

**LIQUEFAÇÃO MONOTÓNICA E/OU CÍCLICA**  
**AVALIAÇÃO DE RISCO**  
**EM LABORATÓRIO (TRIAXIAL) E IN SITU**  
**(SPT, CPT, DMT,  $V_s$ -CH)**

**Um fenómeno de estado**  
**(tipo de solo, compactidade e estado de tensões)**

# SISMICIDADE MUNDIAL

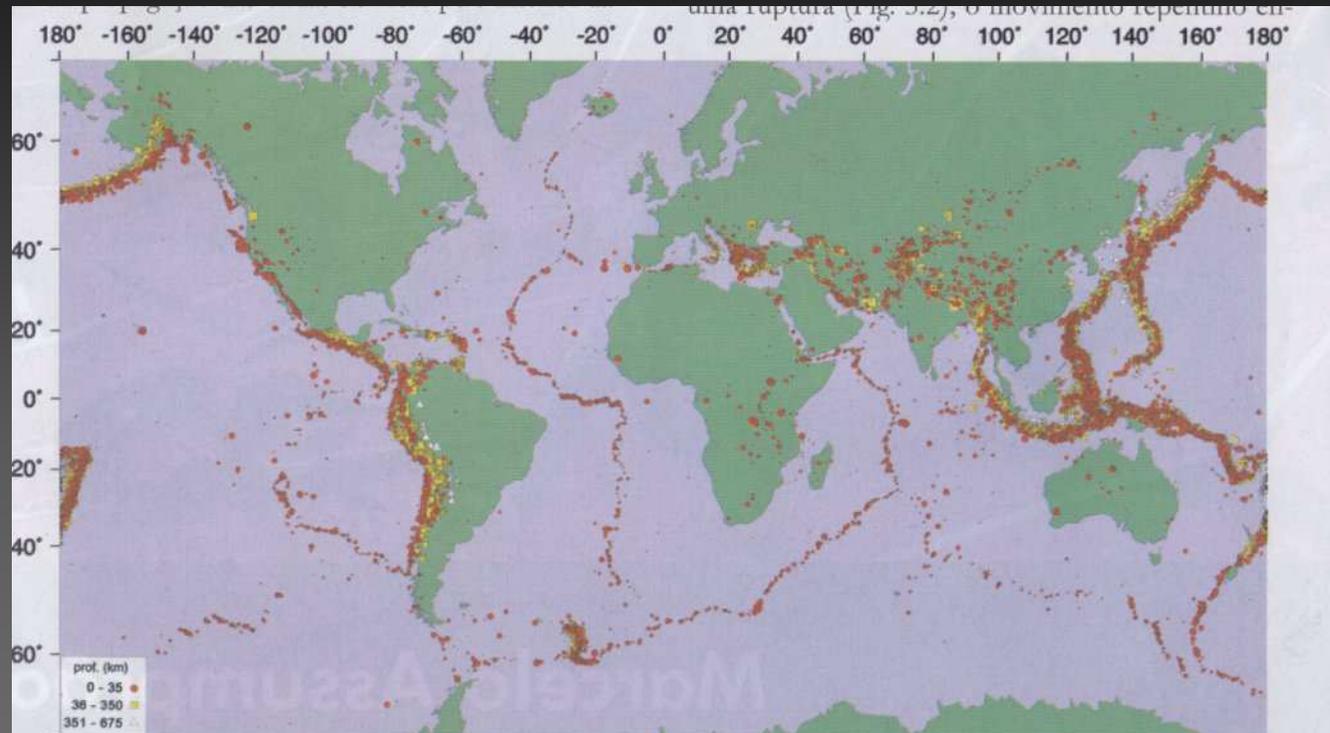
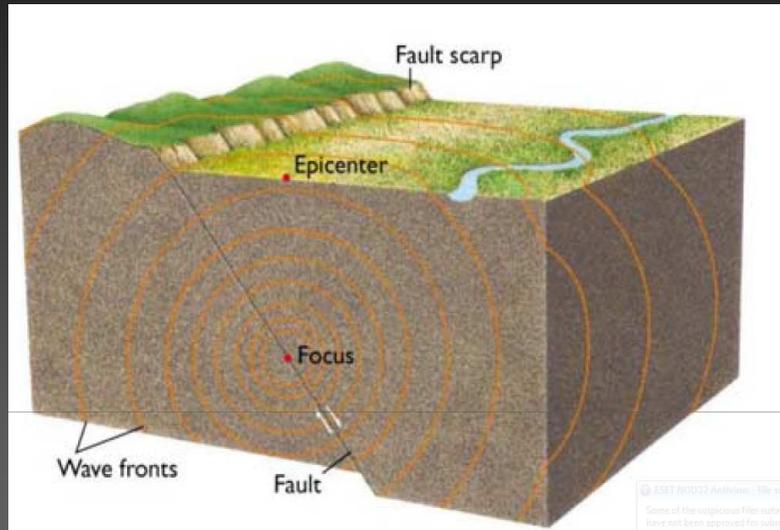


Fig. 3.1 Sismicidade Mundial. Mapa de epicentros do período 1964 a 1995 de sismos com magnitude  $\geq 5,0$ . Fonte: U.S. Geological Survey.

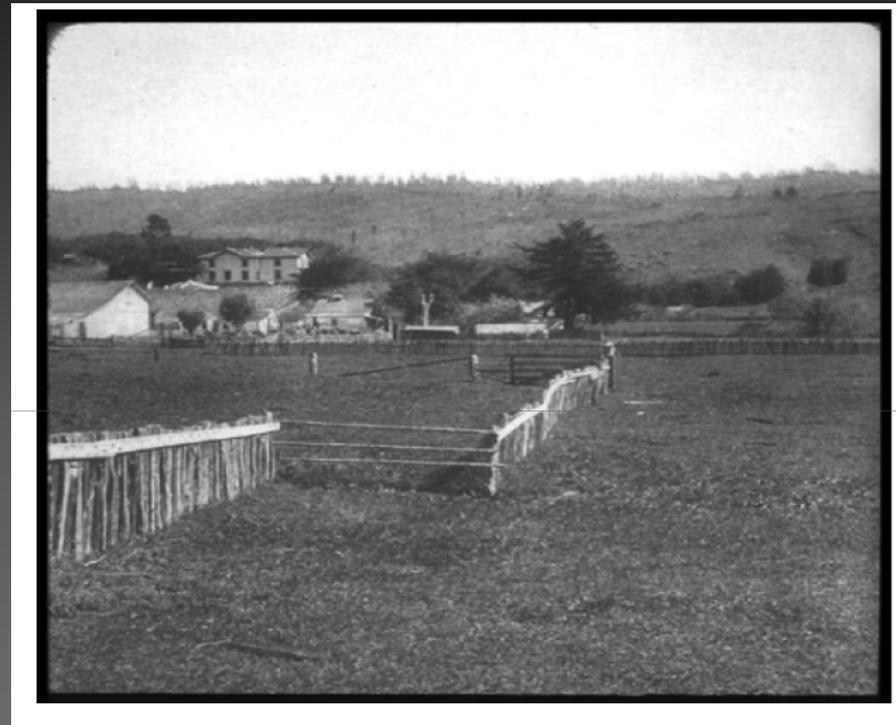
▲ Efeitos de um terremoto ocorrido em Taiwan, em 1999. Foto: Reuters.

**Mapa de epicentros (1964-1995)**  
USGS - U.S. Geological Survey

# EVENTOS SÍSMICOS



Mecanismo das Falhas



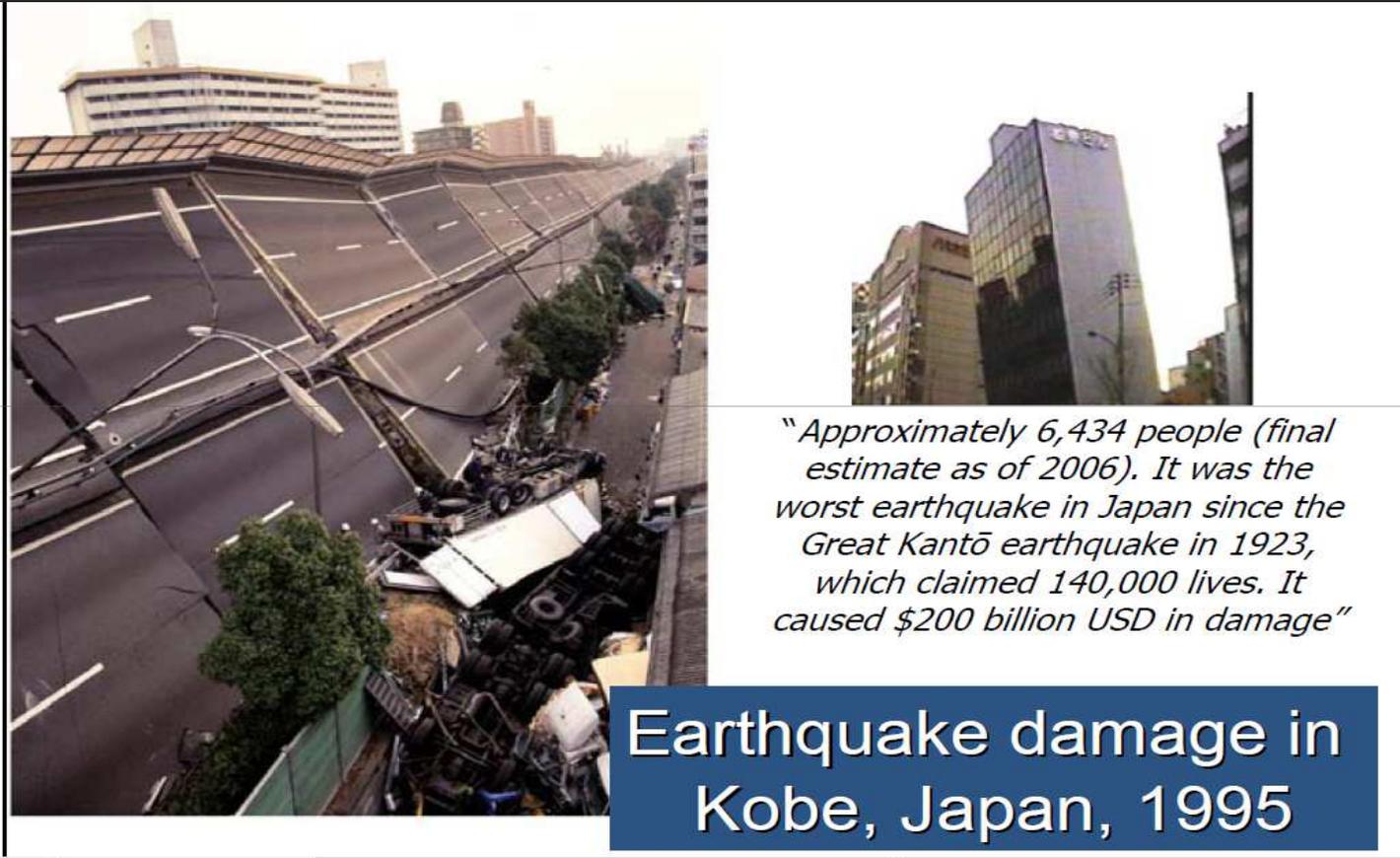
**Sismo de S. Francisco (1906) Falha de St. André – vedação sofreu um movimento relativo de 3m**

# EVENTOS SÍSMICOS



**Sismo de S. Francisco (1906) Falha de St. André - danos**

# EVENTOS SÍSMICOS



*"Approximately 6,434 people (final estimate as of 2006). It was the worst earthquake in Japan since the Great Kantō earthquake in 1923, which claimed 140,000 lives. It caused \$200 billion USD in damage"*

**Earthquake damage in  
Kobe, Japan, 1995**

**Sismo de Kobe - Japão (1995) - danos**

# EVENTOS SÍSMICOS



**Sismo de Kobe - Japão (1995) - danos**

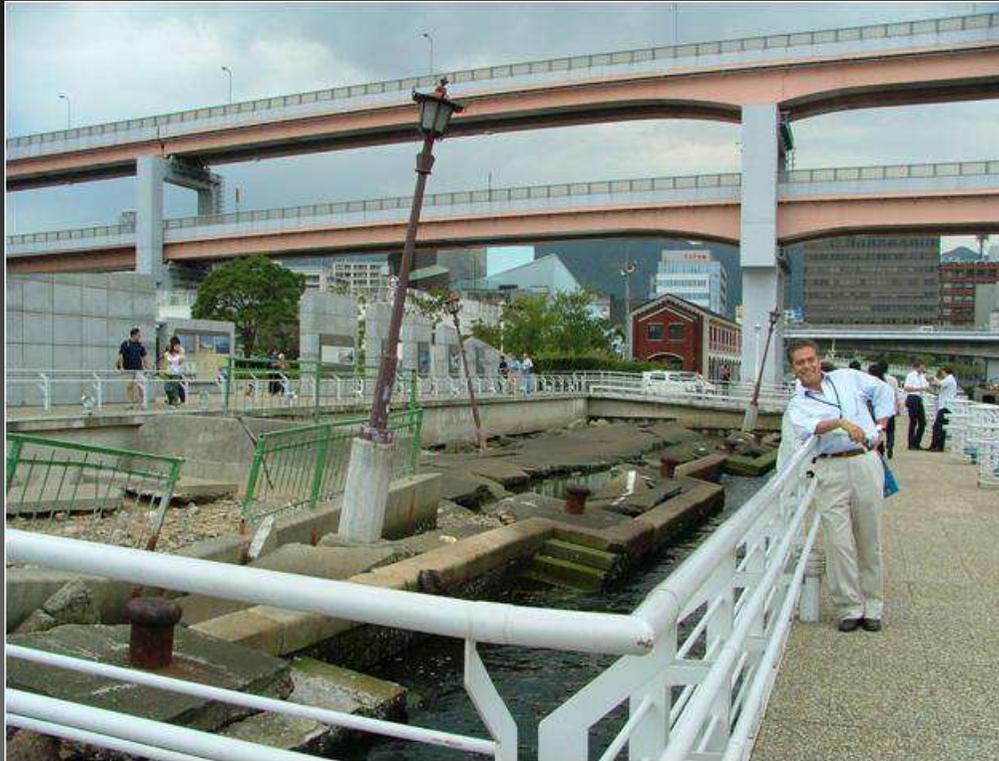
# EVENTOS SÍSMICOS



**Estruturas de armazéns portuários – sobre muros cais arruinados**

**Sismo de Kobe - Japão (1995) - danos**

# EVENTOS SÍSMICOS



Sismo de Kobe - Japão  
(1995) - danos

Hoje...



# EVENTOS SÍSMICOS



**Sismo do Açores (Faial, 1998) – escorregamento de terrenos**

# EVENTOS SÍSMICOS



**Sismo do Açores (Faial, 1998) – escorregamento de terrenos**

# EVENTOS SÍSMICOS



**Turquia – 1999 –  
Movimientos de falla**

# EVENTOS SÍSMICOS



**Turquia – 1999 –  
Movimentos de falha**



# EVENTOS SÍSMICOS



Turquia – 1999



**SUBSIDÊNCIA – LIQUEFAÇÃO  
por MOBILIDADE CÍCLICA**

# EVENTOS SÍSMICOS



**SUBSIDÊNCIA – LIQUEFAÇÃO  
por MOBILIDADE CÍCLICA**

**Turquia – 1999**

# EVENTOS SÍSMICOS



*"United Nations lists a total of 229,866 people lost, including 186,983 dead & 42,883 missing"*

**Tsunamis: Sumatra - Indonésia, Phuket Tailândia, Sri Lanka (dez. 2006)**



**Tsunamis: Sumatra - Indonésia, Phuket Tailândia, Sri Lanka (dez. 2006)**

# EVENTOS SÍSMICOS

Moçambique – Beira (Mar.  
2006) – mov. de falha



# O SISMO DE SICHUAN (12 DE MAIO DE 2008)

- 69,200 dead (20,000 missing)
- 374,200 injured
- 5.4 million buildings collapsed
- 21 million buildings damaged
- 5 million homeless
- 15 million evacuated
- 46 million people affected
- 10 million additional people living below poverty line
- Total loss 80 billion euro (Sichuan GDP 155 billion euro - 10% –40% of provincial GDP; 0.5 –1.5% of national GDP –China)

# O SISMO DE SICHUAN (12 DE MAIO DE 2008)

ANTES

Bailu Middle School



DEPOIS



# O SISMO DE SICHUAN (12 DE MAIO DE 2008)

BEICHUAN



# SISMO NO CHILE

8,8 ESC. RICHTER

(Fev., 2010)



SISMO NO CHILE

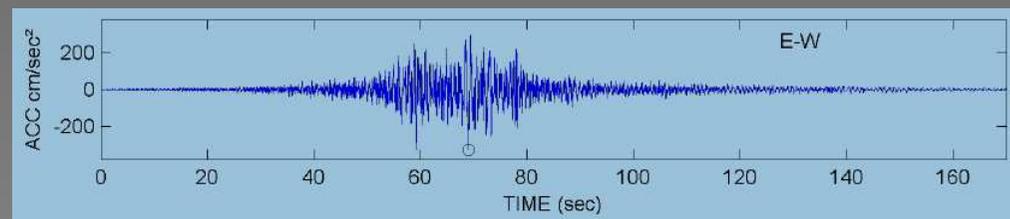
(Fev., 2010)

8,8 ESC. RICHTER



Informação em:

<http://www.terremotosuchile.cl/>



# CONCEITOS ESSENCIAIS DA LIQUEFAÇÃO



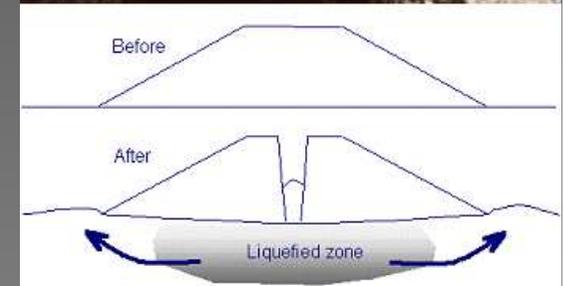
*Bolhas de areia – sismos El Centro e Loma Prieta (California, 1979)*



Colapso das fundações (Niigata, 1964)



Falha numa via de comunicação (Alasca, 1995)



# Causas do fenômeno de liquefacção

- **Eventos sísmicos**
- **Cargas Vibratórias (Máquinas)**
- **Cravação de estacas**
- **Novos edifícios**
- **Despejo de nova camada de material em áreas de resíduos**
- **Rotura de talude de áreas de contenções**

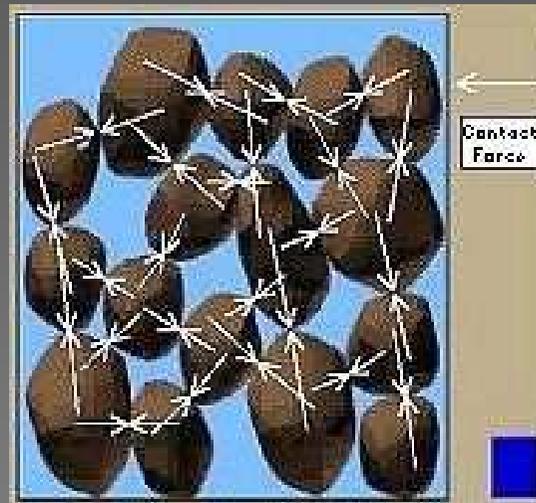
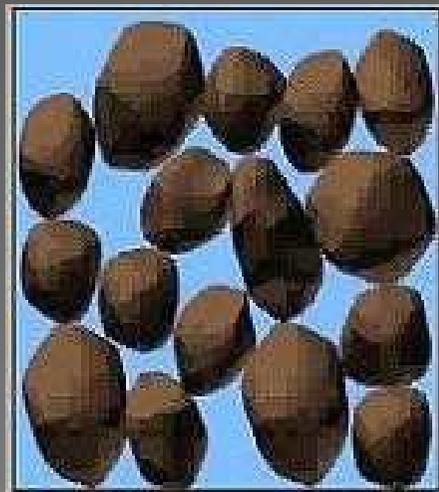
# CONCEITOS ESSENCIAIS DA LIQUEFACÇÃO

- ❑ Perda total ou parcial da resistência de um solo.
- ❑ Porquê?
- ❑ Redução das tensões efectivas devido ao incremento dos excessos de pressão neutra positivos.

# CONCEITOS ESSENCIAIS DA LIQUEFAÇÃO

Ao nível interparticular:

- Solos soltos e saturados
- Oscilações no terreno (Sismos, explosões, cravação de estacas)
- A água fica “presa” e não deixa as partículas aproximarem-se
- A pressão neutra aumenta
- Forças interparticulares diminuem



# AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE LIQUEFAÇÃO

## **Definição de liquefação** - conceitos, tipos e sinais:

**“Liquefação cíclica”**: Razões de excessos de pressão neutra que podem ser temporariamente igual a 100% e a deformação distorcional pode atingir um valor limite dependente de uma compacidade relativa e condições de tensão (“mobilidade cíclica”)

***Bolhas de areia  
indicando  
liquefação  
(Finn &  
Thavaraj, 2001):***



# AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE LIQUEFAÇÃO

**Definição de liquefação** - conceitos, tipos e sinais:

**“Liquefação cíclica”**: Razões de excessos de pressão neutra que podem ser temporariamente igual a 100% e a deformação distorcional pode atingir um valor limite dependente de uma compacidade relativa e condições de tensão (“mobilidade cíclica”)

***Bolhas de areia  
indicando  
liquefação  
(Finn &  
Thavaraj, 2001):***



# Liquefacção Cíclica

Chi-Chi Earthquake (Taiwan, 2001)

*Bolhas de areia numa infraestrutura rodoviária em construção (Nan-Tou)*



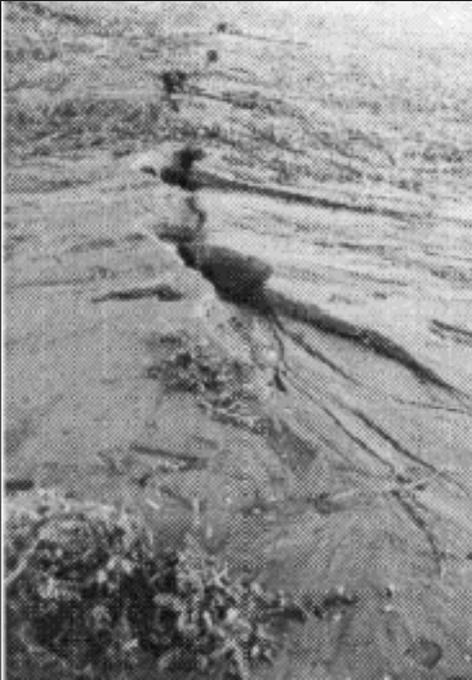
*Depressão no Porto de Mar de Taichung*



*(Fotos de Tzou-Shin Ueng)*

# Liquefacção Cíclica

Chi-Chi Earthquake (Taiwan, 2001)



Maoluo River -  
Taiwan  
(Ni *et al.*, 2001)



*Bolhas de areia em Changhwa, Taiwan (Lee et al., 2001)*

# Liquefacção Cíclica



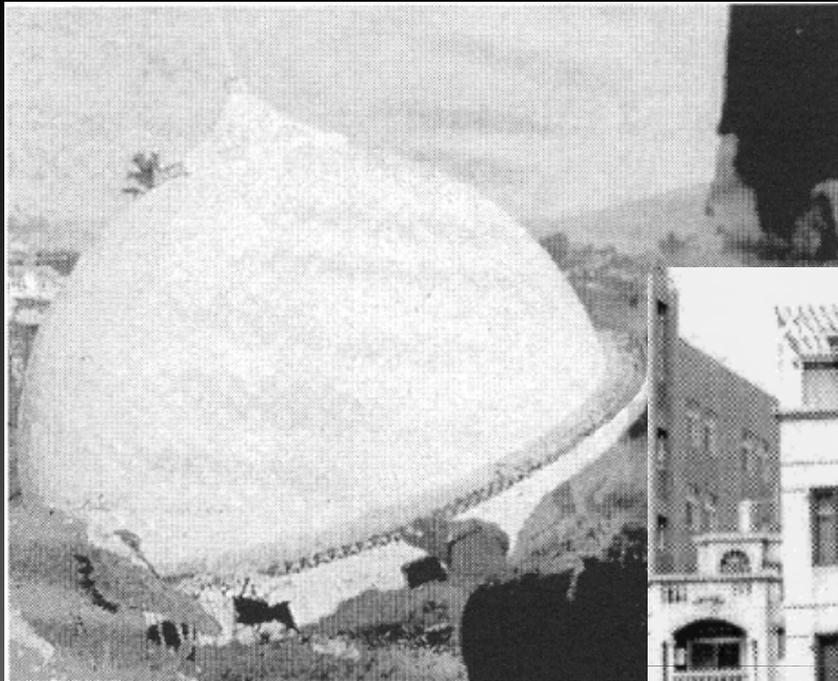
Liquefacção do solo de fundação em Niigata, Japão, (sismo de 1964), causando colapso do conjunto habitacional Kawagishi-cho

# Liquefacção Cíclica



Liquefacção do solo junto a uma estrutura de contenção da Great Bridge (EUA, 1998)

## Sismos de Izmit – Turquia (Ag. 1999)



Subsidência da  
mesquita devida a  
**Liquefacção**  
**Cíclica**



**Sismo de Chi-Chi**  
**(Taiwan, 2001)**

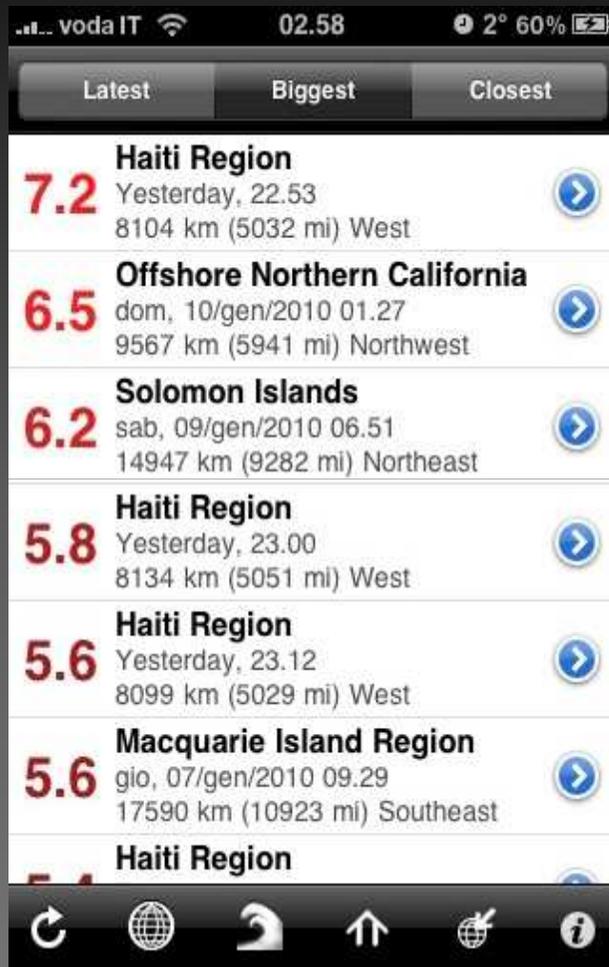
Inclinação de 12° (Lee *et al.*, 2001)

# Sismo de Chi-Chi (Taiwan, 2001)

*Tilting of building due to soil liquefaction at Wu-Feng (Chi-Chi Earthquake)*



# Sismo no Haiti (13 Jan. 2010)



<http://www.tvi24.iol.pt/internacional/corpos-sismo-tvi24-ultimas-haiti/1131261-4073.html>

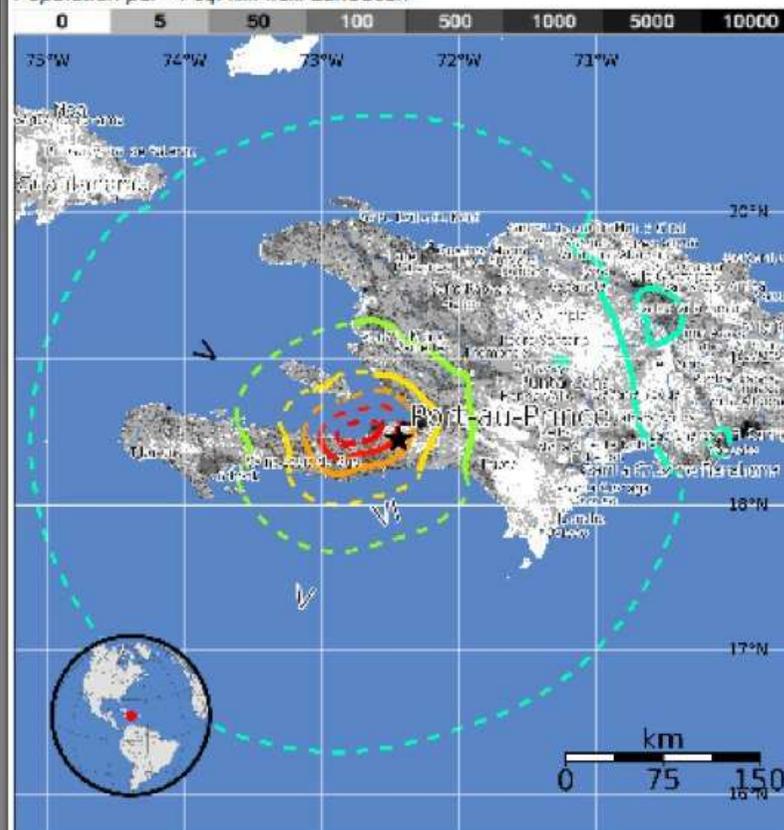
## Estimated Population Exposed to Earthquake Shaking

Est. Modified Mercalli Intensity	Est. Population Exposure	Perceived Shaking	Potential Structure Damage	
			Resistant	Vulnerable
X	137k	Extreme	V. Heavy	V. Heavy
IX	101k	Violent	Heavy	V. Heavy
VIII	1,157k	Severe	Moderate/Heavy	Heavy
VII	2,023k	Very Strong	Moderate	Moderate/Heavy
VI	1,349k	Strong	Light	Moderate
V	6,604k	Moderate	V. Light	Light
IV	6,284k*	Light	none	none
II-III	—*	Weak	none	none
I	—*	Not Felt	none	none

\*Estimated exposure only includes population within calculated shake map area

## Population Exposure

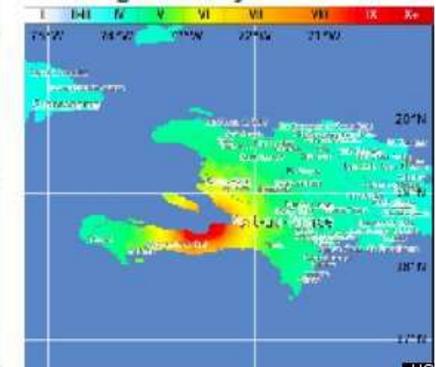
Population per ~1 sq. km. from LandScan



## Selected Cities Exposed

MMI	City	Pop.
X	Petit Goave	15k
X	Leogane	12k
X	Grand Goave	5k
IX	Gressier	4k
VIII	Carrefour	442k
VII	Miragoane	6k
VII	Port-au-Prince	1,235k
VII	Delmas 73	383k
V	Verettes	49k
IV	Santiago de los Caballeros	556k
III	Santo Domingo	2,202k

## Shaking Intensity



# Sismo no Haiti (12 Jan. 2010)



**7.0 na escala de Richter. Teve epicentro a 15 quilómetros a sudoeste de Port-au-prince e a 10 km de profundidade. Estima-se cerca de 200.000 mortos!**

# O Palácio presidencial



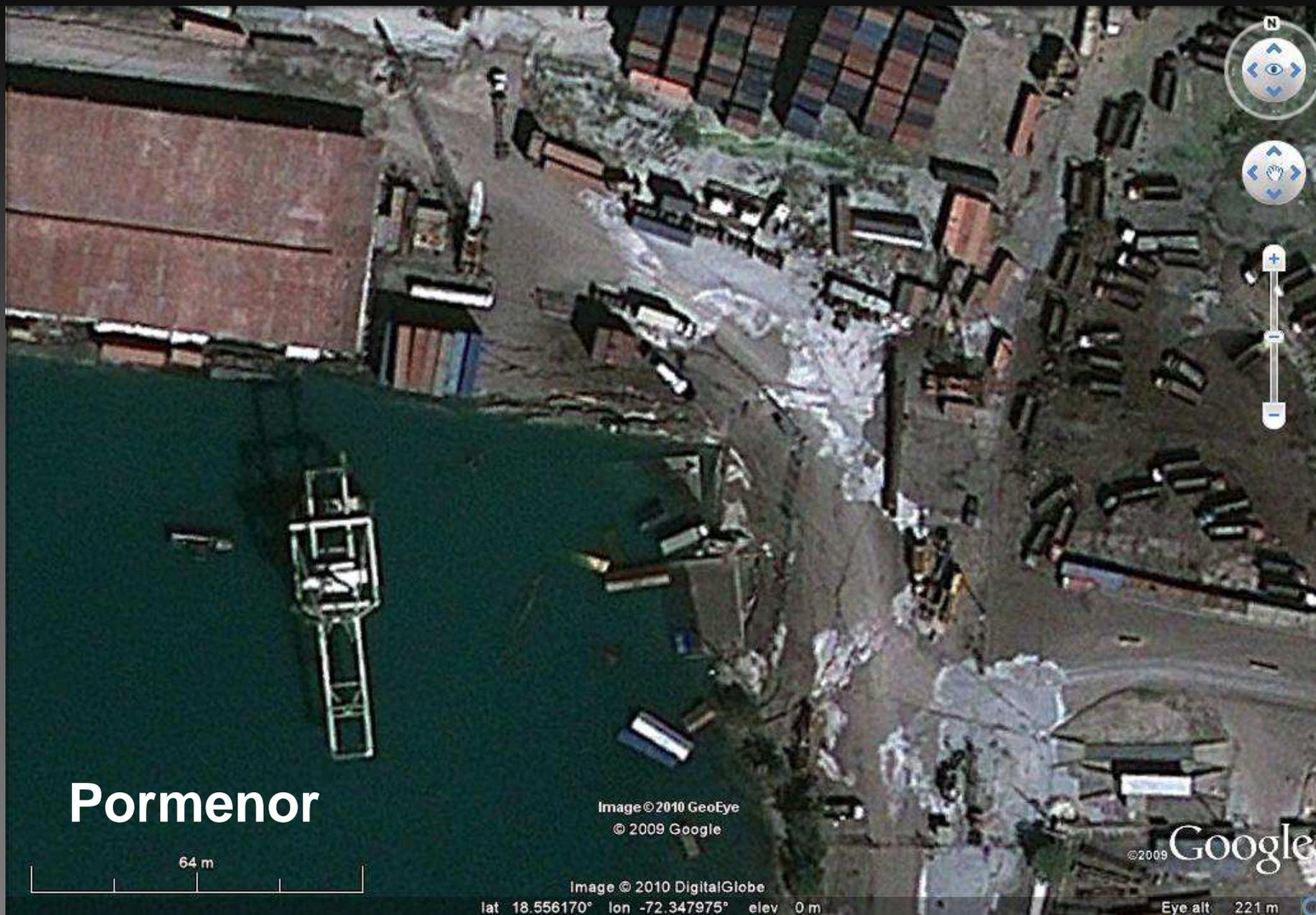
# Sismo no Haiti (13 Jan. 2010)

Liquefacção Sísmica perda da docas do Porto de Mar

Depois



# Liquefacção Sísmica perda da docas do Porto de Mar



# Liquefacção Cíclica

## Sismo de Boumerdès, Argélia (2003)

$M = 6,7$

Na escala de Richter

- ☐ 2278 vítimas mortais,
- ☐ 10147 feridos
- ☐ mais de 15000 desalojados



- ☐ Ponte arruinada por liquefacção dos solos arenosos de fundação dos pilares em 2003 e nova estrutura de substituição (foto AVF em Junho de 2009)

# Liquefacção estática ou monotónica ou de fluxo



Ruptura de represa de resíduos de fluoreto  
(Trento, Itália, julho, 1985)

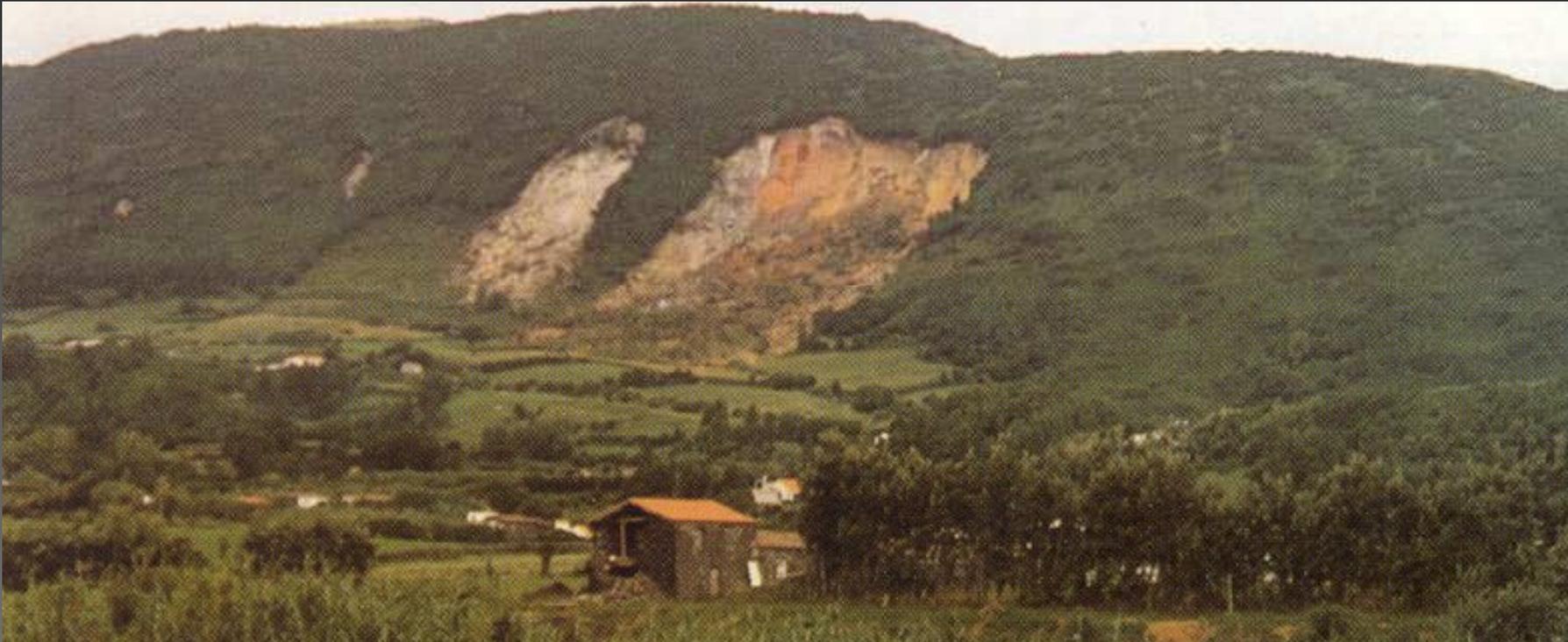
# Liquefacção estática ou monotónica ou de fluxo



Liquefacção  
em barragem  
de rejeitos  
de minas de  
ouro  
(Merriespruit,  
África-Sul ,  
Fevereiro  
1994)

## Liquefacção de fluxo (Açores,1998)

O comportamento de amolecimento por incremento de deformação durante o carregamento não drenado, conduz a **rotura progressiva**



As preocupações são concentradas nos resultados de **resistências ao corte residuais após o processo** e em deslocamentos que se terão desenvolvido ao longo deste processo

# Liquefacção mista de fluxo com acção sísmica

Juo-Feng-Err-Shan: rotura  
generalizada de talude  
(Chi-Chi earthquake)

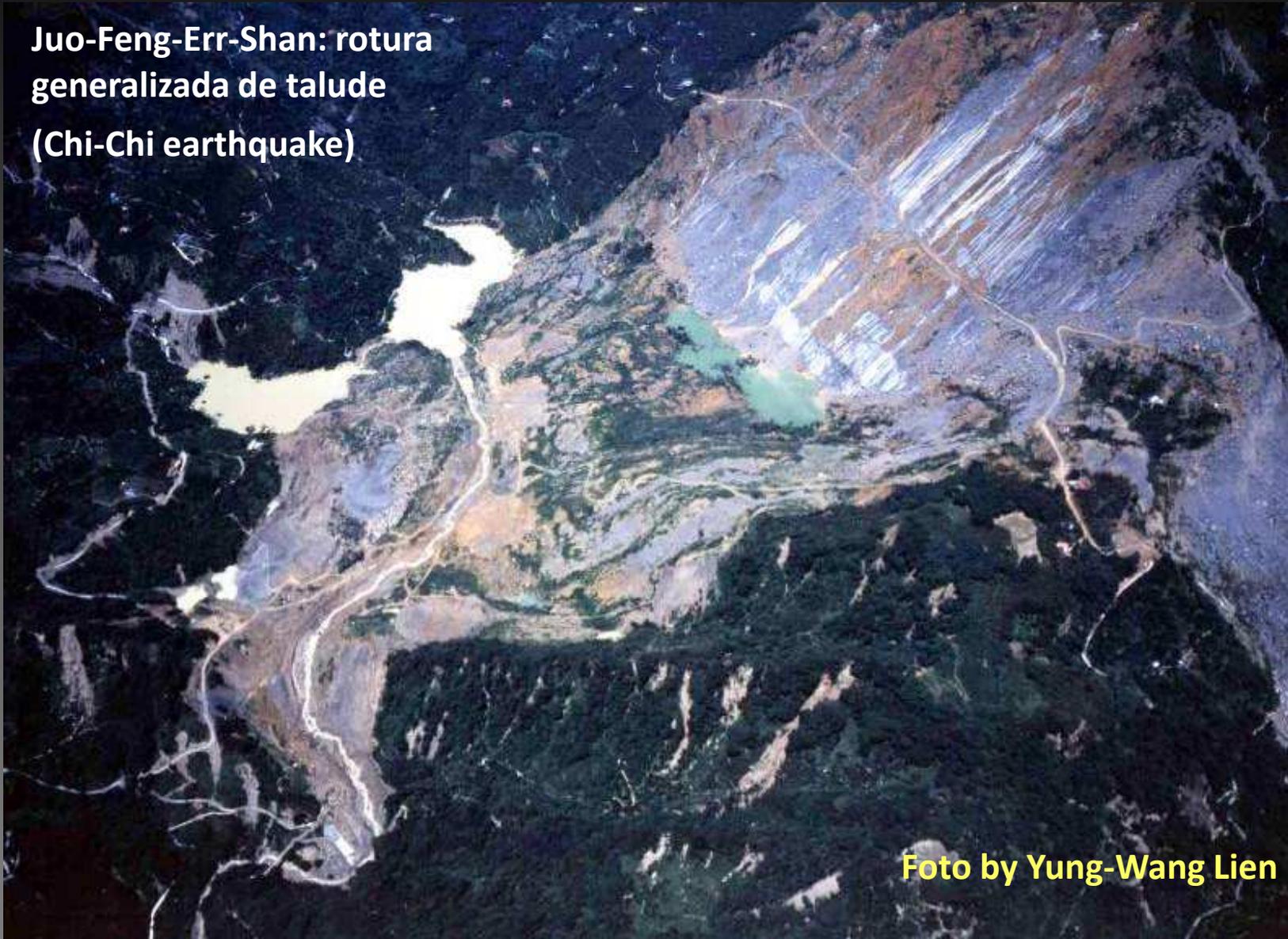
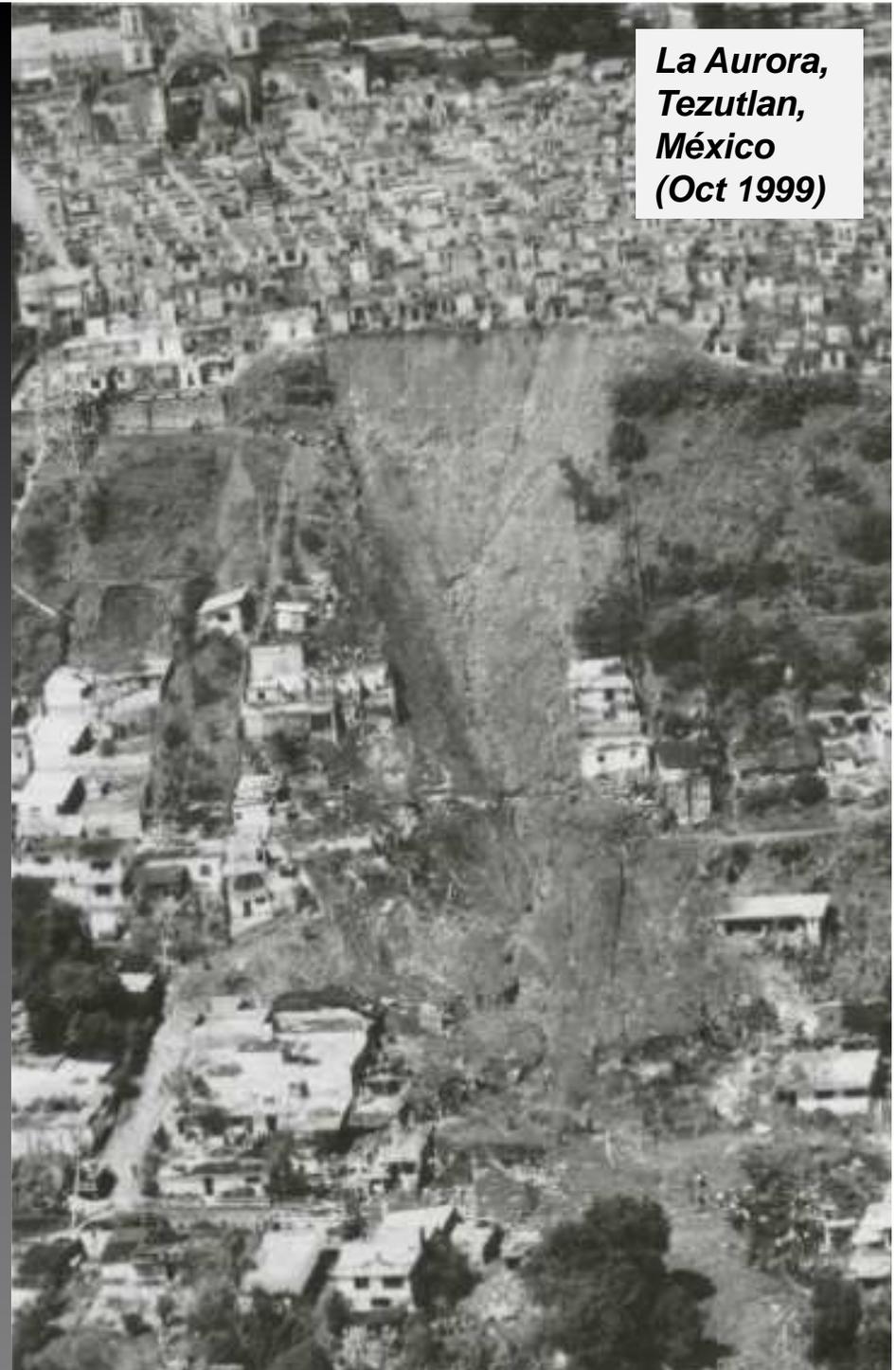


Foto by Yung-Wang Lien

*“A segurança in situ durante os sismos está relacionada com os fenómenos geotécnicos tais como: AMPLIFICAÇÃO, INCLINAÇÃO, ESCORRIMENTOS/DESLIZAMENTOS, LIQUEFAÇÃO E MOVIMENTOS DE FALHAS”.*

*Ponte com fundação em estacas não danificadas, anexa a um aterro colapsado (Sismo Nihon-Kai-Chubu, 2001)*



**La Aurora,  
Tezutlan,  
México  
(Oct 1999)**

# Liquefacção estática ou monotónica ou de fluxo



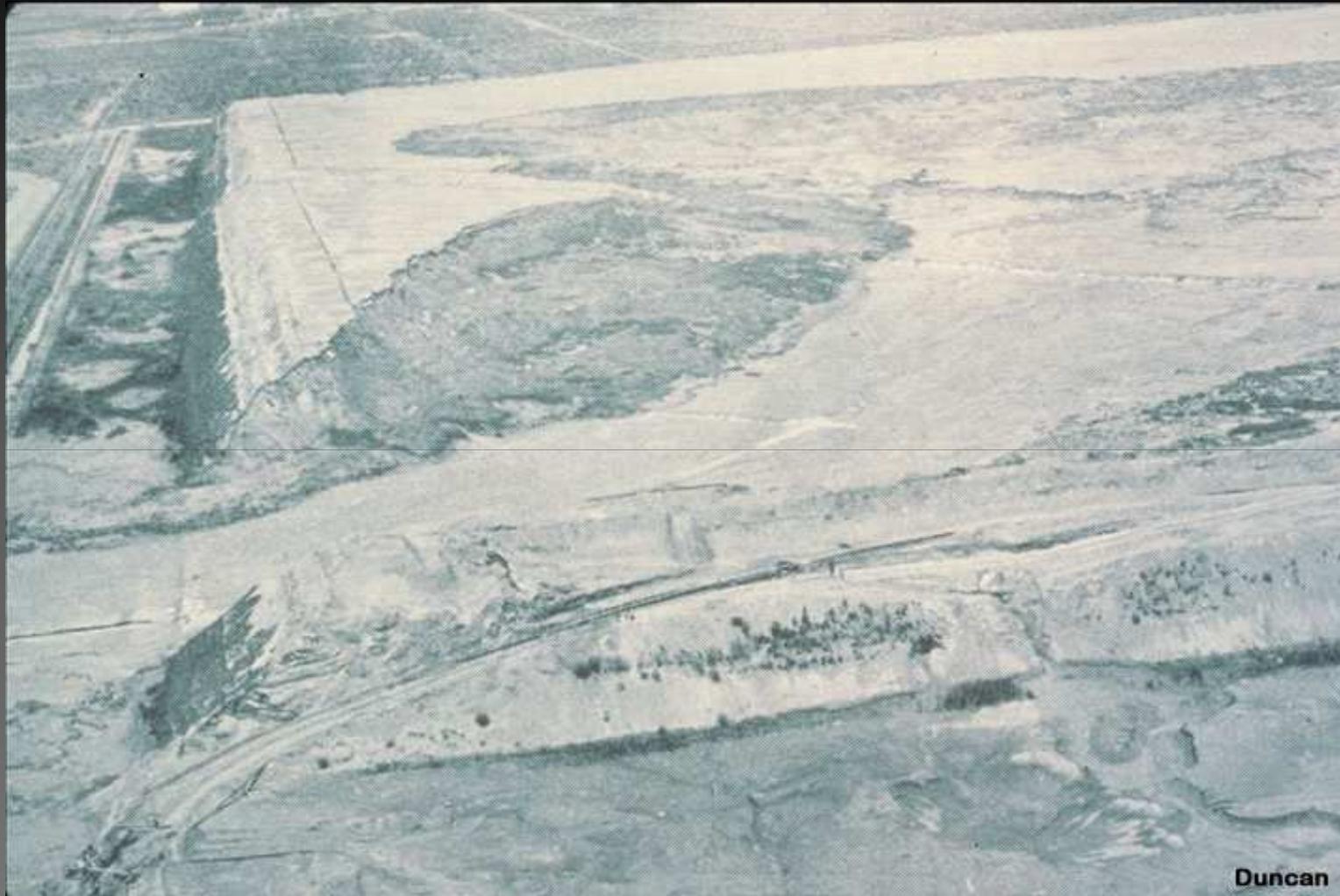
Represa de resíduos de zinco: material areno siltoso, NP  
(Aznalcóllar, Espanha, abril, 1998)

# Liquefacção estática ou monotónica ou de fluxo



Ruptura de barragens de rejeito de urânio (Malvésí, France, março, 2003)

# Liquefacção estática ou monotónica ou de fluxo



Ruptura de barragens de rejeito de cobre - material silto arenoso, NP  
(Cerro Negro, Chile, 2003)

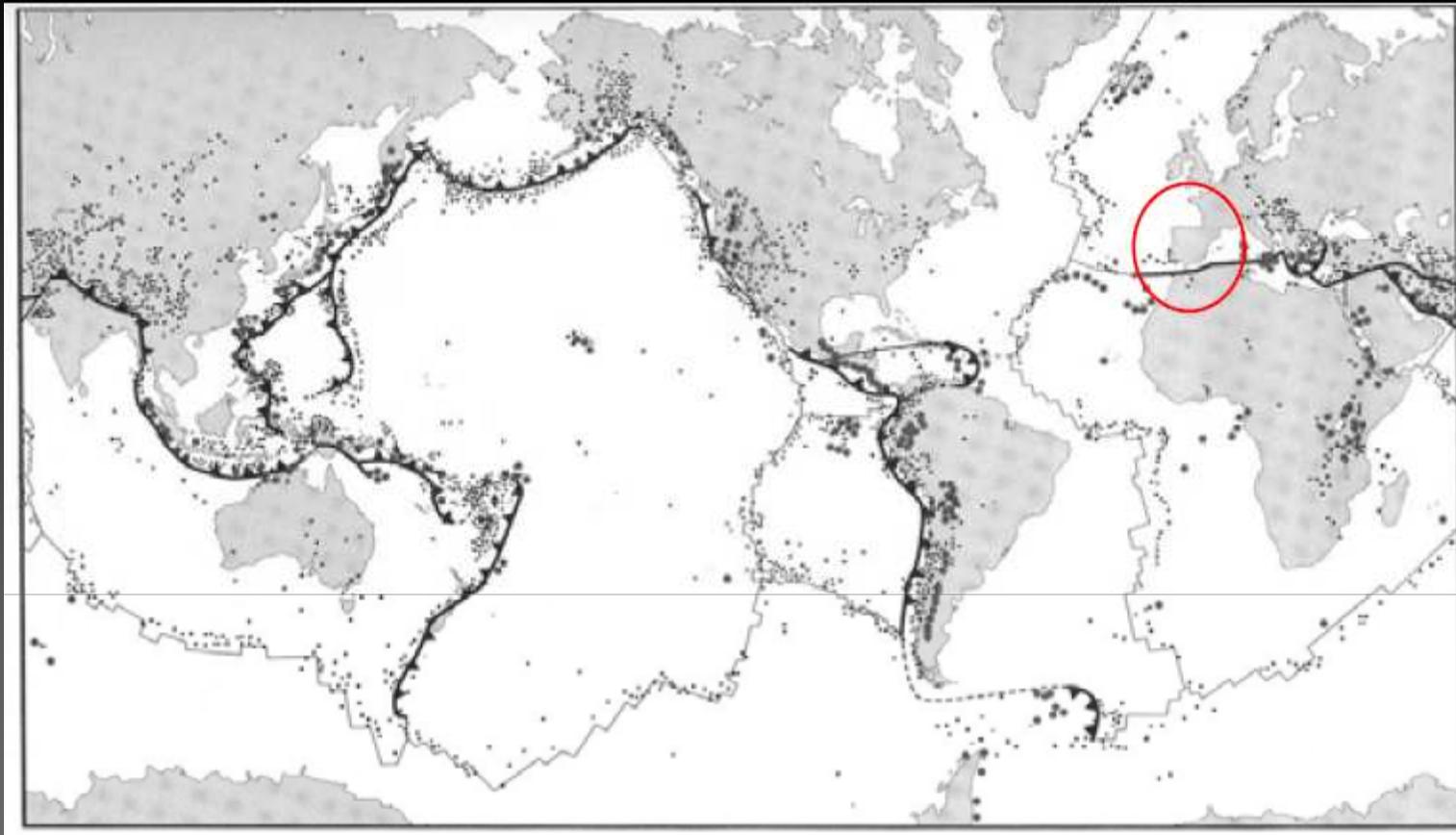
# Sismicidade

## Algumas definições

Sismicidade - frequência de ocorrência de sismos numa dada região: distribuição estatística, cronológica e geográfica, das ocorrências sísmicas expressas quantitativamente por uma dada variável (aceleração, velocidade, deslocamento ... )

Sismicidade histórica - a recolha e tratamento de índole histórica dos registos de ocorrências sísmicas (data e hora de ocorrência, registos históricos dos efeitos dos sismos ...)

Sismicidade instrumental – utilização de aparelhos para o registo de movimentos sísmicos (localização do epicentro, data e hora, registos instrumentos de movimentos (aceleração, velocidade ...)



Portugal localiza-se em regiões de média actividade sísmica.

Portugal continental situa-se a norte da fronteira entre as placas Euro-Asiática e Africana. Os Açores situam-se na crista média do Atlântico, na proximidade da junção das placas Euro-Asiática, Africana e Americana.

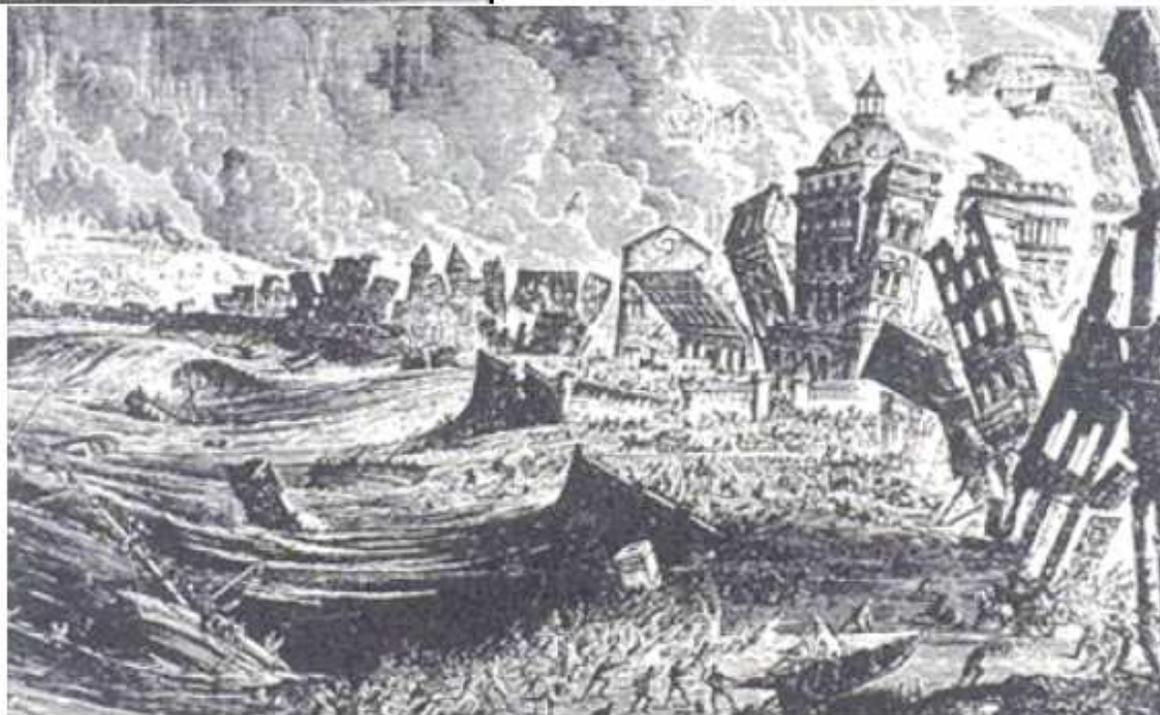


## Sismo de Lisboa 1755

### Magnitude > 8

Uma das maiores observadas e a maior de entre os sismos que afectaram a Europa (entre 8,5 e 9, para alguns autores).

Mais recentemente, surge a tese de que se terá tratado de mais do que um evento sísmico



# Sismo de Lisboa

1 de Novembro de 1755  
dia de todos os Santos



Estima-se o número de vítimas entre 60000 e 80000 dos quais 20000 mortais (população da Lisboa de então era cerca de 200000 habitantes)

Destruição quase total das 20000 casas então existentes (sobraram 3000)

Foram totalmente destruídas 32 igrejas, 60 capelas, 31 mosteiros, 15 conventos e 53 palácios.

O tsunami foi sentido não só nas costas portuguesas mas também a sudoeste de Espanha, norte de África nas Ilhas Britânicas e na Holanda. Também nas costas do continente americano o tsunami se fez sentir.

Os dados históricos do continente referem a ocorrência em Lisboa de sismos catastróficos em 1009, 1344, 1531 e 1755 ... ???

# Relatos históricos

Lisboa, 1755

“Durante os dois abalos violentos do terramoto, o cais principal da cidade, ..., afundou-se todo em conjunto e tão fundo que nenhuma vara o conseguiu alcançar ... vários montes de sal nas margens do rio, muitas léguas acima de Lisboa, afundaram-se no chão quase a toda a altura e assim ficaram. A terra abriu em bastantes locais do reino, como em Alcântara, uma légua a Oeste de Lisboa; em Sacavém ...; em Azeitão, e em Setúbal. Algumas fendas permanecem abertas, outras voltaram a fechar-se, de algumas brotou água, de outras veio um vapor sulfuroso e de outras, proveio apenas vento ...”

“Terreiro do Paço ... bem como o afundar do grande cais de pedra adjacente a esta praça ... a cada convulsão sucessiva nós nos afundássemos; ... mas por todo o lado rachas inumeráveis, de muitas das quais água e areia eram atiradas para fora”

# Relatos históricos

Lisboa, 1755

“... do outro lado do rio ... imediatamente apareceram um número elevado de pequenas brechas em vários terrenos vizinhos de onde jorraram, como de uma cascata, grandes quantidades de areia branca e fina até alturas prodigiosas ...”

“... observei uma das melhores ruas afundar-se na terra e todas as pessoas nela ... ”



# Sismo de Benavente 1909



# Sismo de Benavente (1909)

## Sinais de liquefacção

Ejecções de areia  
devido à liquefacção  
no vale do Rio Tejo  
(Choffar e Bensaúde,  
1912)



# Métodos de avaliação da liquefacção

## ➤ laboratório



Caracterização básica ★

Corte simples cíclico

Triaxial convencionais ★

Triaxiais Stress-path ★

Triaxial cíclicos

Torção cíclica

Coluna ressonante

Ensaio ultrassônicos

Benders elements ★

### Vantagens

Gama ampla de deformações  
Solo saturado (ondas P)

### Desvantagens

Representação das amostras

## ➤ campo



Técnicas de penetração

SPT, CPT ou BPT

Ondas sísmicas

CH (cross-hole),

DH (down-hole),

UP(Up-Hole),

SCPT ,

### Vantagens

-Sem problemas quanto a amostragem  
-resistência é influenciada (estrutura, idade e cimentação),

### Desvantagens

Gama limitada de deformações  
Efeito da não saturação (ondas P)  
Influência dos finos e plasticidade(fronteiras)

# Identificação de riscos de liquefacção através de ensaios de laboratório

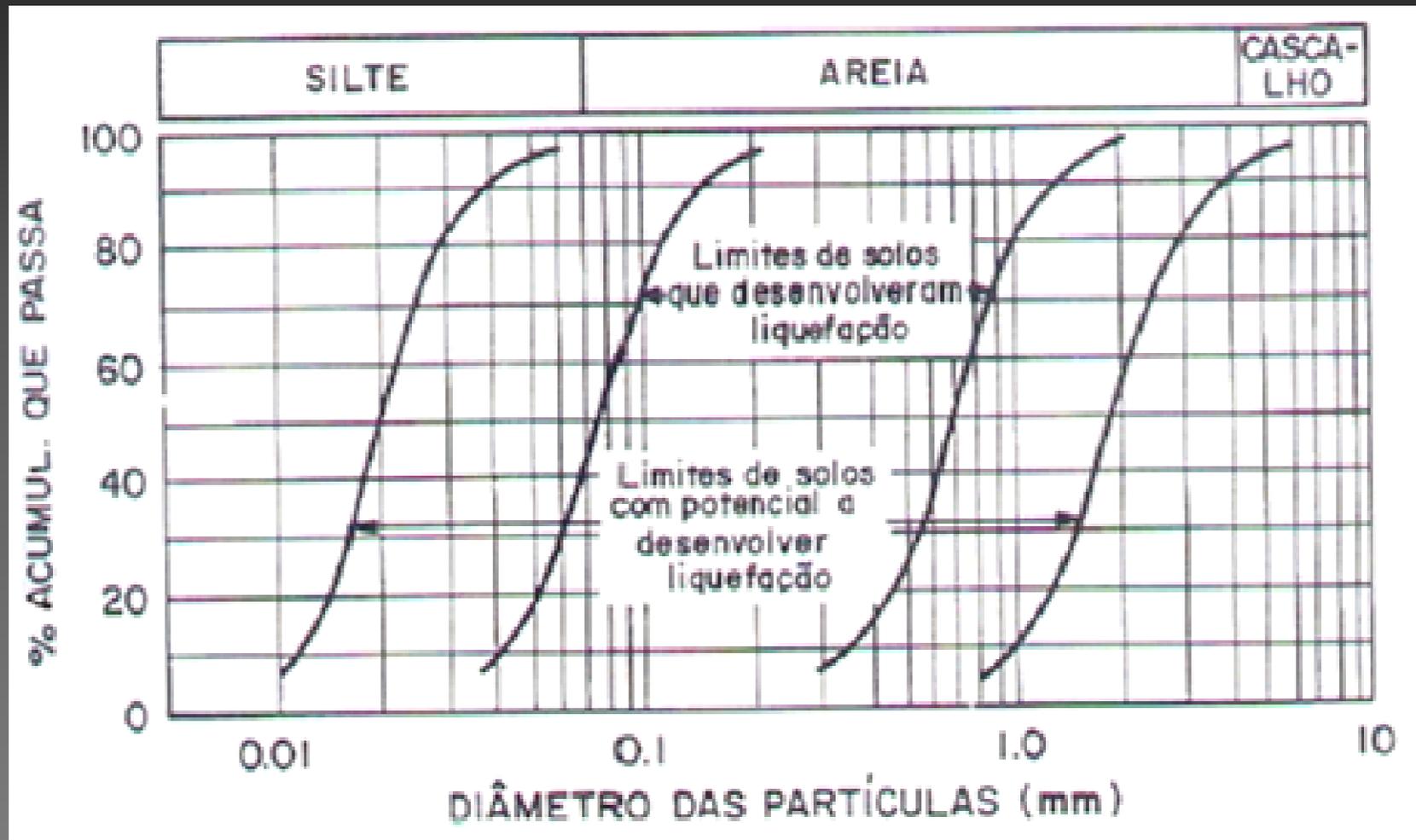
Há distintos critérios publicados na literatura para estimativa da suscetibilidade de liquefacção de solos, sendo alguns deles:

- Quanto ao Critério de composição do material;
  - Distribuição granulométrica,
  - Forma das partículas,
  - Índice de plasticidade
  - Graduação das partículas (quantidades de finos)
  
- Quanto a teoria do estado crítico;
  - Critério do índice de vazios crítico
  - Critério do estado de deformação
  - Parâmetro de estado
  
- Quanto as ondas sísmicas

# Critérios para estimativa da suscetibilidade de liquefação

- Quanto ao Critério de composição do material

## Distribuição granulométrica

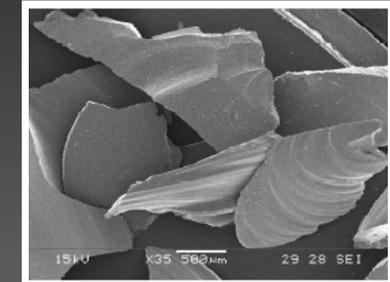
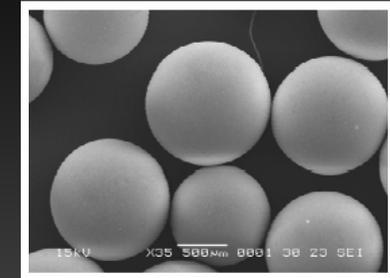


# Critérios para estimativa da suscetibilidade de liquefacção

## Forma das partículas

Reddy (2008): **partículas arredondas sob confinamento – rearranjo – maior suscetibilidade a liquefacção;**

**partículas angulares sob confinamento – intertravamento das partículas - menor suscetibilidade a liquefacção.**



## Índice de plasticidade

Ishihara (1984 e 1985): **solos plásticos - coesão – menor suscetibilidade a liquefacção.**

Polito (1999) solos plásticos- aumento da resistência a liquefacção solo. (*concordância geral*)

**Ensaio de campo** (Mogami e Kubo (1953); Campanella Robertson (1985) e Holzer et al. (1989),

**Ensaio de laboratório** (Lee e Seed (1967a), Chang et al. (1982); e Koester (1994), Ishihara and Koseki (1989).

**Resíduos de mineração** (Dobry e Alvarez (1967); Okusa et al. (1980); e Garga e McKay (1984) .

# Resultados- Caracterização Básica (Bedin, 2009)

## RESÍDUOS DE PROCESSAMENTO DO OURO

Material	Posição	W (%)	G (g/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{nat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	IP
<i>Underflow</i>	Superfície	40,1	2,85	18,6	1,23	5	65	30	NP
	Profundidade	30	,0	20,5	1,15				



### Microscopia eletrônica

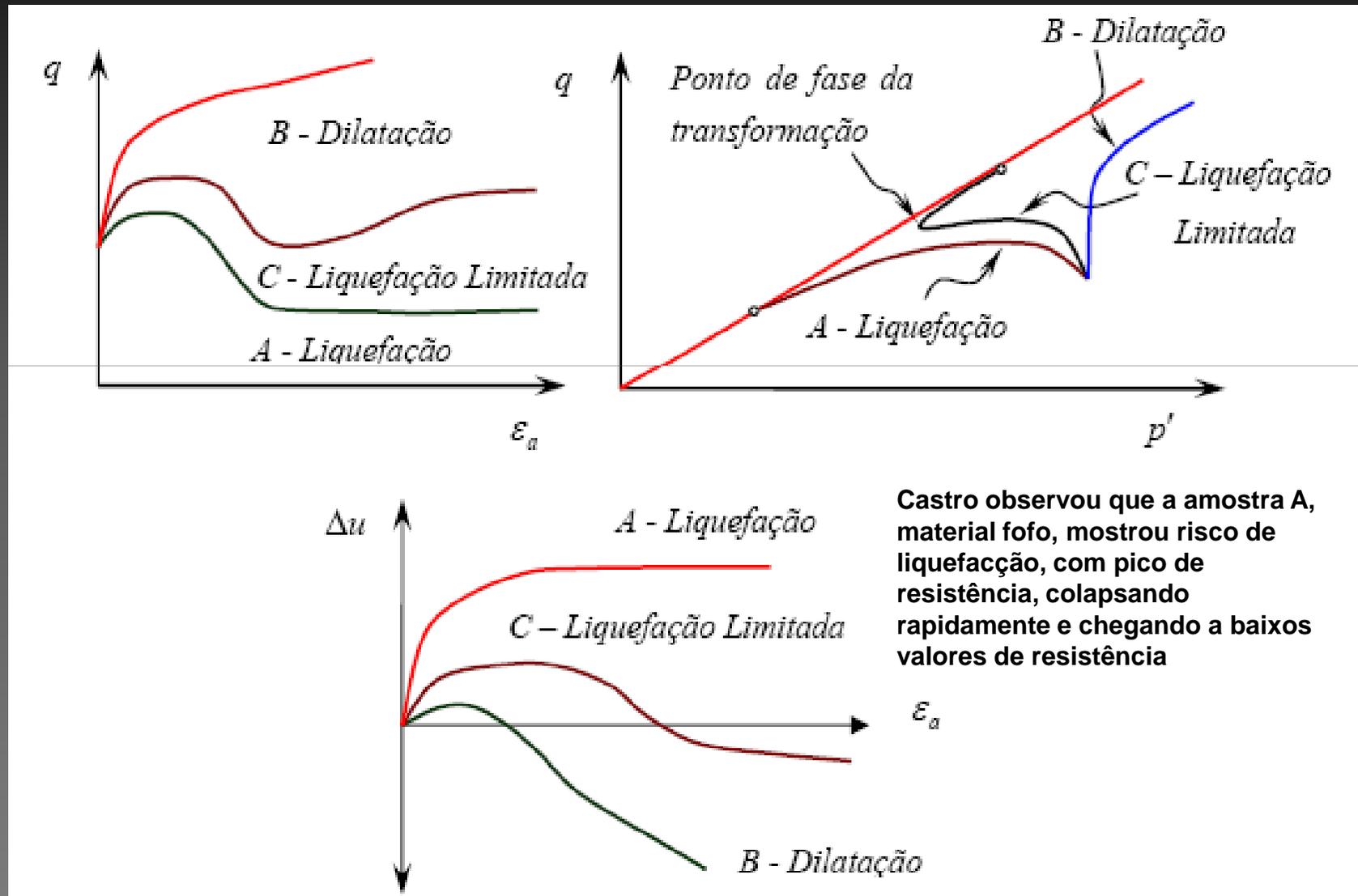
grãos relativamente angulares;

### EDX

Cálcio, ferro e sílcio(30%) identificados como elementos dominantes do resíduo de ouro e em menor quantidade titânio e alumínio;

# Critérios para estimativa da suscetibilidade de liquefacção

## Estado de deformação, índice de vazios e densidade relativa



# Critérios para estimativa da suscetibilidade de liquefação

- Quanto a teoria do estado crítico - Ensaios triaxiais

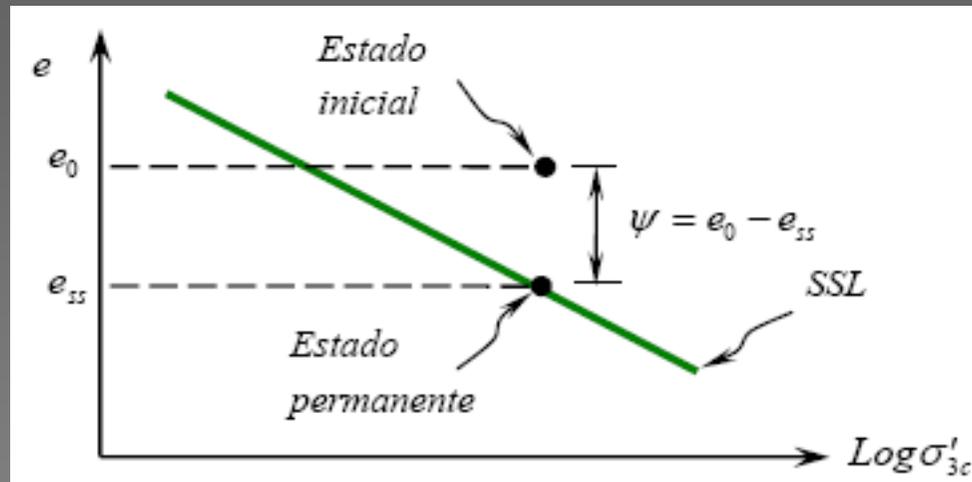
## Índice de vazios crítico

Casagrande, 1936

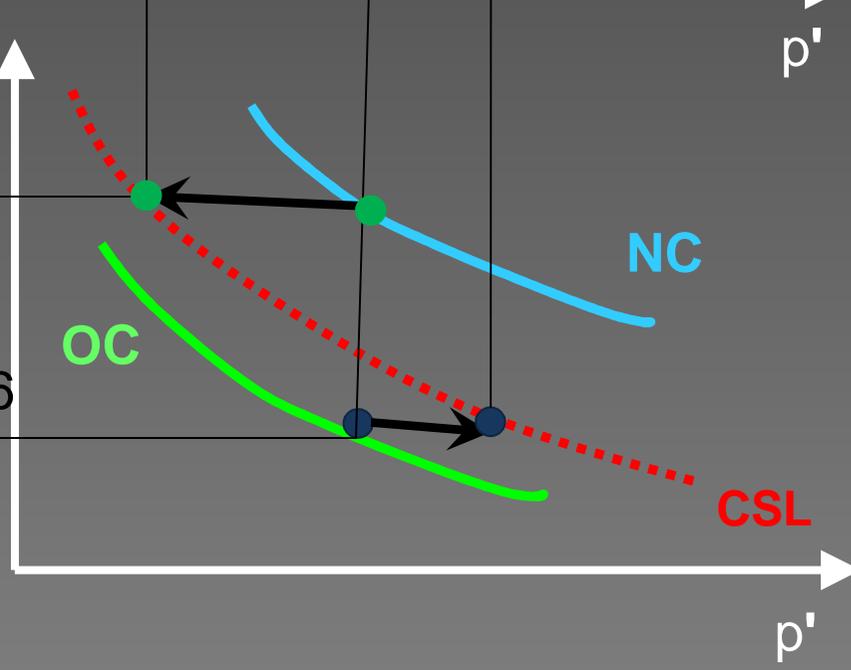
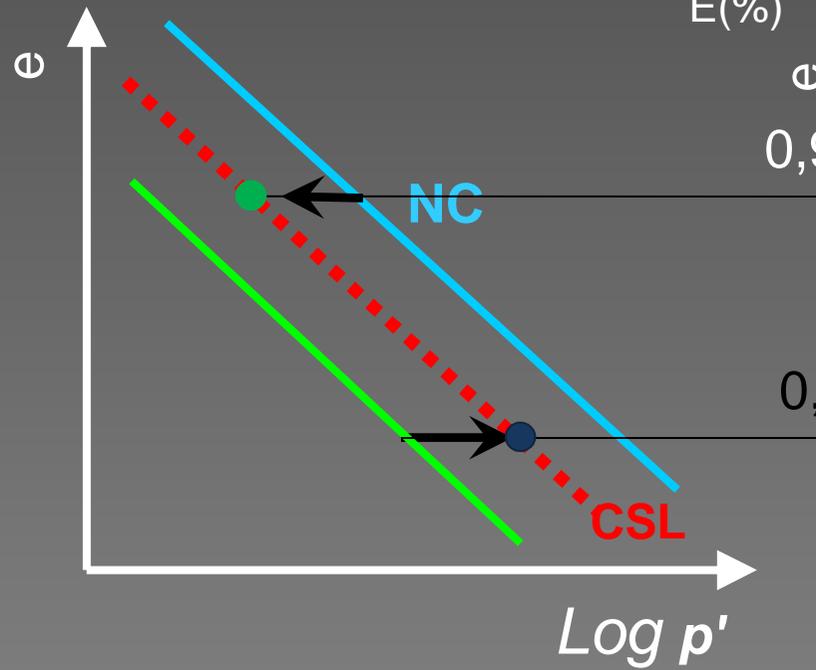
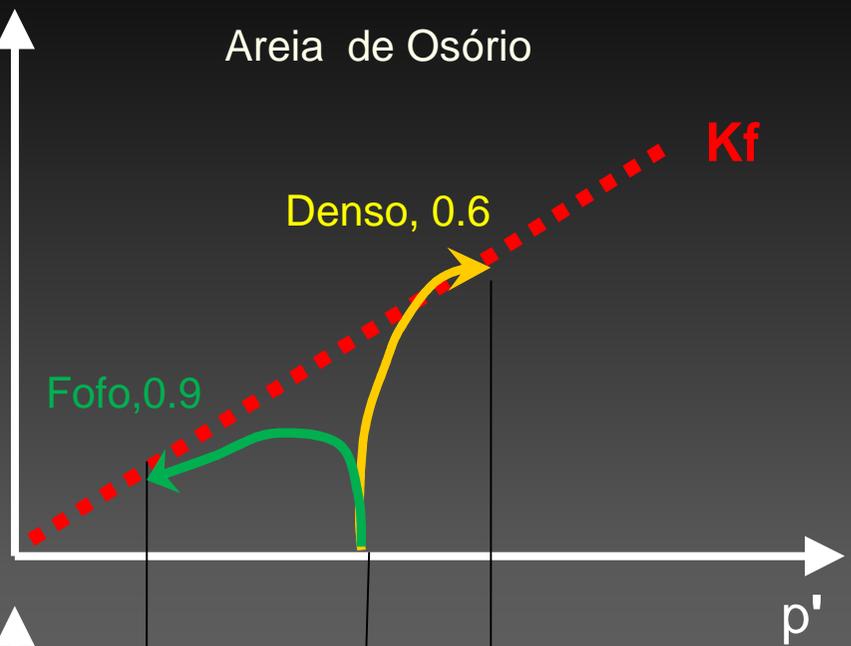
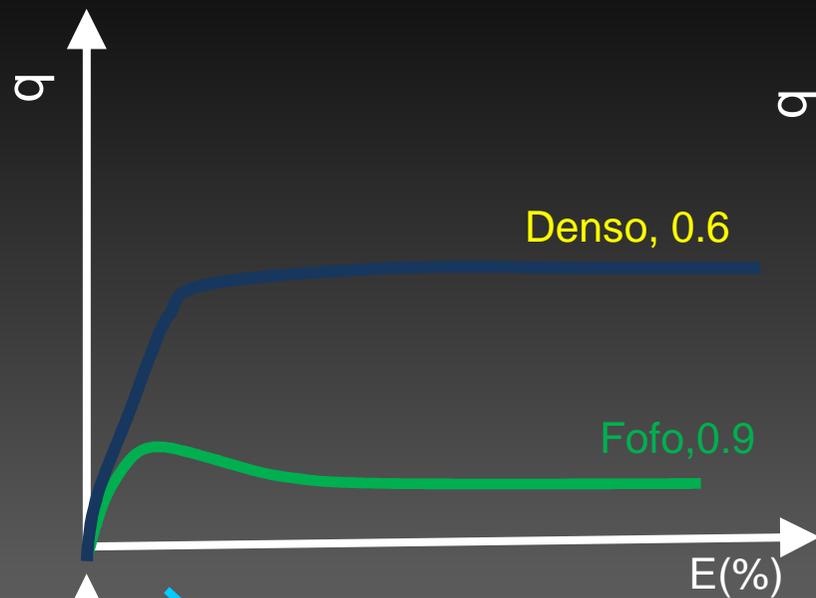


Been & Jefferies, 1985

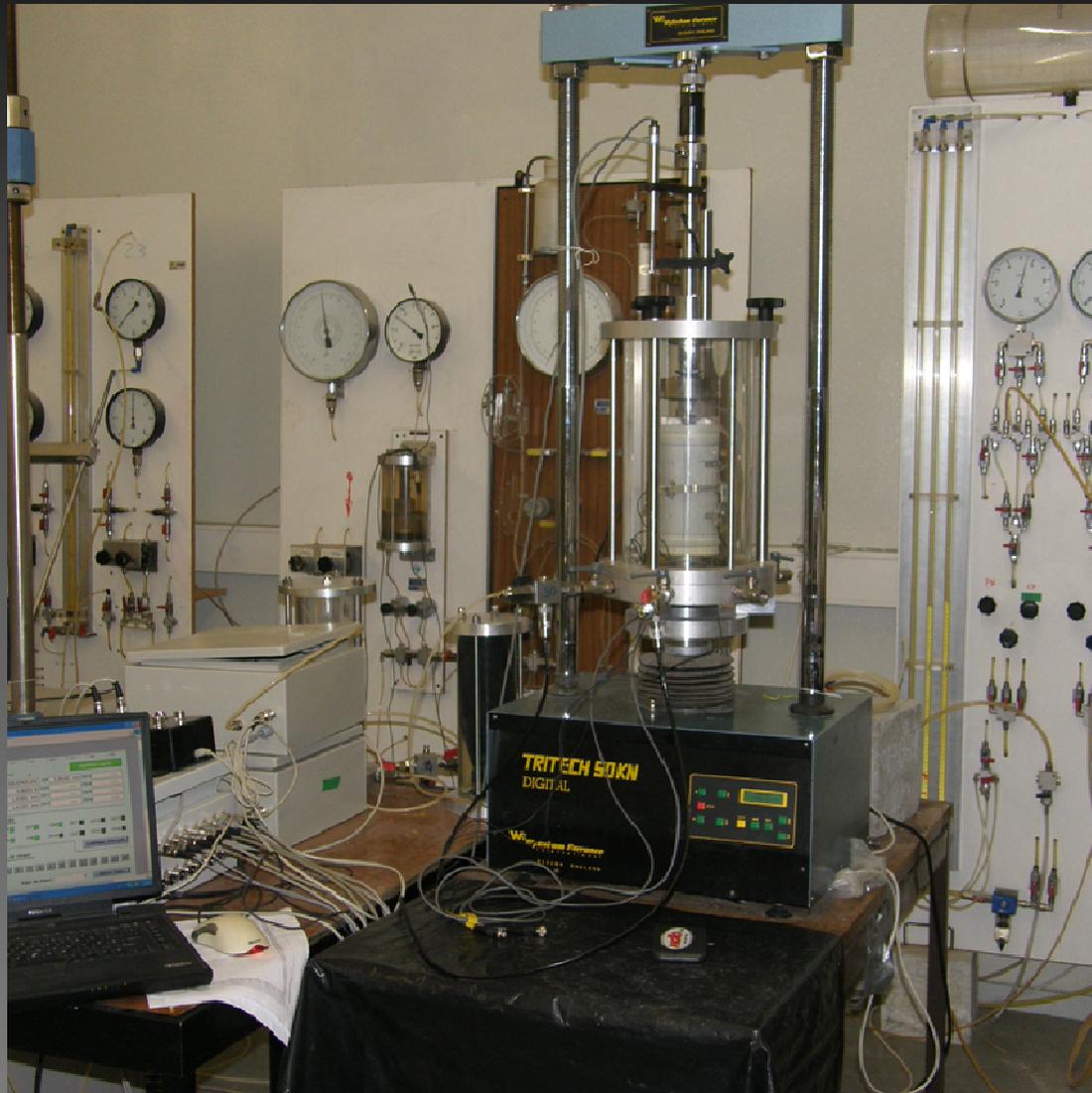
## Parâmetro de estado



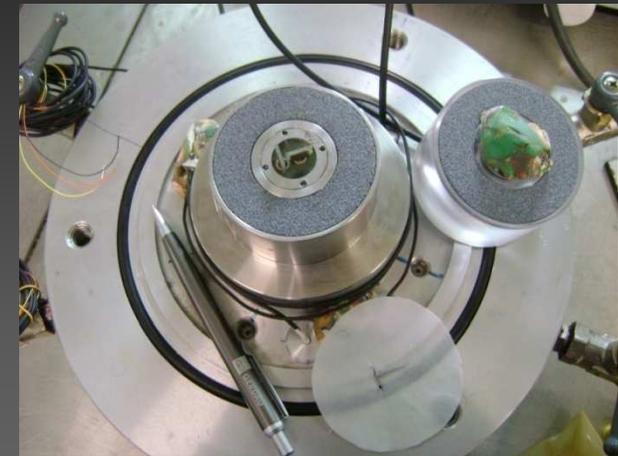
# Quanto a teoria do estado crítico - Ensaios triaxiais



# Programa experimental – Liquefação de fluxo ou monotónica



## ENSAIO TRIAXIAL DE COMPRESSÃO - FEUP

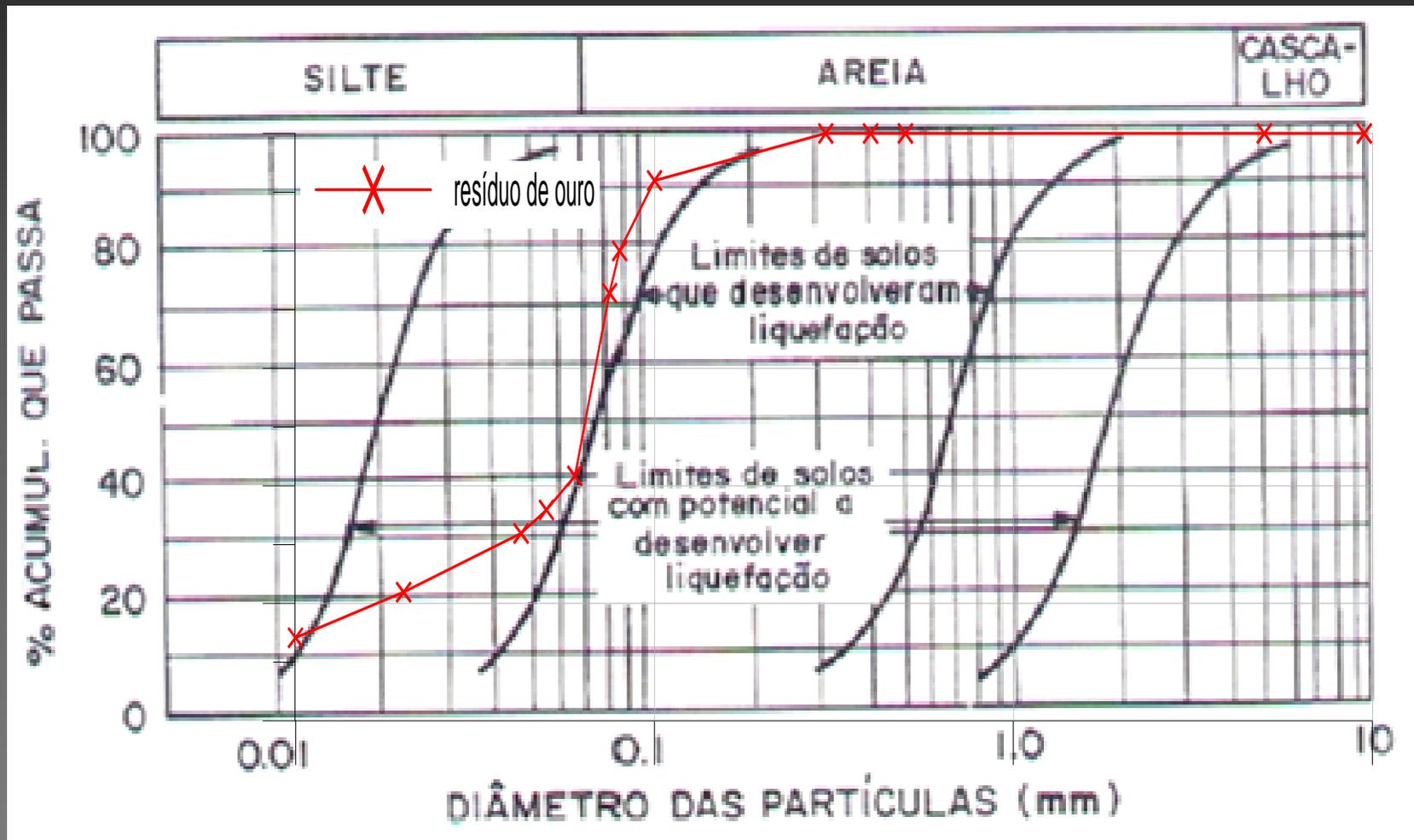


# Critérios para estimativa da suscetibilidade de liquefação

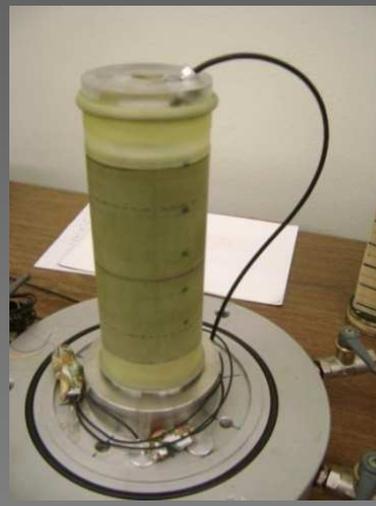
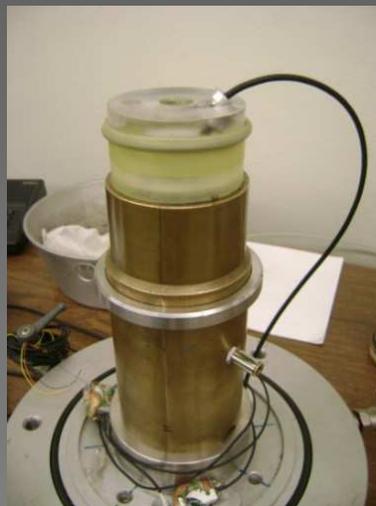
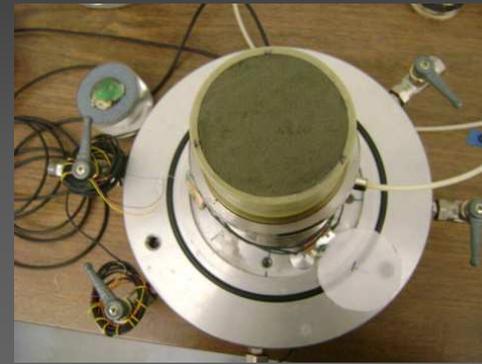
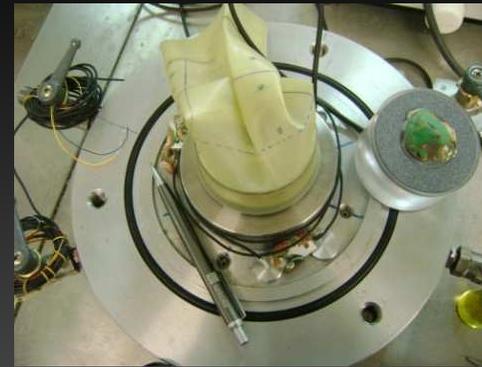
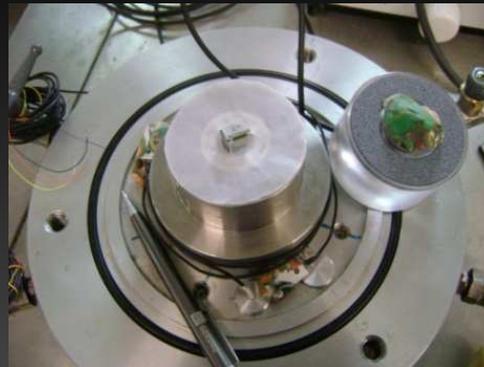
➤ Quanto ao Critério de composição do material

## Distribuição granulométrica

Tsuchida (1970)



# Procedimento de moldagem do do provete



# Procedimentos do ensaio

## 1-) Moldagem

## 4-) Consolidação

Tensões ( 10kPa a 1200kPa )

## 2-) Percolação

- No mínimo duas vezes o volume de vazios

## 5-) Corte

Deformação constante (câmara convencional)

CIU ( $v=0,1$  mm/s)

CID ( $v=0,01$ mm/s)

Deformação em função do estado de tensões  
(câmara Bishop Wesley)

## 3-) Saturação

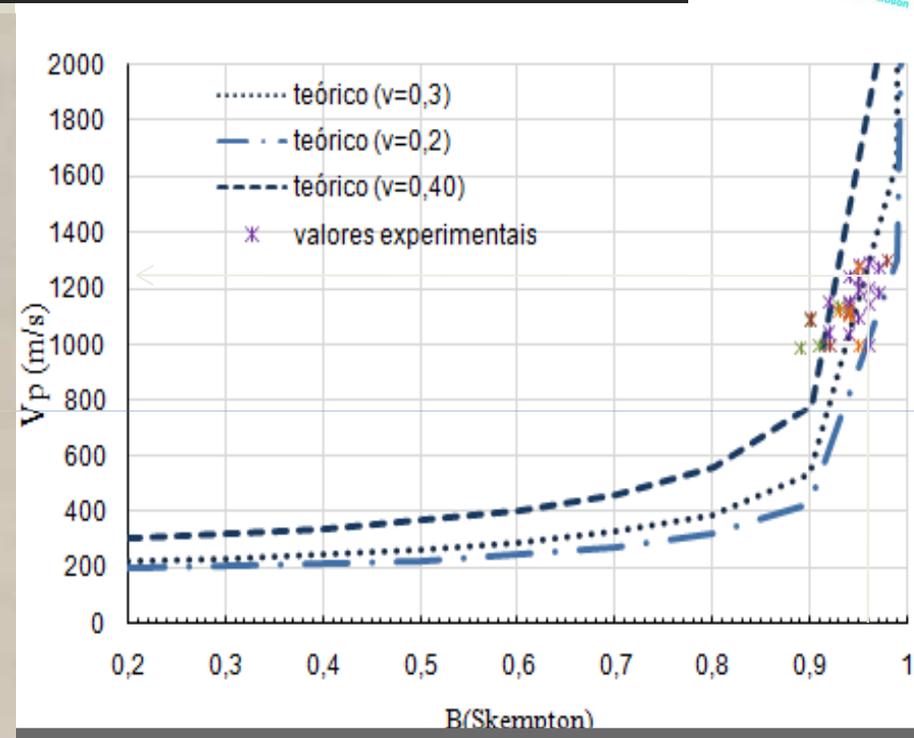
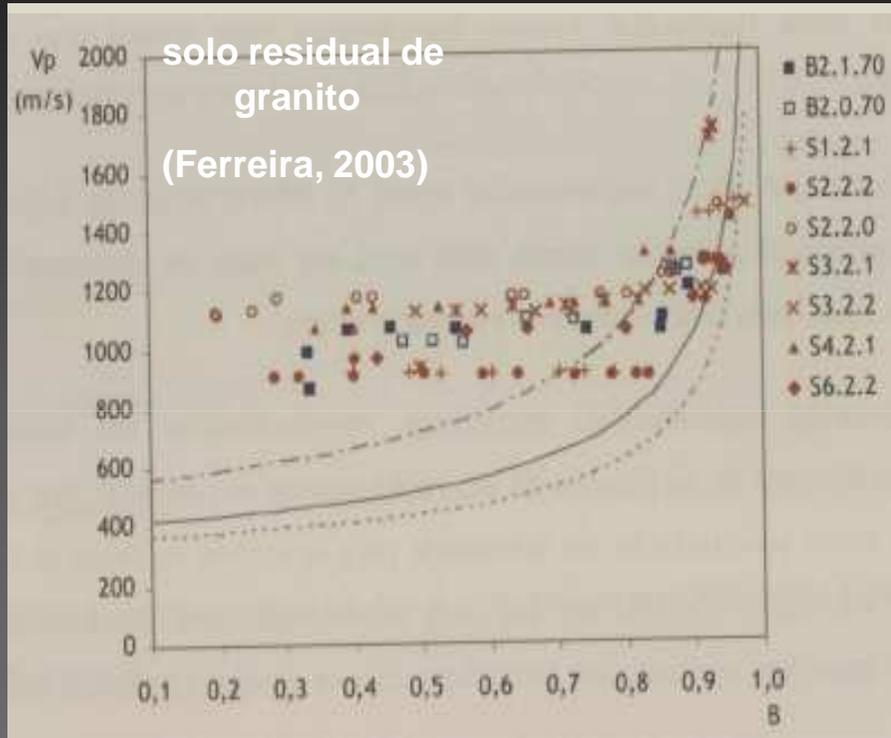
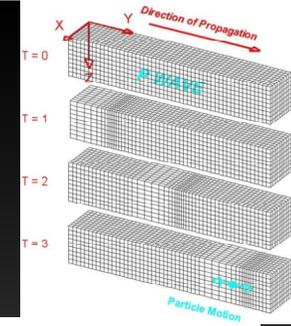
Controle do parâmetro B

Controle através da velocidade de compressão da amostra

# Procedimentos do ensaio

## 3-) Saturação

resíduo do processamento do ouro



### Curva teórica

Ishihara et al.(2001)  
e Yang(2002)

$$V_p = \left[ \frac{4G}{3} + \frac{Kb}{(1-B)} \right]^{1/2} \rho$$

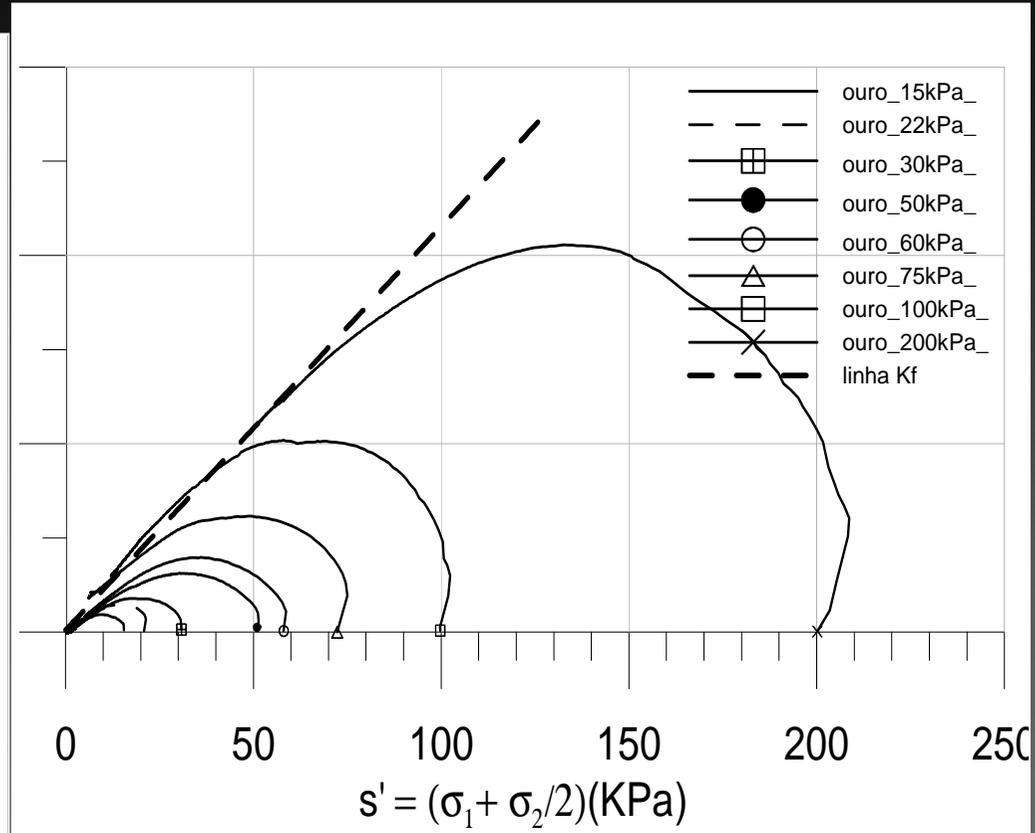
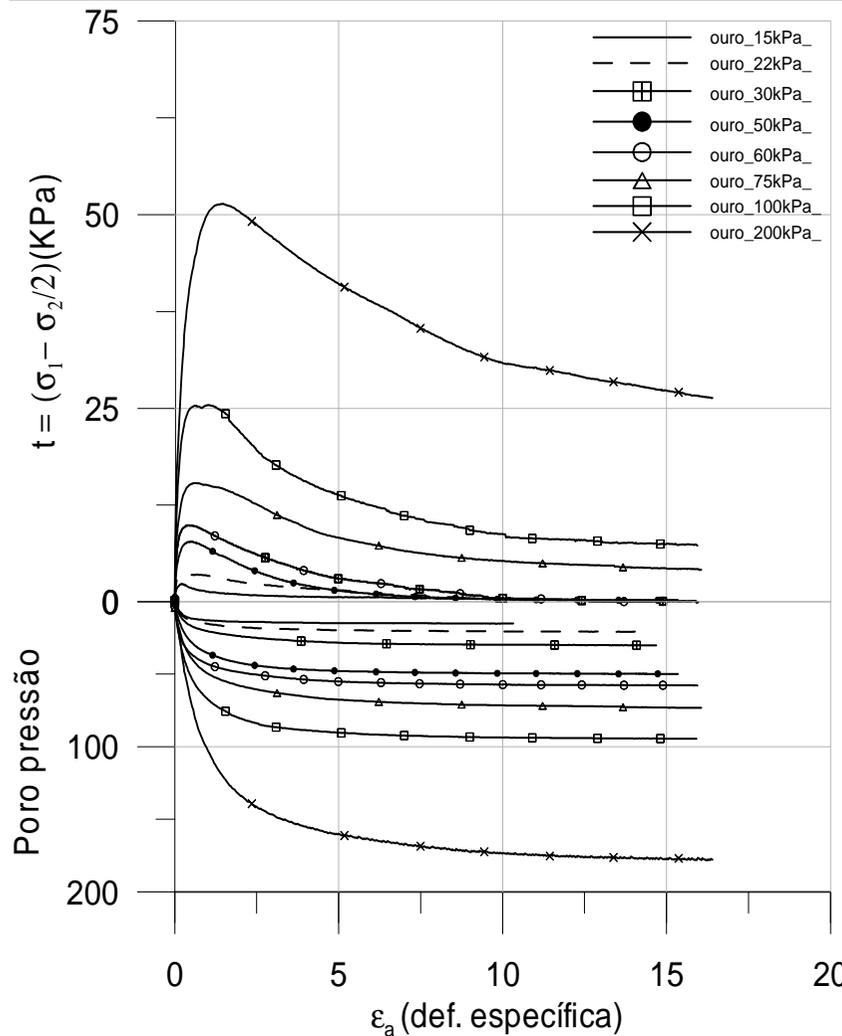
G= módulo de distorção do solo

B = parâmetro de pressões de água nos poros de Skempton

$\rho$ = massa volúmica do solo

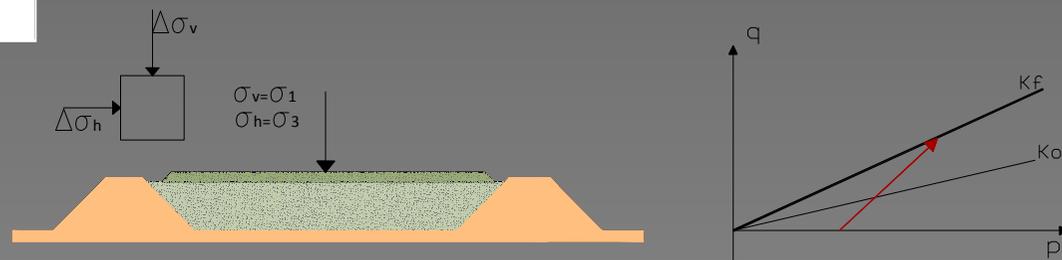
Kp= módulo volumétrico do esqueleto sólido do solo f(v)

# Ensaio de Compressão Triaxial em rejeito de ouro (FEUP)

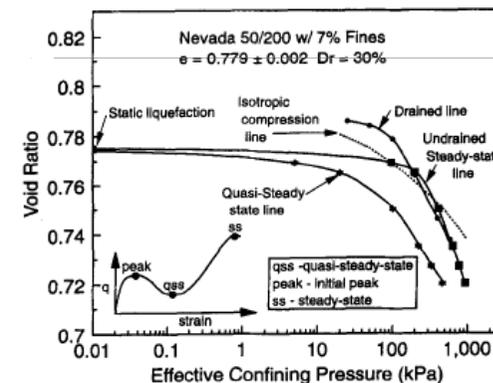
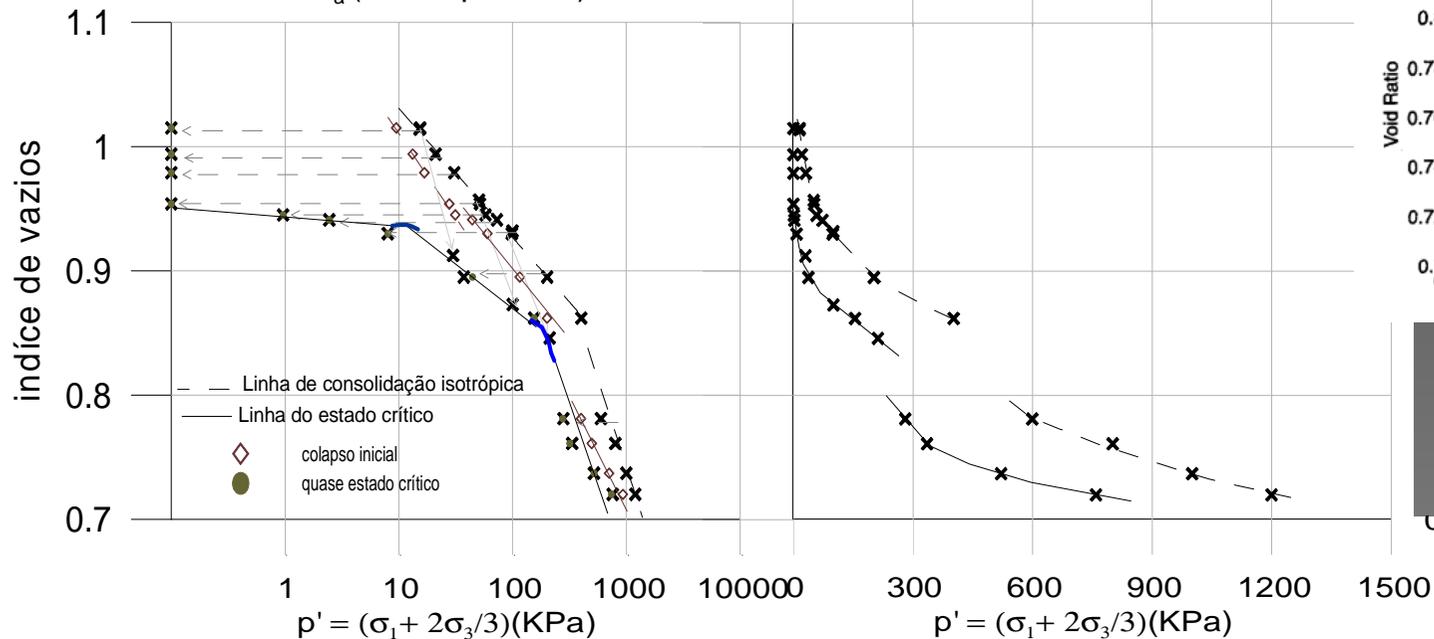
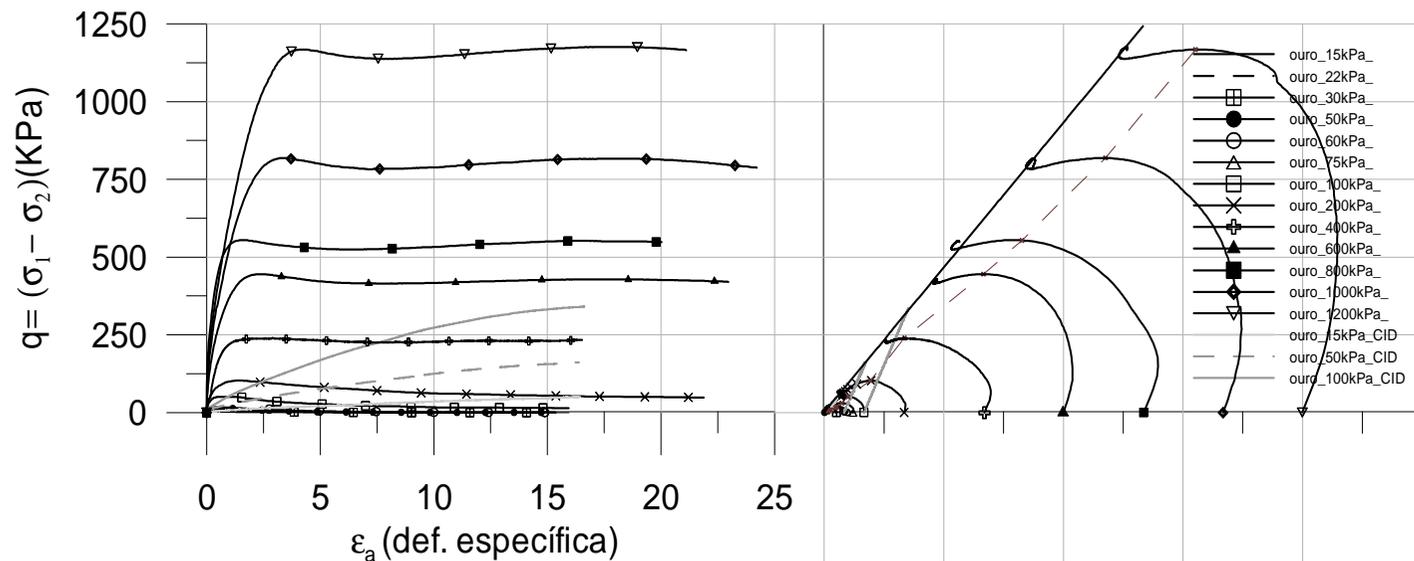


Amostra	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_i$ (%)	$e_i$	Sat.(%)	$\Phi'$
<i>Underflow</i>	13,7	15,5	1,2	>95	32

Deposição de material, carga axial

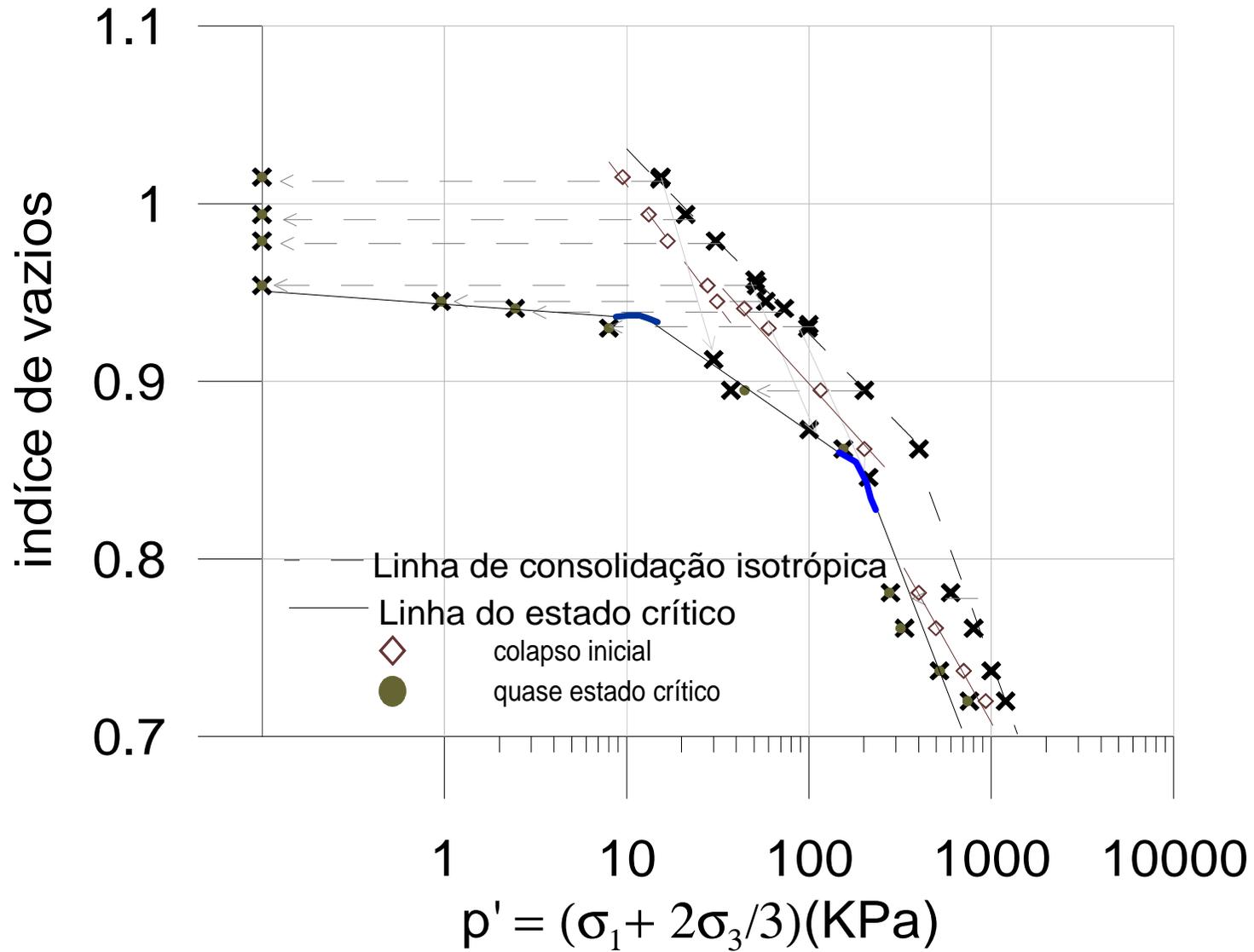


# Análise no Estado Crítico



Yamamuro & Lade(1998)

# Análise no Estado Crítico



# Critérios para estimativa da suscetibilidade de liquefacção

- Ondas sísmicas – Ensaios Triaxiais com benders elements

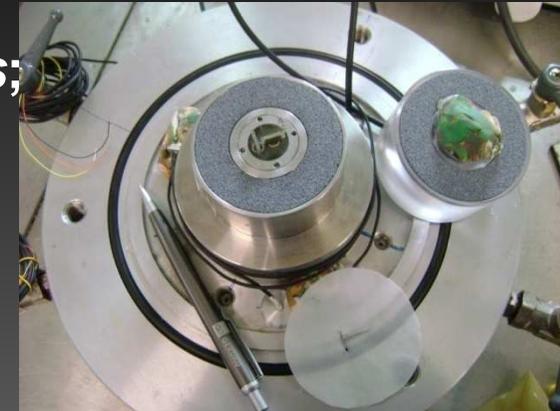
*Determinação da velocidade das ondas sísmicas;*

Velocidade de corte,  $V_s$

Velocidade de compressão,  $V_p$

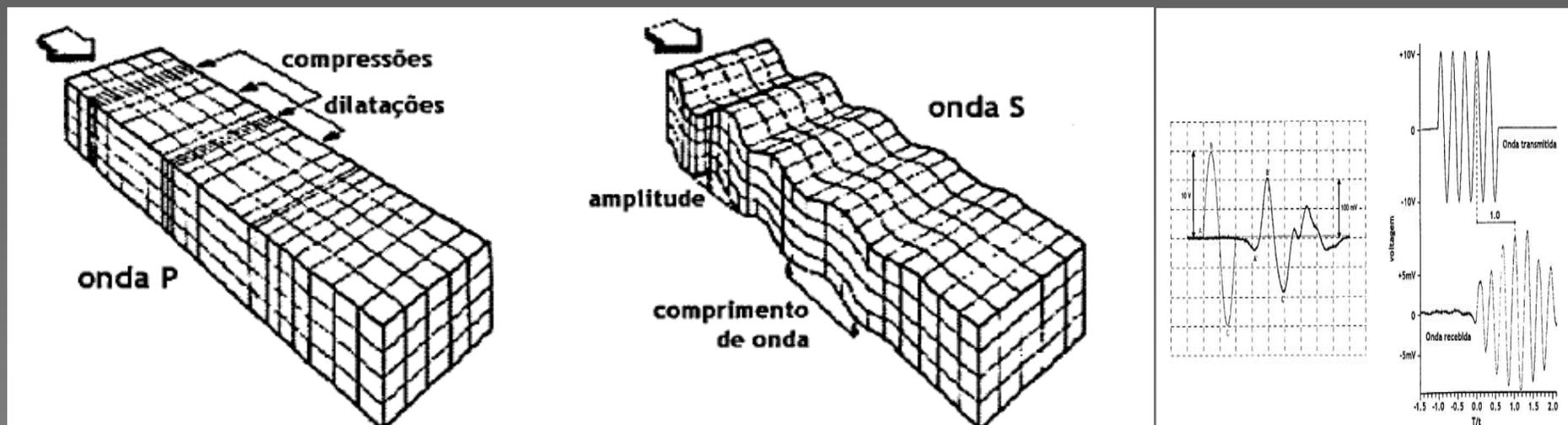
*Determinação do modulo distorcional do solo*

$$G_o = \rho \cdot [V_s]^2 \text{ (MPa)}$$



*Bender-extender elements ou transdutores piezoelétricos*

Ferreira, 2003



# Equipamento de medição das ondas sísmicas



Gerador de funções



Osciloscópio



*Bender-extender elements ou transdutores piezocerâmicos*

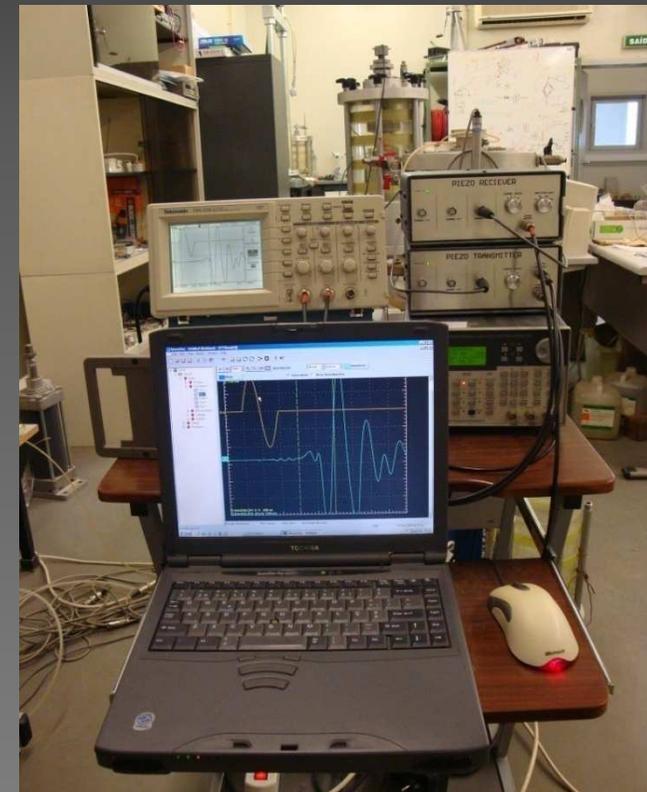


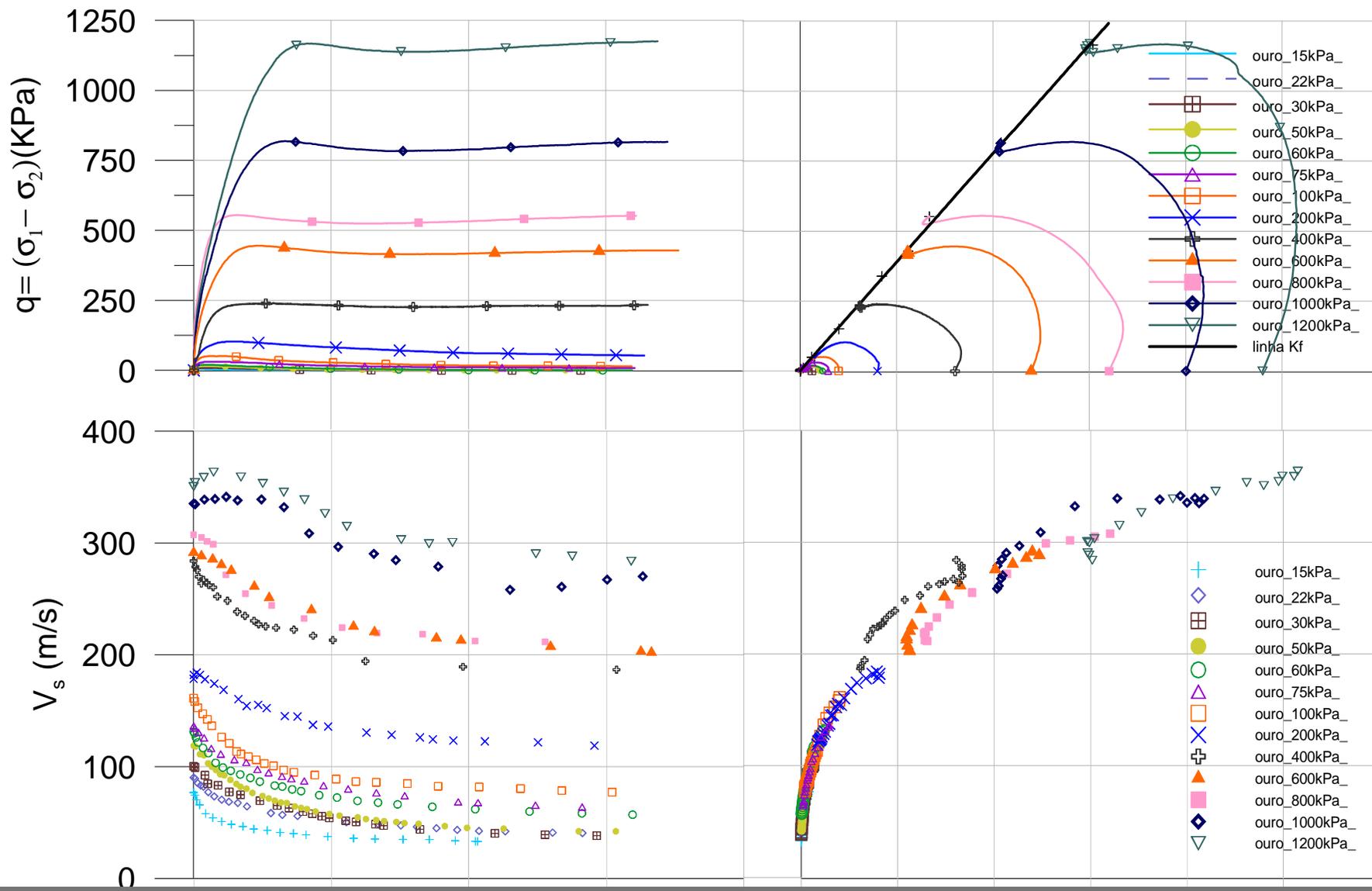
Amplificadores dos piezo-eléctricos:

a) do receptor;



b) do transmissor

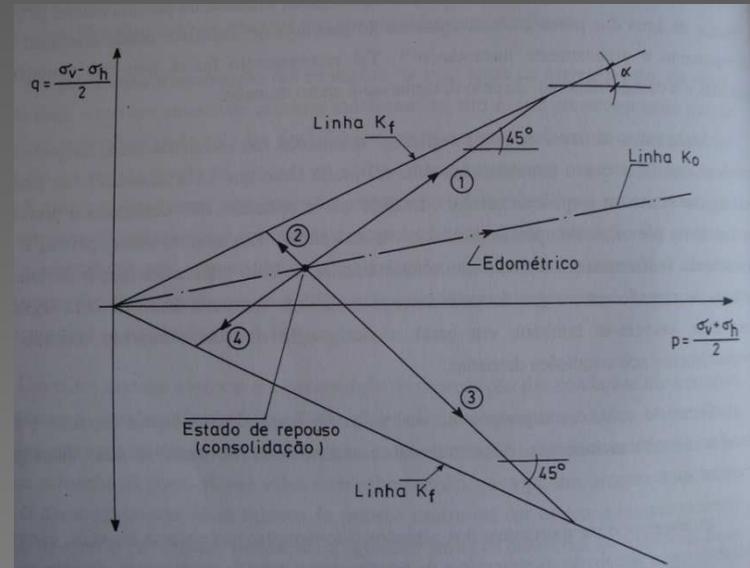
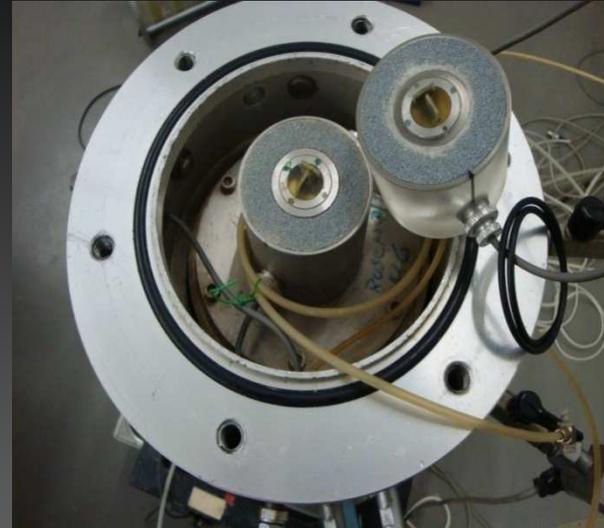
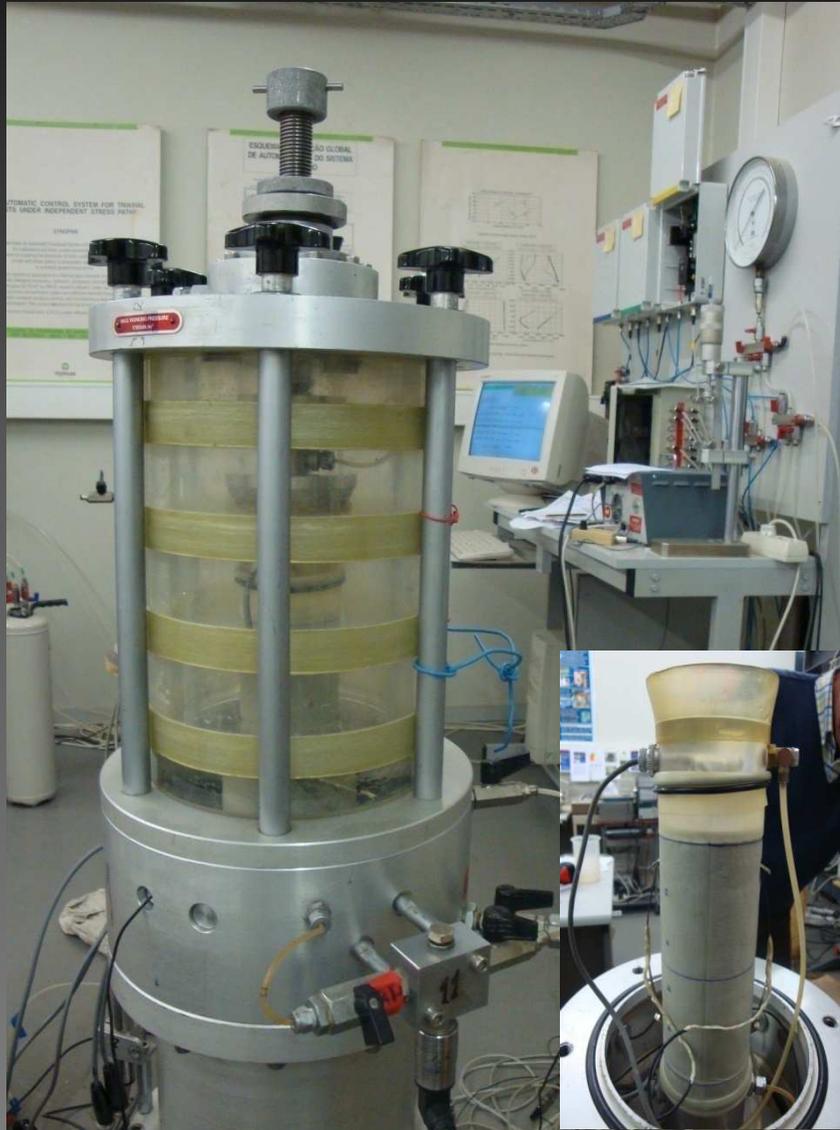




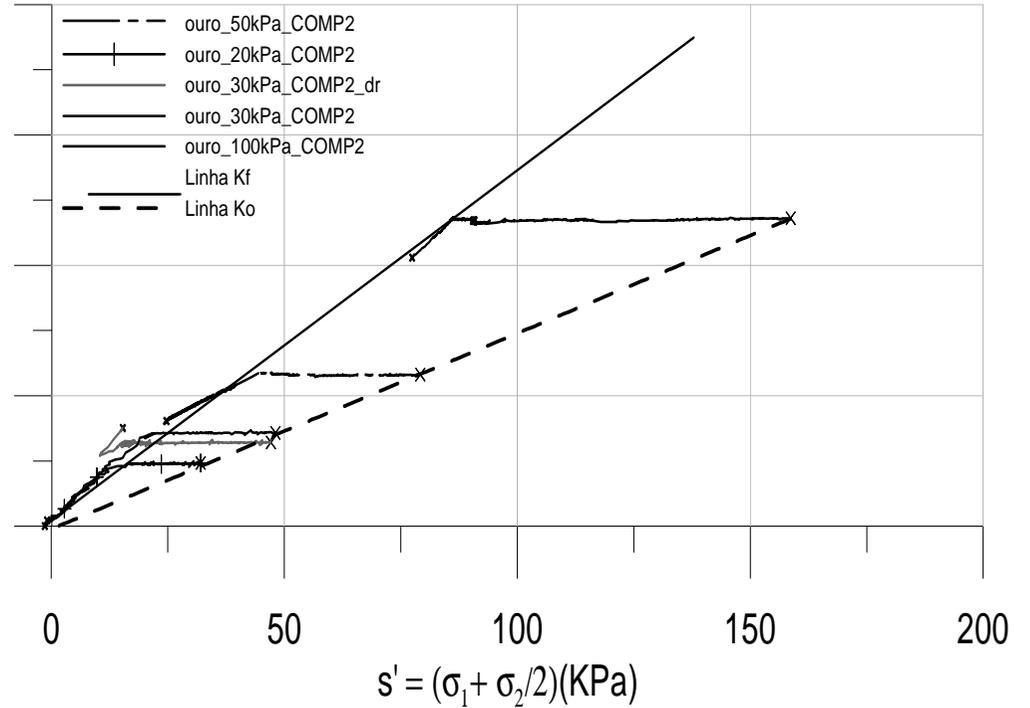
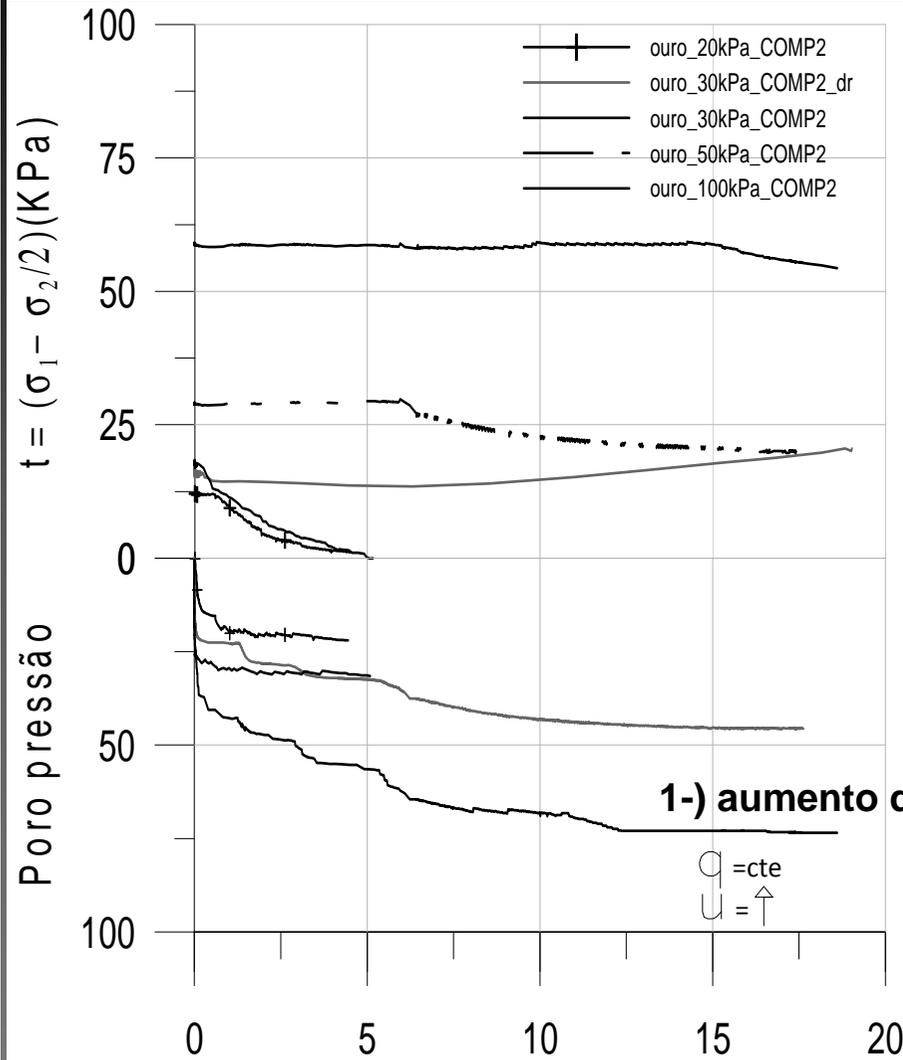
## Ondas sísmicas

# Triaxiais com outras trajectórias de tensões

## ENSAIO BISHOP WESLEY - FEUP

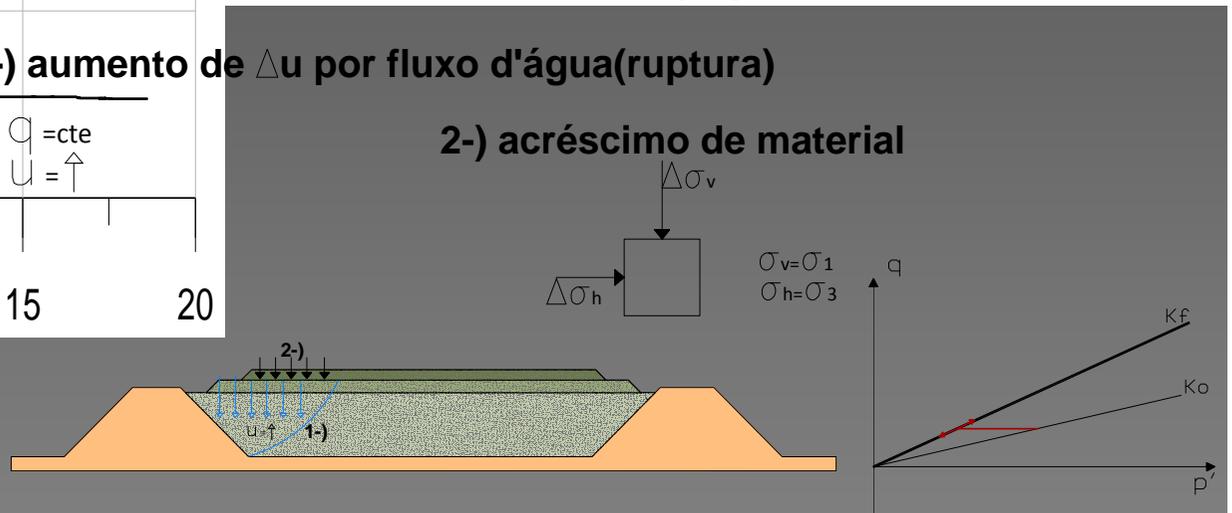


# Compressão Triaxial Bishop FEUP

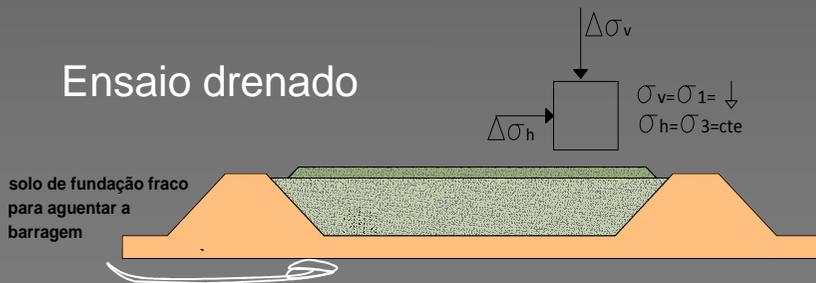
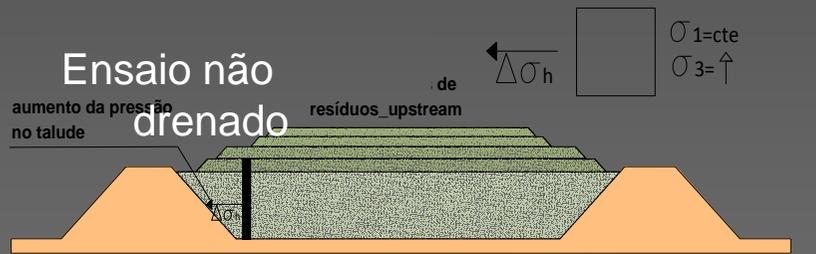
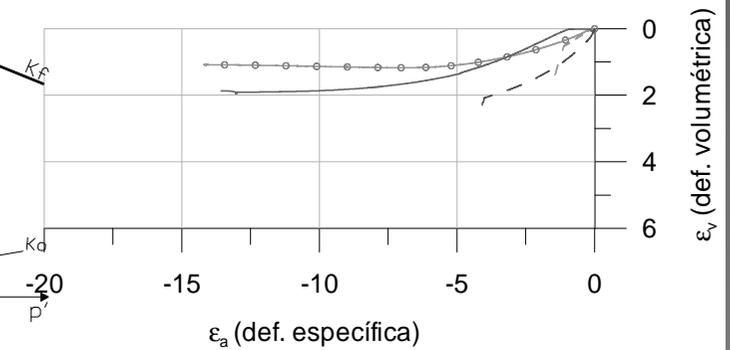
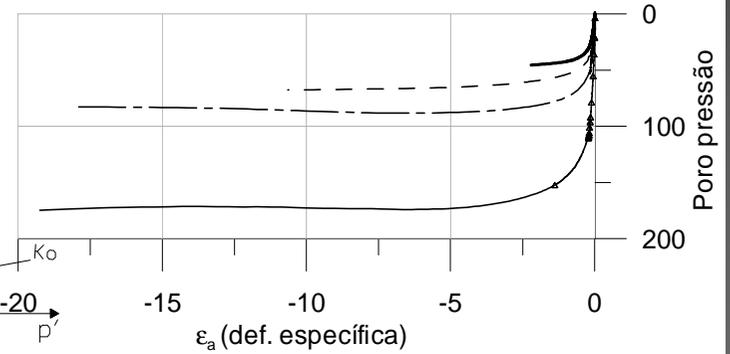
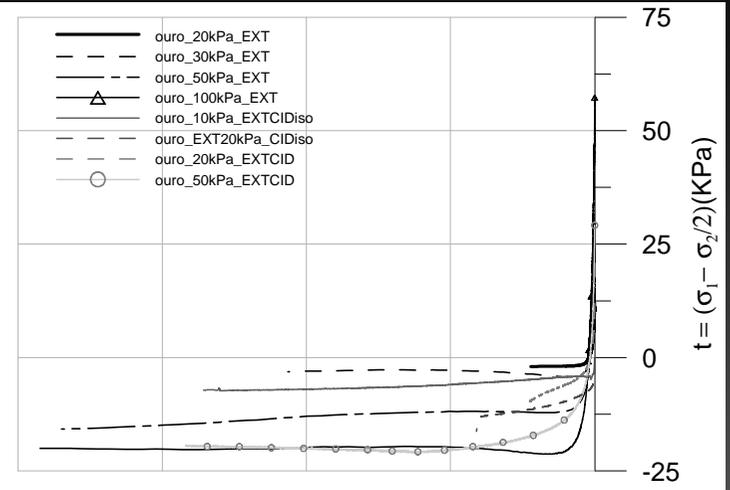
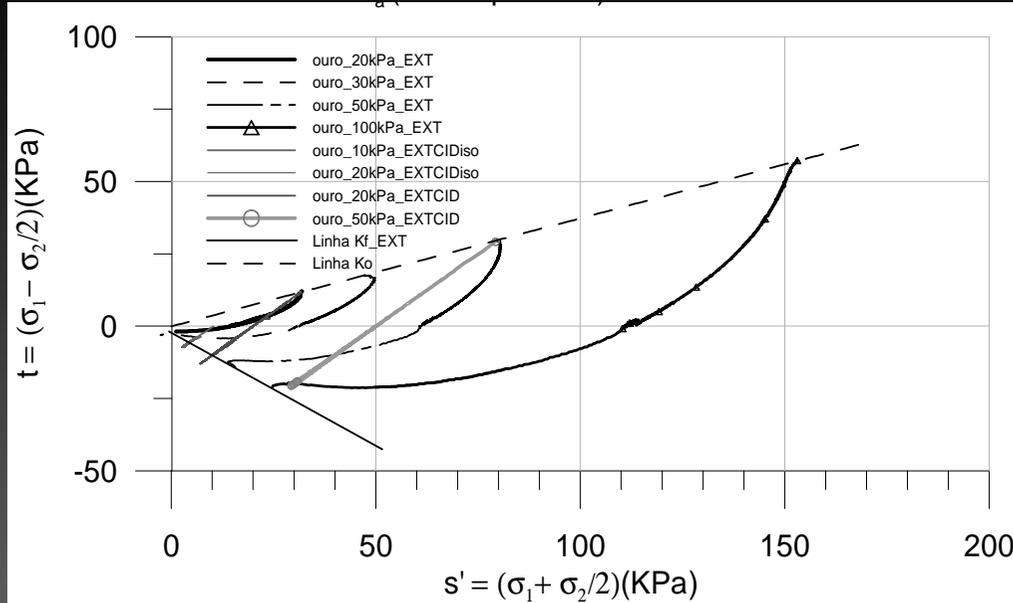


1-) aumento de  $\Delta u$  por fluxo d'água (ruptura)

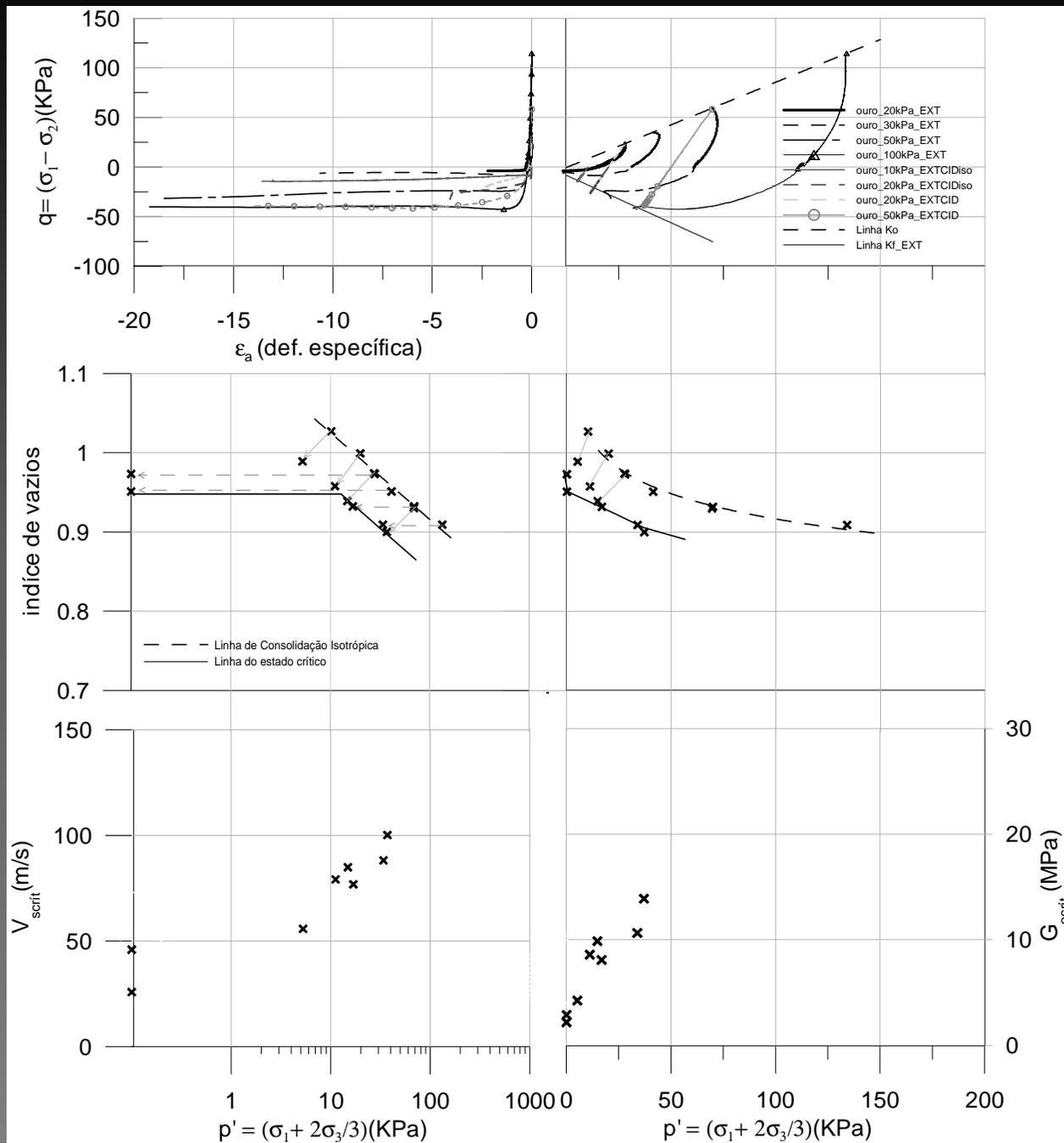
2-) acréscimo de material

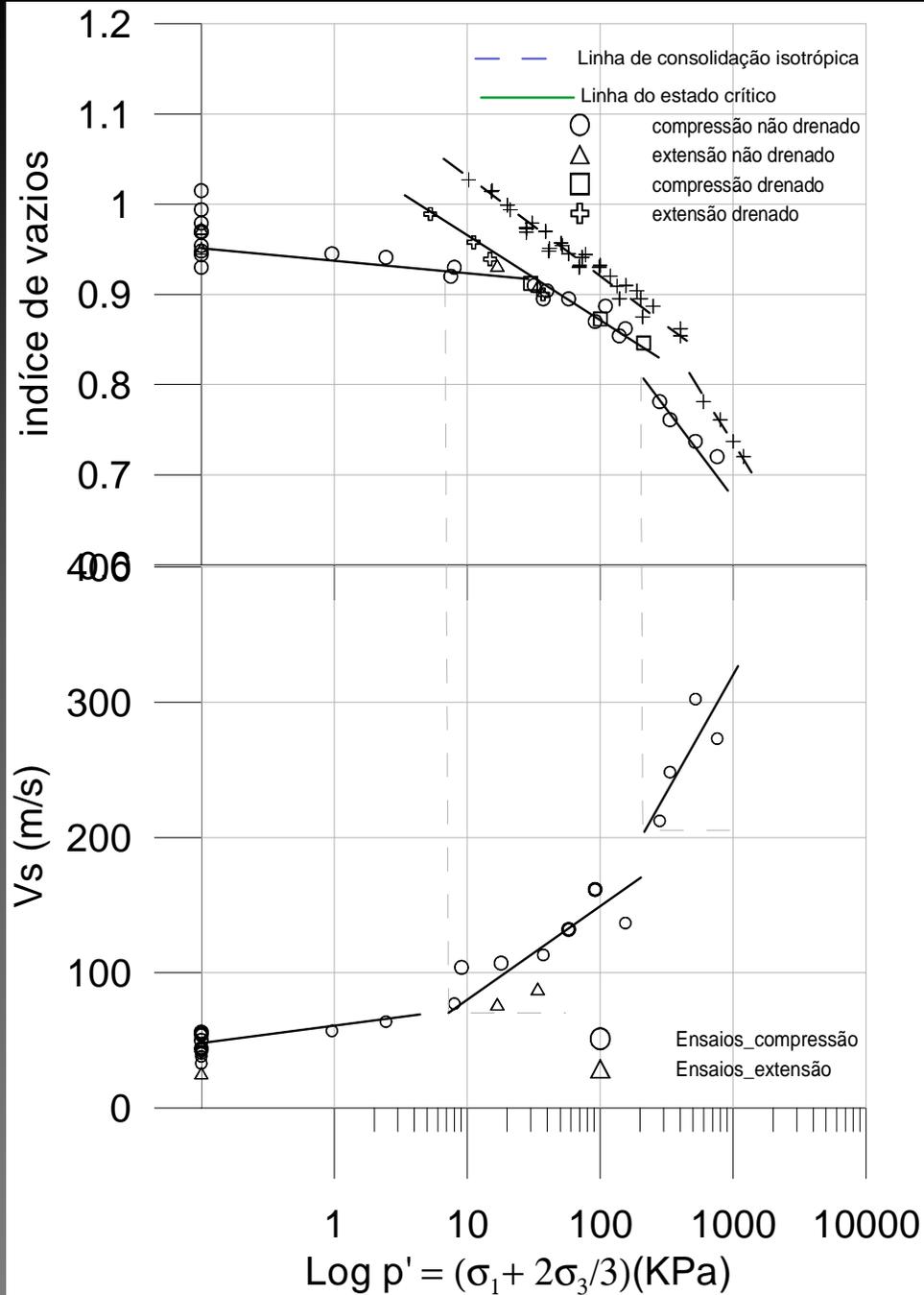


# Extensão Triaxial Bishop FEUP



# Compressão Triaxial-FEUP-estado crítico



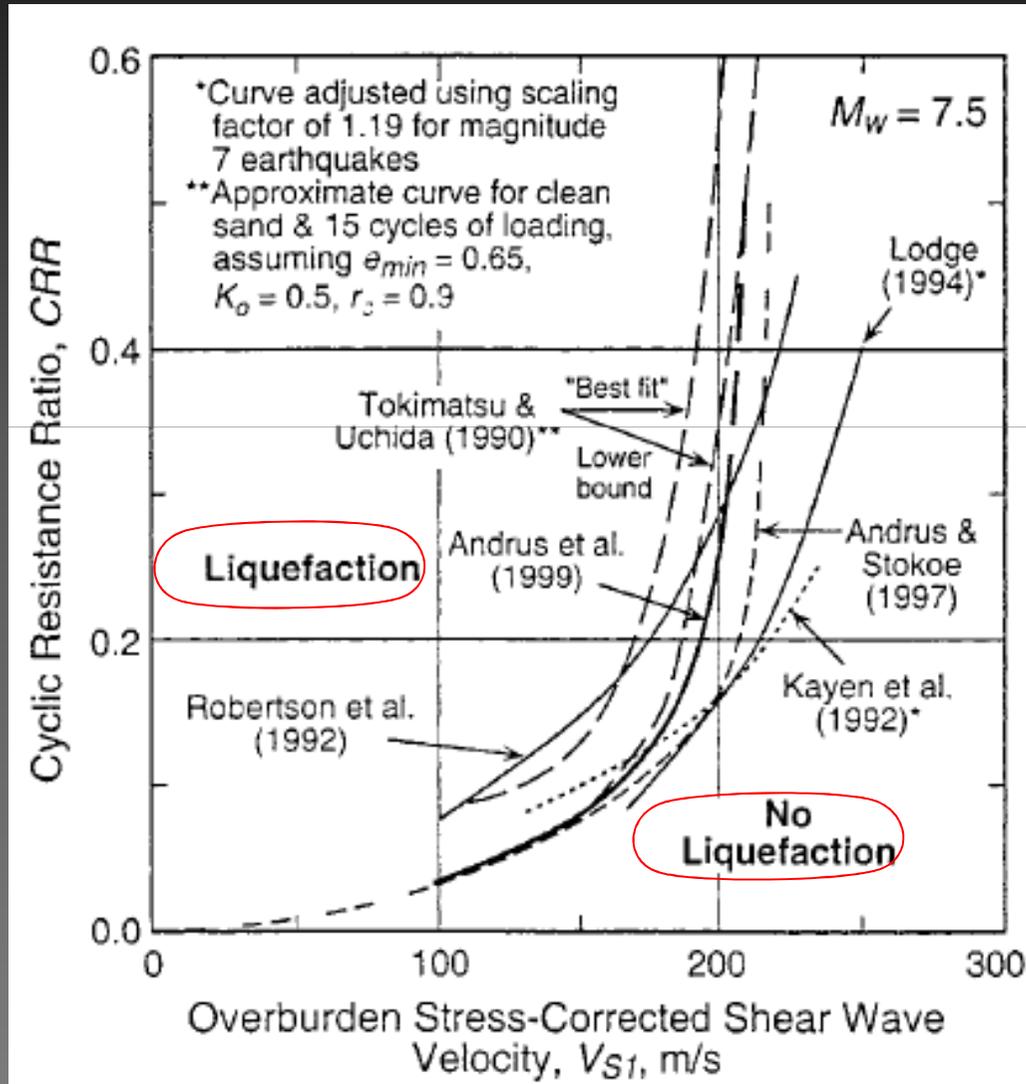


■ **Resumo dos valores de tensão efetiva, índice de vazios e velocidade de cisalhamento obtidos nos ensaios em compressão e extensão**

# Critérios para estimativa da suscetibilidade de liquefacção

➤ Ondas sísmicas

Solos arenosos



velocidade normalizada,  $V_{s1}$

lab

$$V_{s1} = V_{sf} C_V = V_{sf} \left( \frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^{0.25} = V_s \left( \frac{1 + 2K_0}{3} \right)^{0.25} \left( \frac{P_a}{\sigma'_m} \right)^{0.25}$$

campo

$$V_{s1} = V_s \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.25}$$

experimental

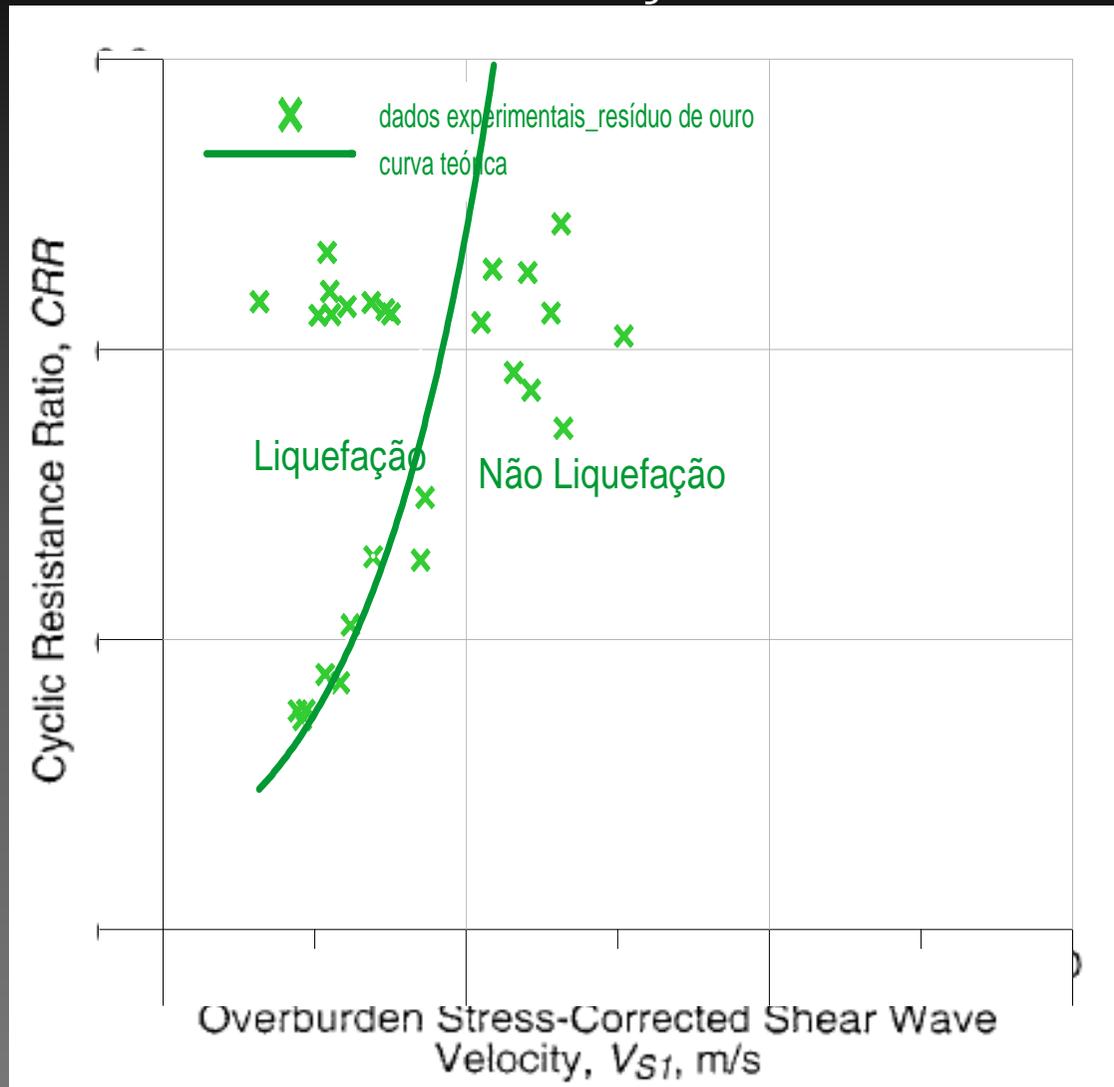
$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = f(\gamma_{av}) V_{s1}^2$$

teórico

$$CRR = \left[ a \left( \frac{K_c V_{s1}}{100} \right)^2 + b \left( \frac{1}{V_{s1}^* - K_c V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) \right] MSF$$

# Ondas sísmicas

## Resíduo de mineração - siltoso



Ensaio

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = f(\gamma_{av}) V_{s1}^2$$



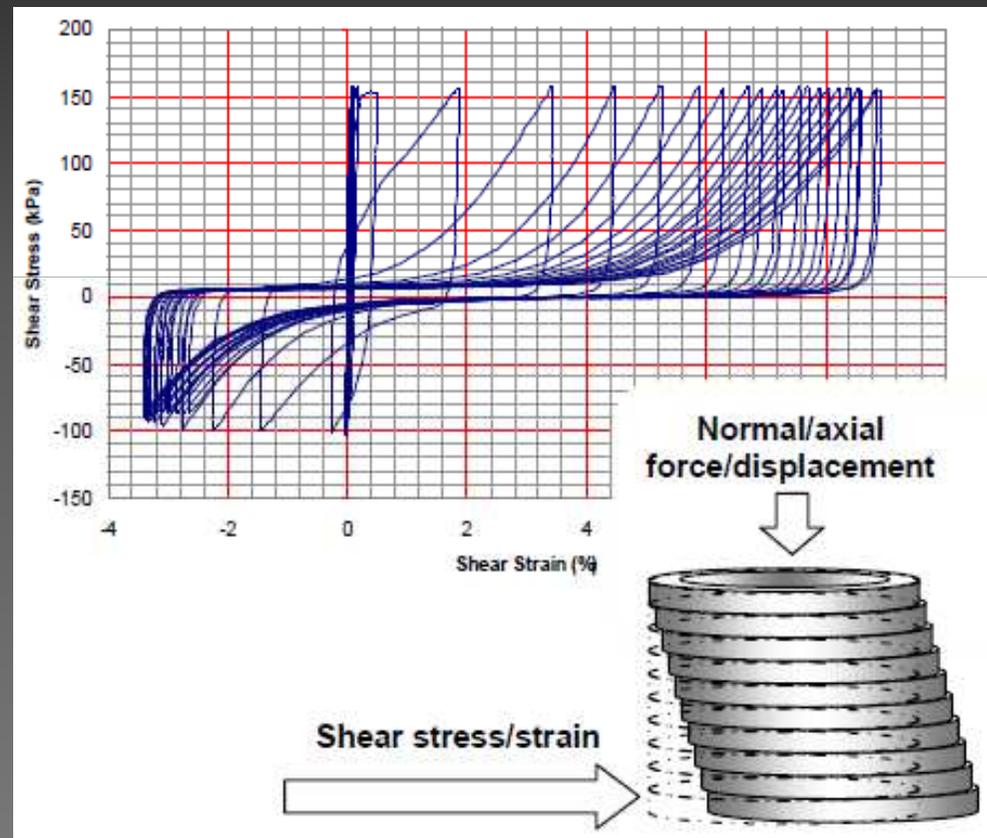
Ensaio estático

$$CSR = \left[ \frac{\sigma_{colapso}}{\sigma_{inicial}} \right]$$

$$V_{s1} = V_{sf} C_V = V_{sf} \left( \frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^{0.25} = V_s \left( \frac{1 + 2K_0}{3} \right)^{0.25} \left( \frac{P_a}{\sigma'_m} \right)^{0.25} \quad CRR = a \left( \frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + b \left( \frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right)$$

# Liquefacção Cíclica

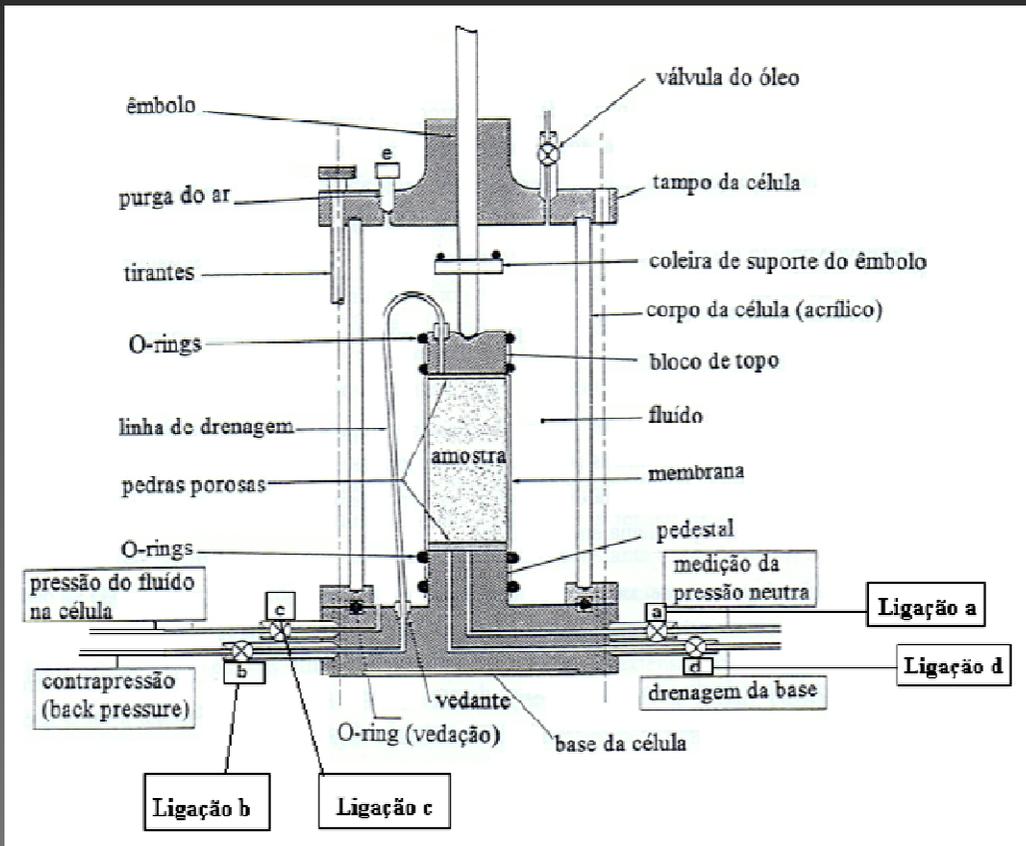
A primeira abordagem faz-se conceptualmente em condições de laboratório



Dynamic Cyclic Simple Shear

# EXPERIMENTAÇÃO EM LABORATÓRIO

## LIQUEFAÇÃO CÍCLICA - MOBILIDADE



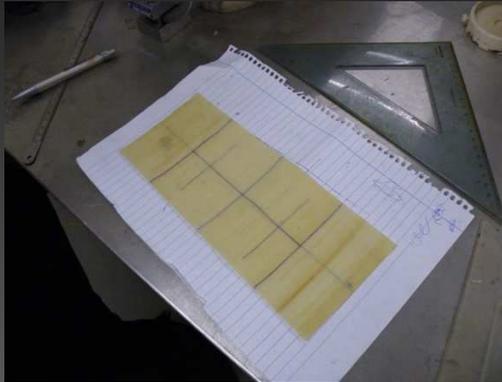
Pormenor da câmara triaxial

### Fases de um ensaio triaxial

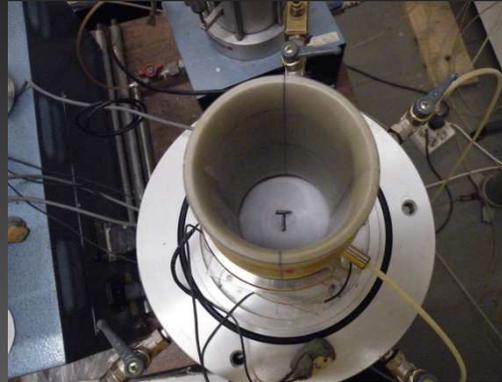
- Preparação
- Percolação
- Saturação
- Consolidação isotrópica ou anisotrópica
- Corte não drenado

# PROGRAMA EXPERIMENTAL

Marcas de orientação



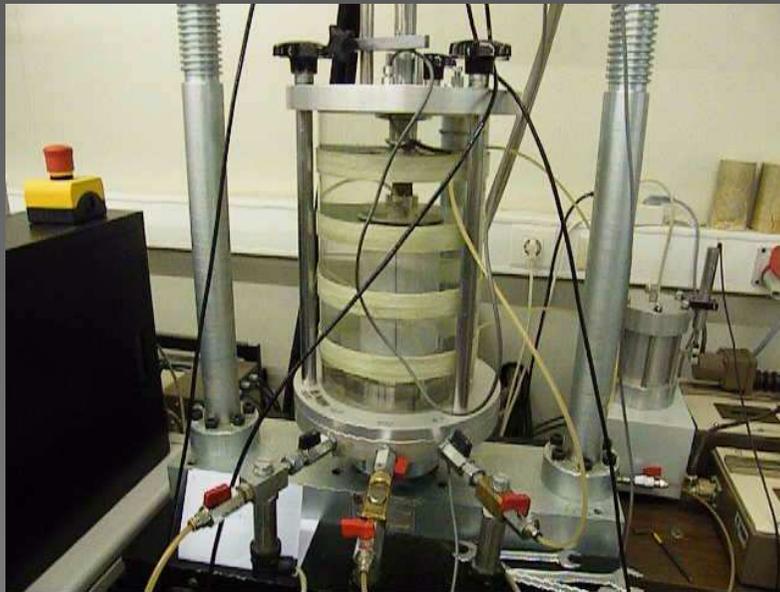
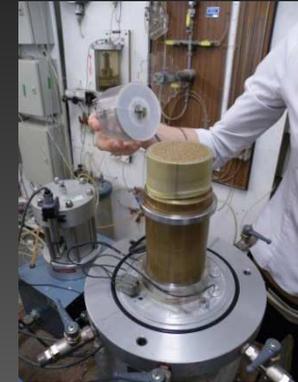
BE Elements



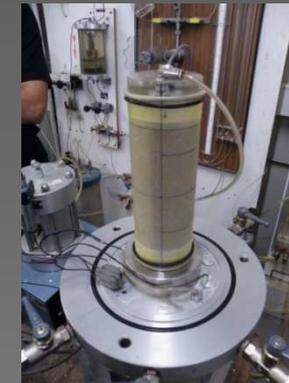
*Moist tamping*



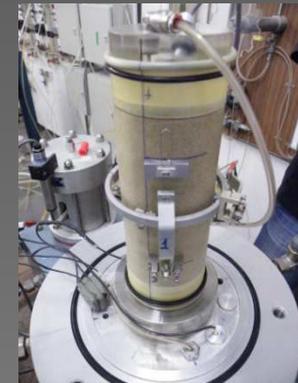
BE Elements



Final da preparação Triaxial cíclico



Triaxial estático



# DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

- SATURAÇÃO DAS AMOSTRAS
- MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

## ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFACÇÃO

- CRITÉRIO DA COMPOSIÇÃO DO MATERIAL
- TEORIA DOS ESTADOS CRÍTICOS
- AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFACÇÃO NOS ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS

# ESTIMATIVA DA ACÇÃO: RAZÃO DE TENSÃO CÍCLICA

O valor de CSR é usualmente estimado com base na probabilidade de ocorrência de um dado sismo.

Um método simplificado para estimar CSR foi proposto por Seed & Idriss (1971), baseado na aceleração máxima na superfície do terreno.

A formulação aproximada é a seguinte:

$$CSR = \tau_{av} / \sigma'_{v0} = 0.65 \alpha r_d \sigma_{v0} / \sigma'_{v0}$$

(sendo:  $\alpha = a_{max}/g$ )

com:

- $\tau_{av}$  – a tensão média (equivalente) de corte cíclico (sismo)
- $a_{max}$  - aceleração máxima no terreno ( $g$  é a aceleração da gravidade)
- $r_d$  é um factor que tem em conta a flexibilidade do solo e a profundidade (em metros), valendo:

$$\begin{aligned} r_d &= 1,0 - 0,00765 \cdot z, & \text{se } z < 9,15\text{m} \\ &= 1,174 - 0,0267 \cdot z, & \text{se } z = 9,15\text{-}23\text{m} \\ &= 0,744 - 0,008 \cdot z, & \text{se } z = 23\text{-}30\text{m} \\ &= 0,5, & \text{se } z > 30\text{m} \end{aligned}$$

# DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

## Plano-resumo dos ensaios

	w (%)	e	$\sigma'_h$ (kPa)	$K_0$	$\sigma'_v$ (kPa)	Condição de ensaio
LD21	5	0,9	50	0,5	100	Estático
LDC22	5	0,9	50	0,5	100	Cíclico
LDC23	5	0,9	50	0,5	100	Cíclico
LDC24	5	0,9	50	0,5	100	Cíclico
LD25	5	0,9	100	0,5	200	Estático
LDC26	5	0,9	50	0,5	100	Cíclico
LD27	5	0,9	200	0,5	400	Estático
LDC28	5	0,9	100	0,5	200	Cíclico
LDC29	5	0,9	200	0,5	400	Cíclico
LDC30	5	0,9	200	0,5	400	Cíclico
LDC31	5	0,9	50	0,5	100	Cíclico
LDC32	5	0,9	100	0,5	200	Cíclico
LDC33	5	0,9	25	0,5	50	Cíclico
LD34	5	0,9	25	0,5	50	Estático
LDC35	5	0,9	25	0,5	50	Cíclico
LD36	5	0,9	50	0,5	100	Estático
LDC37	5	0,9	200	0,5	50	Cíclico
LDC38	5	0,9	25	0,5	50	Cíclico
LD39	5	0,9	100	1	100	Estático

$$K_0 = 1 - \sin \phi'$$

(Jaky, 1944)

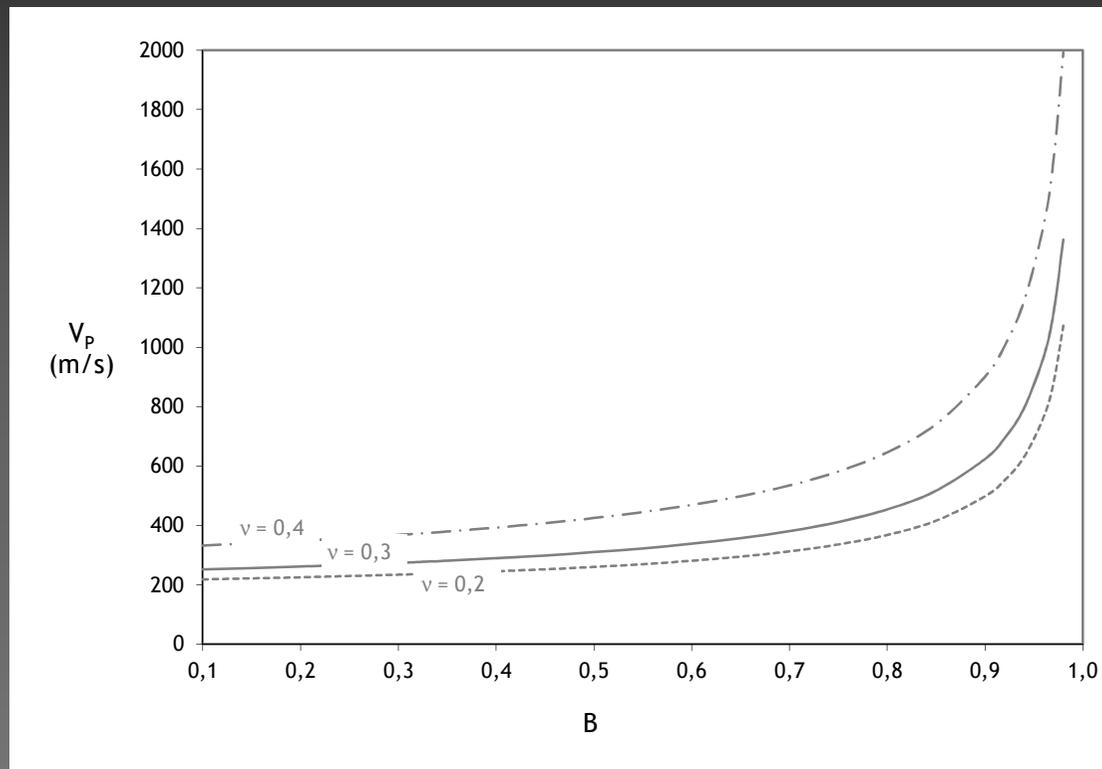
$$\phi' = 29,4^\circ$$

$$K_0 = 1 - \sin(29,4) = 0,51$$

(Pinheiro, 2009)

# SATURAÇÃO DAS AMOSTRAS

Ishihara et al. (2001) e Yang (2002)



$$V_p = \left[ \frac{4G_0 + \frac{K_b}{1-B}}{3\rho} \right]^{\frac{1}{2}}$$

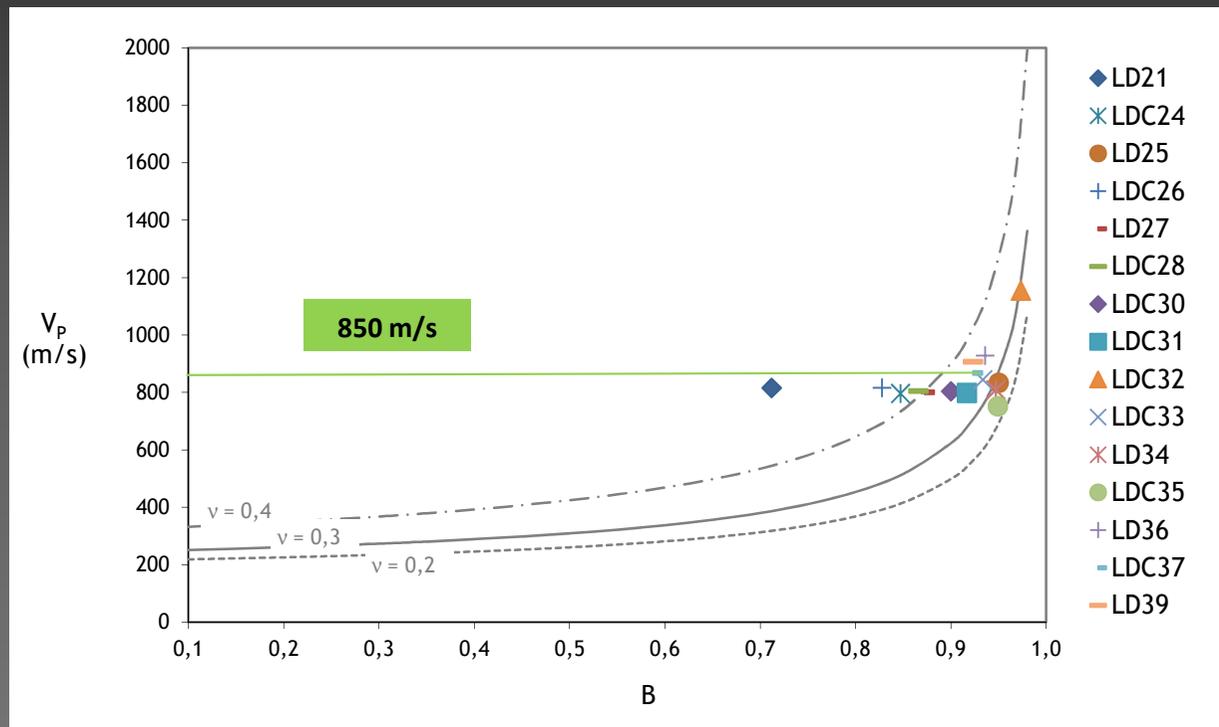
$$K_b = \frac{2G_0 \times (1+\nu)}{3(1-2\nu)}$$

$$\rho = \frac{\gamma}{9,81} \times 1000 \approx 1480 \text{ kg/m}^3$$

$$G_0 = 25 \text{ MPa}$$

# SATURAÇÃO DAS AMOSTRAS

Ishihara et al. (2001) e Yang (2002)



$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

$$V_{P,S} = \frac{d}{\Delta t}$$

$$V_{P,\text{água}} = 1500 \text{ m/s}$$

(Kokusho, 2000)

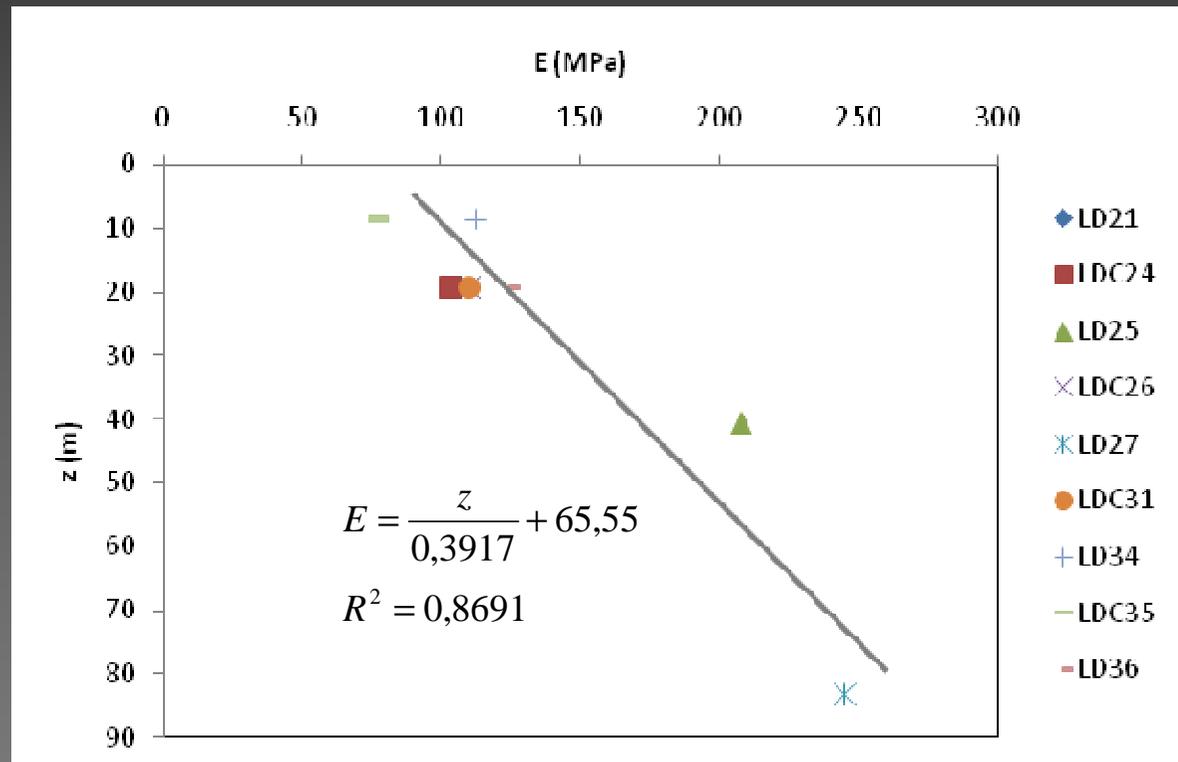
$$0,30 \leq v < 0,40$$

$$\overline{V_P} = 850 \text{ m/s}$$

# MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \quad E = 2G_0(1+\nu)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}$$

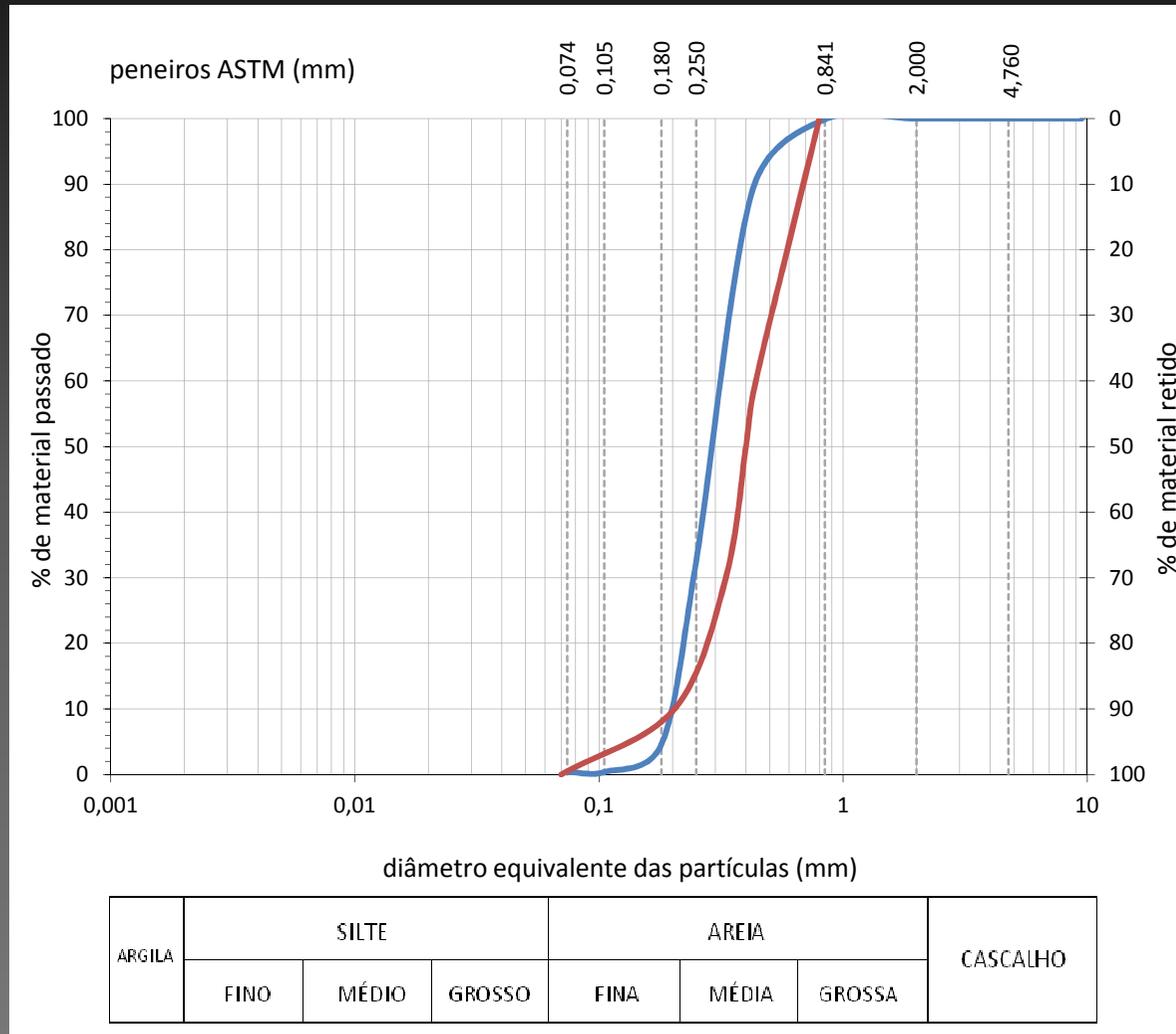


Ensaio LD21

$$\nu = \frac{\left(\frac{242,23}{112,53}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{242,23}{112,53}\right)^2 - 2} = 0,36$$

Evolução de E em profundidade

# CRITÉRIO DA COMPOSIÇÃO DO MATERIAL




---

*Laboratoire GIENA*

$$C_C = 1,21$$

$$C_U = 2,15$$

---

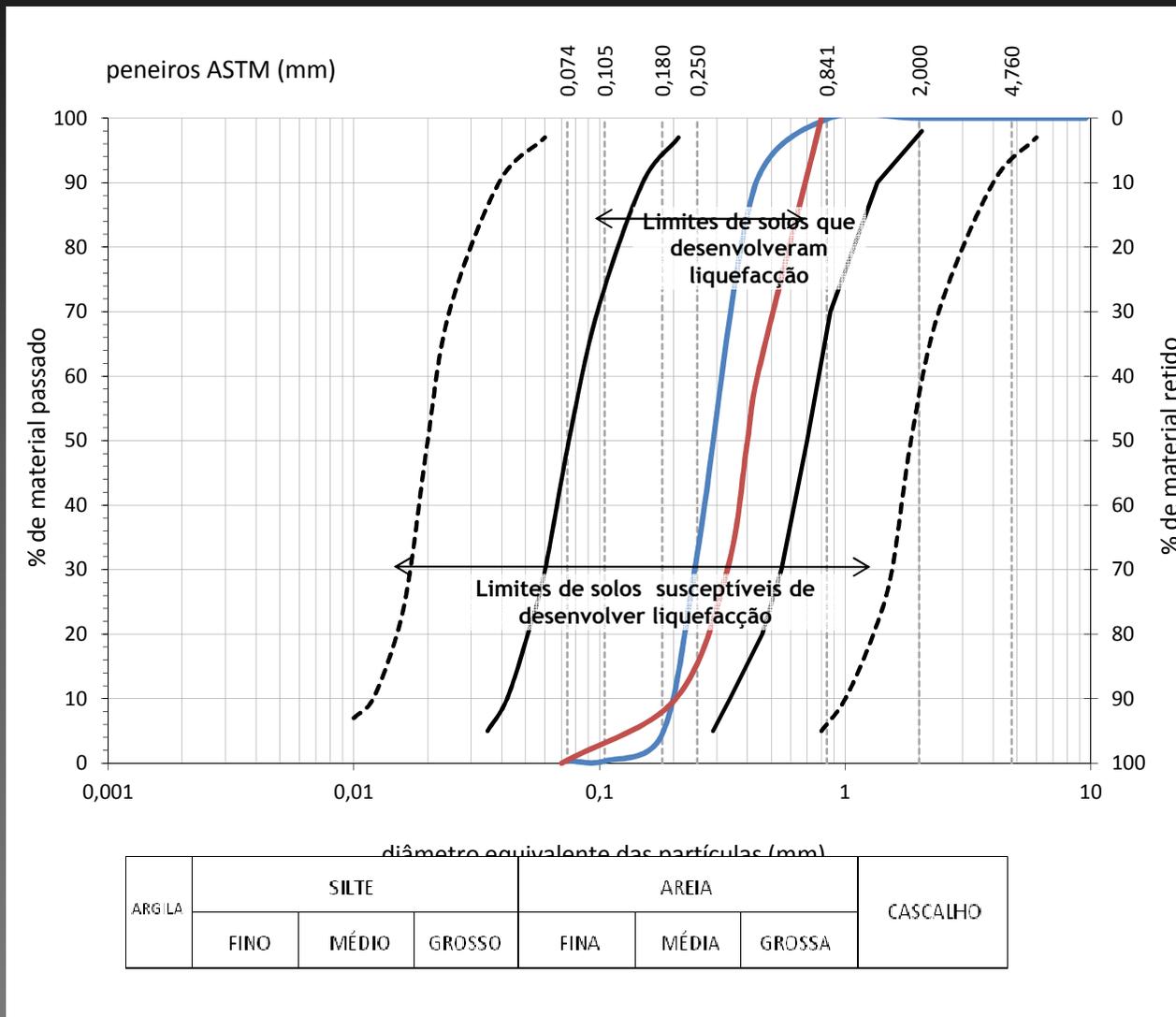
*LabGeo – FEUP*

$$C_C = 1,01$$

$$C_U = 1,55$$

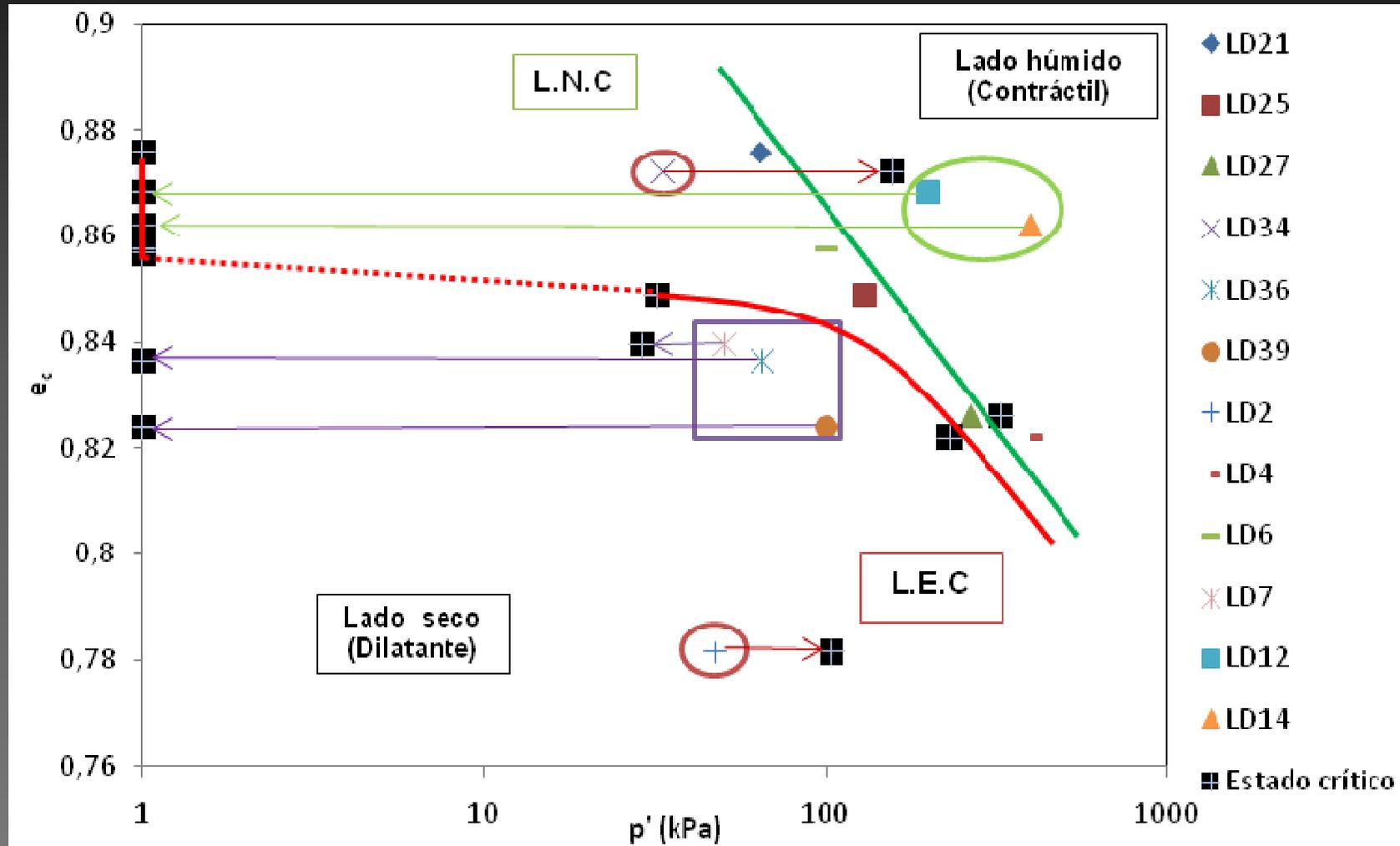
Curvas granulométricas da areia em estudo

# CRITÉRIO DA COMPOSIÇÃO DO MATERIAL

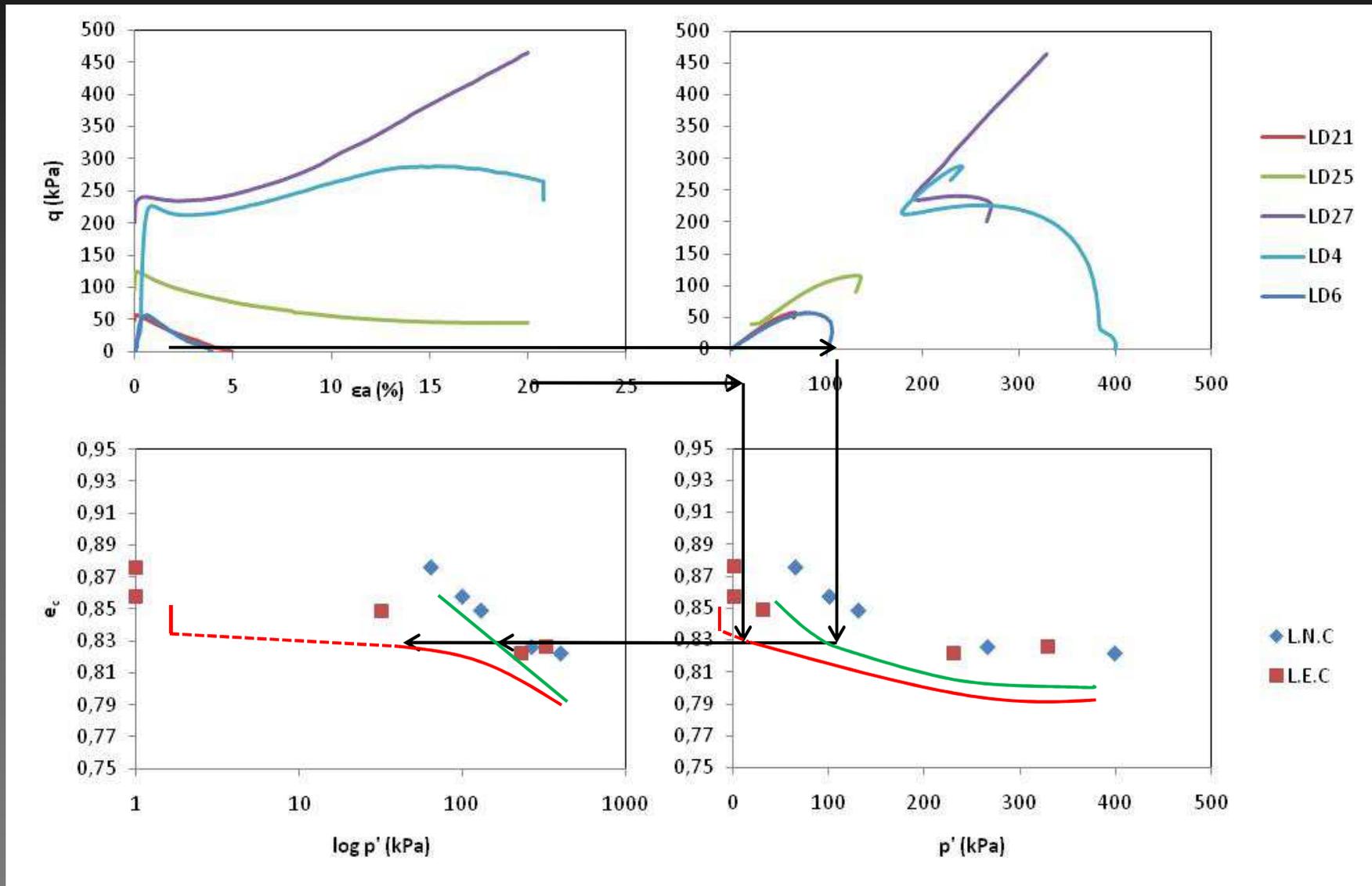


Faixas limite de distribuição granulométricas propostas por Tsuchida (1970)

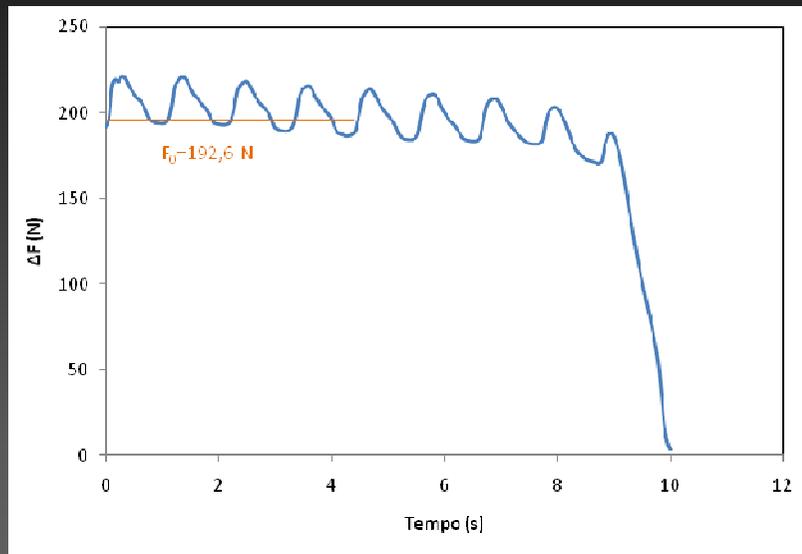
# TEORIA DOS ESTADOS CRÍTICOS



# TEORIA DOS ESTADOS CRÍTICOS

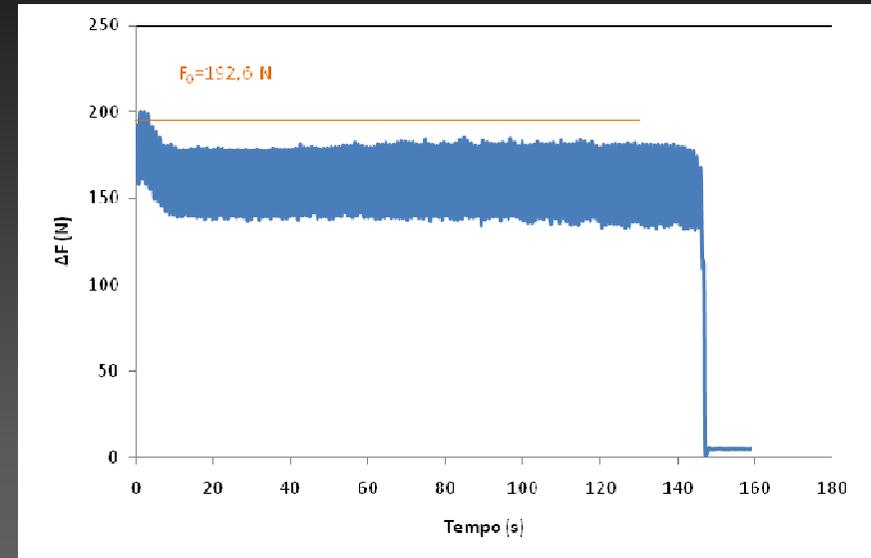


# AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO NOS ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS



Solicitação sísmica centrada

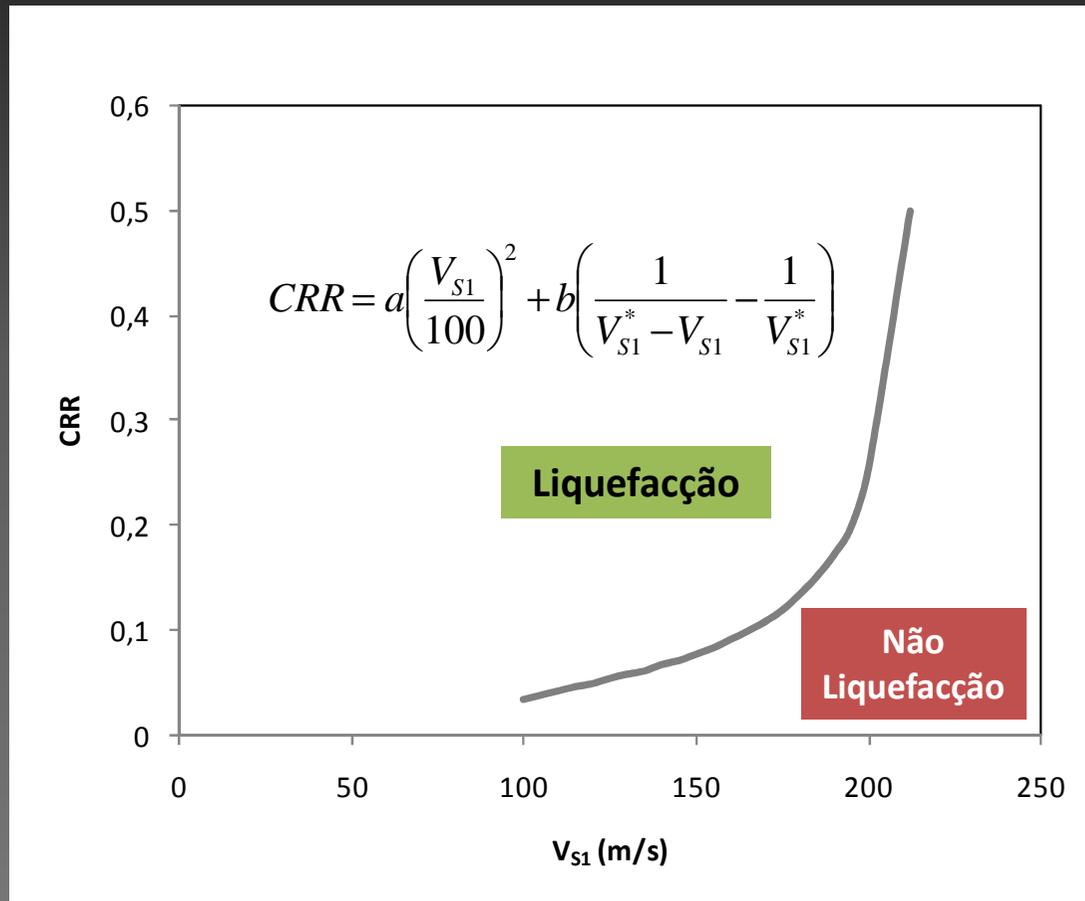
Ensaio	$\sigma'_{h0}$
LDC24	50
LDC26	50
LDC28	100
LDC30	200



Solicitação sísmica não centrada

Ensaio	$\sigma'_{h0}$
LDC31	50
LDC32	100
LDC33	25
LDC37	200

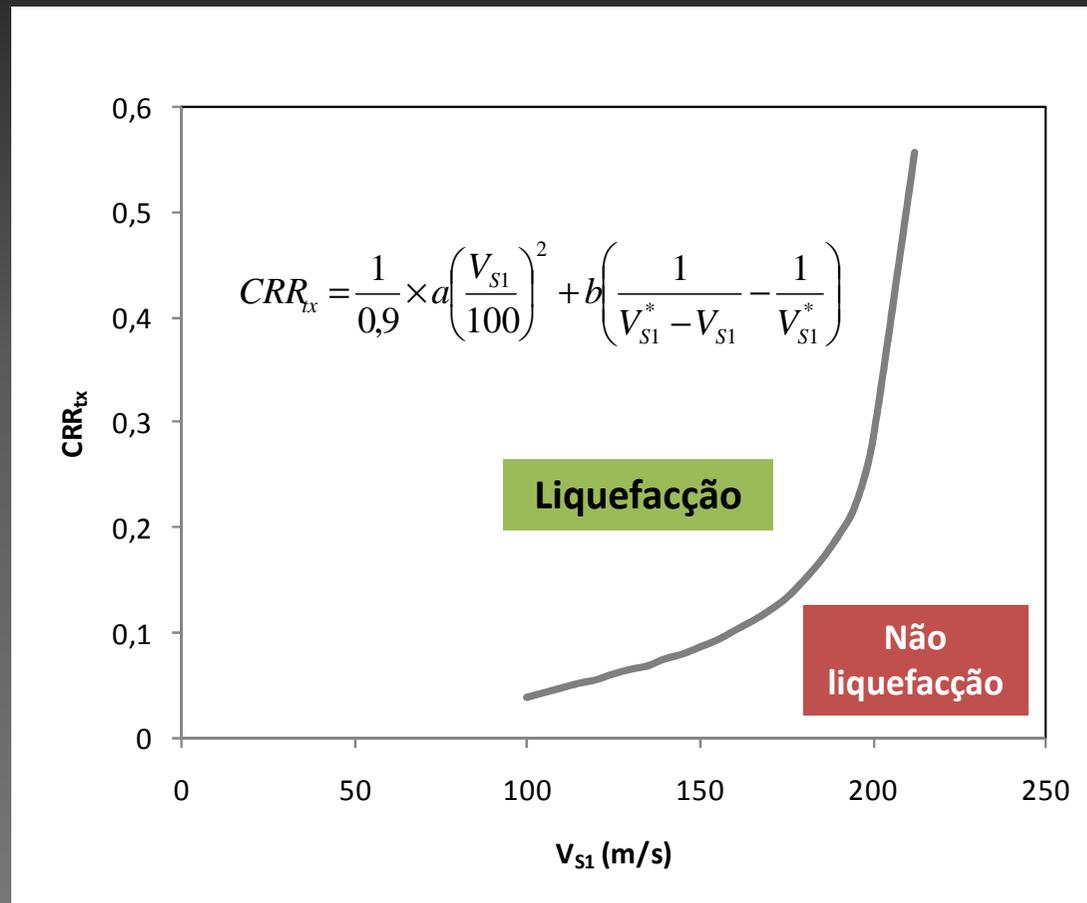
# AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO NOS ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS



Andrus e Stokoe (2000)

- Definida para condições in situ
- 26 sismos
- Mais de 70 locais de medição

# AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO NOS ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS



Seed et al. (1975)

$$CSR_{in\ situ} = 0,9 \times CSR_{tx}$$

# AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO NOS ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS

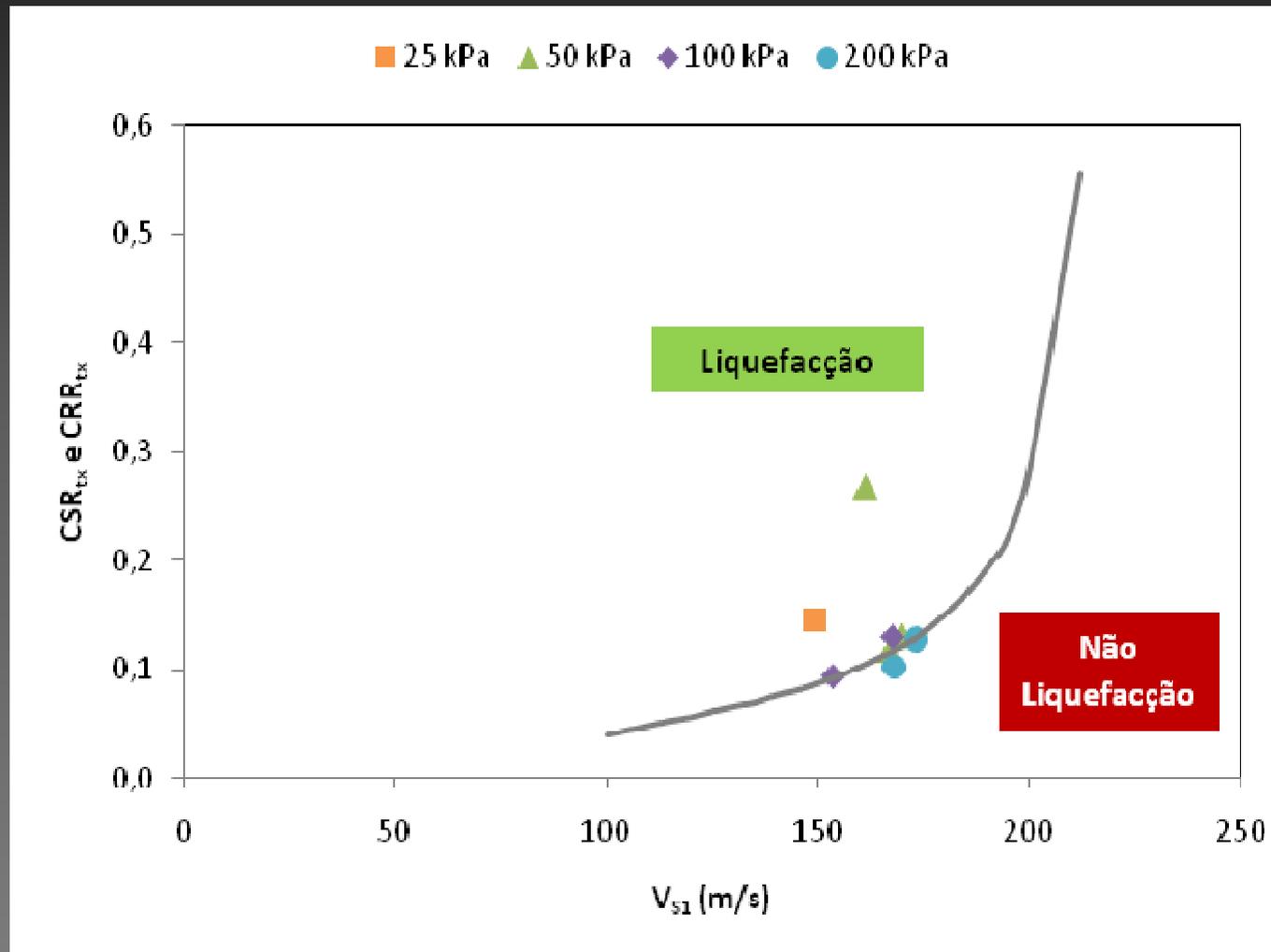
	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma'_{h0}$ (kPa)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$p' = \sigma'_m$ (kPa)	$CSR_{tx}$	$V_S$ (m/s)	$K_0$	$V_{S1}$ (m/s)
LDC24	36	50	99	66	0,2680	161,11	0,51	161,47
LDC26	15	48	98	65	0,1175	166,16	0,49	167,05
LDC28	25	99	199	132	0,0940	182,53	0,50	153,70
LDC30	54	199	398	265	0,1022	244,81	0,50	173,37
LDC31	16	50	99	63	0,1285	165,99	0,55	169,91
LDC32	33	99	198	127	0,1301	194,68	0,54	167,66
LDC33	8	22	47	29	0,1455	120,76	0,52	149,27
LDC37	65	199	406	257	0,1267	233,62	0,53	168,01

$$CSR_{tx} = \frac{\sigma_d}{2 \times \sigma'_m}$$

$$\sigma'_m = p' = \frac{(\sigma'_{v0} - \sigma_d/2) + 2 \times \sigma'_{h0}}{3}$$

$$V_{S1} = V_S \times \left( \frac{1 + 2K_0}{3} \right)^{0,25} \times \left( \frac{P_a}{\sigma'_m} \right)^{0,25}$$

# AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO NOS ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS

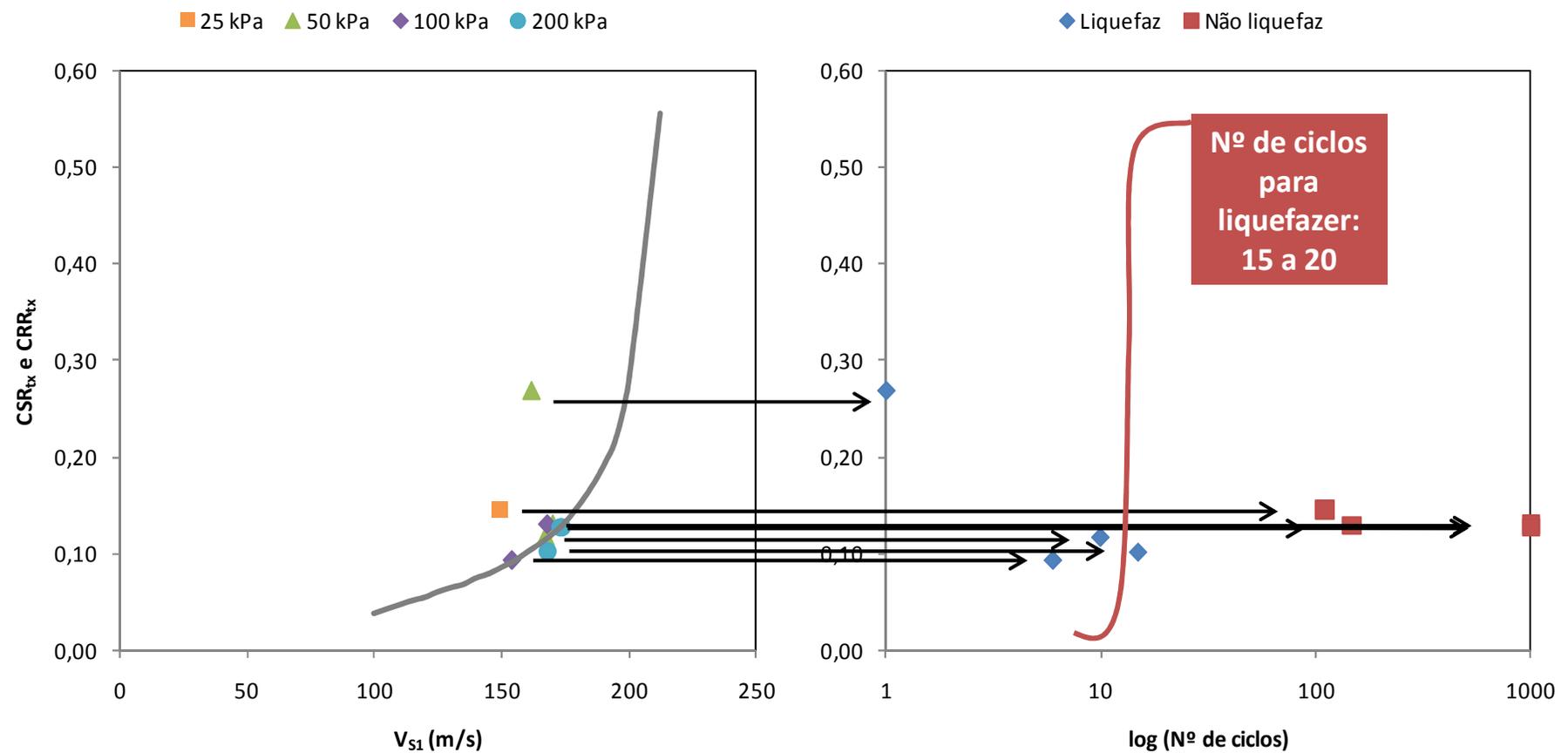


$$F.S = \frac{CRR_{tx}}{CSR_{tx}}$$

# AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO NOS ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS

Ensaio	$V_{S1}$ (m/s)	Nº de ciclos	$CSR_{tx}$
LDC24	161,47	1	0,2680
LDC26	167,05	10	0,1175
LDC28	153,70	6	0,0940
LDC30	173,37	15	0,1022
LDC31	169,91	147	0,1285
LDC32	167,67	$\infty$	0,1301
LDC33	149,37	110	0,1455
LDC37	168,05	$\infty$	0,1267

# AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO NOS ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS



# NOTAS SOBRE OS ESTUDOS CÍCLICOS

- ❑ A areia são sensíveis, tanto quanto uniforme e quanto têm grãos relativamente arredondados
- ❑ Cumpre um dos critérios físicos que baseia a avaliação da susceptibilidade à liquefacção
- ❑ A partir da definição da linha normalmente consolidada e a linha dos estados críticos é possível avaliar o comportamento do solo em estudo
- ❑ A relação de Andrus e Stokoe (2000) que relaciona a acção sísmica e a velocidade das ondas S normalizada não é suficiente para avaliar a susceptibilidade à liquefacção em ensaios triaxiais cíclicos
- ❑ É preciso ter em conta o número de ciclos que a amostra sofre até liquefazer

# **LIQUEFACÇÃO MONOTÓNICA E/OU CÍCLICA AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO (TRIAXIAL) E IN SITU (SPT, CPT, DMT, Vs-CH)**

**Definição de susceptibilidade**

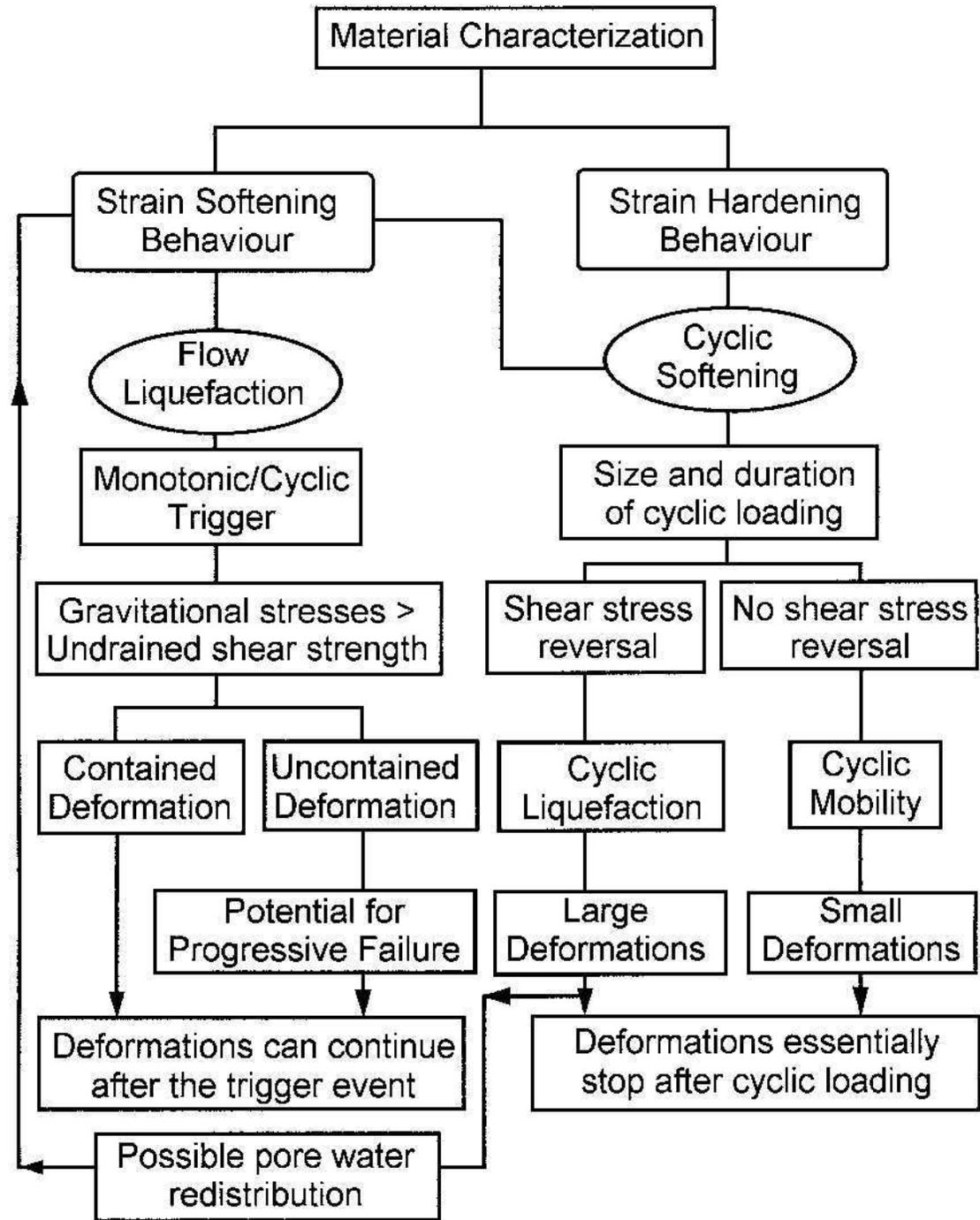
**(tipo de solo, compacidade e tensor de tensões)**

**ESTIMATIVA DA ACÇÃO: RAZÃO DE TENSÃO CÍCLICA**

A SEQUÊNCIA do processo de avaliação de RISCO é:

1. Avaliação da susceptibilidade de liquefação cíclica;
2. Avaliação “dísparo” (despoletação) daquela;
3. Avaliação das deformações pós-sismo.

**FLUXOGRAMA  
PARA AVALIAÇÃO  
DE LIQUEFACÇÃO  
EM SOLOS  
(ROBERSTSON  
AND WRIDE, 1998)**

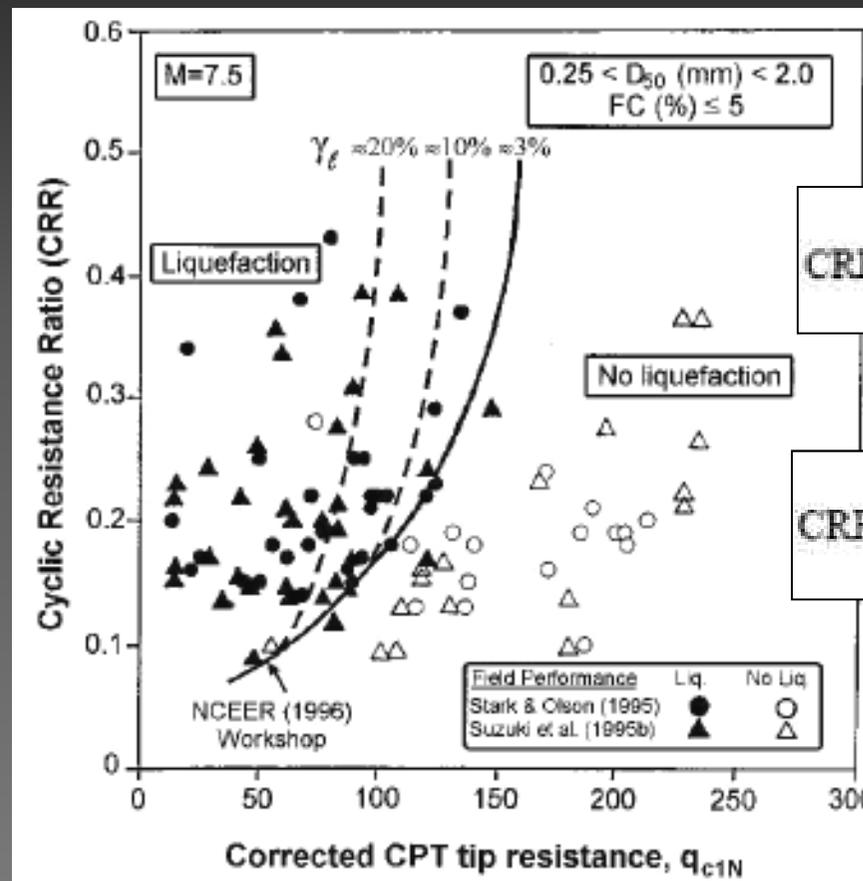


# AVALIAÇÃO DO “DESENCADEAMENTO EMINENTE” DA LIQUEFAÇÃO CÍCLICA EM MATERIAIS ARENOSOS OU ARENO-SILTOSOS (POUCO FINOS, CS)

Razão de resistência cíclica (CRR) a partir do CPT em areias limpas ou com muito poucos finos (Robertson & Wride, 1998)

Válidas para:

- Areias Holocénicas, limpas (cs)
- depósitos horizontais ou taludes suaves
- Magnitude de sismos:  $M = 7.5$
- Profundidades de 1 a 15 m (85%, prof.s <10m)
- registos para CPTs em zonas que liquefizeram.



Se  $50 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 160$

$$CRR_{7.5} = 0.833 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.05$$

$$CRR_{7.5} = 93 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08$$

# LIQUEFAÇÃO CÍCLICA EM MATERIAIS ARENOSOS COM FINOS

Robertson & Wride (1998) sugerem que se estime uma resistência à penetração equivalente para areias limpas (“cs”) de,  $(q_{c1N})_{cs}$

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c (q_{c1N})$$

em que  $K_c$  é um factor correctivo que é função das características granulométrica (finos) e plasticidade, sugerindo-se o recurso ao índice:

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5}$$

Com

$$Q = \left( \frac{q_t - \sigma_{v0}}{P_{a2}} \right) \left( \frac{P_{a2}}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

Em que:

$n$  = expoente de tensão (este valor pode ser tomado, por facilidade, 0,5 para areias e 1,0 para argilas...) \*;

$F = f_s / [(q_c - \sigma_{v0})] \times 100\%$  razão de fricção normalizada (em %);

$f_s$  = resist. unitária lateral do CPT;

$\sigma_{v0}$  e  $\sigma'_{v0}$  são as tensões total e efectiva de repouso;

$P_a$  = pressão de referência nas mesmas unidades de  $\sigma'_{v0}$  ( $P_a = 100$  kPa,  $\sigma'_{v0}$  em kPa);

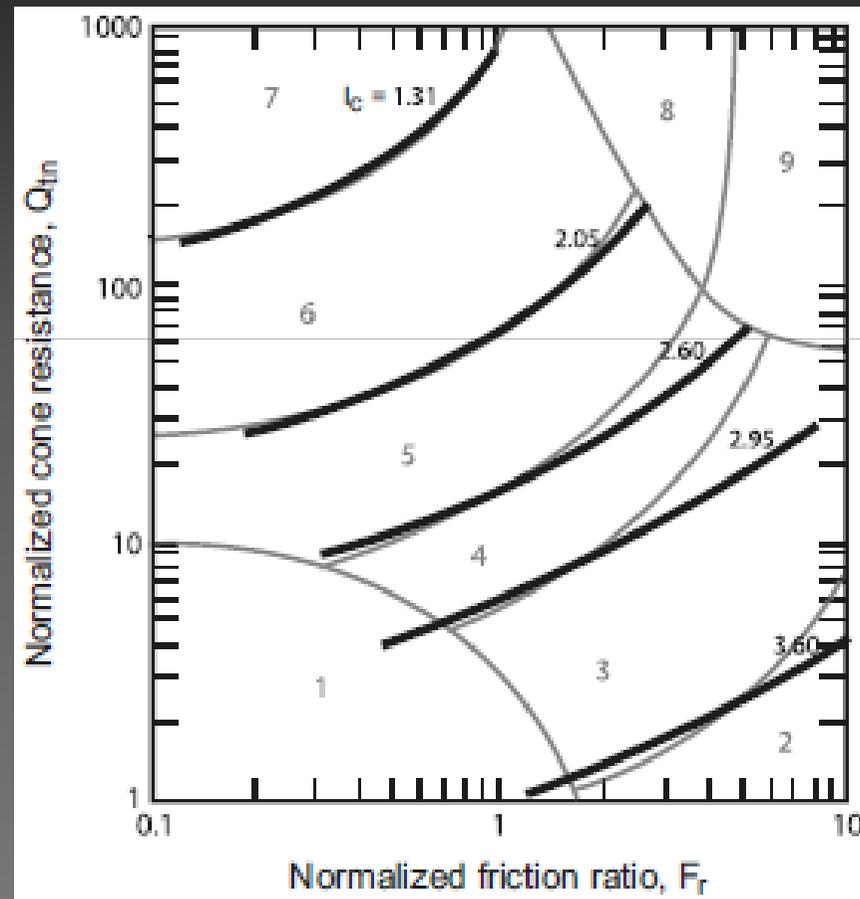
$P_{a2}$  = pressão de referência nas mesmas unidades de  $\sigma_{v0}$  ( $P_{a2} = 0.1$  MPa,  $q_c$  e  $\sigma_{v0}$ , MPa).

\* Em rigor este valor segue um processo iterativo e pode ser estimado por:

$$n = 0,381(I_c) + 0,05 (\sigma'_{v0}/p_a) - 0,15$$

# LIQUEFAÇÃO CÍCLICA EM MATERIAIS ARENOSOS COM FINOS

Na Figura seguinte apresentam-se os limites (contornos) das zonas “típicas” de comportamento geomecânico, ou seja, “grandes zonas de comportamentos afins”.



$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5}$$

# LIQUEFAÇÃO CÍCLICA EM MATERIAIS ARENOSOS COM FINOS

A recomendação para relacionar  $I_c$  e  $K_c$ :

$$K_c = 1.0, I_c \leq 1.64$$

$$K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88, I_c > 1.64$$

O que é um muito bom princípio de parametrização, pois integra factores como “plasticidade, conteúdo de finos, mineralogia, *sensibilidade, idade geológica e história de tensões (OCR)*”

*Flow chart - cyclic resistance ratio a partir do CPT (Robertson & Wride, 1998)*

$q_c$ : Resistência de ponta,  $f_s$ : resistência lateral  
 $\sigma_{vo}$ ,  $\sigma'_{vo}$ : tensão vertical total e efectiva in-situ  
 Unid.s: em kPa

expoente de tensão inicial:  $n = 1.0$  e calcular  $Q$ ,  $F$ , and  $I_c$   
 se  $I_c \leq 1.64$ ,  $n = 0.5$   
 se  $1.64 < I_c < 3.30$ ,  $n = (I_c - 1.64) * 0.3 + 0.5$   
 se  $I_c \geq 3.30$ ,  $n = 1.0$   
 Calcular  $n$  iterativamente até,  $\Delta n < 0.01$   
 se  $\sigma'_{vo} > 300$  kPa, então  $n = 1.0$  para todos solos

continua...

O factor de seg. em relação à liquefação:

$$\frac{CSR}{CRR_{7.5}} MSF$$

Com

$$MSF = \frac{174}{M^{2.56}}$$

# LIQUEFAÇÃO CÍCLICA EM MATERIAIS ARENOSOS COM FINOS

A recomendação para relacionar  $I_c$  e  $K_c$ :

$$K_c = 1.0, I_c \leq 1.64$$

$$K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88, I_c > 1.64$$

O que é um muito bom princípio de parametrização, pois integra factores como “plasticidade, conteúdo de finos, mineralogia, sensibilidade, idade geológica e história de tensões (OCR)

*Flow chart*



*cyclic resistance ratio a partir do CPT (Robertson & Wride, 1998)*

O factor de seg. em relação à liquefação:

$$\frac{CSR}{CRR_{7.5}} MSF$$

Com

$$MSF = \frac{174}{M^{2.56}}$$

$q_c$ : Resistência de ponta,  $f_s$ : resistência lateral  
 $\sigma_{vo}$ ,  $\sigma_{vo}'$ : tensão vertical total e efectiva in-situ  
Unid.s: em kPa

expoente de tensão inicial:  $n = 1.0$  e calcular  $Q$ ,  $F$ , and  $I_c$   
se  $I_c \leq 1.64$ ,  $n = 0.5$   
se  $1.64 < I_c < 3.30$ ,  $n = (I_c - 1.64) \cdot 0.3 + 0.5$   
se  $I_c \geq 3.30$ ,  $n = 1.0$   
Calcular  $n$  iterativamente até,  $\Delta n < 0.01$   
se  $\sigma_{vo}' > 300$  kPa, então  $n = 1.0$  para todos solos

$$C_n = \left( \frac{100}{\sigma_{vo}'} \right)^n$$

$$Q = \frac{(q_c - \sigma_{vo})}{100} \cdot C_n, \quad F = \frac{f_s}{(q_c - \sigma_{vo})} \cdot 100$$
$$I_c = \sqrt{[(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]}$$

*Robertson and Wride (1998)*

se  $I_c \leq 1.64$ ,  $K_c = 1.0$   
 se  $1.64 < I_c < 2.60$ ,  $K_c = -0.403I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88$   
 se  $I_c \geq 2.60$ , avaliar com outro critério; provavelm/não liquefiável if  $F > 1\%$   
MAS, se  $1.64 < I_c < 2.36$  e  $F < 0.5\%$ , tomar  $K_c = 1.0$

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c \cdot Q$$

$$CRR_{7.5} = 93 \cdot \left( \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right)^3 + 0.08, \text{ if } 50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160$$

$$CRR_{7.5} = 0.833 \cdot \left( \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right) + 0.05, \text{ if } (q_{c1N})_{cs} < 50$$

se  $I_c \geq 2.60$ , avaliar com outro critério; provavelm/não liquefiável if  $F > 1\%$

# MATERIAIS ARGILOSOS

Os solos finos, com argila, de natureza coesiva, desenvolvem baixos excessos de pressões neutras se sujeitos as cargas cíclicas não drenadas, particularmente quando comparados com as areias. ASSIM, nos solos argilosos NÃO se anulam as tensões efectivas – logo não há liquefação cíclica, com grandes deformações de “colapso” ...

**CONTUDO, quando o *Cyclic Stress Ratio (CSR)* é grande em relação ao ratio da desistência não drenada em argilas, podem ocorrer grandes deformações (“CYCLIC FAILURE”).**

Para Boulanger e Idriss (2004), a *Cyclic Resistance Ratio (CRR)* para solos argilos é controlada pela RESISTÊNCIA NÃO-DRENADA e, por sua vez, pelo OCR!

Recomendaram as seguintes expressões para  $CRR_{M=7,5}$  (sismo de magn. de 7,5) em depósitos naturais de argilas:

$$CRR_{M=7,5} = 0.8 (s_u/\sigma'_{vc}) K_\alpha$$

e

$$CRR_{M=7,5} = 0.18 (OCR) 0.8 K_\alpha$$

Em que:

- $s_u/\sigma'_{vc}$  é o ratio da resistência não-drenada para a direcção apropriada de carregamento,
- $K_\alpha$  é o factor de correcção parater em conta a tensão de corte estática. Para estruturas bem dimensionadas, onde o o factorr de segurança para gcarregamentos estáticos é grande,  $K_\alpha$  é geralmente próximo de 0,9.

# MATERIAIS ARGILOSOS

**Em carregamentos sísmicos, onde  $CSR < 0,6$ , a rotura cíclica só se pode dar para solos normalmente consolidados ou para ligeiramente sobreconsolidados ( $OCR < 4$ ).**

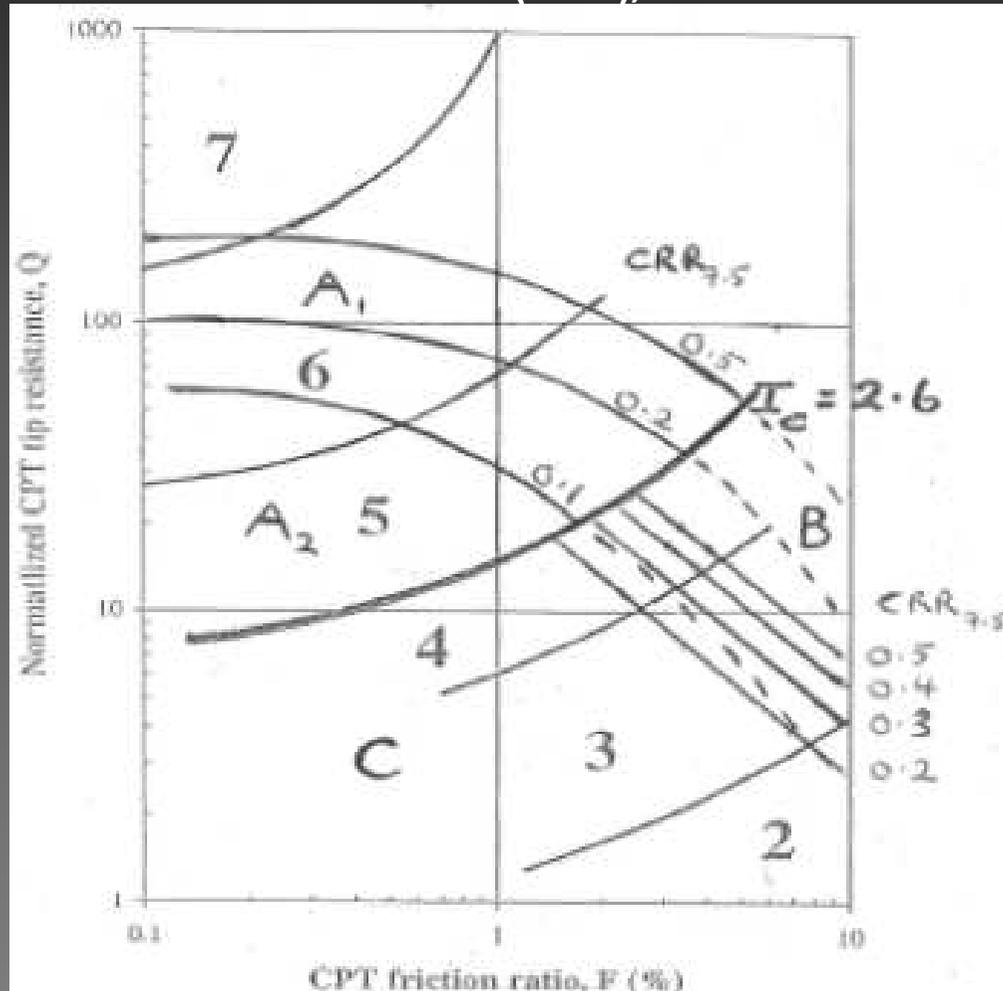
A determinação de CRR pode seguir uma das vias:

- utilização de métodos empíricos;
- Medir  $s_u$  usando ensaios in-situ;
- Medir CRR em amostras de grande qualidade com ensaios triaxiais cíclicos.

# MATERIAIS ARGILOSOS

O ensaio CPT, porém, pode ser usado e tem a vantagem de dar um bom perfil das características (OCR e, portanto, CRR) em profundidade. Na figura apresentam-se contornos de  $CRR_{M=7.5}$  (para  $K_\alpha = 1.0$ ), na região das argilas:

Robertson & Wride (R&W), 1998



Zone A1:

Liquefação cíclica provável dependendo do tamanho e duração da carga cíclica

Zone A2:

Liquefação cíclica e perda de resistência prováveis dependendo do carregamento e da geometria do terreno

Zone B:

Liquefação cíclica e perda de resistência pós-sismo improváveis, verificar rotura cíclica

Zone C:

Liquefação cíclica e perda de resistência possível dependendo da plasticidade do solo, fragilidade/sensibilidade, deformação até ao pico da resistência não drenada e geometria do terreno

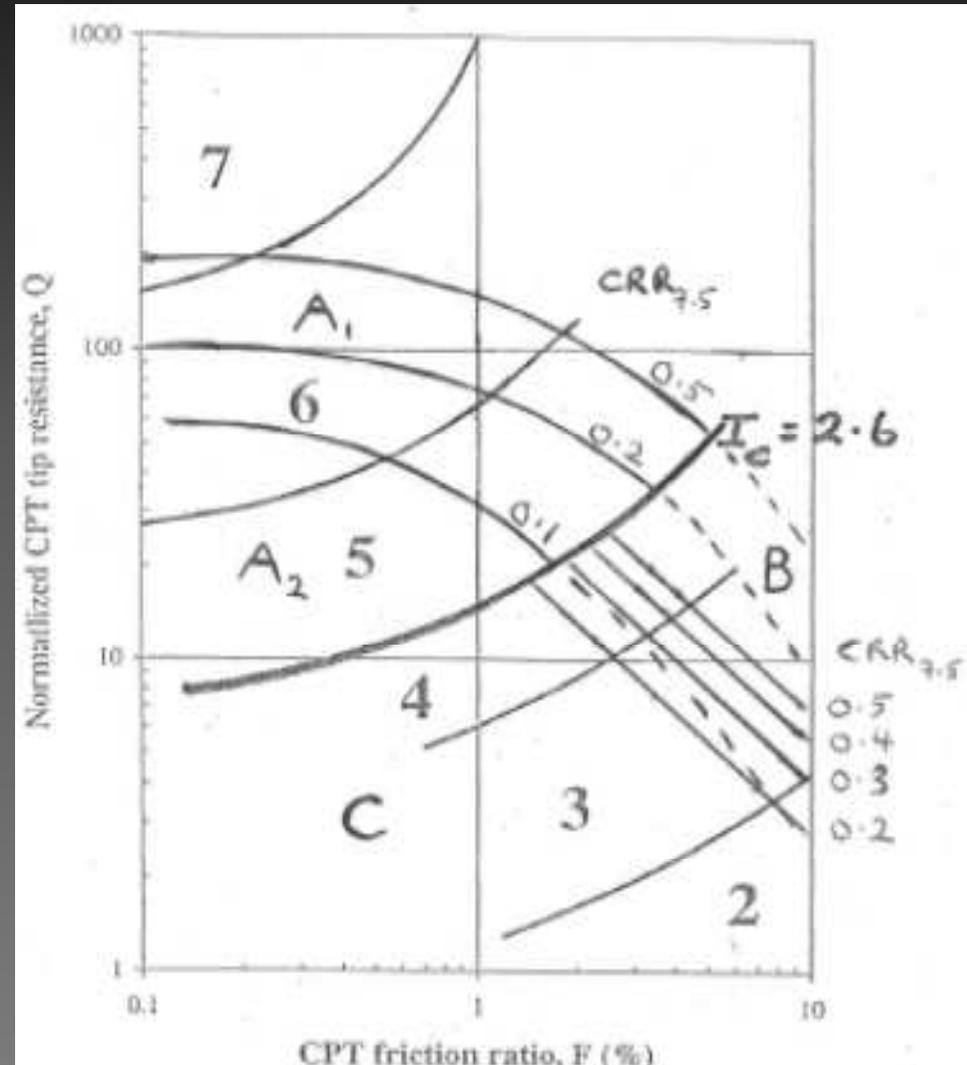
# MATERIAIS ARGILOSOS

Na figura apresenta-se os limites, para  $CRR_{M=7,5}$  na região de solos arenosos. Se este mesmo método é usado na região de solos argilosos (em que  $I_c > 2,6$ ) os valores estimados de  $CRR_{M=7,5}$  são muito conservativos (menores do que o derivado do  $OCR$  em argilas !...).

Para projectos de baixo risco, o  $CRR_{M=7,5}$  para avaliação de rotura cíclica em solos argilosos pode ser estimado a partir do  $CPT$  (ver figura).

Para projectos de risco médio, devem também ser realizados ensaios de corte relativo ( $FVT$ ) para deter correlações específicas com o  $CPT$ .

Para projectos de alto risco, deverão ser ensaiadas amostras indeformadas de alta qualidade retiradas em locais bem identificados pelos logs do  $CPT$ .



Mét. Robertson & Wride (R&W), 1998

# ***AVALIAÇÃO DE DEFORMAÇÕES PÓS-SISMOS (ASSENTAMENTOS VERTICAIS)***

Para projectos de baixo a médio risco e para estimativa preliminar em projectos de alto risco, os assentamentos pós-sismo podem ser estimados usando métodos empíricos de avaliação de deformações volumétricas (ex: Zhang et al., 2002).

*Zhang, G., Robertson, P.K., Brachman, R., 2002,  
Estimating Liquefaction Induced Ground Settlements from the CPT,  
Canadian Geotechnical Journal, 39: pp1168-1180*

O método de Zhang et al. (2002) baseia-se nos resultados do CPT e fornece um perfil vertical das deformações volumétricas em profundidade e acompanhando o registo do CPT.

Este método é geralmente conservativo porque toma os valores mínimos do CPT em zonas de transição e fronteira, que não representem o valor médio dos assentamentos.

É preciso, portanto, algum “juízo de engenheiro”...

Em projectos de grande risco, aconselha-se o estudo da colapsibilidade volumétrica em estudos e amostras indeformadas.

## AS CARGAS DINÂMICAS OU TRANSITÓRIAS INDUTORAS DE DEFORMAÇÕES

As cargas dinâmicas transitórias induzem rearranjos interparticulares e inerentes assentamentos, que podem ser substanciais em alguns solos, como os incoerentes.

A maior parte das cargas deste tipo são causadas por tráfego em pavimentos.

As forças dinâmicas de uma roda ou cilindro em trânsito sobre um pavimento conduzem a combinações de deformações distorcionais e de compressão volumétrica, cuja consequência é tratada de forma semi-empírica, como as soluções que se discutem agora.

## **A. GRANDEZA DO ASSENTAMENTO**

A grandeza do assentamento depende da compacidade inicial do solo, da espessura do estrato compressível e da deformação distorcional máxima induzida ao solo. Nos solos não coesivos com índices de compacidade ( $I_D$ ) superiores a 75% não são de esperar assentamentos significativos, embora cargas dinâmicas muito intensas possam mesmo em solos muito densos induzir assentamentos de 1 a 2% da espessura do estrato.

## **B. CAUSAS DE ASSENTAMENTOS DIFERENCIAIS**

A causa principal de assentamentos diferenciais significativos resulta de compactação de areias soltas devido a cargas dinâmicas. Em algumas circunstâncias também cargas de maquinaria pode resultar em assentamentos significativos.

## **C. PREVISÃO DE CÁLCULO DE ASSENTAMENTOS DEVIDOS A CARGAS DINÂMICAS**

Os erros associados às metodologias de estimativa de assentamentos são elevados (podem atingir 50% ou mais). Assim, estas aproximações de 1ª ordem devem ser calibradas com experiência comparável.

## **D. MINIMIZAÇÃO DOS ASSENTAMENTOS**

São clássicos os métodos de minimização dos assentamentos de areias em solos granulares soltos susceptíveis de sofrer grandes assentamentos, através da sua prévia densificação: vibro-compactação, compactação dinâmica, etc..

## ***Assentamentos devidos a sismos***

Os sismos induzem aos maciços primordialmente tensões distorcionais, deformações distorcionais, fruto dos movimentos de ondas de corte que se propagam desde a crosta à superfície do terreno.

Estes movimentos induzem inicialmente assentamentos em camadas e sequencialmente nas mais superficiais. Por serem assentamentos aleatoriamente distribuídos são indutores de fortes assentamentos diferenciais em estruturas com evidentes danos.

Estes movimentos desenvolvem-se tanto em solos secos como saturados, aqui podendo advir situações muito danosas como o da liquefação.

## ***Assentamentos devidos a sismos***

Os movimentos do maciço sujeito às ondas sísmicas são multidireccionais, no entanto, as medições são geralmente feitas num sistema de eixos ortogonais, com 2 eixos horizontais e um vertical.

A componente vertical destes movimentos é geralmente menos significativa – em geral responsável por menos do que 25% do assentamento – embora possa ser atendida.

São clássicos os métodos de minimização dos assentamentos de areias em solos granulares soltos susceptíveis de sofrer grandes assentamentos, através da sua prévia densificação: vibro-compactação, compactação dinâmica, etc..

# *Assentamentos devidos a sismos*

## **A. PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS**

Esta metodologia é aplicável a areias secas ou a areias saturadas em início de liquefacção e usa os dados de ensaios SPT em profundidade, as tensões geostáticas efectiva e total e uma estimativa da aceleração horizontal máxima da superfície do maciço a partir de registos sísmicos locais.

# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

adapt. da ASCE (1994): TECH. ENG. DESIGN GUIDES – US ARMY CORPS ENG., N.º9

## 1. Areias saturadas que iniciam o processo de liquefacção

1º) Regista os valores de NSPT, discretizando o maciço em sub-camadas com valores homogéneos de NSPT.

2º) Normaliza os registos para o  $N_{60}$ .

3º) Estima os valores das tensões geostáticas (verticais, resultantes dos pesos volúmicos e espessuras das camadas superiores) em tensões totais  $(\sigma_0 = \sigma_{v0})$  e efectivas  $(\sigma'_0 = \sigma'_{v0})$ .

# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 1. Areias saturadas que iniciam o processo de liquefacção

4º) Avaliar o índice de compacidade a partir das propostas reconhecidas da bibliografia. O documento da ASCE sugere o uso do ábaco de Gibbs e Holtz (Figura 17 – em tsf e ft) que se formaliza pela expressão para solos sobreconsolidados:

$$I_D = D_r = 21 \cdot \frac{N_j}{\sigma'_0 + 0,7}$$

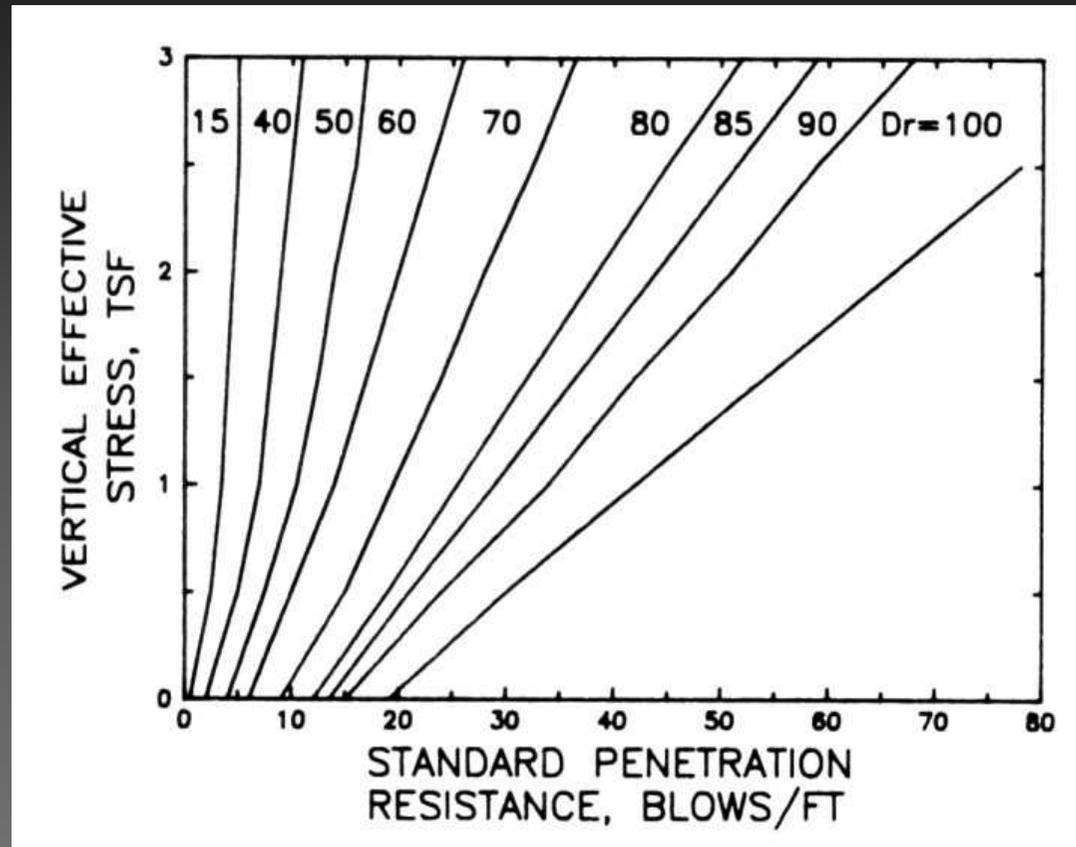
Sendo  $N_j = N_{72}$  (Japão) e  $\sigma'_0$  a tensão efectiva. Para  $D_r(I_D)$  em solos normalmente consolidados, recorre-se a:

$$D_r(=I_D) = 11,7 + 0,75 \cdot \left[ 222N + 1600 - 736\sigma'_0 - 50c_u^2 \right]^{1/2}$$

com  $\sigma'_0$  em tsf;  $c_u = D_{60} / D_{10}$  - coeficiente de uniformidade

# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 1. Areias saturadas que iniciam o processo de liquefacção



Correlações entre a compacidade relativa e o n<sup>o</sup> de pancadas no ensaio SPT  
(Gibbs e Holtz)

# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 1. Areias saturadas que iniciam o processo de liquefacção

5º) Determina-se o factor  $C_n$  correctivo para avaliação do parâmetro

$$(N_1)_{60} = c_n \cdot N_{60}$$

6º) Calcula-se a razão de tensão distorcional cíclica que causa o início da liquefacção para um sismo de magnitude  $n$ :

$$\left( \frac{\tau_{av}}{\sigma'_0} \right)_n = 0,65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma'_0} \cdot r_d$$

sendo  $\tau_{av}$  = tensão de corte cíclica média induzida por esse sismo;  $\sigma'_0$  e  $\sigma_0$  = tensões geostáticas;  $a_{max}$  = máxima aceleração horizontal da superfície;  $g$  = aceleração de gravidade;  $r_d$  = factor de redução (Liao e Whitmann, 1986):

$$r_d = \begin{cases} 1.0 - 0.00765 z & z < 9.15 \text{ m} \\ 1.174 - 0.0267 z & 9.15 \text{ m} < z < 23.0 \text{ m} \\ 0.744 - 0.008 z & 23.0 \text{ m} < z < 30 \text{ m} \\ 0.5 & z > 30 \text{ m} \end{cases}$$

# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 1. Areias saturadas que iniciam o processo de liquefacção

7º) Converter  $\tau$  ou  $(\sigma'_0)$  para um sismo equivalente de magnitude  $n = 7,5$ :

$$\left[ \begin{array}{c} \tau_{av} \\ \sigma'_0 \end{array} \right]_{7,5} = \left[ \begin{array}{c} \tau_{av} \\ \sigma'_0 \end{array} \right]_n \cdot r_m$$

sendo  $r_m$  dado pelos valores que se esquematizam a seguir:

Magnitude do sismo $n$	Número de ciclos representativos para $0,65 \tau_{\max}$ (*)	$r_m$
8,5	26	0,89
7,5	15	1,00
6,75	10	1,13
6,00	5	1,32
5,27	2-3	1,50

(\*) número de ciclos correspondente, para  $\tau_{\max}$ , do presente sismo

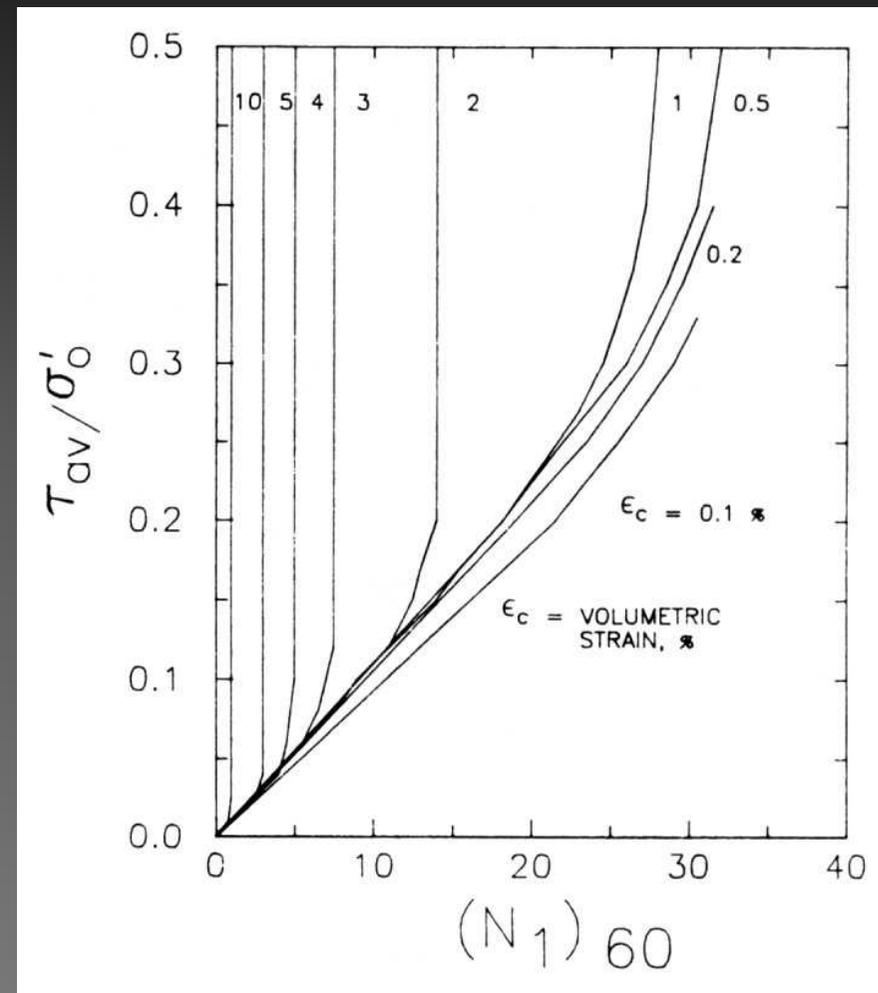
# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 1. Areias saturadas que iniciam o processo de liquefação

8º) Calcular as deformações

volumétricas  $(\epsilon_c)$  em percentagem após a liquefação a partir da figura, usando valores calculados de  $(N_1)_{60}$  e de  $(\tau_{av}/\sigma'_{v0})_{7,5}$

Relação proposta entre o ratio de tensão cíclica  $\tau_{av}/\sigma'_{v0}$ , o valor de  $(N_1)_{60}$  e a deformação volumétrica em areias limpas saturadas, para sismos de  $M = 7,5$



# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 1. Areias saturadas que iniciam o processo de liquefacção

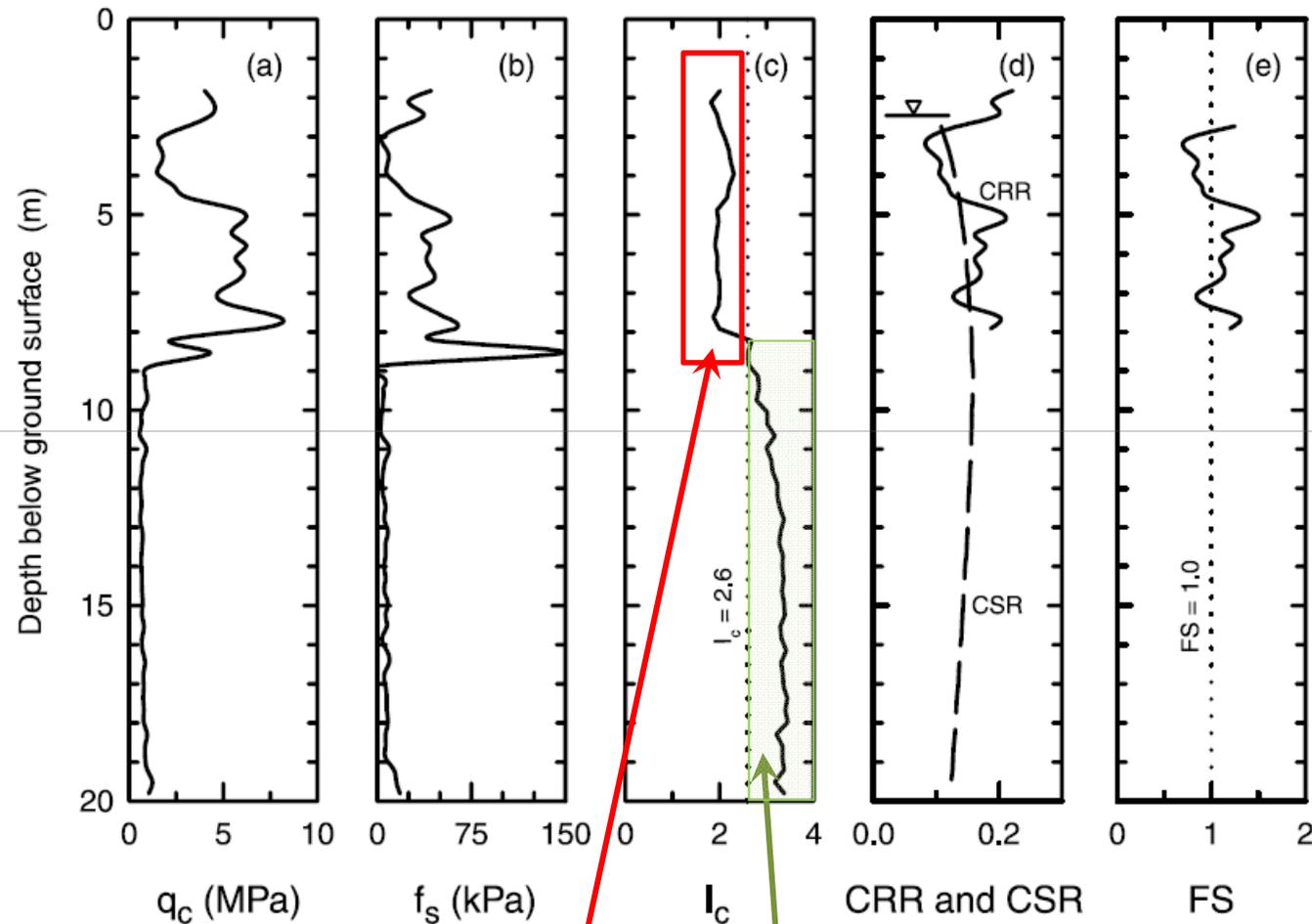
9º) Calcular o assentamento induzido pelo sismo a partir da expressão:

$$s_e = \sum_{j=1}^n \frac{\varepsilon_{cj}}{100} \cdot h_j$$

em que  $h_j$  = espessura de cada subcamada considerada em (1º).

# Exemplo de aplicação do mét. Robertson & Wride

**Fig. 4.** Example plots illustrating the major procedures in performing liquefaction potential analysis using Robertson and Wride's (1998) CPT-based method.



$I_c < 2.6$ : zona LIQUEFIÁVEL (ARENOSA)     $I_c > 2.6$ : zona NÃO liquefiável (argilosa)

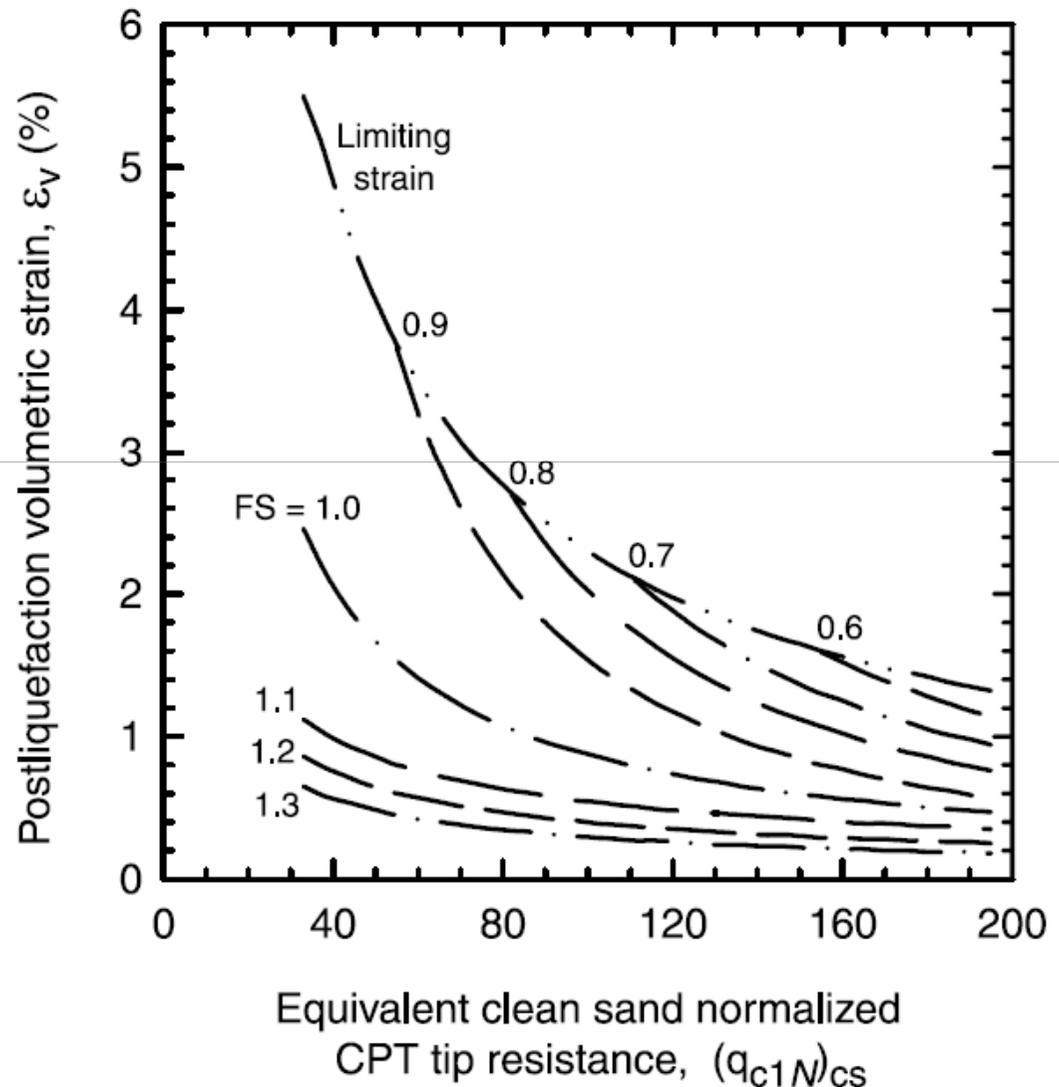
# Ábaco simplificado de avalição de assentamento pós- liquefacção

Sendo calculado o coeficiente de segurança em relação à liquefacção, recorre-se ao valor da resistência de ponta normalizada do CPT  $(q_{c1N})_{CS}$  e calcula-se FS para calcular a deformação volumétrica para cada camada  $\epsilon_{vi}$ , e obter a compressão de cada camada pela expressão:

$$S = \sum_{i=1}^n (\epsilon_v)_i \Delta z_i$$

Zhang, Robertson & Brachman (2002)

Fig. 3. Relationship between postliquefaction volumetric strain and equivalent clean sand normalized CPT tip resistance for different factors of safety (FS).



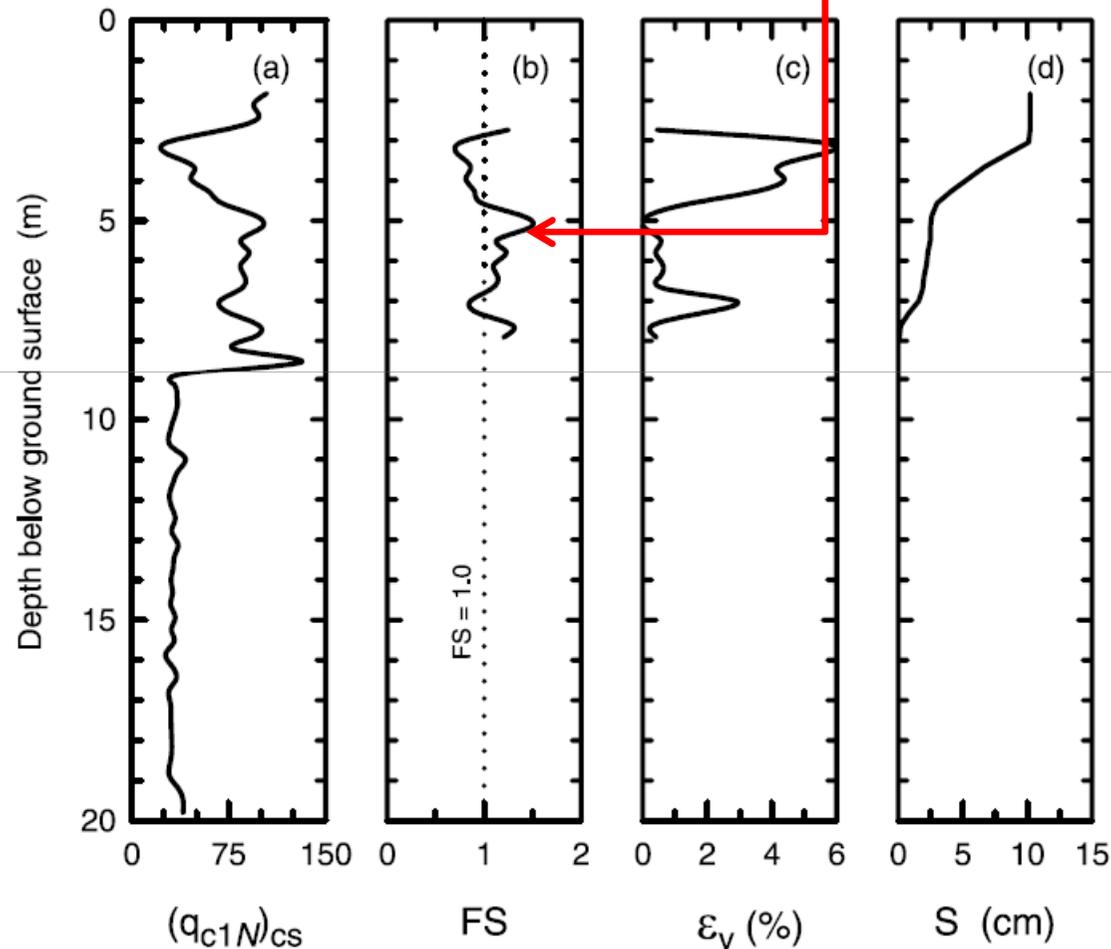
## Equações das curvas de deformação volumétrica

Equations for the relationships plotted in Fig. 3 are given by

[A1]	if FS $\leq$ 0.5,	$\epsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
[A2]	if FS = 0.6,	$\epsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 147$
[A3]	if FS = 0.6,	$\epsilon_v = 2411(q_{c1N})_{cs}^{-1.45}$	for $147 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
[A4]	if FS = 0.7,	$\epsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 110$
[A5]	if FS = 0.7,	$\epsilon_v = 1701(q_{c1N})_{cs}^{-1.42}$	for $110 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
[A6]	if FS = 0.8,	$\epsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 80$
[A7]	if FS = 0.8,	$\epsilon_v = 1690(q_{c1N})_{cs}^{-1.46}$	for $80 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
[A8]	if FS = 0.9,	$\epsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 60$
[A9]	if FS = 0.9,	$\epsilon_v = 1430(q_{c1N})_{cs}^{-1.48}$	for $60 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
[A10]	if FS = 1.0,	$\epsilon_v = 64(q_{c1N})_{cs}^{-0.93}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
[A11]	if FS = 1.1,	$\epsilon_v = 11(q_{c1N})_{cs}^{-0.65}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
[A12]	if FS = 1.2,	$\epsilon_v = 9.7(q_{c1N})_{cs}^{-0.69}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
[A13]	if FS = 1.3,	$\epsilon_v = 7.6(q_{c1N})_{cs}^{-0.71}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
[A14]	if FS = 2.0,	$\epsilon_v = 0.0$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 20$

# Exemplo dos resultados de um cálculo de assentamento ao longo de um perfil com sensibilidade à liquefacção

**Fig. 5.** Example plots illustrating the major procedures in estimating liquefaction-induced ground settlements using the proposed CPT-based method.



# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 2. Areias Secas, NÃO SATURADAS

Para estas condições o procedimento é equivalente até à determinação de  $D_r$  ( $I_D$ ) e  $(N_1)_{60}$ . Em seguida deve-se fazer as seguintes alterações a partir do 7º passo:

7º) avaliar a tensão efectiva média ou octaédrica  $(\sigma'_m)$  para cada sub-camada (ex:  $\sigma'_m = (1 + 2K_0) \sigma'_0 \cong 0,65 \sigma'_0$ , se  $K_0 \cong 0,47$ );  $\sigma'_m$  é assumido como a tensão média efectiva de uma areia seca.

8º) Estima-se o valor de  $G_0$  ( $G_{max}$ ). O documento da ASCE sugere a expressão:

$$G_{max} = 10 [(N_1)_{60}]^{1/3} \cdot [\sigma'_m]^{1/2}$$

# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 2. Areias Secas, NÃO SATURADAS

9º) Determina-se a deformação efectiva de corte cíclico a partir da seguinte expressão:

$$\gamma_{eff} \cdot \frac{G_{eff}}{G_{max}} = \frac{0,65 \cdot a_{max} \cdot \sigma_0 \cdot r_d}{g \cdot G_{max}}$$

Sendo,

$G_{eff}$  = o módulo de distorção efectivo relativo à distorção induzida pelo sismo;

$a_{max}$  = aceleração máxima horizontal à superfície;  $\sigma_0$  = tensão geostática (vertical) total;

$g$  = aceleração da gravidade;

$r_d$  = factor de redução (ver acima).

# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 2. Areias Secas, NÃO SATURADAS

9º) Determina-se a deformação efectiva de corte cíclico a partir da seguinte expressão:

$$\gamma_{eff} \cdot \frac{G_{eff}}{G_{max}} = \frac{0,65 \cdot a_{max} \cdot \sigma_0 \cdot r_d}{g \cdot G_{max}}$$

Sendo,

$G_{eff}$  = o módulo de distorção efectivo relativo à distorção induzida pelo sismo;

$a_{max}$  = aceleração máxima horizontal à superfície;  $\sigma_0$  = tensão geostática (vertical) total;

$g$  = aceleração da gravidade;

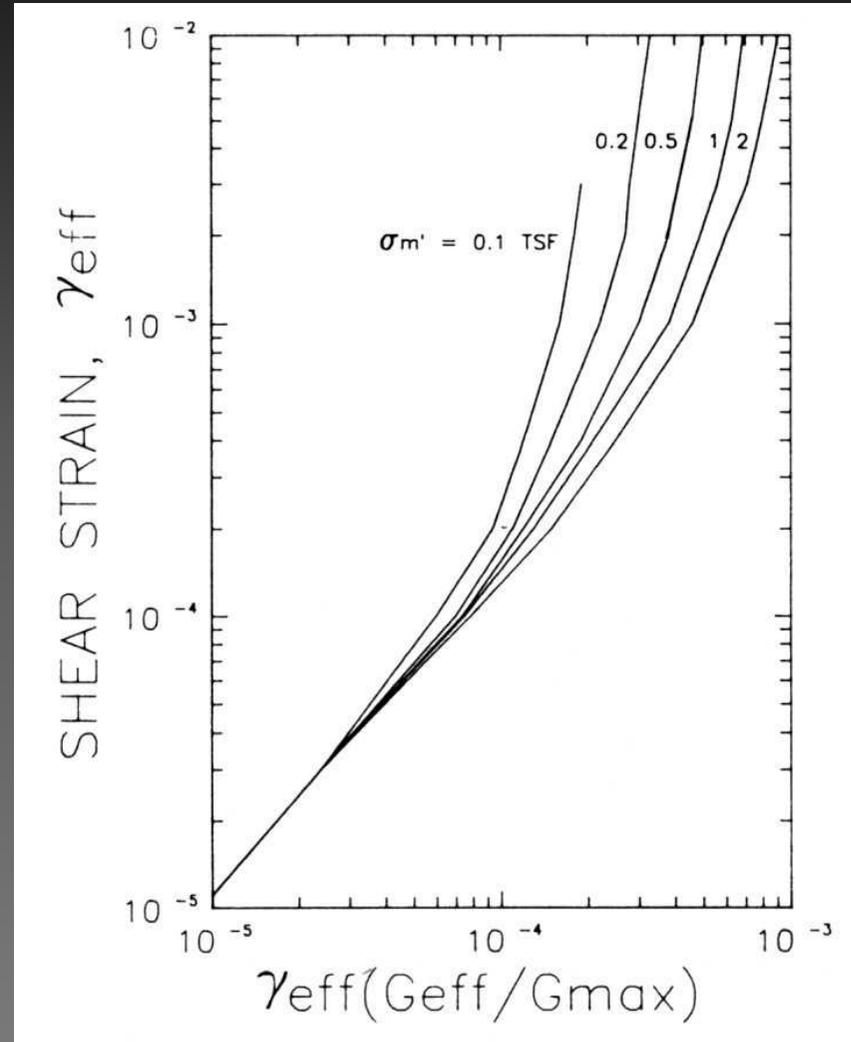
$r_d$  = factor de redução (ver acima).

# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 2. Areias Secas, NÃO SATURADAS

10º) Avaliar  $\gamma_{eff}$  da figura seguinte,  $G_{eff} / G_{max} \cdot \gamma_{eff}$  usando a partir do passo (9º) e  $\sigma'_m$  do passo (7º).

Ábaco para  
determinação de  
deformações induzidas  
em depósitos arenosos

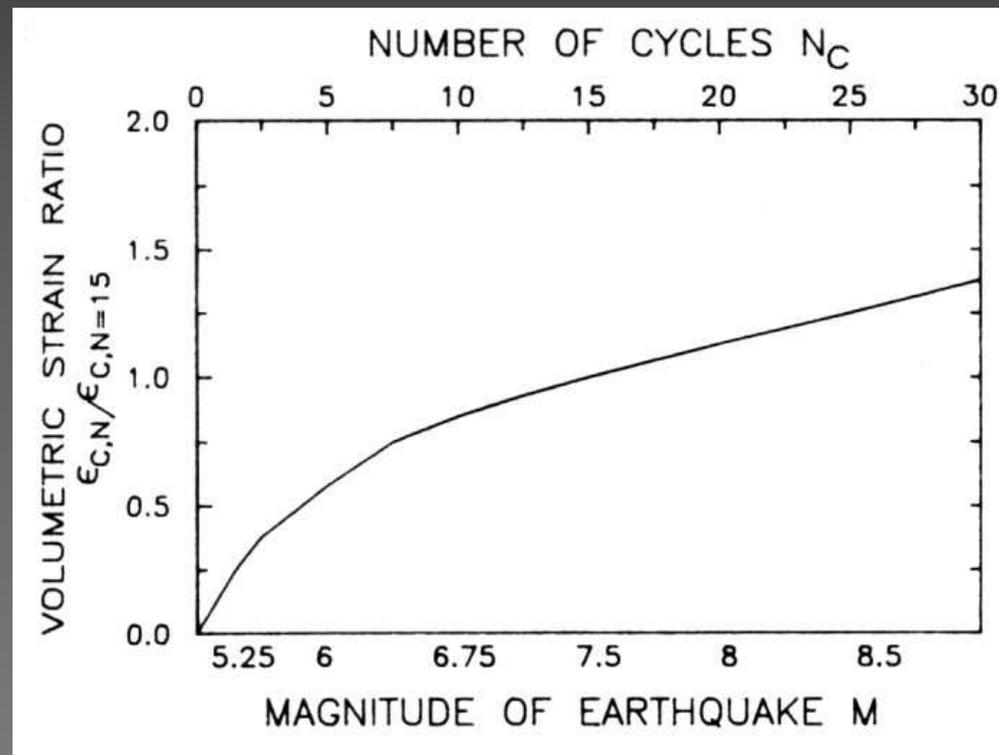


# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 2. Areias Secas, NÃO SATURADAS

11<sup>o</sup>) Estimar a deformação volumétrica  $\epsilon_{c,7,5}$  a partir da figura seguinte usando  $D_r$  e  $(N_r)_{60}$ . Este valor de deformação volumétrica é relativo a um sismo de referência com a magnitude de 7,5 ( $n = 7,5$ ).

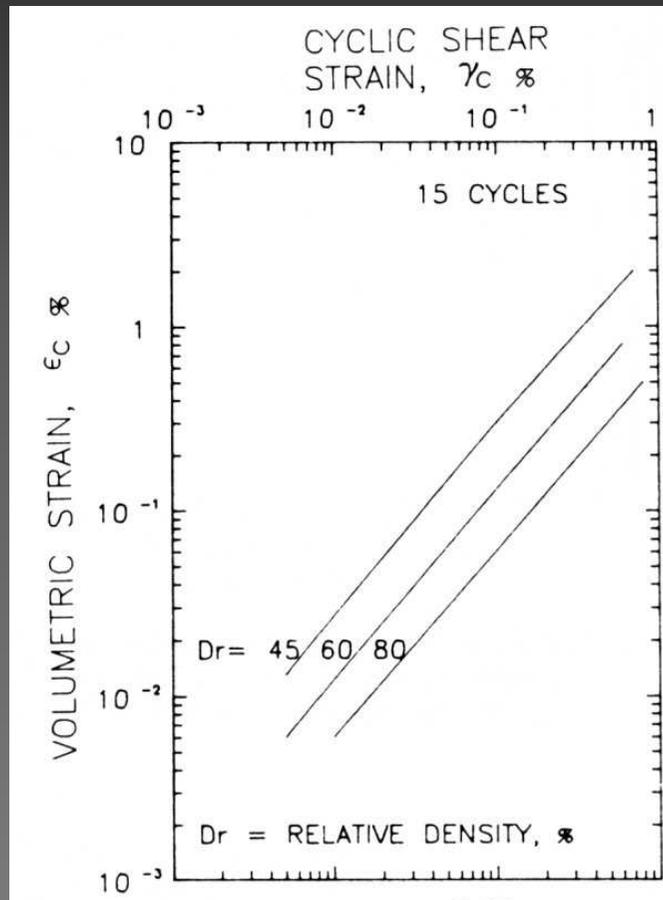
Relação entre o ratio da deformação volumétrica e o número de ciclos (magnitudes dos sismos) para areias secas



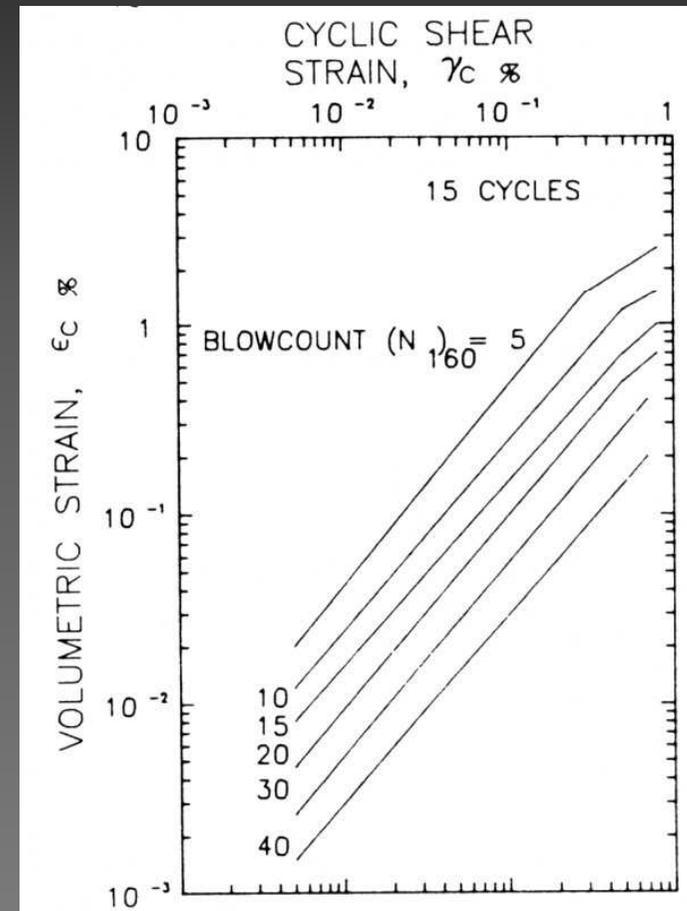
# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 2. Areias Secas, NÃO SATURADAS

12º) Transformar o valor de  $(\epsilon_{c,n})$  para o valor  $\epsilon_{c,7,5}$  de deformação volumétrica esperada para um sismo de magnitude  $n$  a partir de:



Relação entre a deformação volumétrica  $\epsilon_c$  e a deformação de corte cíclica  $\gamma_c$ , para um sismo de magnitude  $M=7,5$



# PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AREIAS - ASCE

## 2. Areias Secas, NÃO SATURADAS

13º) Multiplicar  $\varepsilon_{c,n}$  por 2 para considerar o efeito multidireccional do sismo no assentamento e avaliar o assentamento total previsível associado ao sismo através do somatório das parcelas das várias sub-camadas:

$$S_e = \sum_{j=1}^n \frac{2\varepsilon_{c,n}}{100} \cdot h_j$$

# DEFORMAÇÕES (MOVIMENTOS) LATERAIS

Para projectos de risco baixo a médio e avaliações preliminares de risco elevado os deslocamentos (deslizamentos) laterais induzidos são estimados por métodos empíricos (ex: Youd et al., 2002 e Zhang et al., 2004). Este último tem a vantagem de se basear no CPT e também é conservatório – mesmas razões acima apontadas.

*Youd, T.L et al. (2002) Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, October, pp 817-833*

O juízo de engenheiro é importante, particularmente se há zonas de transição (...). Em geral, assume-se que uma camada liquefiável localizada a uma profundidade superior a duas vezes a profundidade da face livre tem pouca influência deslizamentos laterais.

Quando as deformações laterais avaliadas pelos métodos simplificados empíricos são grandes (> 30% de def.s distorcionais) deve-se avaliar a susceptibilidade do solo para perda de resistência (deslizamentos de talude ...).