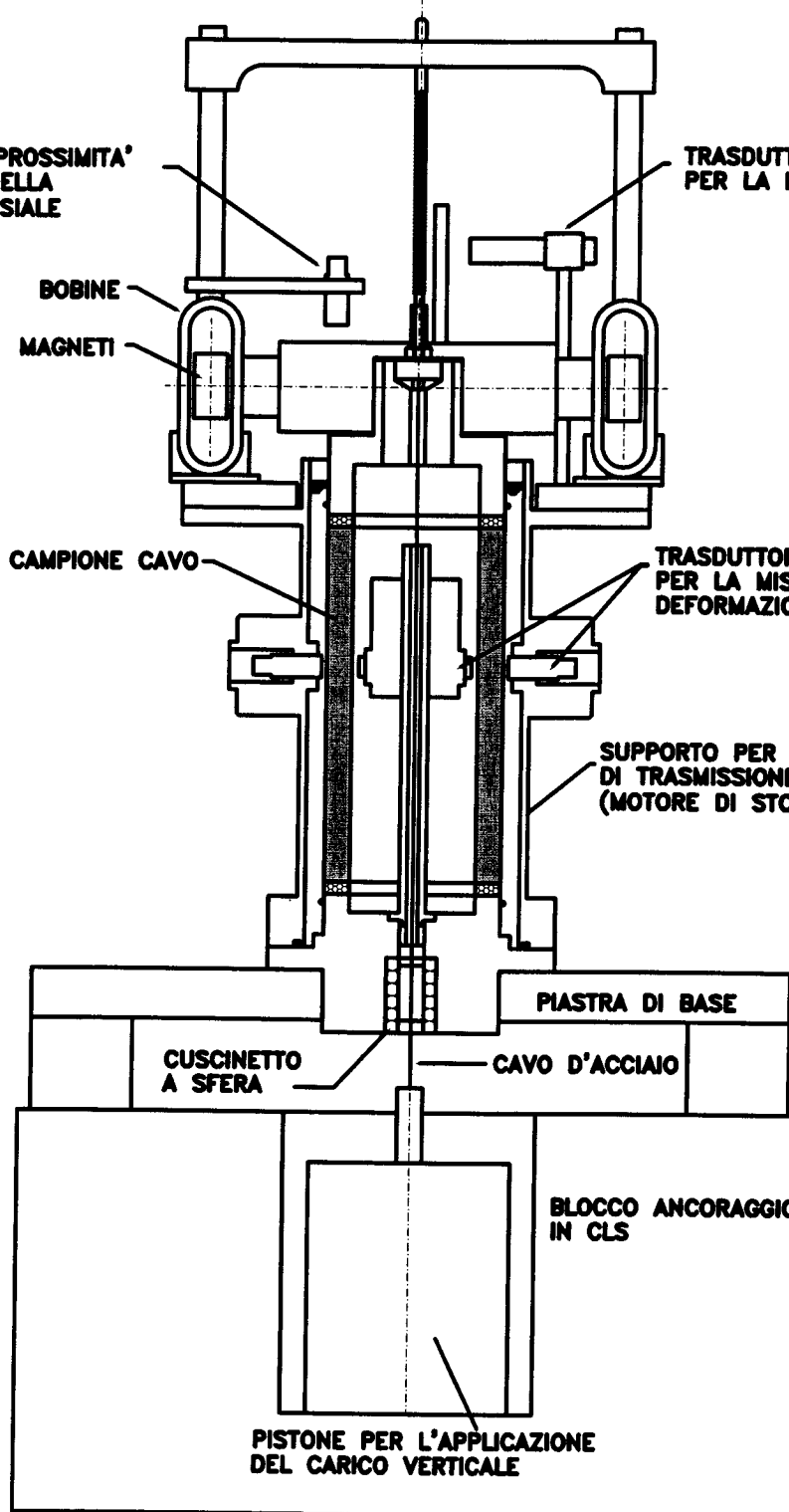
PIASTRA DI BASE

CUSCINETTO  
A SFERA

CAVO D'ACCIAIO

BLOCCO ANCORAGGIO  
IN CLS

PISTONE PER L'APPLICAZIONE  
DEL CARICO VERTICALE



# RIGIDEZZA DA PROVE DI TAGLIO TORSIONALE – COLONNA RISONANTE

## COLONNA RISONANTE:

- Rigidezza a taglio  $G = \rho(2 \cdot \pi \cdot l \cdot f_n / \beta)^2$ ;  $I_s / I_{ds} = \beta \cdot \tan \beta$

- Rapporto di smorzamento  $D = \frac{f_1 - f_2}{2 \cdot f_n}$ ;  $D = \frac{\ln(A_0 / A_n)}{2 \cdot \pi \cdot n}$

- Deformazione a taglio (misura accelerometro)  
TAGLIO TORSIONALE:

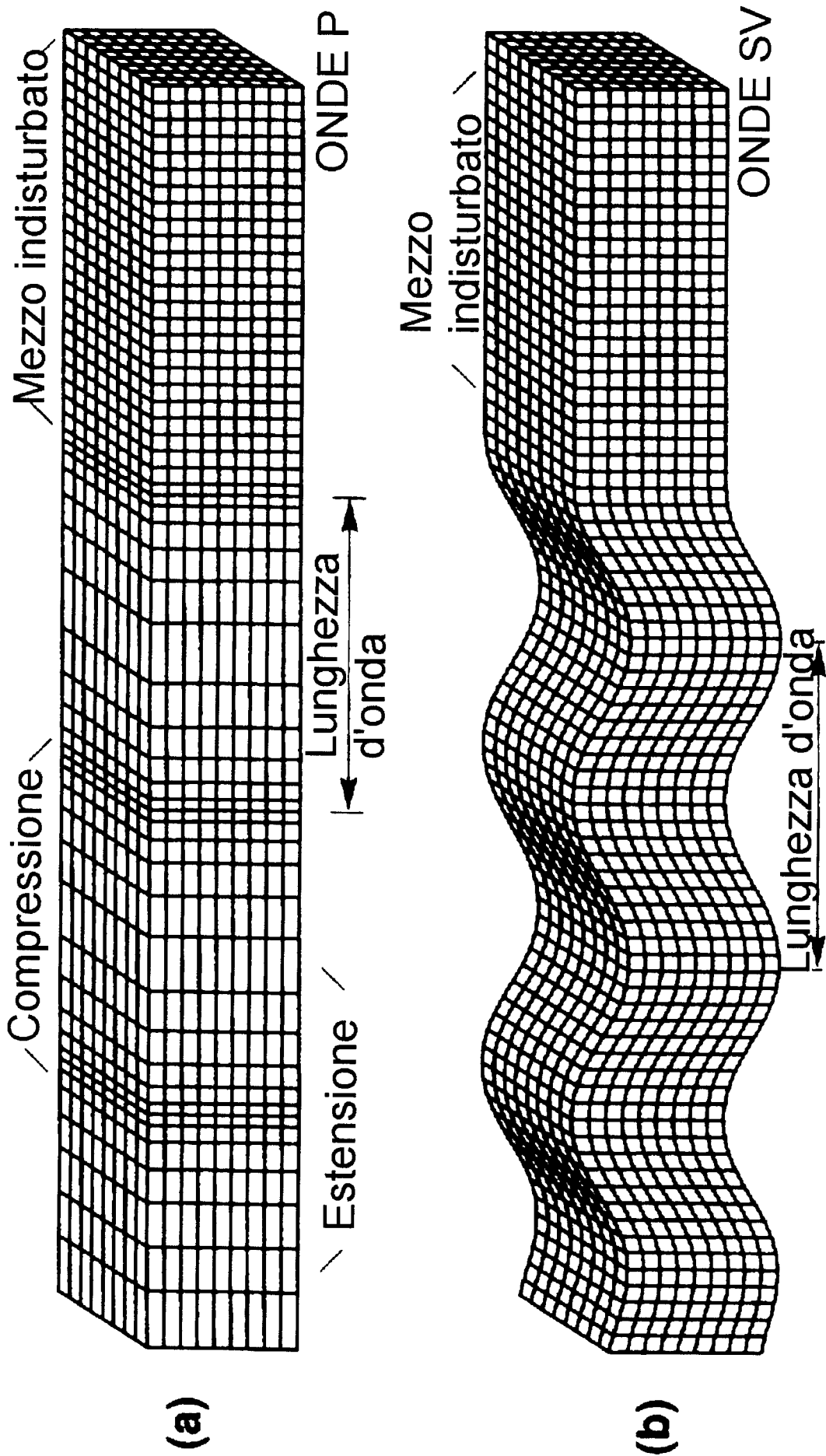
- Sforzi di taglio:  $\tau_{\max} = \frac{2T}{\pi \cdot r^3}$ ;  $\tau = \frac{3T}{2 \cdot \pi \cdot (r_e - r_i)^3}$

- Deformazioni a taglio:  $\gamma = \frac{2}{3} r \frac{\vartheta}{l}$ ;  $\vartheta = \frac{\Delta a}{R}$ ;  $\gamma = \frac{2}{3} \frac{\vartheta (r_e^3 + r_i^3)}{l (r_e^3 - r_i^3)}$

- Cicli di isteresi

- Fattore di mobilitazione  $\tau / \tau_{\max}$

# ONDE DI VOLUME (BOLT 1988)

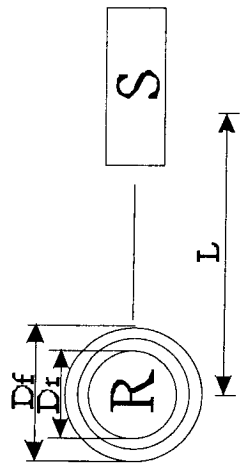


# INDAGINI IN SITO: PROVE GEOFISICHE

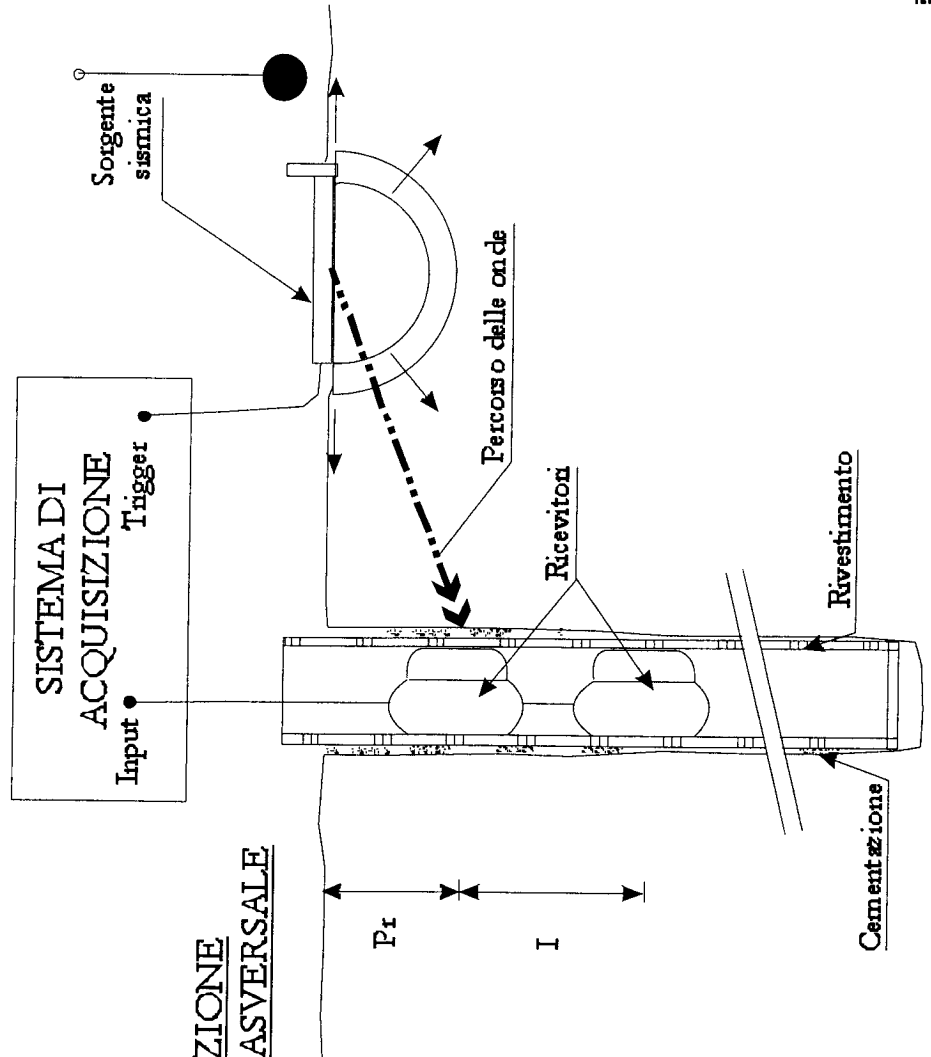
- **IN FORO (INVASIVE)**
  - Cross Hole (CH)
  - Down Hole (DH)
  - Cono sismico (SCPT)
- **REQUISITI ESSENZIALI**
  - buon accoppiamento meccanico,
  - controllo verticalità,
  - forme d'onda ripetibili,
  - controllo direttività e polarità,
  - uso di una coppia di ricevitori
  - uso di analizzatori di segnale portatili
- **DI SUPERFICIE (NON INVASIVE)**
  - SASW, Rifrazione (SH), Riflessione

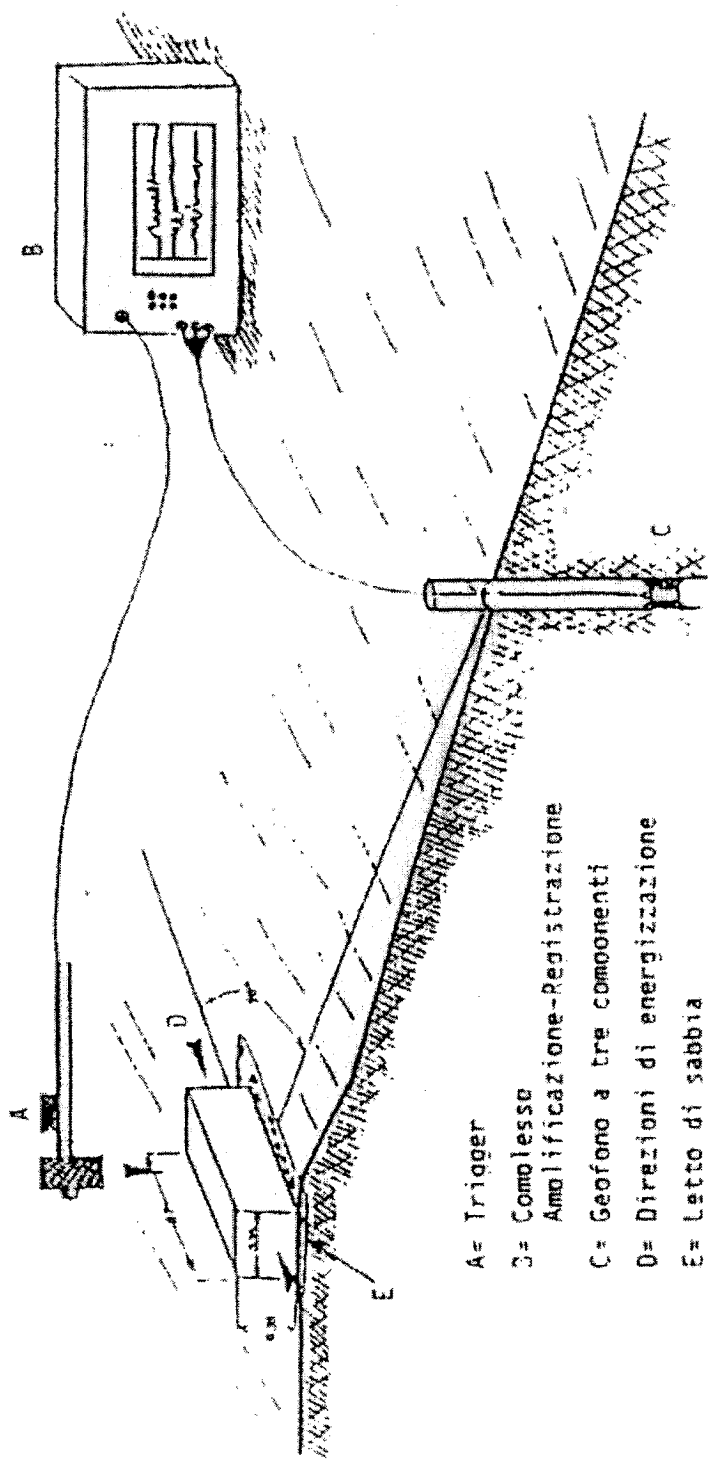
# PROVE GEOFISICHE IN FORO

## PLANIMETRIA



## SEZIONE TRASVERSALE





- A= Trigger
- B= Complesso Amplificazione-Registrazione
- C= Geofono a tre componenti
- D= Direzioni di energizzazione
- E= Letto di sabbia

Schema della prova Down Hole

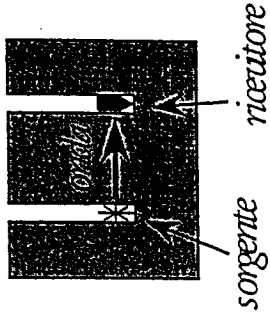




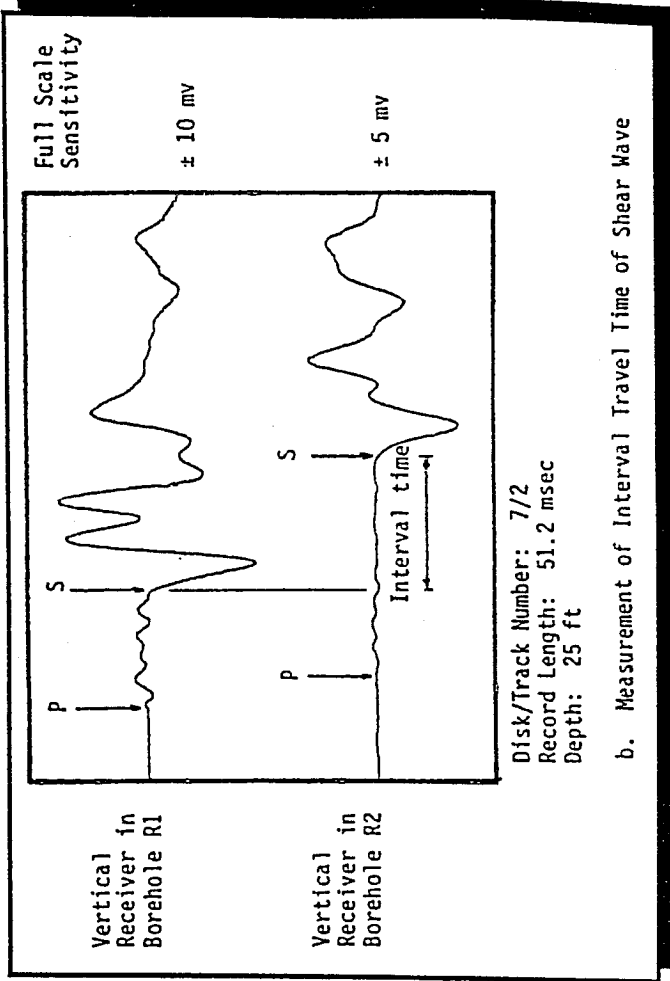
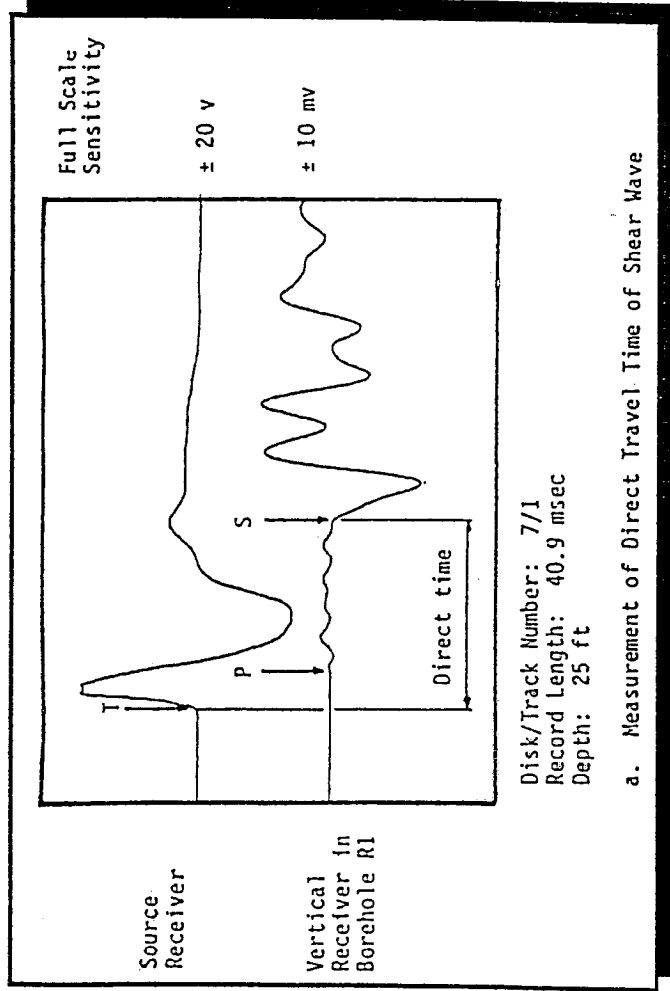
STUDIO GEOTECNICO ITALIANO srl  
 Ingegneria geotecnica - ecologia applicata - ingegneria sismica

# Indagini Geofisiche

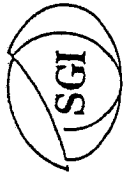
*Prove Invasive* ⇨ *Cross-Hole Test* ⇨



## • Interpretazione



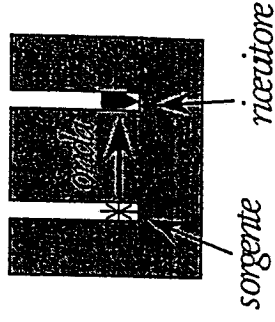
(da Stokoe, 1992)



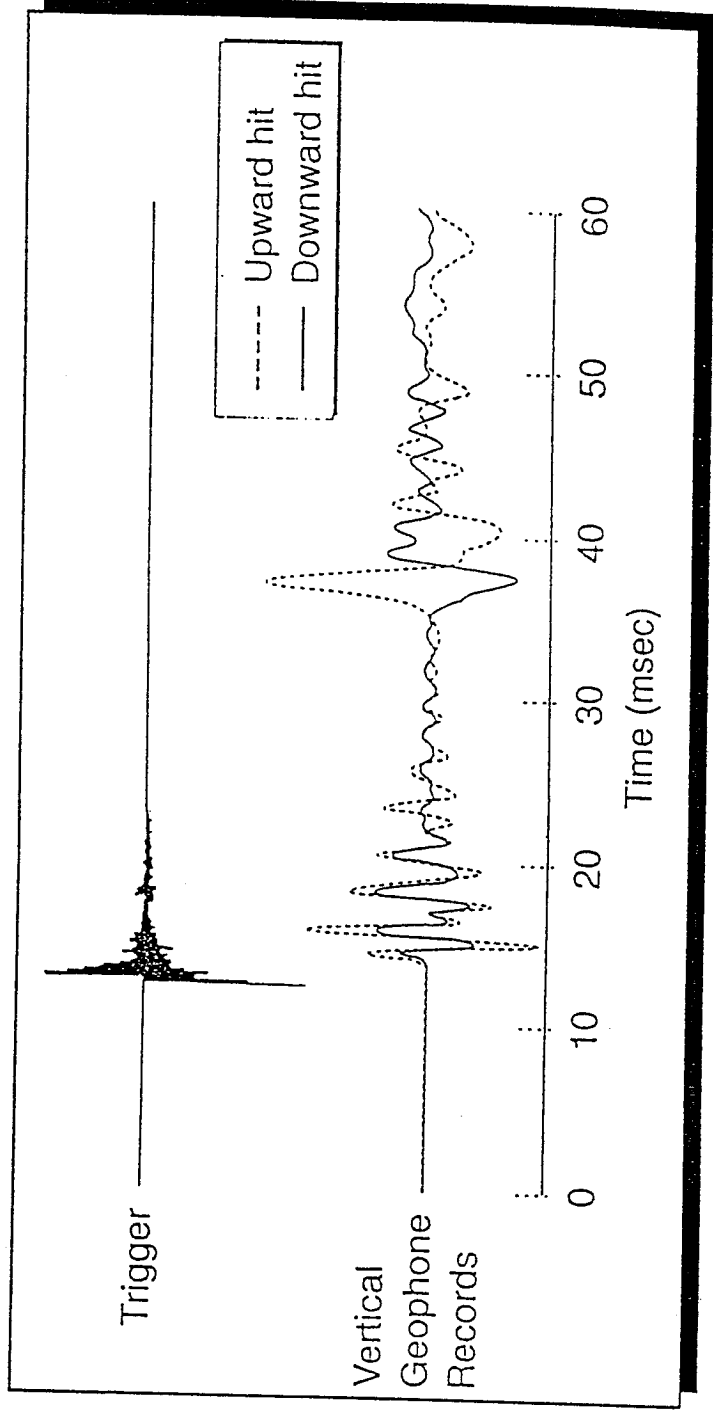
STUDIO GEOTECNICO ITALIANO srl  
ingegneria geotecnica - geologia applicata - ingegneria sismica

# Indagini Geofisiche

*Prove Invasive* ⇨ *Cross-Hole Test* ⇨



## • Interpretazione

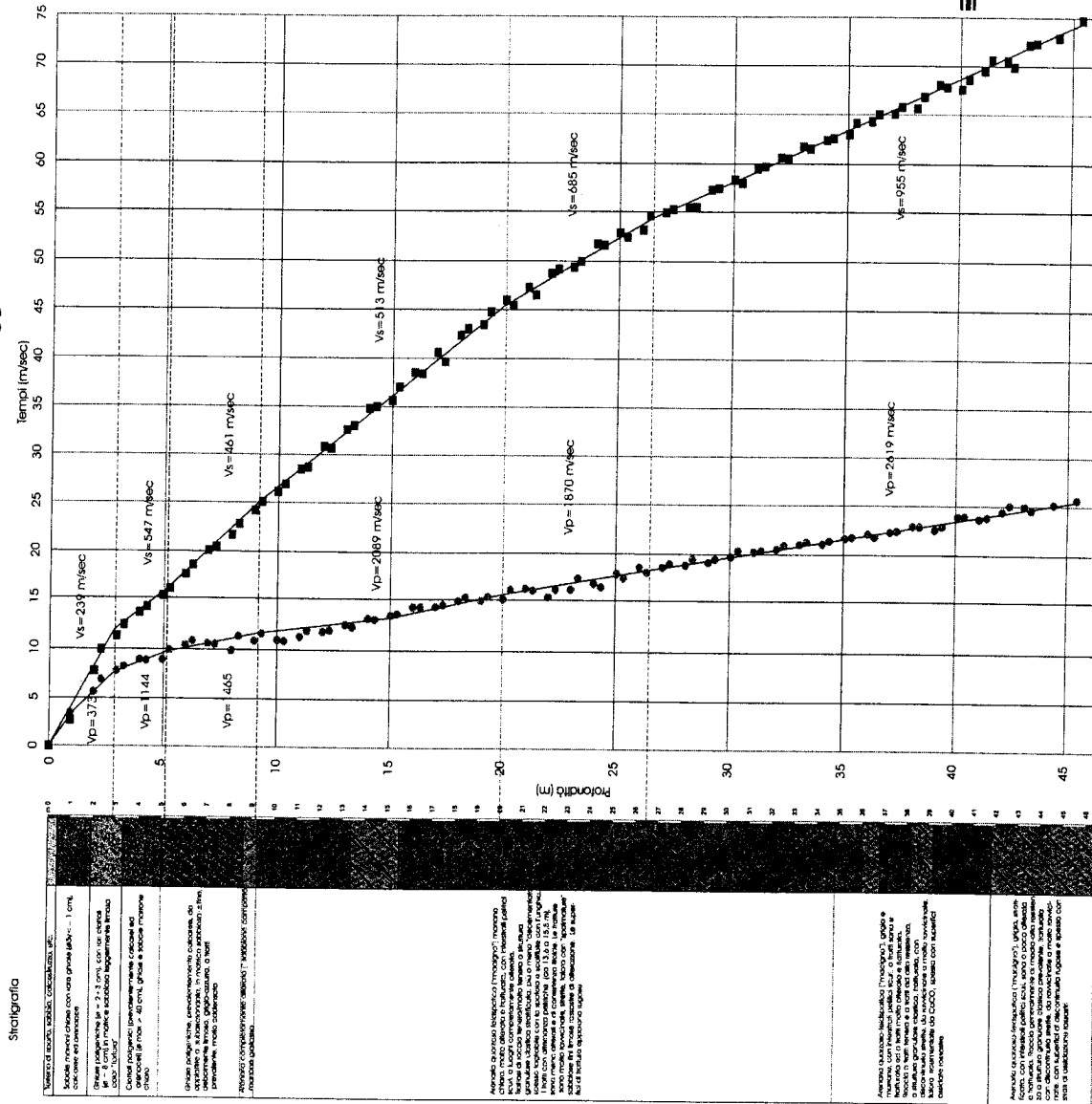


# PROVE GEOFISICHE IN FORO



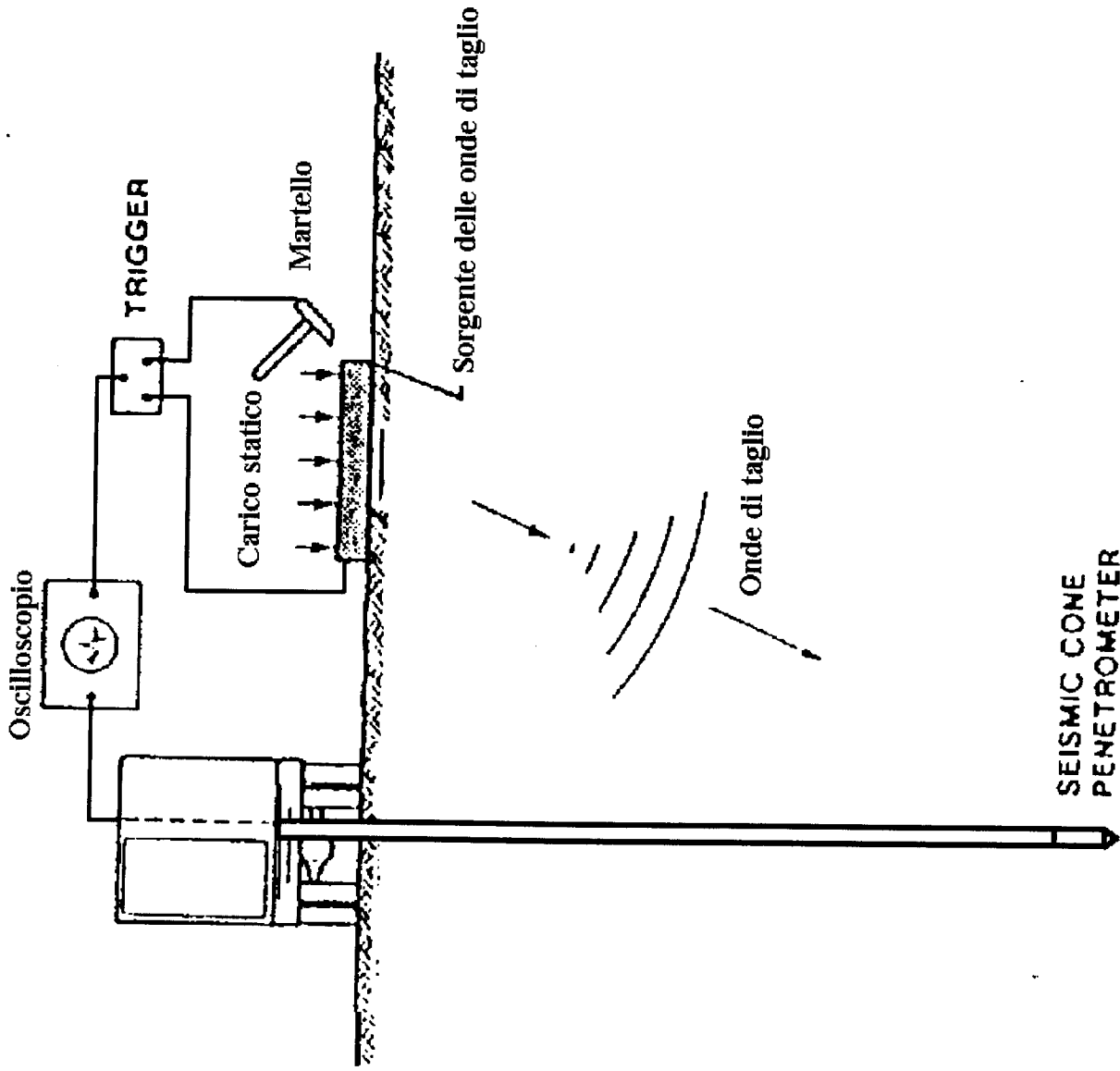
**PROGETTO V.E.L.  
SUBPROGETTO GARFAGEO**

## DOWNHOLE - Tempi di percorrenza corretti Comune di Castelnovo di Garfagnana - Sondaggio S1



Scala grafica

1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
10	10	10	10
11	11	11	11
12	12	12	12
13	13	13	13
14	14	14	14
15	15	15	15
16	16	16	16
17	17	17	17
18	18	18	18
19	19	19	19
20	20	20	20
21	21	21	21
22	22	22	22
23	23	23	23
24	24	24	24
25	25	25	25
26	26	26	26
27	27	27	27
28	28	28	28
29	29	29	29
30	30	30	30
31	31	31	31
32	32	32	32
33	33	33	33
34	34	34	34
35	35	35	35
36	36	36	36
37	37	37	37
38	38	38	38
39	39	39	39
40	40	40	40
41	41	41	41
42	42	42	42
43	43	43	43
44	44	44	44
45	45	45	45



# GENERALITÀ' ONDE SISMICHE

## VELOCITÀ' DI PROPAGAZIONE

$$V_s = \frac{d}{t_s} \quad V_p = \frac{d}{t_p} \quad V_R = f(\omega) = \lambda \cdot f$$

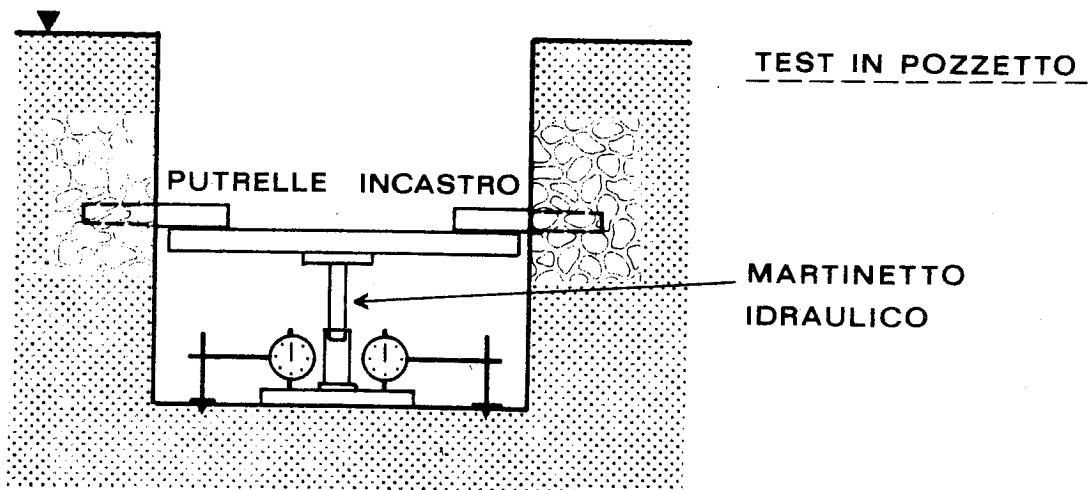
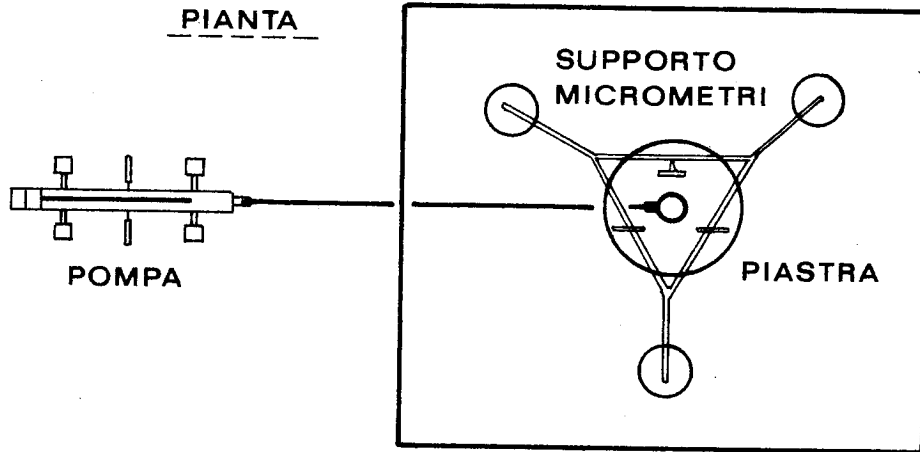
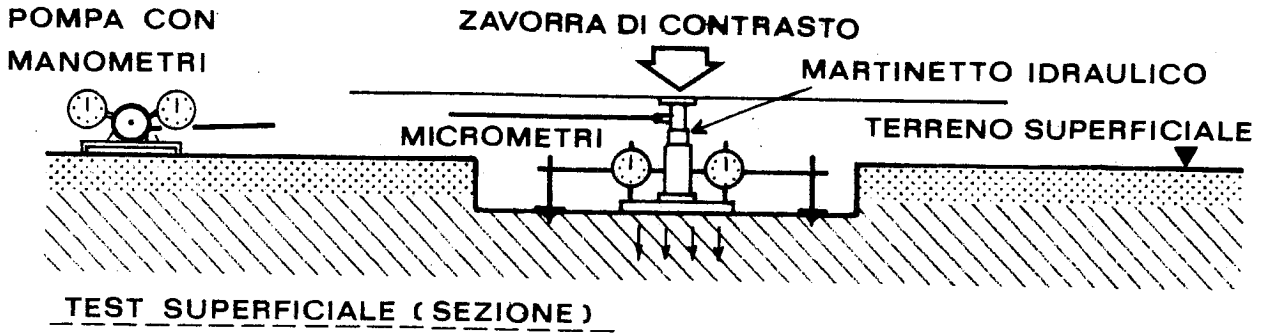
## CARATTERISTICHE ELASTICHE

$$G_o = \rho V_s^2 \quad M_o = \rho V_p^2 \quad V_R / V_s \approx (0.862 + 1.14\nu) / (1 + \nu)$$

$$\nu = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p^2 - V_s^2)$$

$$\gamma = \frac{\dot{u}_s}{V_s}$$

# FIG.1 : PROVA DI CARICO SU PIASTRA



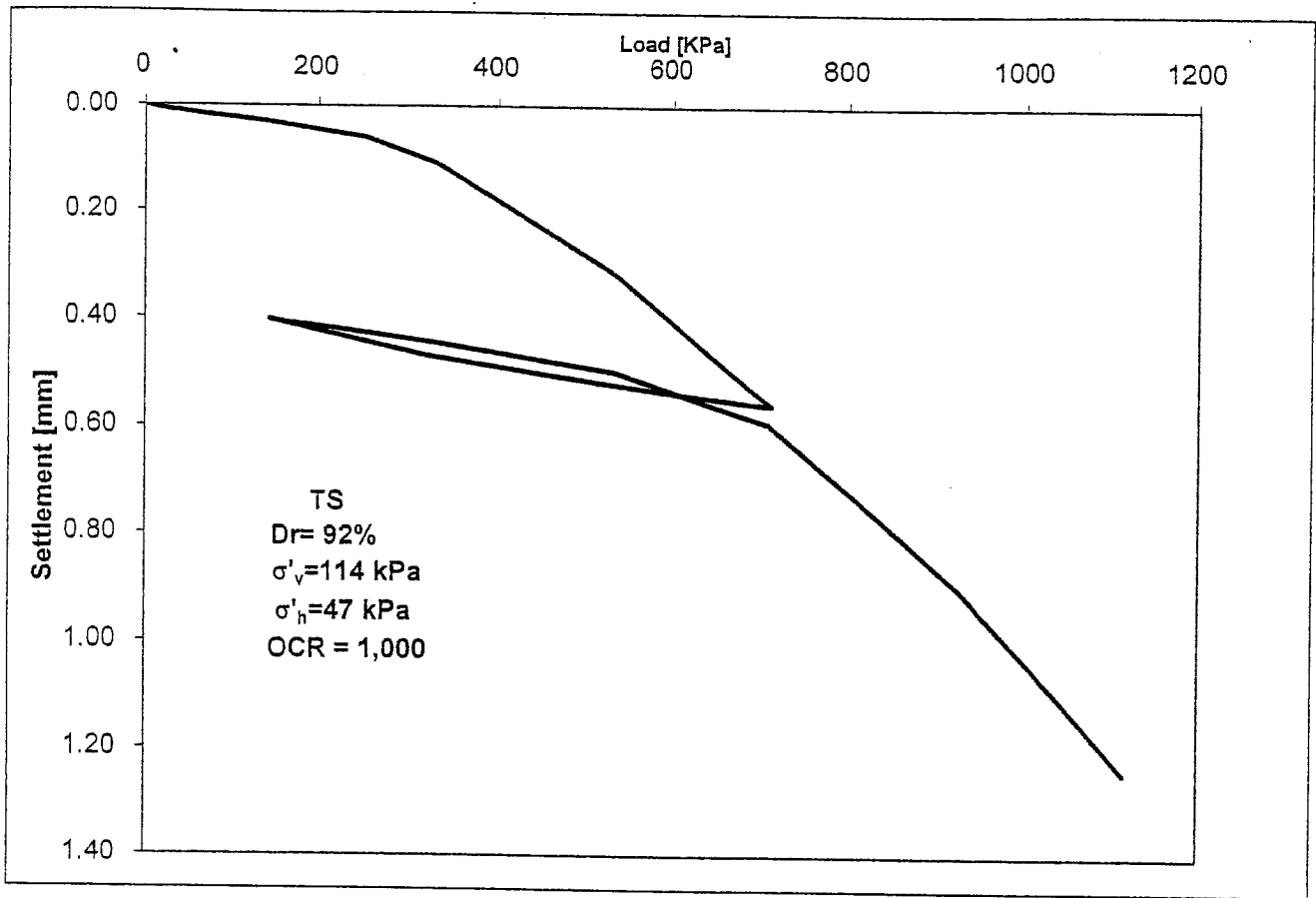


Figure 3 - Load-Settlement Curve

# DETERMINAZIONE DELLA RIGIDEZZA DA PROVE DI CARICO SU PIASTRA

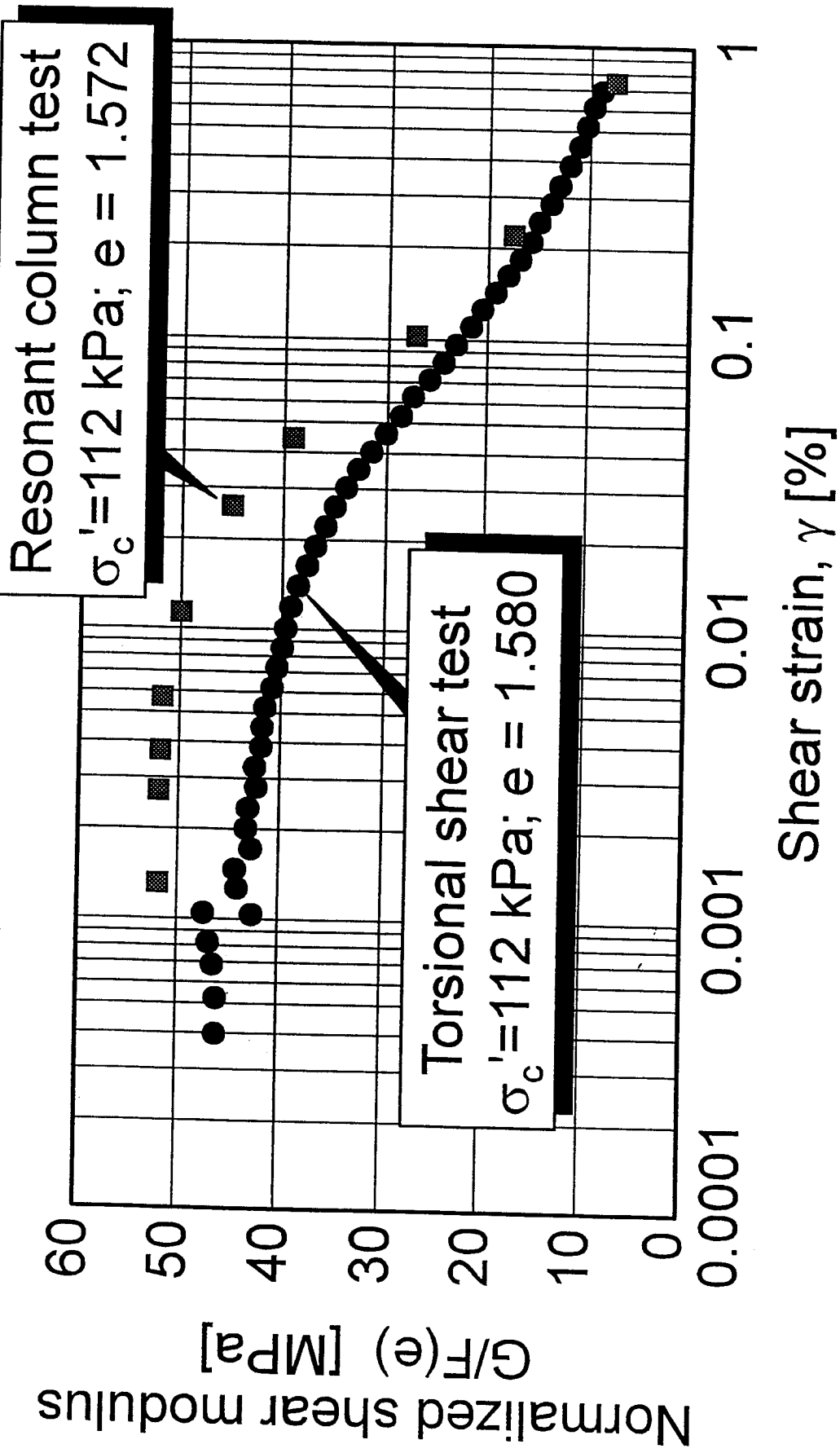
$$G = \frac{\pi q \cdot D \cdot (1 - \nu)}{8} \cdot f(z)$$

$$E = \frac{2\pi q \cdot D \cdot (1 - \nu^2)}{8} \cdot f(z)$$

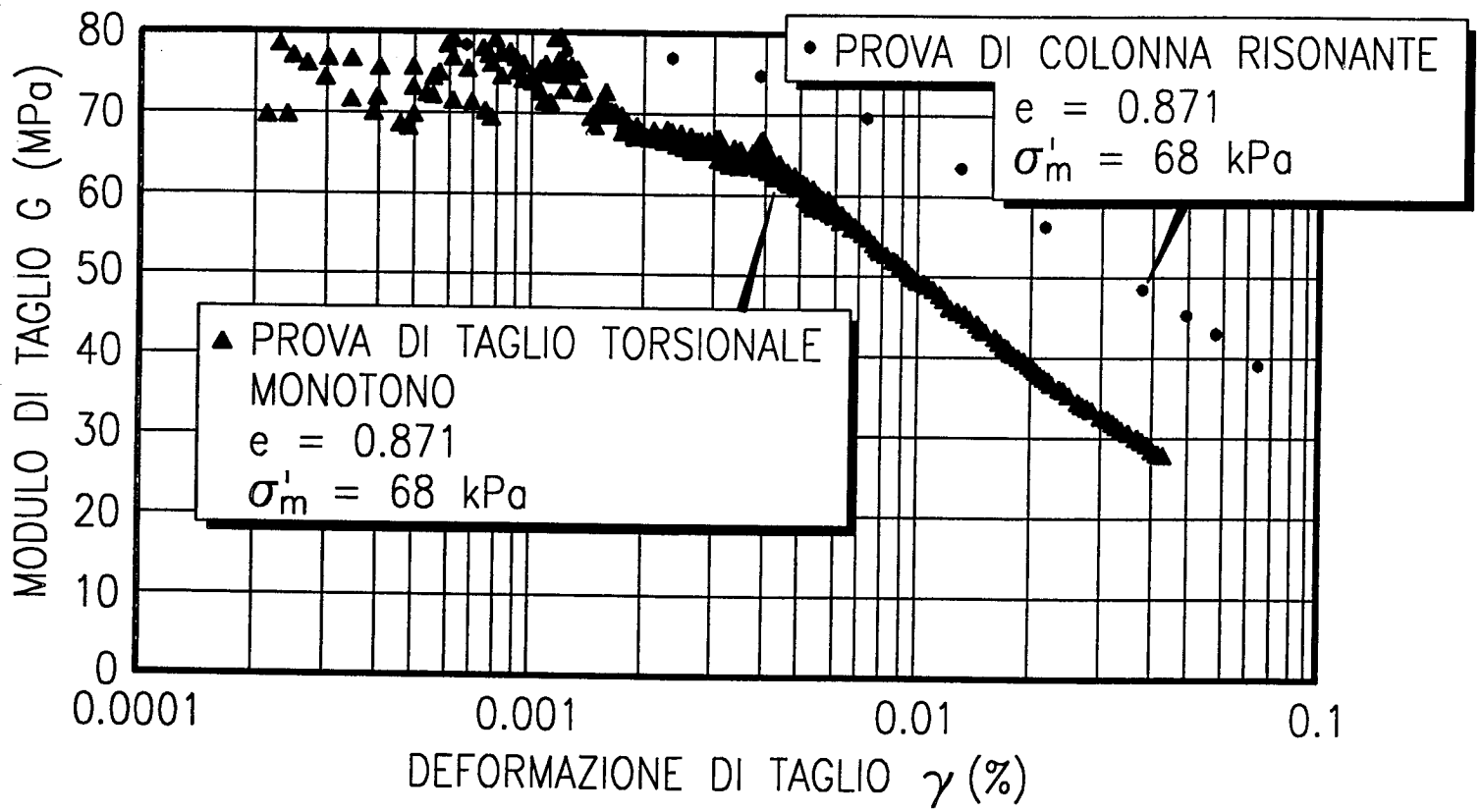


# SHEAR MODULUS OF ISOTROPICALLY CONSOLIDATED UPPER PISA CLAY

*Lo Presti (1994)*

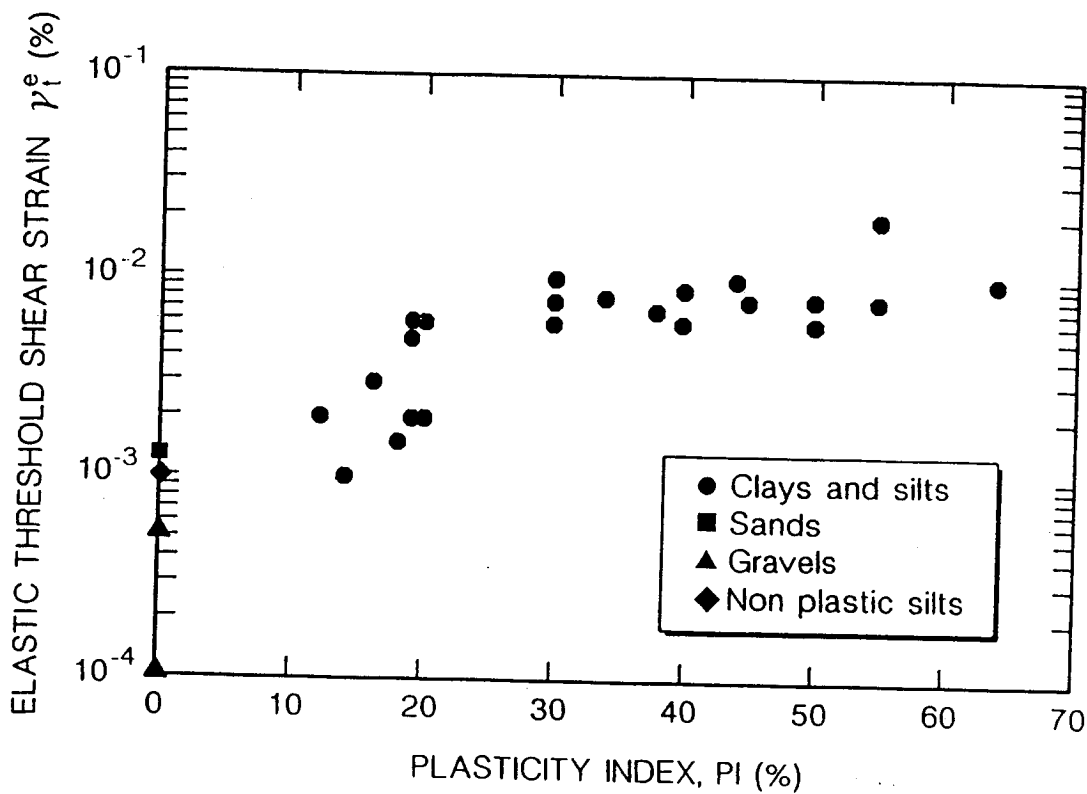


SABBIA DI TOYOURA



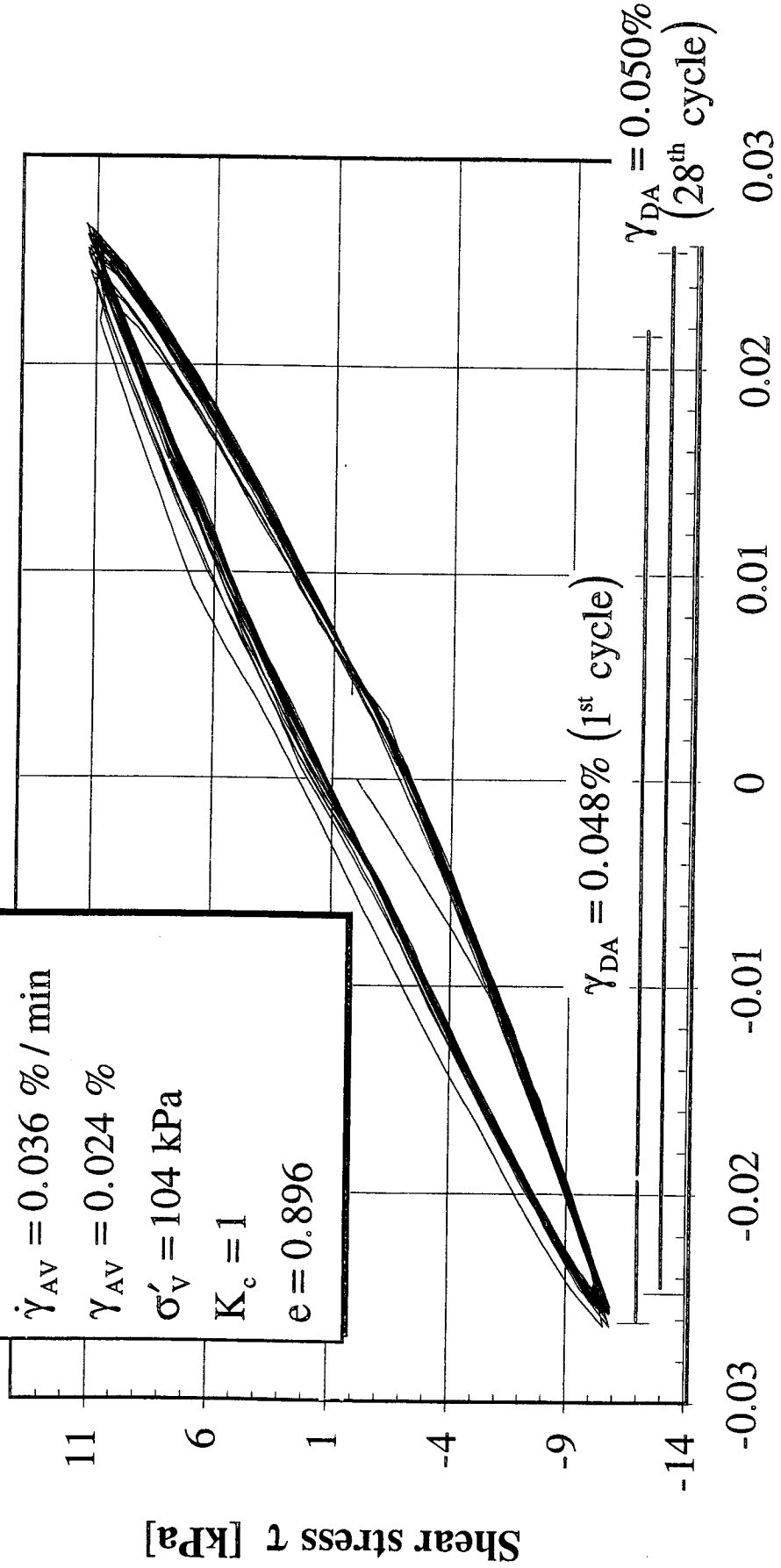
**ELASTIC THRESHOLD SHEAR STRAIN FROM  
CYCLIC AND DYNAMIC TESTS**

(Lo Presti, 1989)



PISA CLAY

Test No. 5 - CLTST  
 $\dot{\gamma}_{AV} = 0.036 \text{ \% / min}$   
 $\gamma_{AV} = 0.024 \text{ \%}$   
 $\sigma'_v = 104 \text{ kPa}$   
 $K_c = 1$   
 $e = 0.896$



$\gamma_{DA}$  = Double amplitude shear strain

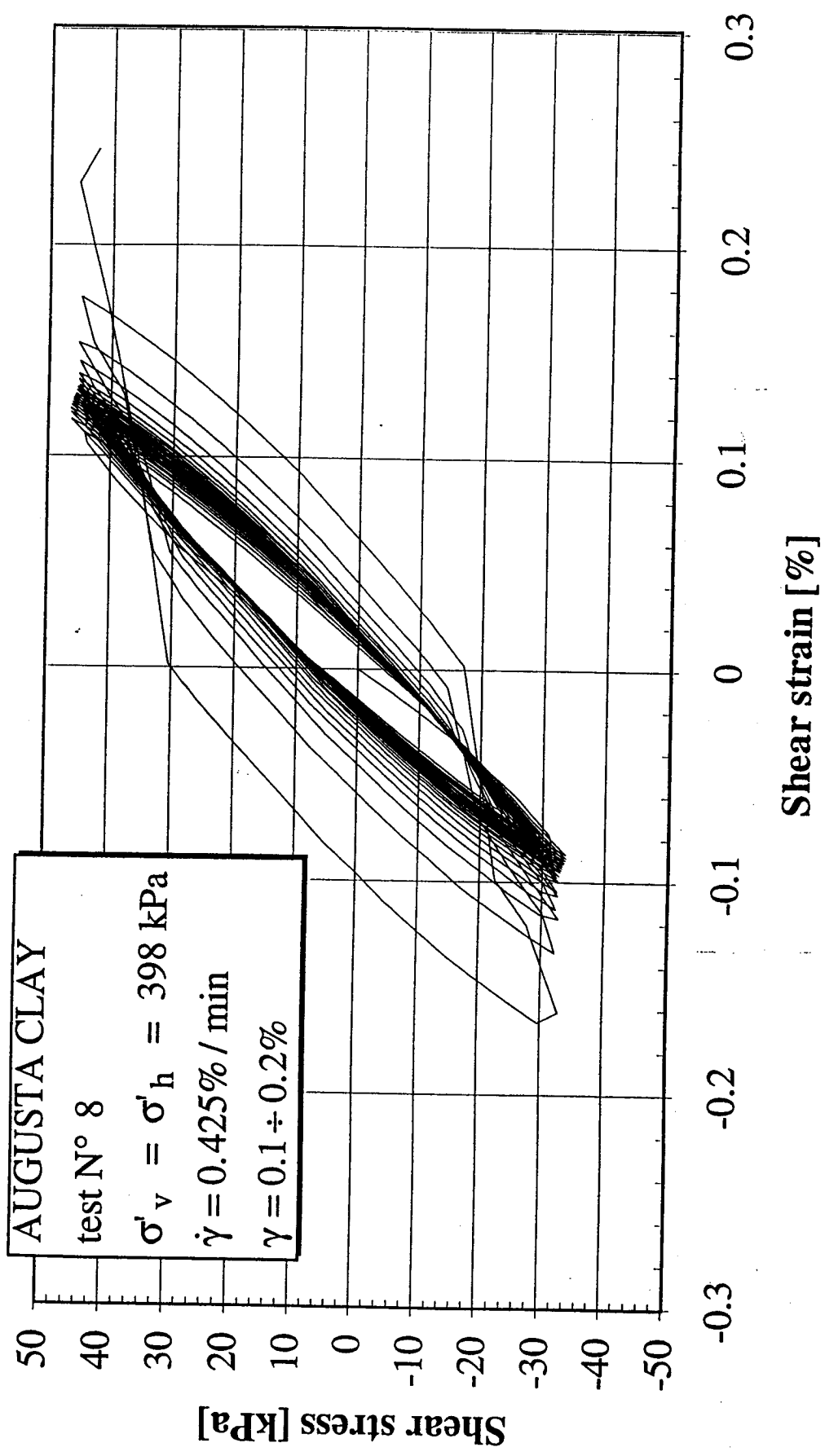
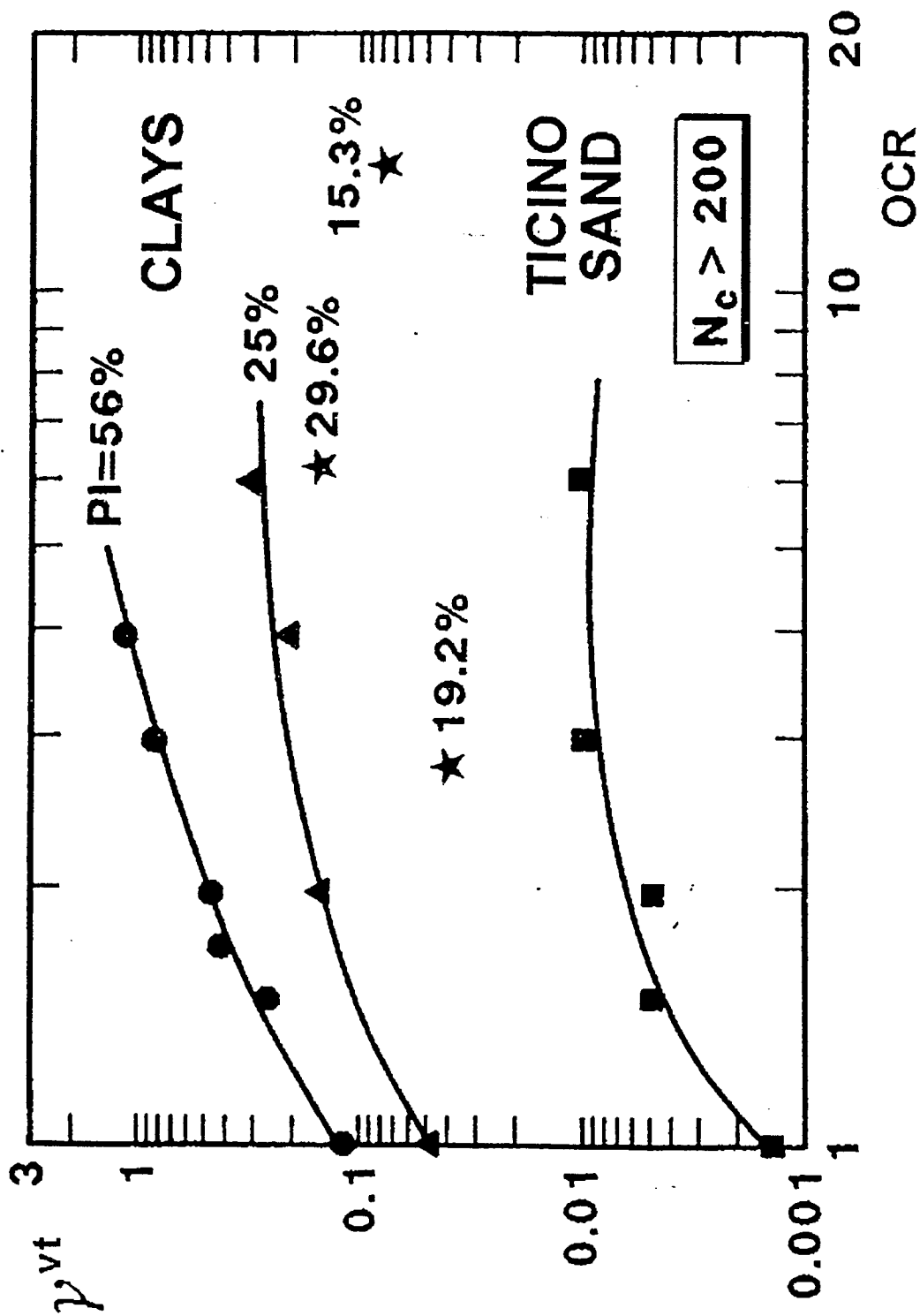


Fig. 9b - Unstable unloading-reloading cycles of Augusta clay.

# VOLUMETRIC TRESHOLD SHEAR STRAIN FROM RESONANT COLUMN TESTS

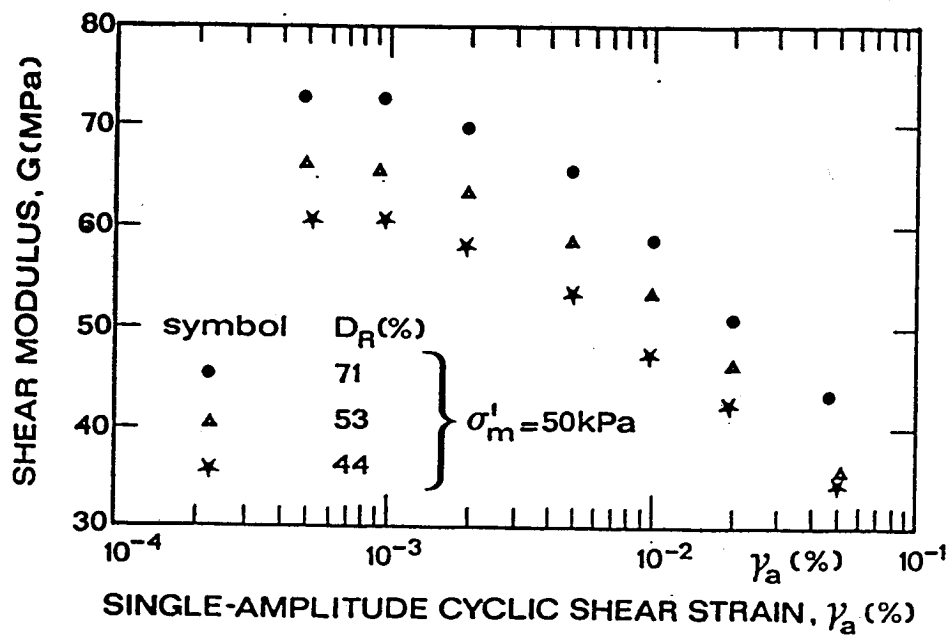
*Lo Presti (1989)*



# SHEAR MODULUS OF TS FROM RCT'S

## INFLUENCE OF $D_R$

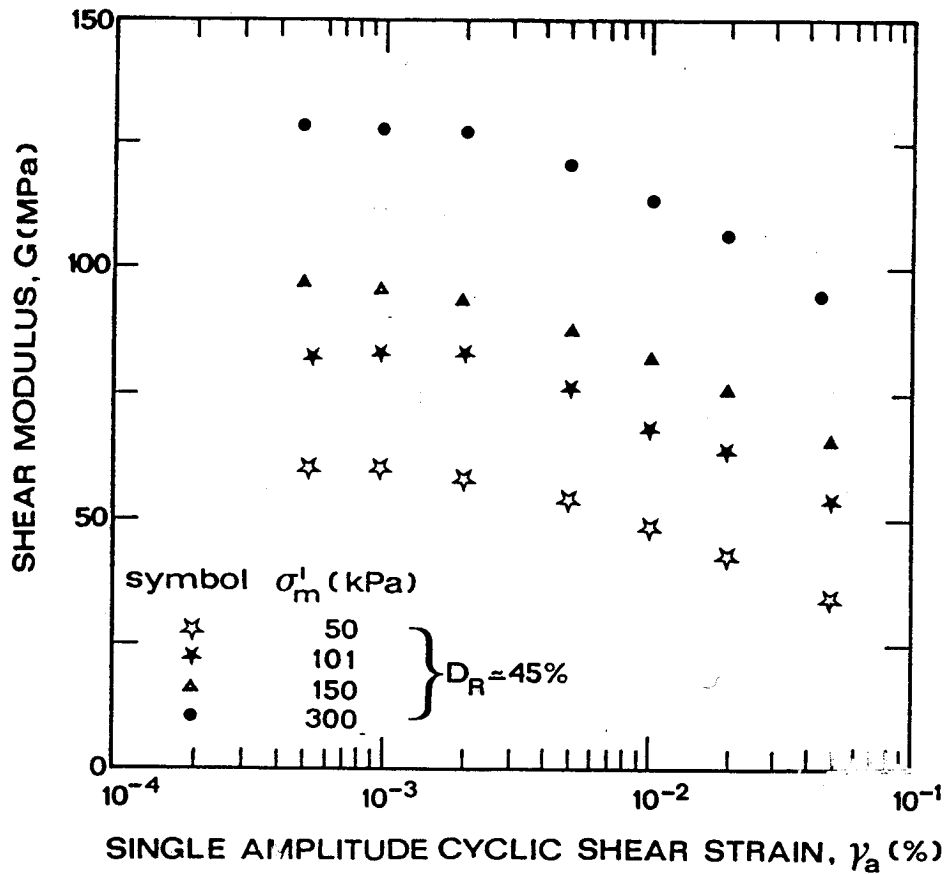
(LO PRESTI, 1987)



SHEAR MODULUS OF TS FROM RCT'S

INFLUENCE OF  $\sigma_m^l$

(LO PRESTI, 1987)





# **FATTORI CHE INFLUENZANO $E_0$ , $G_0$**

- **STATO FISICO DEL TERRENO**
  - **INDICE DEI VUOTI (DENSITA' RELATIVA)**
  - **TENSIONI GEOSTATICHE**
- **STRUTTURA DEL TERRENO**
  - **FABRICA**
  - **AGING**
  - **CEMENTAZIONE**

# FATTORI CHE INFLUENZANO IL MODULO DI DEFORMAZIONE

- Stato fisico del terreno:  $e_o$  ( $D_R$ ) e  $\sigma'_m$ .
- Livello della deformazione di taglio ( $\epsilon_s$ ), oppure livello della tensione di taglio normalizzata ( $\tau/\tau_{ff}$ ).
- Storia dello stato tensionale (OCR).
- Direzione nella quale viene applicata la sollecitazione.
- Fattore tempo;
  - tempo di consolidazione ( $t \geq t_p$ ), incrudimento viscoso (aging)
  - velocità di deformazione in fase di rottura ( $\dot{\epsilon}_s$ )

# MODULI DI DEFORMAZIONE DEI TERRENI RELAZIONI FONDAMENTALI EMPIRICHE

Al di sotto della soglia di elasticità lineare,  $\varepsilon \leq \varepsilon^e$

$$\left. \begin{array}{l} E_o \\ G_o \end{array} \right\} = S_o \cdot F(e)_o \cdot p_a^{(1-n_o)} \cdot (\sigma'_m)^{n_o}$$

Al di sopra della soglia di elasticità lineare,  $\varepsilon > \varepsilon^e$

$$\left. \begin{array}{l} E \\ G \end{array} \right\} = S(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \cdot F(e) \cdot p_a^{[1-n(\varepsilon, \dot{\varepsilon})]} \cdot (\sigma'_m)^{n(\varepsilon, \dot{\varepsilon})} \cdot F(\text{OCR})$$

$S \cdot F(e) = K$  = numero del modulo, diminuisce al crescere di  $\varepsilon$ .

$n$  = esponente del modulo aumenta al crescere di  $\varepsilon$ .

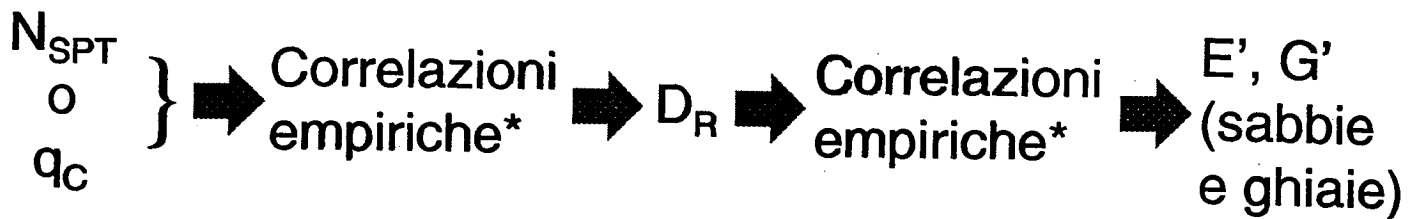
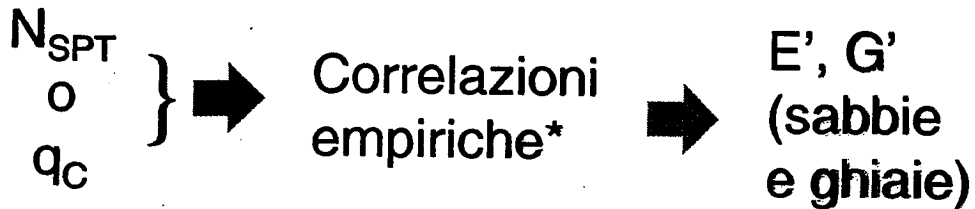
# VALORI TIPICI DEL MODULO DI DEFORMAZIONE IN CONDIZIONI DRENATE

<b><i>Tipo di terreno</i></b>	<b><i>E' , MPa*</i></b>
Argille tenere NC	1.4 ÷ 4.2
Argille mediamente compatte	4.2 ÷ 8.4
Argille compatte	8.4 ÷ 20.0
Sabbie sciolte NC**	10.0 ÷ 20.0
Sabbie mediamente dense NC**	20.0 ÷ 40.0
Sabbie dense NC**	40.0 ÷ 90.0

(\*) Valori di E' "operativi",  $0.3 \leq \varepsilon_a \leq 0.6$  %

(\*\*) Nelle sabbie OC, moltiplicare per due i valori di E'

# UTILIZZO DEI RISULTATI DELLE PROVE IN SITO NELLA STIMA DEI PARAMETRI DI DEFORMABILITA'

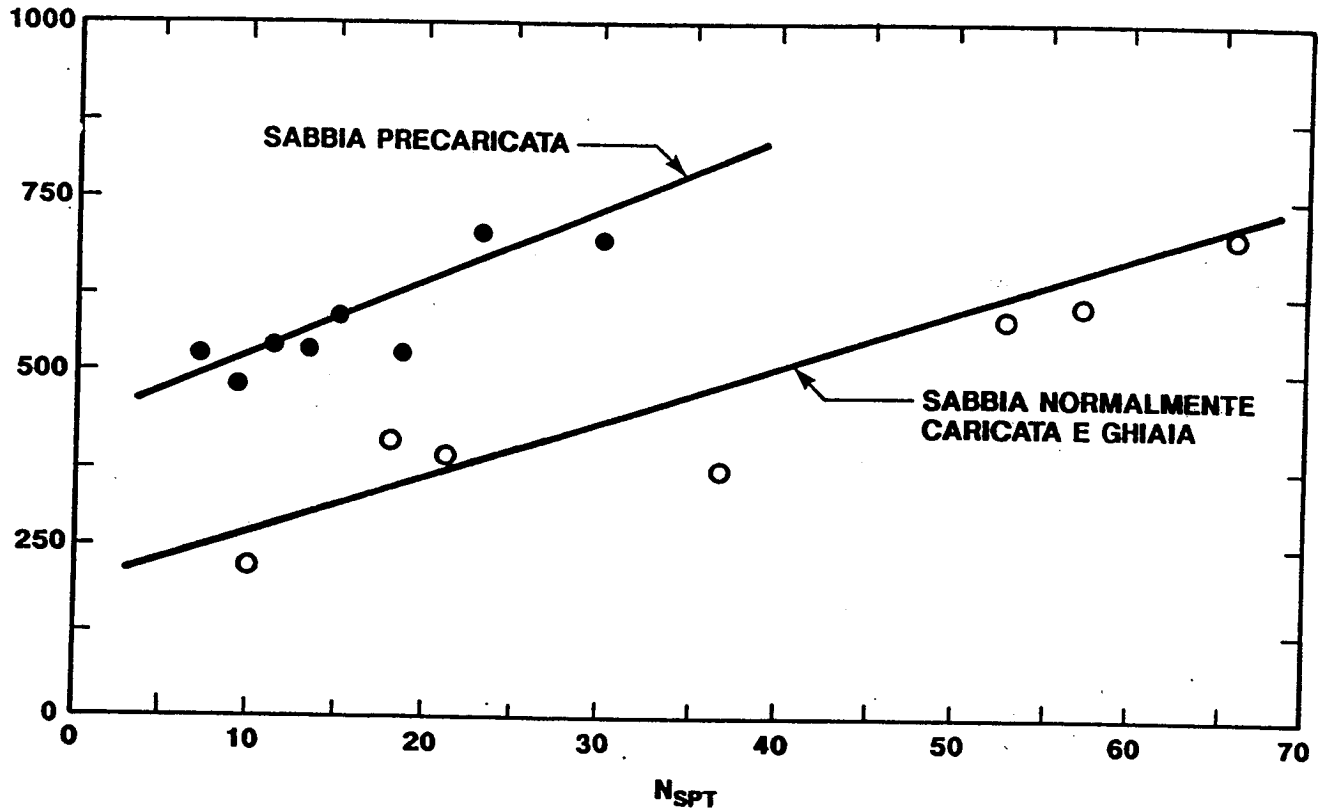


$N_{SPT}$  (colpi/piede), da Standard Penetration Test (SPT)

$q_c$  ( $FL^{-2}$ ), da Static Cone Penetration Test (CPT)

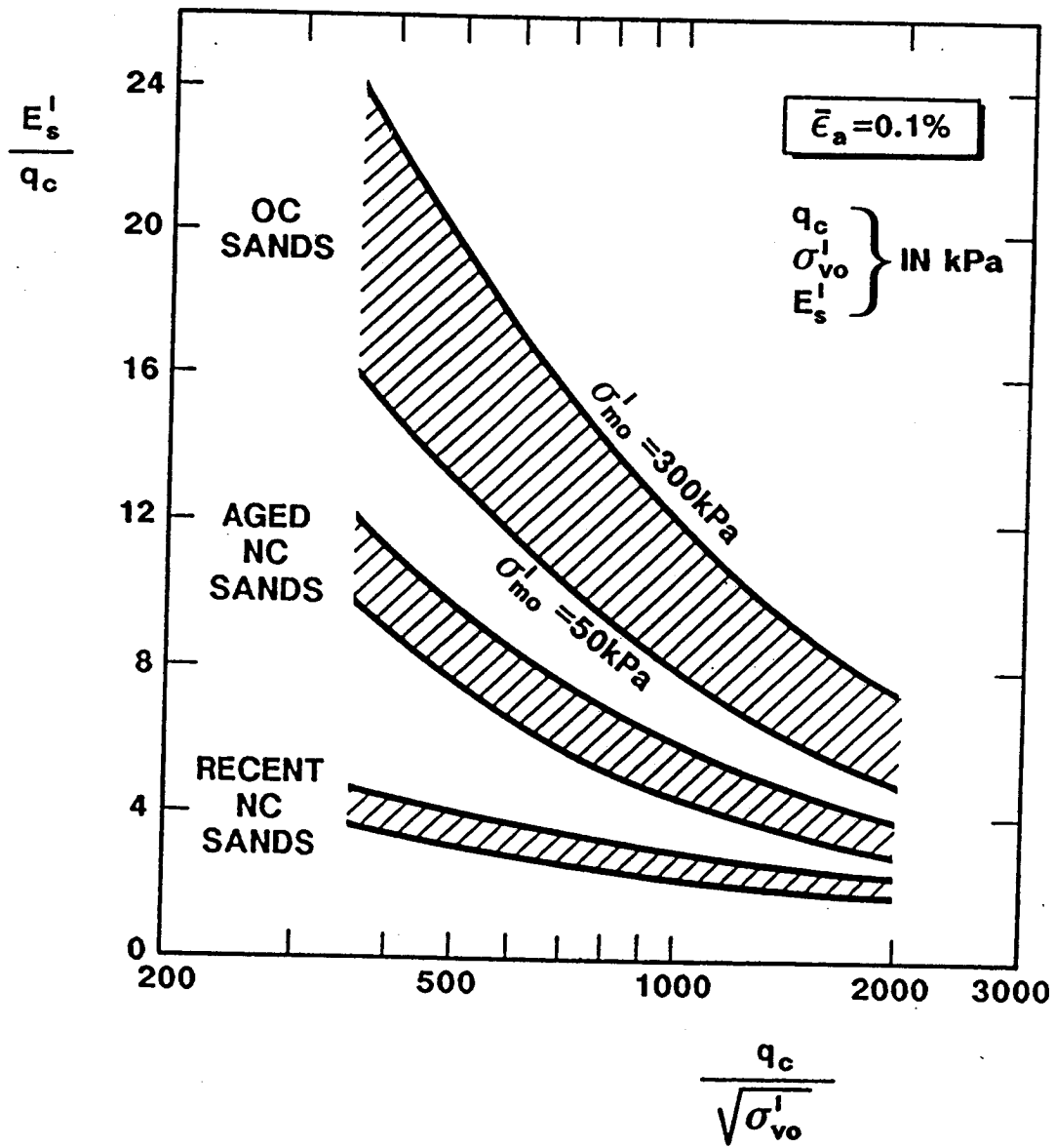
(\*) Da analisi retrospettiva del comportamento delle opere in vera grandezza.

$$M = \frac{\bar{E}}{1 - \nu^2} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$



**CORRELAZIONE TRA IL MODULO DI COMPRESSIBILITA' DEL TERRENO ED I VALORI DI N<sub>SPT</sub> MISURATI (D'APPOLONIA ET AL. 1970)**

# EVALUATION OF DRAINED YOUNG'S MODULUS FROM CPT FOR SILICA SANDS



# PROVE PENETROMETRICHE

$$V_s = 69 \cdot N_{60}^{0.17} \cdot Z^{0.2} \cdot F_A \cdot F_S$$

(OTHA AND GOTO 1978)

$$G_0 = 99.5 \cdot q_c^{0.695} \cdot p_a^{0.305} / e^{1.3} \quad G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

(MAYNE AND RIX 1993)