



COBRAMSEG 2024

XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica
X Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
X Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens

GEOTECNIA PARA O
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

USO CONJUNTO DE ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO PARA AVALIAÇÃO DA FRAGILIDADE DE TSF: um caso de estudo

António Viana da Fonseca

(Da Lição 10ª James K. Mitchell Lecture)

Tópicos abordados - 1

- Introdução (contexto e problemática: mineração e processamento, materiais)
- Instabilidade e fragilidade: suscetibilidade à liquefação parcial ou total
- Fatores desencadeantes (perigo – “hazard” -, gatilhos)
- O caso-histórico: excepcional, dramático, desafiante e fonte de aprendizagem
- Estados críticos em análises de estabilidade (equilíbrio limite e modelação numérica)
- Caracterização física e hidromecânica em laboratório: amostragem; classificação em tipologias:
 - Três grupos de matérias afins, diferenciados (densidade, coloração, microscopia...)
 - Tendências próprias de comportamento em permeabilidade, compressibilidade e resistência
- Linhas de Estados Críticos (evolutiva) e de Instabilidade (fronteira dependente da morfologia)
 - Identificadas em amostras indeformadas versus integrais desestruturadas e remoldadas em laboratório; índices morfológicos e propriedades hidro-geomecânicas do solos
 - Velocidades de ondas sísmicas de cisalhamento (V_s) e de compressibilidade (V_p) – elásticas
- Avaliação de estrutura interparticular: fábrica e cimentação; aderência à condição “in situ”:
 - O índice de rigidez indicador de sensibilidade/fragilidade (resistência de pico vs residual)
 - Saturação e velocidades de ondas de compressão e suscetibilidade à liquefação

Tópicos abordados - 2

- Avaliação de estrutura interparticular: fábrica e cimentação; aderência à condição “in situ”:
 - O índice de rigidez indicador de sensibilidade/fragilidade (resistência de pico vs residual)
 - Saturação aferida por via das velocidades de ondas de compressão e suscetibilidade à liquefação
- Identificação de clusters de materiais de comportamentos diferenciados
 - O papel decisivo da CPTU no microzonamento dos "clusters" de comportamento distinto:
 - ✓ Resistência friccional e dilatante (estado) e condutividade hidráulica (drenagem);
 - ✓ Índices de fragilidade/metaestabilidade integrando a rigidez elástica e resistência não drenada
- Gatilhos de liquefação potenciados por repostas de sistema (distribuição espacial de desfavorável)
 - Retroanálise de casos históricos onde a essa disposição foi identificada: fragilidade agravada
 - Razão de resistência de pico (cedência descontrolada) e residual (mínima: friccional ou líquida)
- Fatores inerentes (estrutura interparticular) e induzidos (influência do ângulo de Lode) :
 - Estado de tensão de repouso isotrópico ou anisotrópico, orientação das tensões principais
 - Posição relativa das tensões principais durante o carregamento (ângulo de Lode)
- A relevância dos ensaios insitu para identificação/mapeamento desses fatores de estado e condições de tensões: pressiômetros, dilatômetros e geofísica
- Breve abordagem ao potencial e limitações de alguns modelos avançados em cálculo numérico

The James K. Mitchell Legacy Website

Cahill Professor of Civil Engineering, Emeritus, University of California, Berkeley
 University Distinguished Professor Emeritus, Department of Civil & Environmental Engineering, Virginia Tech
 jkm@vt.edu

<https://mitchell.geoengineer.org/curriculum-vitae/#>

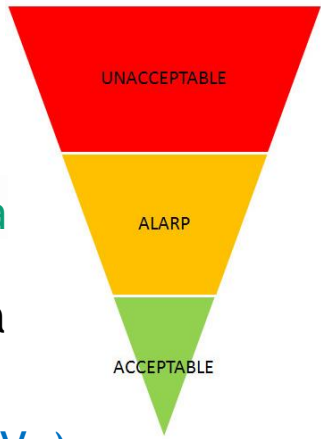
Year	Lecturer	Conference Presentation
2004	Hai-Sui Yu, Univ. of Nottingham, UK	ISC-2, Porto, Portugal
2006	Paul W. Mayne, Georgia Inst. Technology, USA	GeoShanghai, China
2008	Dick Campanella, Univ. British Columbia	ISC-3, Taipei, Taiwan
2010	Tom Lunne, Norwegian Geotech Inst., Norway	CPT'10, Huntington Beach, California
2012	Peter K. Robertson, Gregg Drilling, USA	ISC-4, Pernambuco, Brazil
2014	Mike Jamiolkowski, Studio Geotecnica, Italy	CPT'14, Las Vegas, Nevada, USA
2016	An-Bin Huang, National Chiao Tung University, Taiwan	ISC-5, Brisbane/Gold Coast, Australia
2017	J.M.Powell, GeoLabs Ltd.	19 th ICSMGE, Seoul'2017
2021	Fernando Schnaid, UFRGS, Brazil	ISC'6, Budapest 2020/21
2022	António Viana da Fonseca, FEUP, Portugal	CPT'22, Bologna 2022



Materiais (mineração e processamento dinâmicos)

Liquefação: potencial / provável

Boas práticas & Julgamento de engenharia



Resistência máxima (pico) e final (residual) (rigidez; permeabilidade; fragilidade)

Recorrentes ensaios tendo em vista fatores condicionantes

Nível(s) da água Saturação

Ensaio antes, durante e após construção, reforço e descaracterização

Quais devem ser priorizados?

- seismic waves (V_p), geophysical methods;
- SDMT, SCPT...

Laboratório

Ensaio in situ permitem

Amostragem

TIPO / CLASSE (ADN: essencial)

Estado induzido na construção

Integral / indeformada

Estado de tensão instalado (q/p'); K_0 , α ; etc

- pressióremetros (PMT)
- dilatômetros (DMT)

Reconstituídos (Fábrica a considerar)

Remoldado e testado sob condições específicas de tensão-deformação

Parâmetro de estado Índice frágil Permeabilidade P Parâmetros geomecânico

Análise Granulométrica (AG)
MORFOLOGIA
Granulom. EVOLUTIVA
SENSIBILIDADE
CSL (Linha Est. Críticos - LEC)
Superf. Lim. De Estabilidade

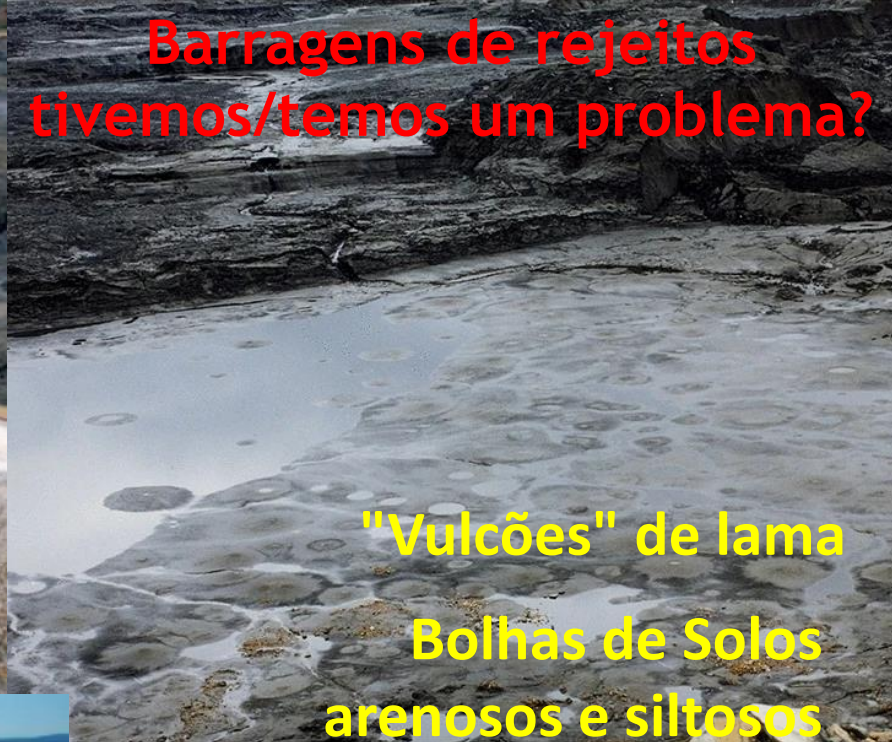
Abordagem ao projeto
Parâmetros constitutivos evolutivos

AG e densidade, etc. para definição de clusters
Ensaio triaxial de caminhos de tensão a partir de CK_0
CSL original e evoluída NOVO limite de **INSTABILIDADE**

- CPT (básico)
- CPTU/SCPTU (essencial)
- SDMT (V_p e V_s - superlativo)



Aznalcóllar, SW Espanha, 1998
1,5 milhões de m³ de rejeitos
piríticos



Barragens de rejeitos
tivemos/temos um problema?

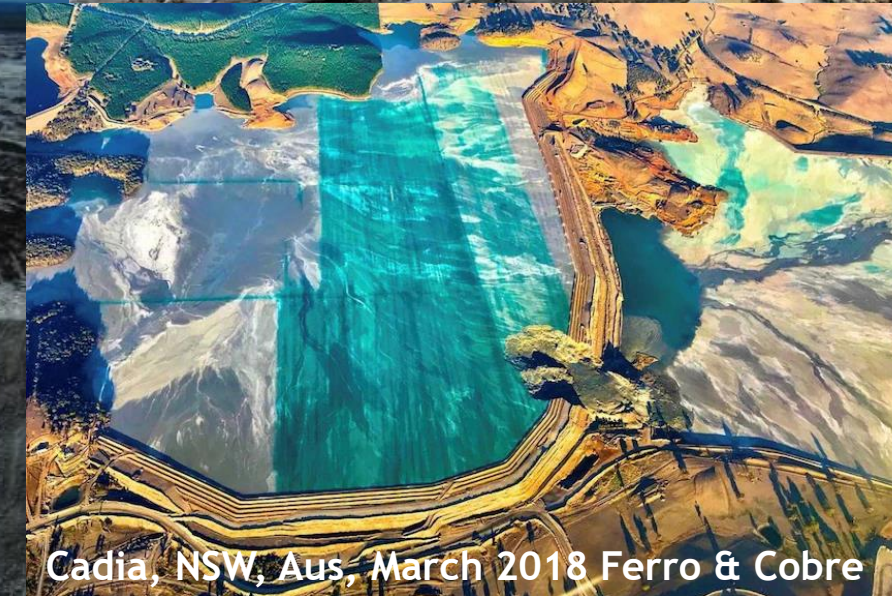
"Vulcões" de lama
Bolhas de Solos
arenosos e siltosos



Fundão, Mariana, Br Nov.2015
32 Milhões m³ de rejeito de ferro



Mount Polley, Ca, Aug.2014
24 milhões m³ de rejeito de ferro



Cadia, NSW, Aus, March 2018 Ferro & Cobre



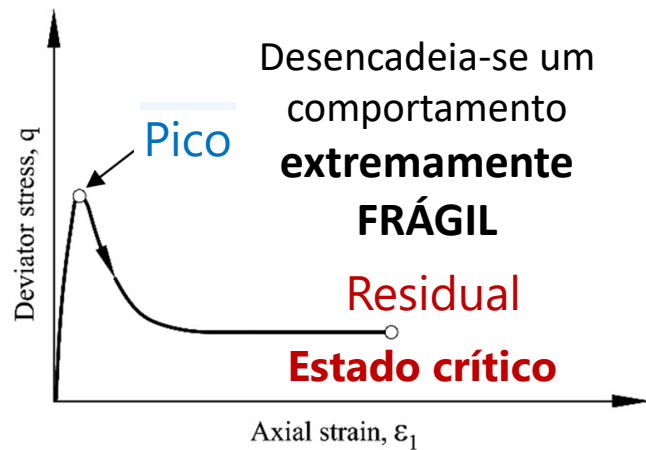
Quais e quando temos materiais (solos) frágeis que liquefazem e conduzem as estruturas de terra a romper?

- A prática revela que o elevado número de roturas em **barragens construídas a montante** supera as barragens de rejeitos a jusante e de linha central, e mais ainda em uma etapa de construção, **embora existam vários casos** com impacto muito alto onde a liquefação ocorreu devido à **fragilidade do solo de fundação** do "dique" conduzindo à liquefação dos rejeitos no reservatório
- A **construção de barragens** a montante excede a condição de risco em relação às de jusante e de linha central durante no decurso da operação de mineração e alteamentos que, às vezes volumes obriga a novas abordagens de projetos; A reavaliação das condições de projeto (**propriedades dos materiais** e comportamento do sistema) é exigente para a **reavaliação contínua**, especialmente quando rejeitos ou siltes mais finos suportam os diques adicionais
- Os rejeitos geralmente são **depositados soltos, portanto, são contráteis**, de modo que qualquer ação que induza **uma resposta não drenada, mas também drenada (DESDE QUE HAJA DECRÉSCIMO de p')**, **pode desencadear liquefação** (parcial ou completa) e colapso; Cerca de 100 roturas a montante em cerca de 3500 barragens de rejeitos podem ser consideradas por baixo, mas têm **sérias consequências** em vidas, resiliência social devido a altos danos de infraestrutura e terríveis perdas econômicas e ambientais.

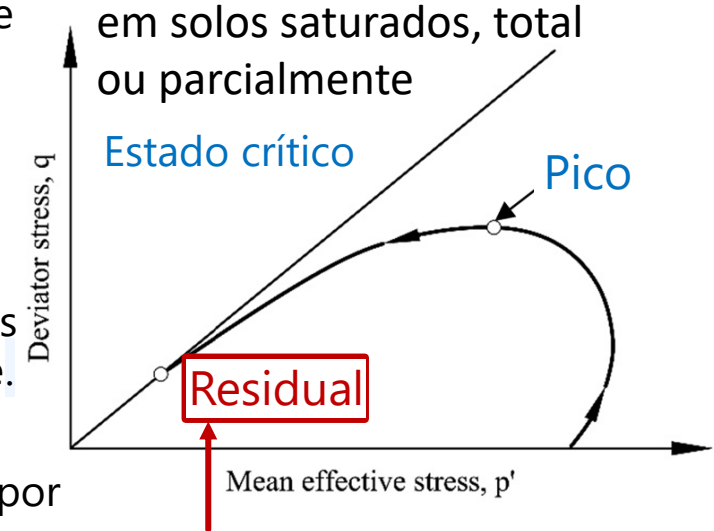
Portanto, precisamos de registo contínuo de engenharia nas TSF (EoR)

SUSCEPTIBILIDADE: QUAIS E PORQUE LIQUEFAZEM OS MATERIAIS GRANULARES?

Este é um processo em que se verifica um **aumento de poropressão** que pode ser gerado por alterações de estado de tensão **em condições drenadas e não drenadas**, havendo uma **queda consistente da tensão efetiva média** com ou sem variação da tensão deviatória. É um fenómeno que se desencadeia quando se atingem estados de tensão em que se perde a sustentabilidade interparticular por **diminuição das forças de contacto efetivas, diminuindo a resistência ao cisalhamento** de um valor máximo (**pico**), ainda no interior do espaço de tensões da envoltória de rotura, numa taxa de deformação que cresce exponencialmente.



O processo gera um **material fluido de viscosidade variável**, que não é equilibrado por partículas com forças entre si e poro pressões estacionárias. **É um material "não newtoniano"** que só volta a estabilizar quando as partículas voltam a contactar entre si, mobilizando uma resistência muito baixa e "atrítica" em tensões muito mais baixas (as poropressões que se geram neste processo atingiram valores muito elevados).



Resistência última ("residual") será atingida para valores muito baixos de tensões tangenciais, convergindo para linha ou superfície dos estados críticos (*Critical State Locus*)

Para que um material seja suscetível à liquefação de fluxo, existem duas condições a serem cumpridas:

- os materiais devem estar eminentemente **SATURADOS** ou pelo menos **próximos da saturação**; e,
- Os materiais devem ser frágeis: logo, **contráteis** e com e de **estrutura interparticular mataestável!**

PRINCIPAIS QUESTÕES A SEREM RESOLVIDAS NA LIQUEFAÇÃO DE FLUXO

Os ensaios de compressão triaxial não drenada podem contribuir para avaliar parcialmente para identificar esses problemas-chave, mas os convencionais são muito limitados, incapazes de resolver incertezas graves:

RESISTÊNCIA NÃO DRENADA DE PICO (ZONA DE INSTABILIDADE NO ESPAÇO DE ESTADO DE TENSÃO)

Este é um valor máximo da tensão deviatória em carregamento não drenado ou não drenado, observado dentro do espaço de tensão (expresso pelos invariantes)

- não está posicionada na envoltória de rotura nem acima dela – como é o caso do solos cimentados; NÃO É UMA ROTURA FRICCIONAL em tensões efetivas; e, NÃO é estado de transformação de fase convencional;
- apoiado por novas leis de fluxo; sendo identificados em ensaios adensados com estados anisotrópicos e com trajetórias de tensão diferenciadoras, com extensivos com padrões de carregamento distintos; muito variável (dependente do “arranjo” – “fábrica” – das partículas natural ou induzida previamente)

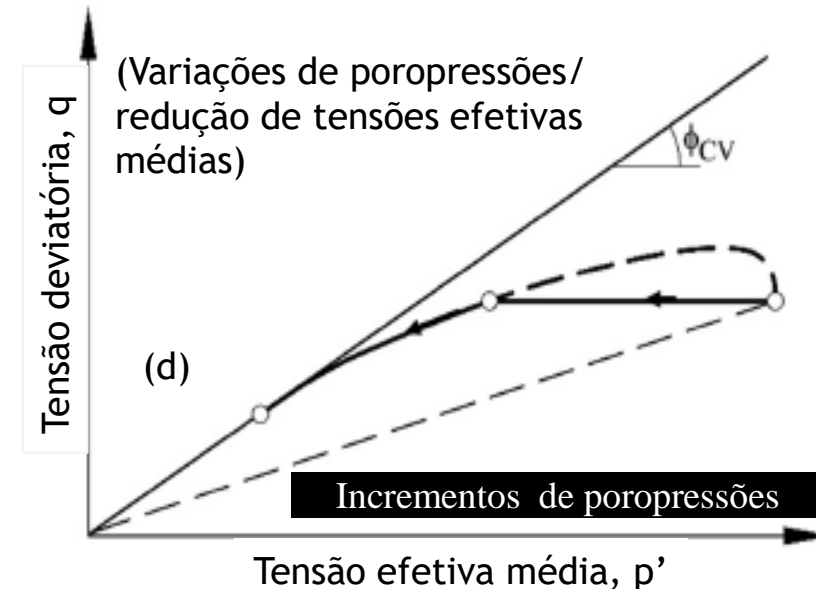
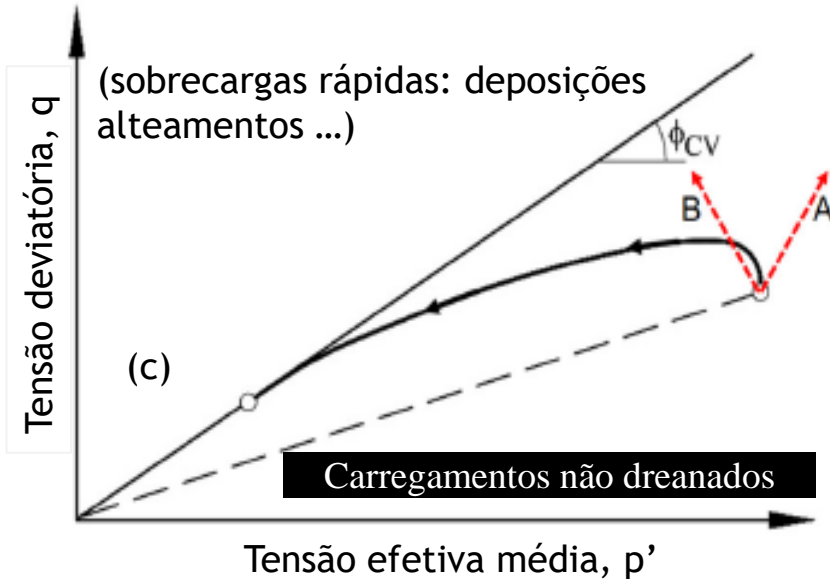
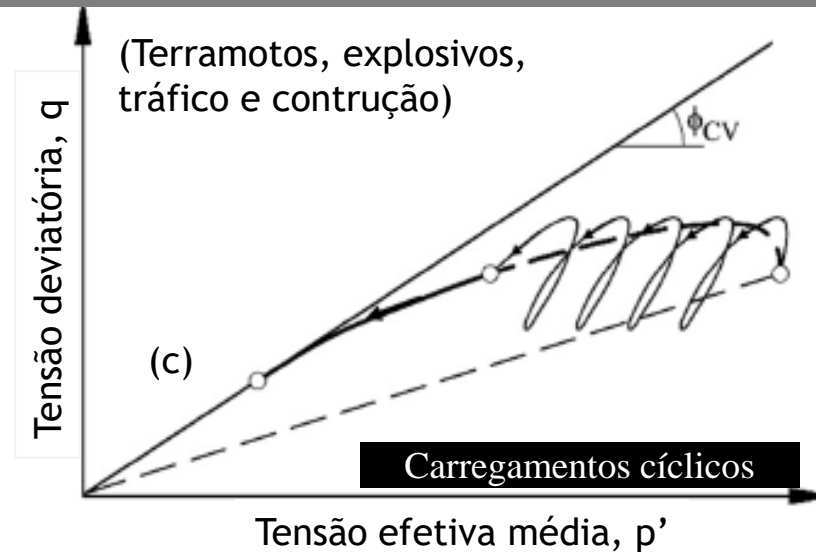
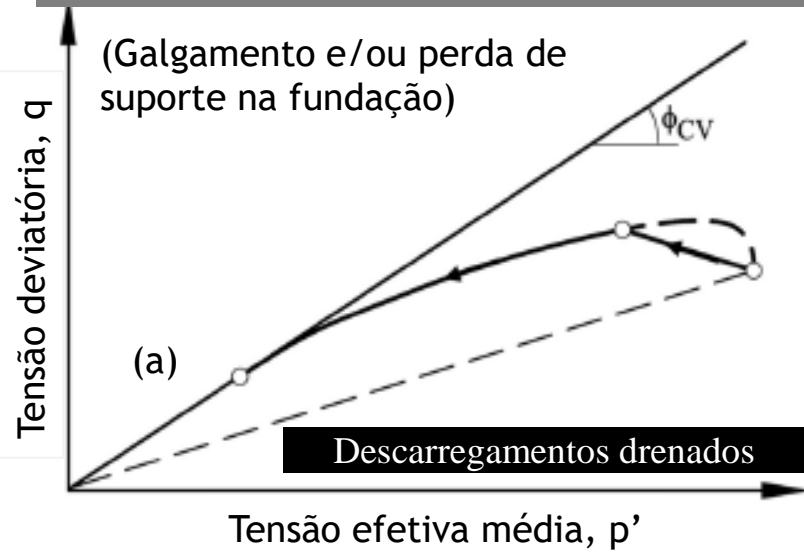
RESISTÊNCIA RESIDUAL

Não é fundamentalmente uma resistência não drenada após-liquefação, pois é diversa e erradamente designada como estacionária (“Steady State”), esperando-se porém que:

- o estado de tensão convirja a resistência crítica / friccional (CSL), mobilizando tensões efetiva
- Tem uma **característica fundamental (ADN)** e é menos dependente do caminho de tensões e da fábrica

O que é necessário tem de ser suficiente: fatores desencadeantes (gatilho/perigo)

Ensaio triaxiais drenados e não drenados: hidromecânica da liquefação do escoamento



(a) **galgamento** por escoamento imprevisto de tempestades, vertedores e valas de desvio ou protetores na borda livre, enquanto a **perda de suporte** é devida a rápida taxa de subida do reservatório, atividades no pé...;

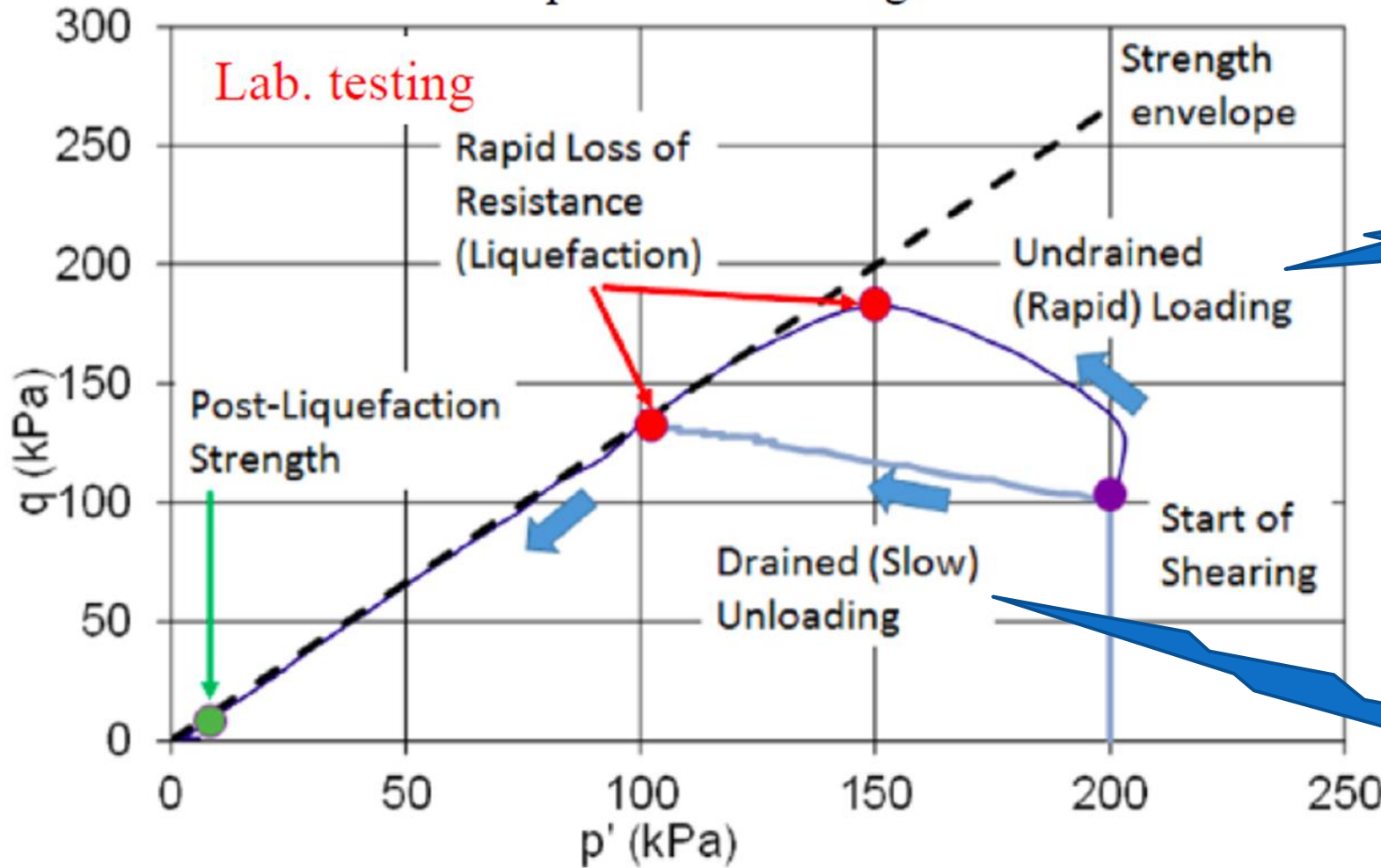
(b) **sobrecarga** é devida a rápida taxa de deposição, ou similares;

(c) **cargas dinâmicas** devidas a sismos, desmontes com explosivos na mina, estacas-pranchas cravadas com vibração e push-in de impacto.

(d) **variações de poropressão / reduções na tensão efetiva média**, devido ao mau funcionamento da drenagem, elevação do lençol freático; vazamento localizado, erosão interna; fluência (creep) volumétrica e constricta.

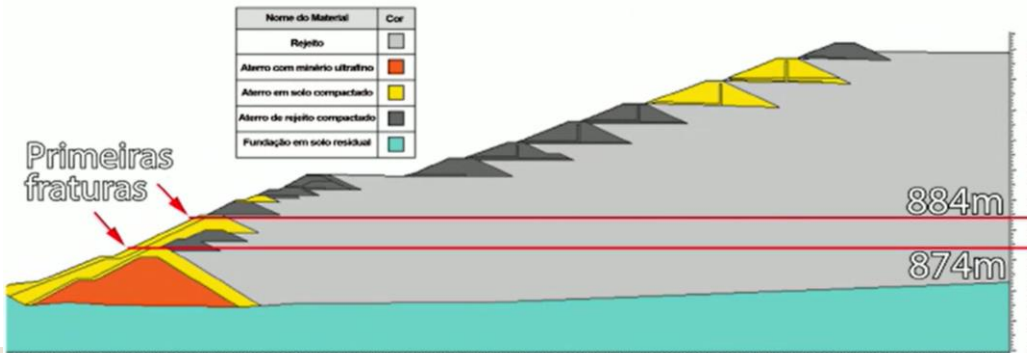
LIQUEFAÇÃO DE FLUXO OU ESCOAMENTO – EX. BARRAGEM DO FUNDÃO (MARIANA)

<http://fundaoinvestigation.com/>



Carregamento vertical rápido não drenado (ex: deposição rápida de rejeitos)

Descarregamento drenado ou diminuição efetiva da tensão (movimento para jusante)





Dam B1, Bruamdinho, MG
1.5 Mm³ Rejeitos de ferro



TSUNAMI DE LAMA
IMAGENS MOSTRAM ROMPIMENTO DA BARRAGEM GLOBO TV
SI JORNAL DA NOITE



Estes rejeitos chegam
a ter 95% de ferro

REFEITÓRIO E ADMINISTRAÇÃO
REGIÃO VIRA PÂNTANO MARROM APÓS ROMPIMENTO DA BARRAGEM
JORNAL DA NOITE

Da suscetibilidade à liquefação à vulnerabilidade das TSF

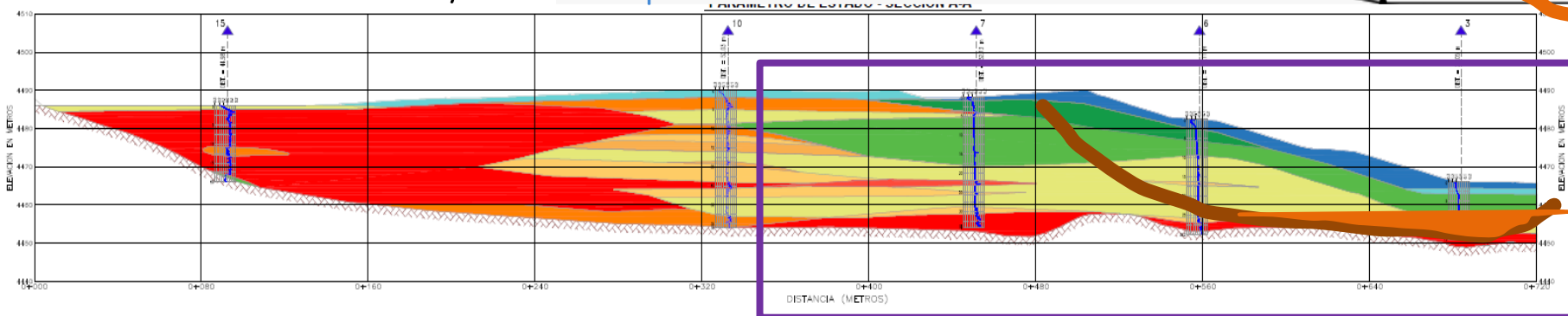
- **Suscetibilidade:** identificar se as condições de um depósito são potencialmente liquidificáveis (estado – materiais granulares soltos e saturados)
- **Perigo (hazard):** condicionantes (processos construtivos, hidrogeológicos; etc) que pode favorecer o desenvolvimento de liquefação estática em caso de sua ocorrência (“gatilho”)
- **Vulnerabilidade:** se o objeto de análise (TSF) é suscetível a um fenómeno, **se há perigo** de o mesmo ser sujeito a um **gatilho** que crie **fragilidade** da estrutura (TSF) **então é vulnerável**



Os ensaios in situ, em particular os

ensaios CPTu, e técnicas geofísicas (com velocidades das ondas P e S) são decisivos.

Metodologias próprias para microzonamento de risco resultarão nas zonas +/- suscetíveis **que se ilustram à frente**



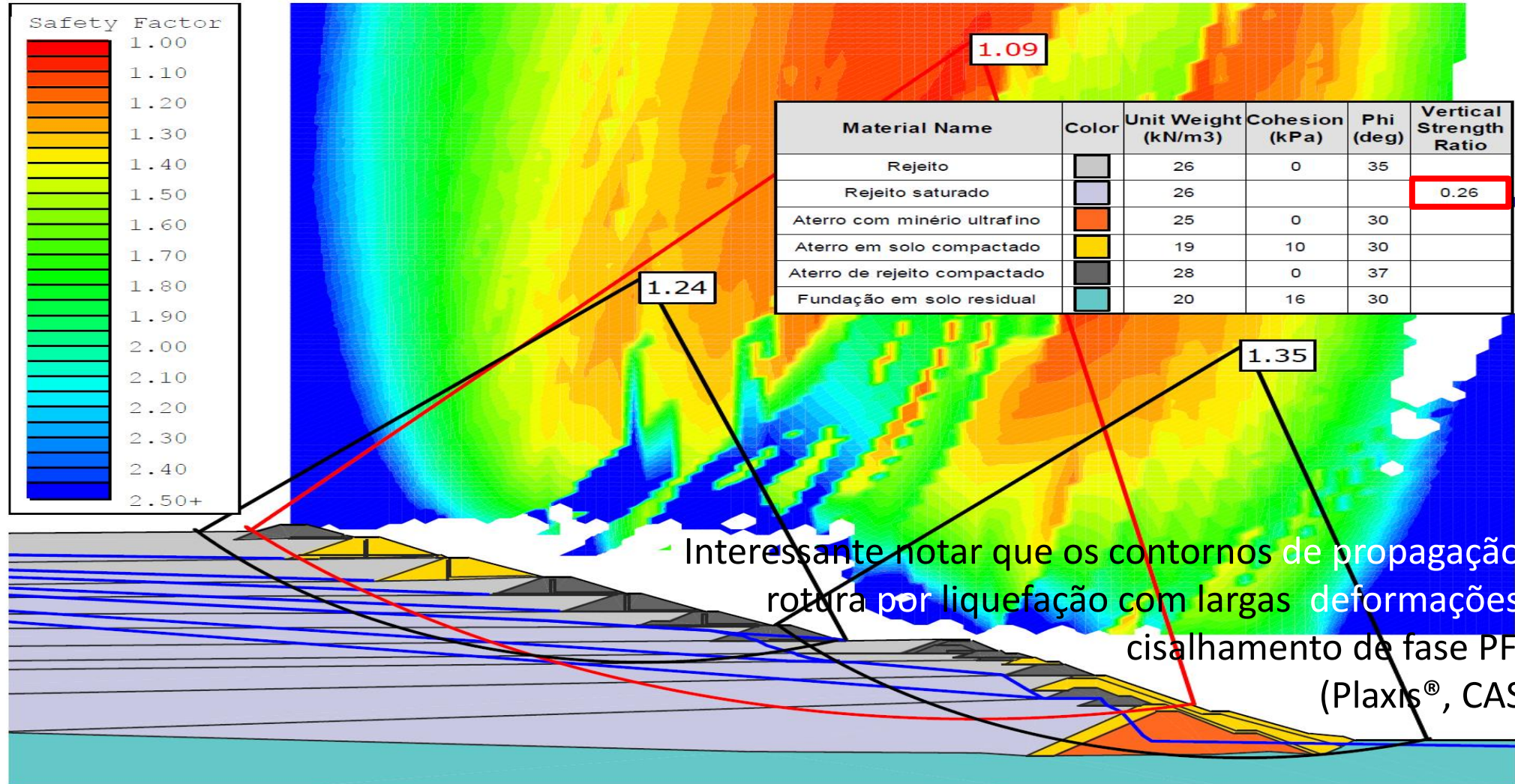
A zona de falha que se deduz das imagens filmadas

Absolutamente indispensável para análise da suscetibilidade das **zonas cujos materiais deviam ser associados em “clusters”**

Relatório do painel CIMNE, 2021

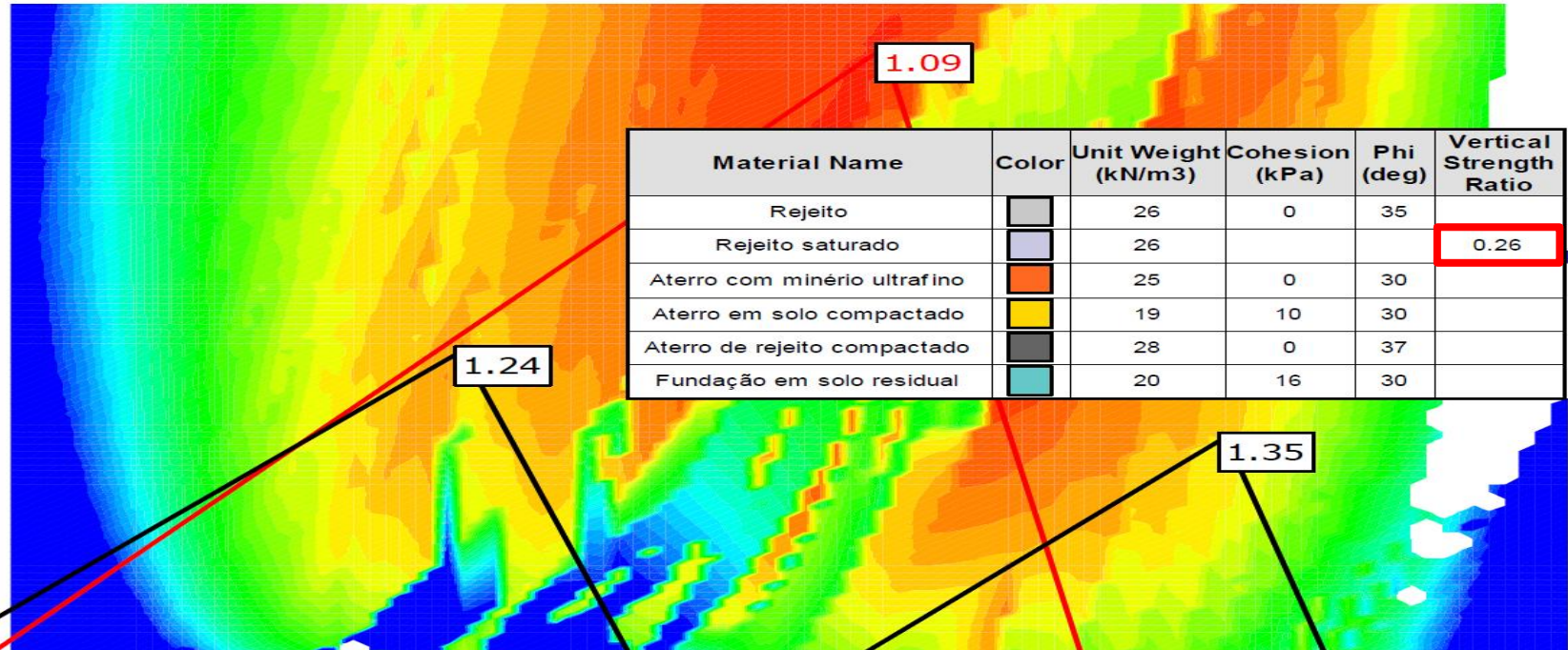
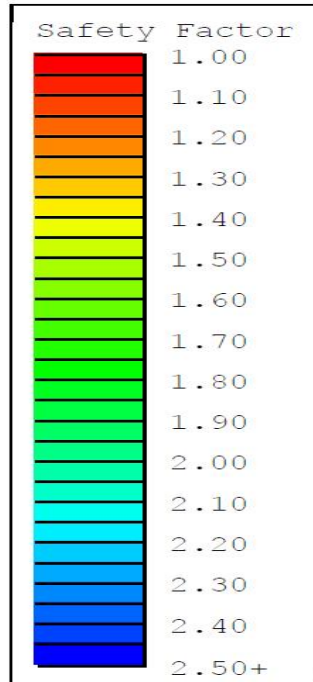
Esta MESMA seção (EE') na barragem B1 foi analisada em equilíbrio limite não drenado e a superfície circular crítica para a hipótese de um **GATILHO DESCONHECIDO** obtido foi de FS = 1,09 (Spencer).

03/09/18
3 meses antes da rotura



Esta MESMA seção (EE') na barragem B1 foi analisada em equilíbrio limite não drenado e a superfície circular crítica para a hipótese de um **GATILHO DESCONHECIDO** obtido foi de FS = 1,09 (Spencer).

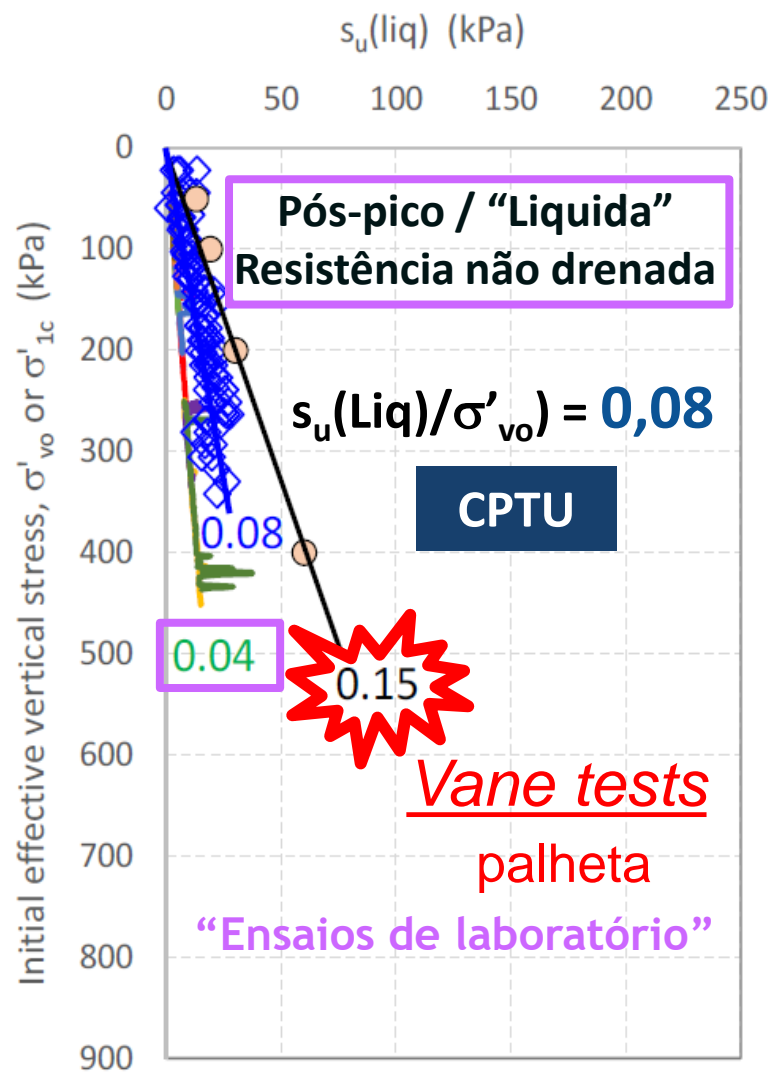
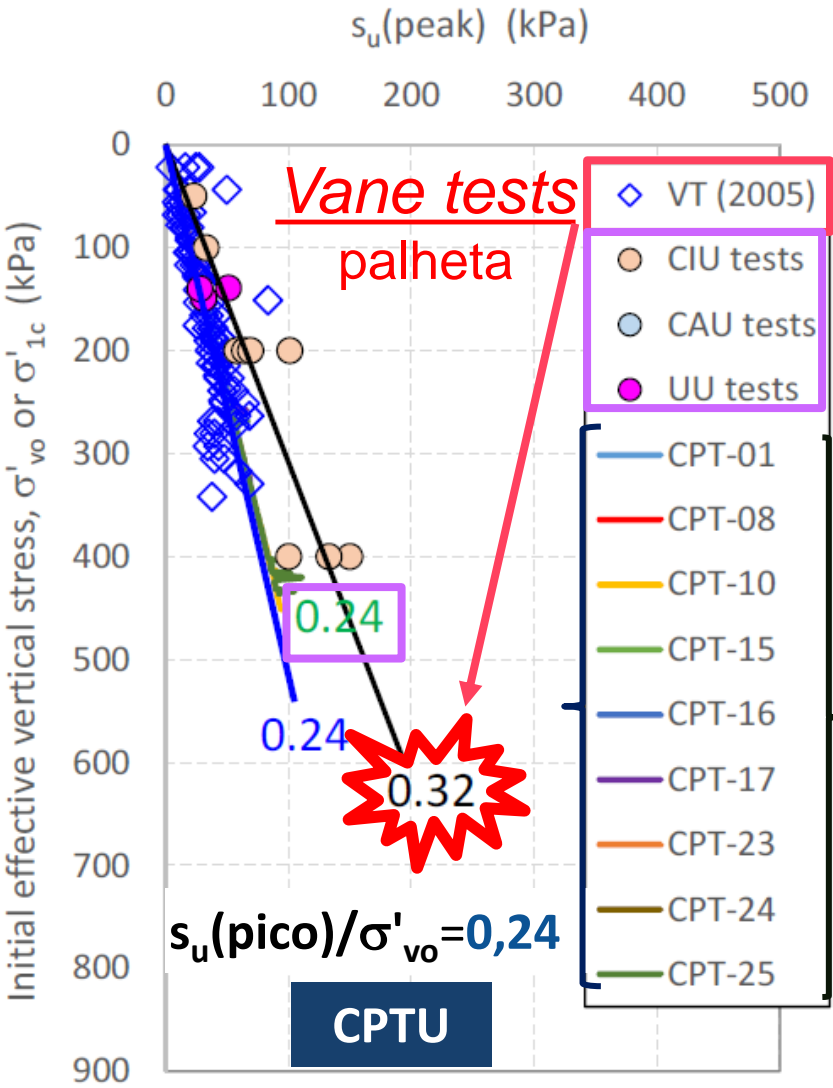
03/09/18
3 meses antes da rotura



Interessante notar que os contornos de propagação de rotura por liquefação com largas deformações de cisalhamento de fase PFEM (Plaxis®, CASM)

Relatório CIMNE das análises numéricas na Seção 3 (similar à EE')

Barragem B1- análises "circulares" de equilíbrio limite não drenado foram baseadas numa combinação de **ensaios in situ (CPTU e FVT)** e de **ensaios de laboratório** a maior parte obtidos em corpos de prova densos (logo dilatantes)



Resistência ao cisalhamento não drenada obtida em ensaios de palheta (FVT) e de laboratório vs ensaios de piezocone (CPTU)

Correlações de Olson & Stark para a resistência não drenada de PICO (ÍNICIO DE INSTABILIDADE)

$$\frac{s_{u_yield}}{\sigma'_{v0}} = 0.205 + 0.0143q_{c1} \pm 0.04$$

$$q_{c1} = q_c \frac{1.8}{0.8 + \left(\frac{\sigma'_v}{p_a}\right)} \leq 6.5 MPa$$

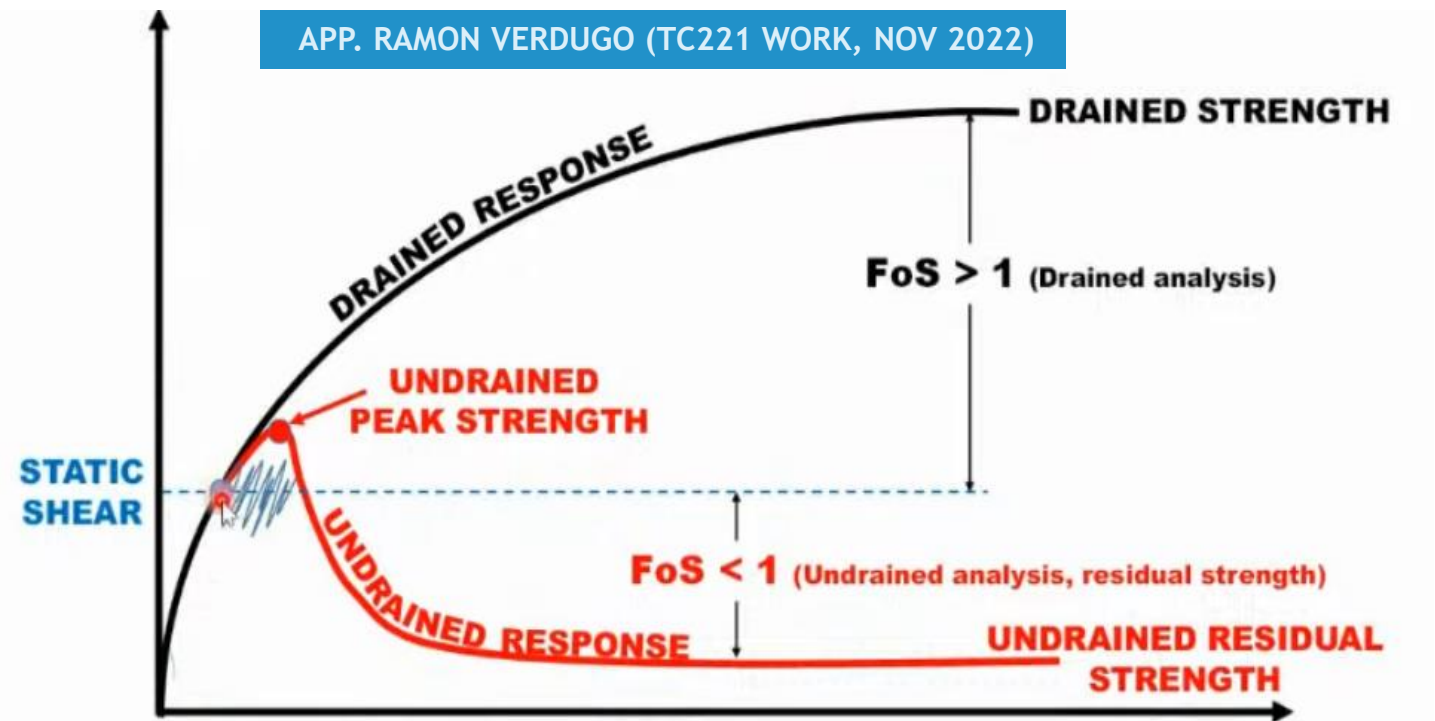
ou pós-pico (residual) - última

$$\frac{s_{u_liq}}{\sigma'_{v0}} = 0.03 + 0.0143q_{c1} \pm 0.030$$

A Mecânica dos Solos de Estados Críticos tem uma abordagem fundamental para obter S_{u_res} , $S_{u(Liq)}$:

- sua associação com análises de equilíbrio limite, pode ser um mal-entendido sobre o que é uma **rotura progressiva e o que é realmente uma queda abrupta para a residual de um elemento**;
- **Há alguma confusão nos conceitos**, como **sensibilidade pós-pico** (argilas sensíveis) **versus liquefação total em solos granulares não plásticos** que são devidos a **ações cíclicas ou ações dinâmicas** que, com um aumento sustentado da poro-pressão pode ocorrer uma **perda total do contato entre as partículas** deve / pode acontecer; aí **a resistência atrítica não será mobilizada** (o CRR está associado a tensão efetiva NULA em condições últimas)

A liquefação de fluxo em carregamentos monotónicos, prevalece na maioria das estruturas de rejeitos (certamente de quadrilátero mineiro), dá-se com perda de equilíbrio newtoneano e queda para a CSL, após atingir estados de tensão instáveis e seguindo-se deformações de velocidade crescentes (convergindo para o estado de "fricção" puro de valor muito reduzido!)



Análises efetivas (acopladas) tensão-deformação reproduzem esses comportamentos complexos ?

Estas análises de tensão-deformação podem emular as consequências de possíveis eventos de liquefação estática por basearem-se em modelos constitutivos que incorporam a mecânica fundamental do problema, ou seja, fenómenos de instabilidade viscosa em estados de tensão aquém da envoltória de resistência atrítica.

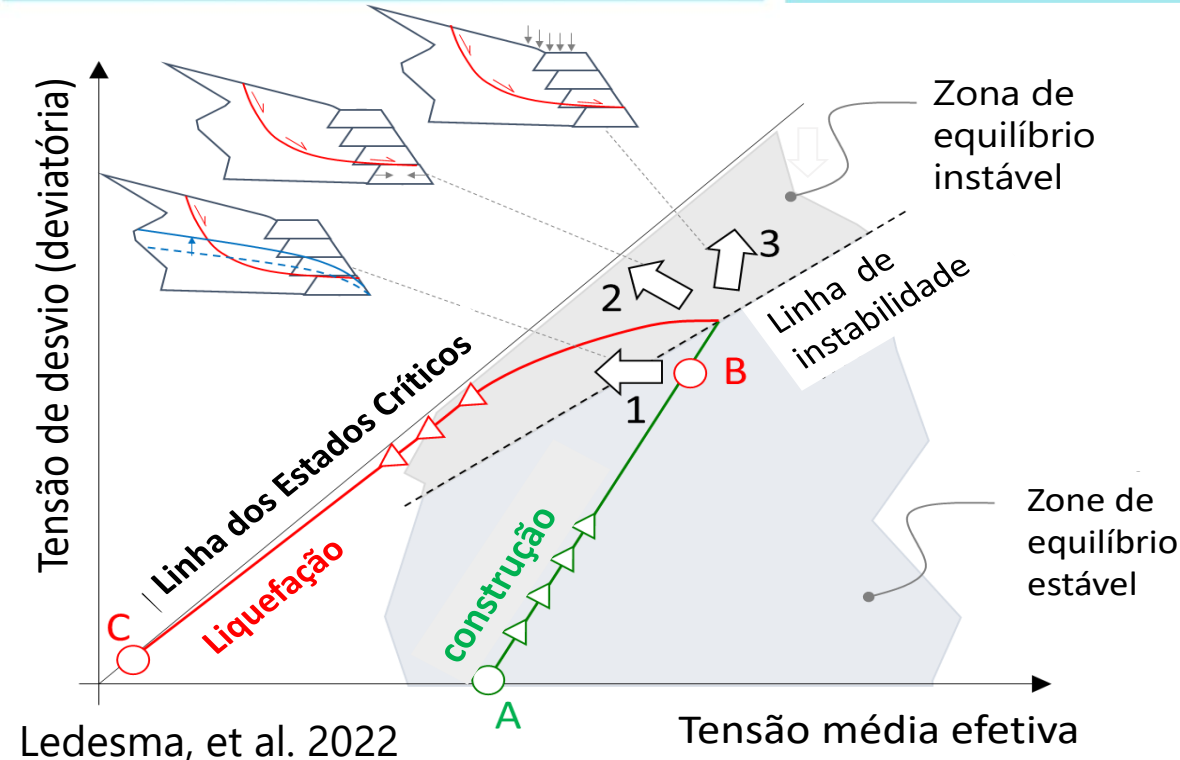
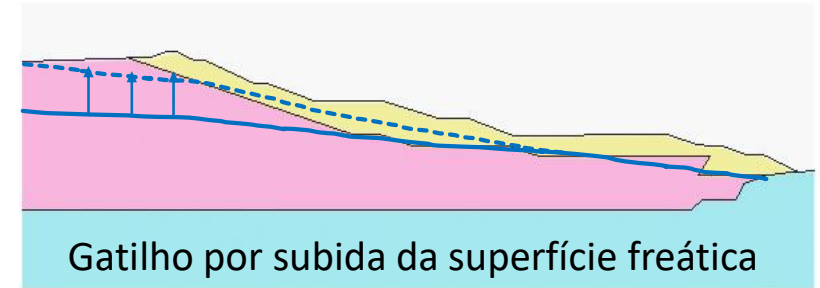
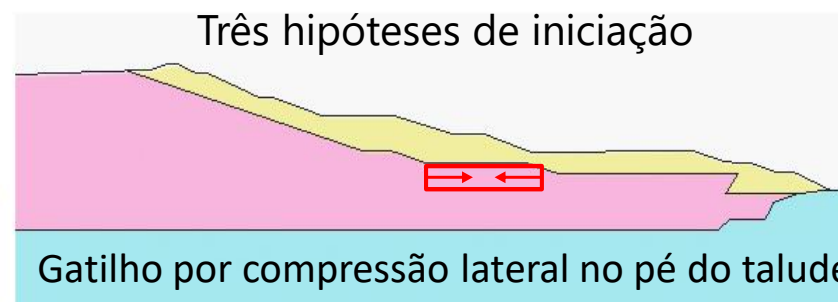
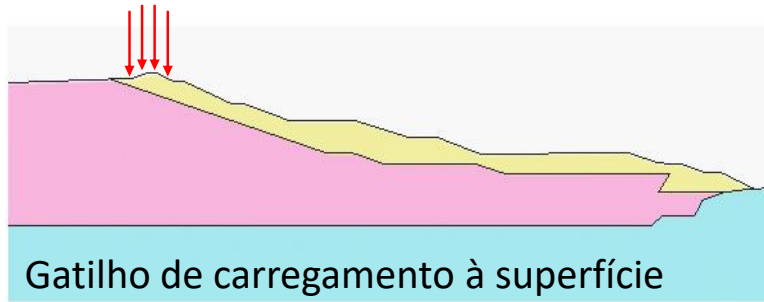
Uma vez que os métodos clássicos de análise de estabilidade, baseados no equilíbrio limite, são desajustados para incorporar um comportamento frágil, o recurso a plataformas numéricas é indispensável, sendo que comercialmente a oferta cresce constantemente, podendo ser adotada na prática de engenharia de projeto.

A Mecânica dos Solos dos Estados Críticos (CSSM) oferece uma estrutura clara para entender a liquefação estática) e permite formular modelos constitutivos que reproduzem esse comportamento. Essa abordagem foi pioneira no modelo NorSand (Jefferies, 1993), empregado para esclarecer o mecanismo de ruptura de Fundação (Morgenstern et al., 2015). Robertson et al. (2019) abandonaram as análises numéricas de NorSand nos estudos de estabilidade da B1 devido a problemas numéricos, já resolvidos. Outras bem-sucedidas: Cadia (Jefferies et al. 2019) ou Tar Island (Shuttle et al, 2022). Mais recentemente, além do B1, o CASM - Clay And Sand Model - um modelo baseado em conceitos de estado crítico capaz de representar a liquefação estática, foi usado para analisar o rompimento da barragem de rejeitos de Merriespruit, África do Sul, 1994, e contextualiza como a liquefação generalizada pode comprometer os rejeitos saturados (Manica et al. 2021).

A formulação do modelo é elaborada para mostrar que os parâmetros necessários estão relacionadas com conceitos familiares, como a linha de estado crítico, o parâmetro de estado, a força de pico não drenada normalizada ou o coeficiente de pressão de terra em repouso. Este é um fator importante para a boa interpretação destas roturas.

Análises efetivas (acopladas) tensão-deformação reproduzem esses comportamentos complexos ?

Estudos de vulnerabilidade baseados em análises numéricas com modelos avançados permitem estudar uma rotura generalizada por liquefação estática pode ser desencadeada por fatores inesperados (erosão de taludes...).



Computers and Geotechnics 135 (2021) 104158

Content lists available at ScienceDirect

ELSEVIER Computers and Geotechnics journal homepage: www.elsevier.com/locate/compgeo

Research Paper

Formulation and numerical implementation of a state parameter-based generalized plasticity model for mine tailings

Oswaldo Ledesma ^{a,b}, Diego Manzanal ^{b,d,*}, Alejo Sfriso ^{a,b,c}

Computers and Geotechnics 144 (2022) 104632

Content lists available at ScienceDirect

ELSEVIER Computers and Geotechnics journal homepage: www.elsevier.com/locate/compgeo

Procedure for assessing the liquefaction vulnerability of tailings dams

Oswaldo Ledesma ^a, Alejo Sfriso ^{a,b,c}, Diego Manzanal ^{c,d,*}

Caracterização física e hidromecânica em laboratório dos solos amostrados na bacia remanescente do colapso da barragem

Fizemos isso, estando descrito parcialmente no artigo
Viana da Fonseca et al., Soils and Rocks 45(2):e2022001122 (2022)

Soils and Rocks







An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering

www.soilsandrocks.com

ISSN 1980-9743
ISSN-e 2675-5475



The mechanics of iron tailings from laboratory tests on reconstituted samples collected in post-mortem Dam I in Brumadinho

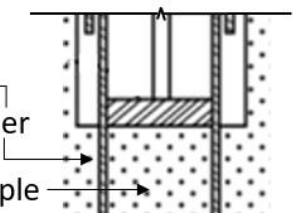
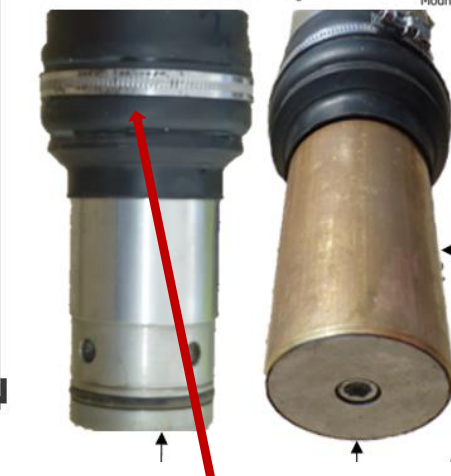
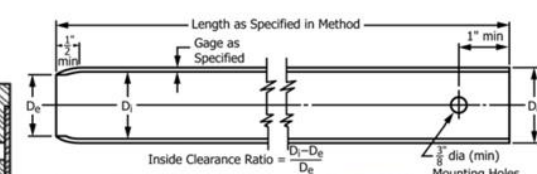
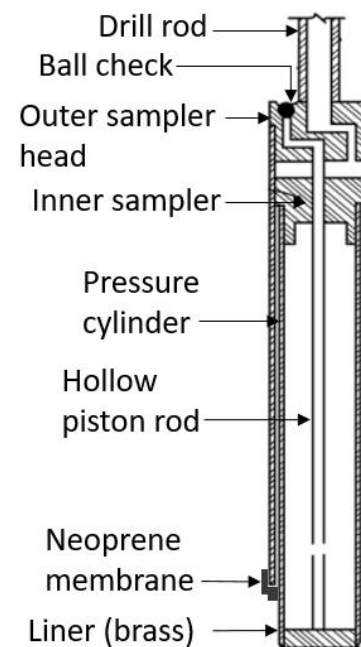
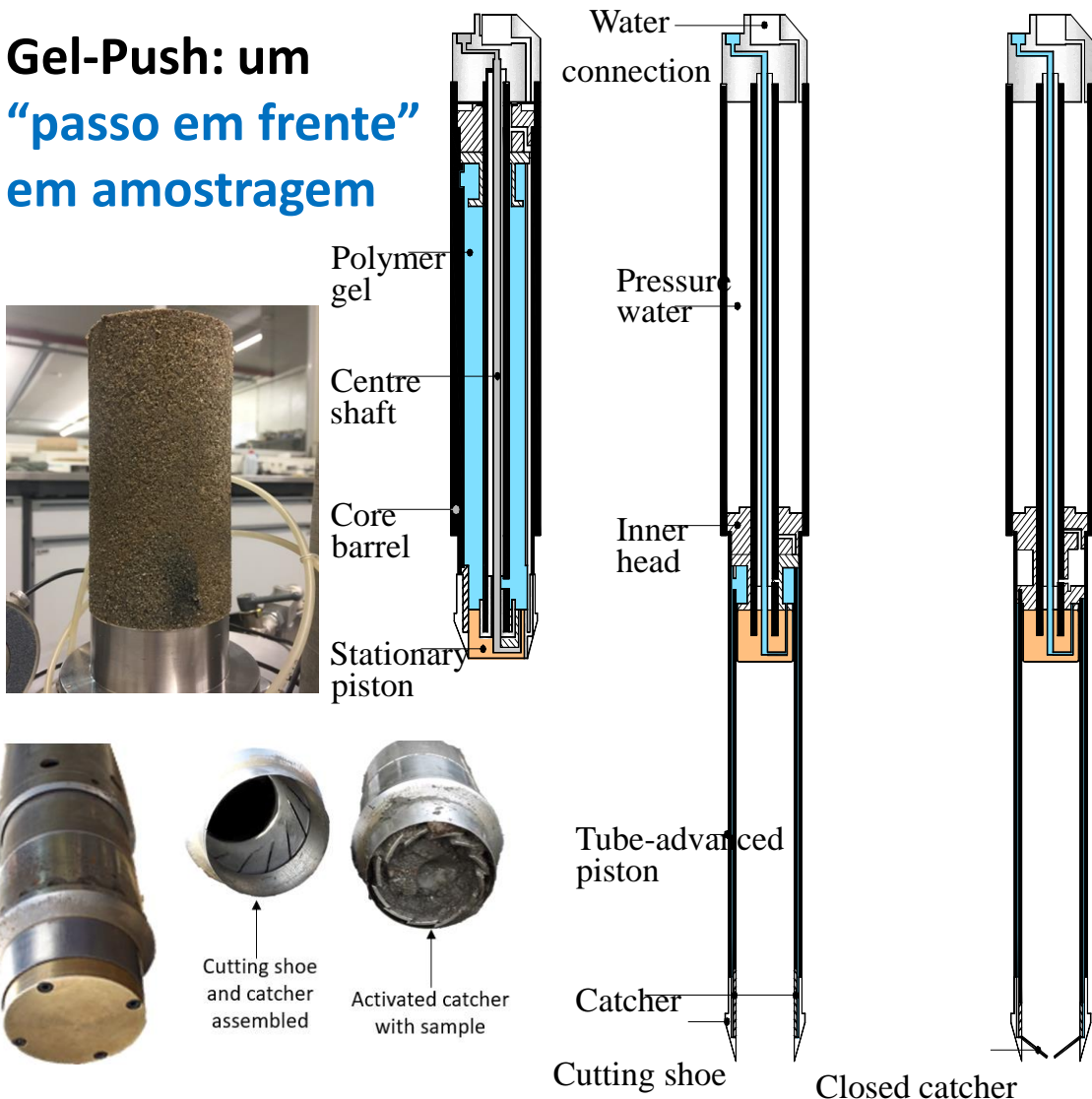
António Viana da Fonseca¹ , Diana Cordeiro¹ , Fausto Molina-Gómez¹ ,
Davide Besenon^{1,2} , António Fonseca¹ , Cristiana Ferreira^{1#} 

Article

<https://doi.org/10.28927/SR.2022.001122>

Para estudar esses mecanismos, devemos ter resultados de ensaios em amostras representativas (**indeformadas!**) ... mas não havia disponíveis resultados de **técnicas avançadas de amostragem**

Gel-Push: um “passo em frente” em amostragem



Sampling in sandy soils
the liner into the sam

Esta manga de neoprene induz um acréscimo de sucção que segura melhor não permitindo compressão

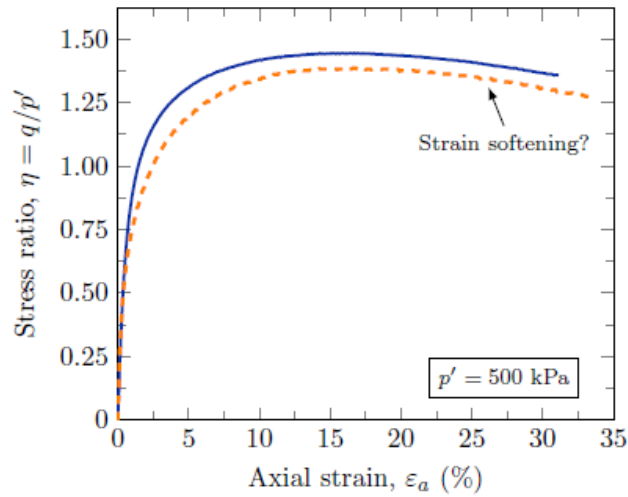


Dames & Moore: um amostrador estacionário com melhoramentos em relação aos Osterberg



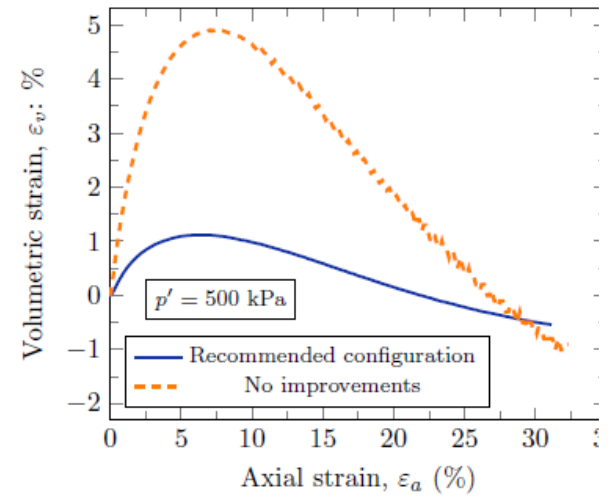
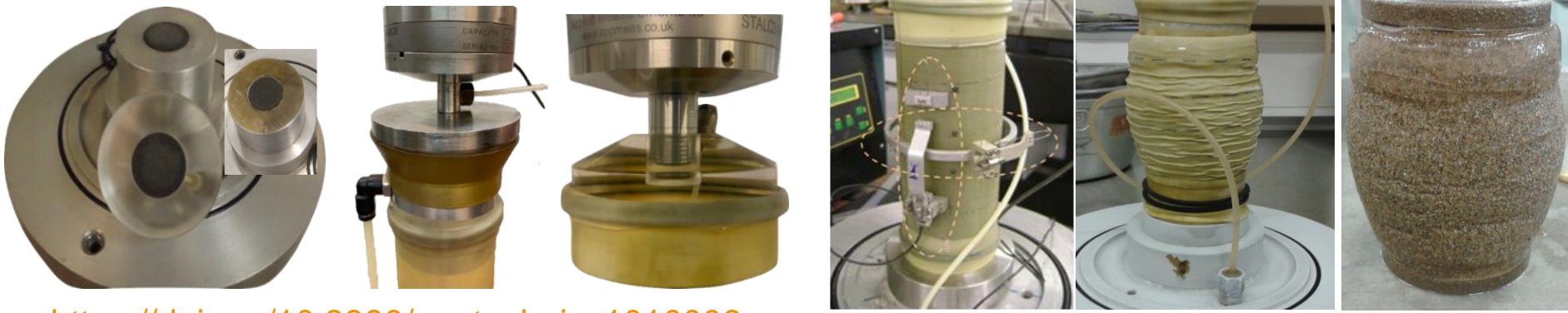
<https://paginas.fe.up.pt/~sgwww/labgeo/liq2proearth/>

Sem isso, poderíamos confiar em amostras remoldadas para definir CSL e outros parâmetros relevantes para modelação? A preparação de corpos de prova suficientemente soltos - **sem estrutura** “fábrica e cimentação” induzidas, com **deposição à colher muito leve** e confinados em célula seguindo trajetórias representativas ($K_0...$)



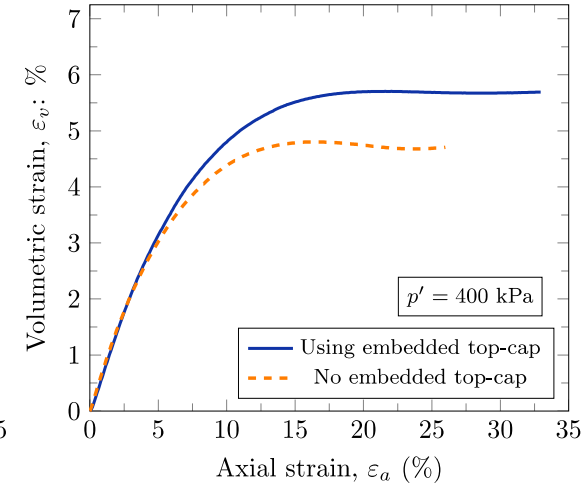
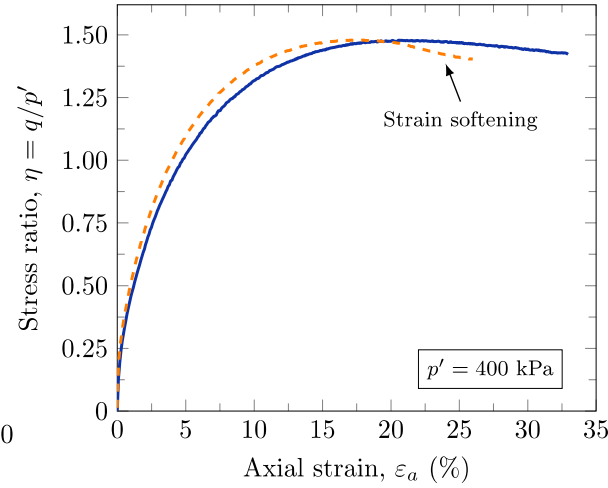
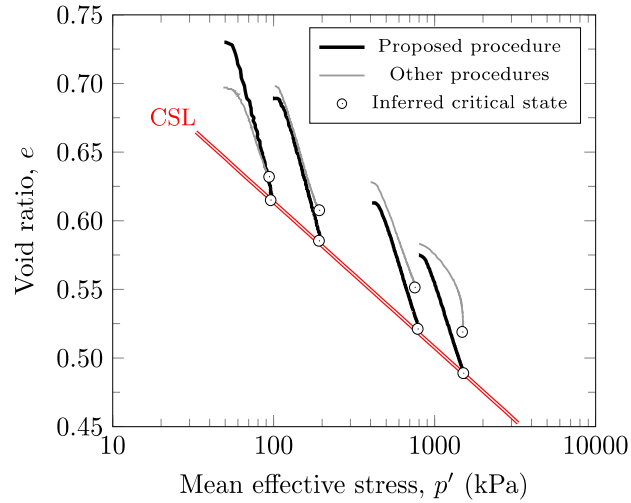
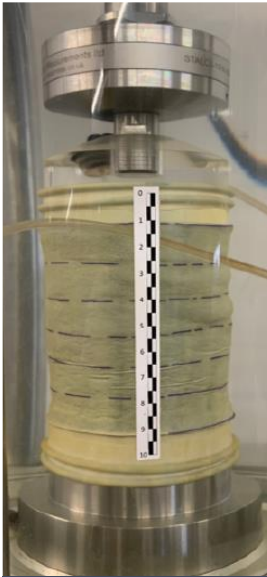
Recommended Procedures to Assess CSL from Triaxial Tests in Cohesionless Remoulded Samples

Viana da Fonseca et al. 2021



<https://doi.org/10.3390/geotechnics1010006>

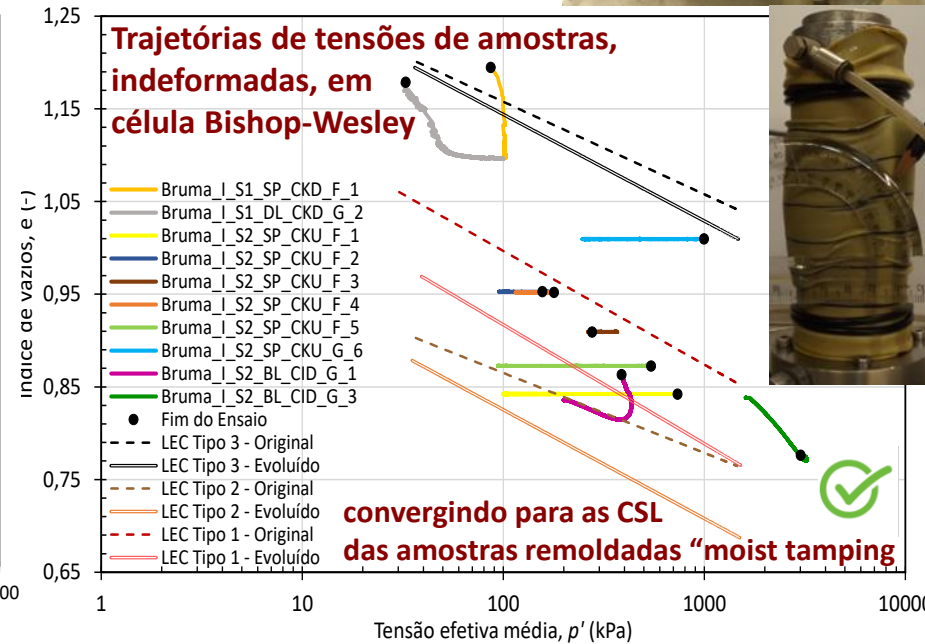
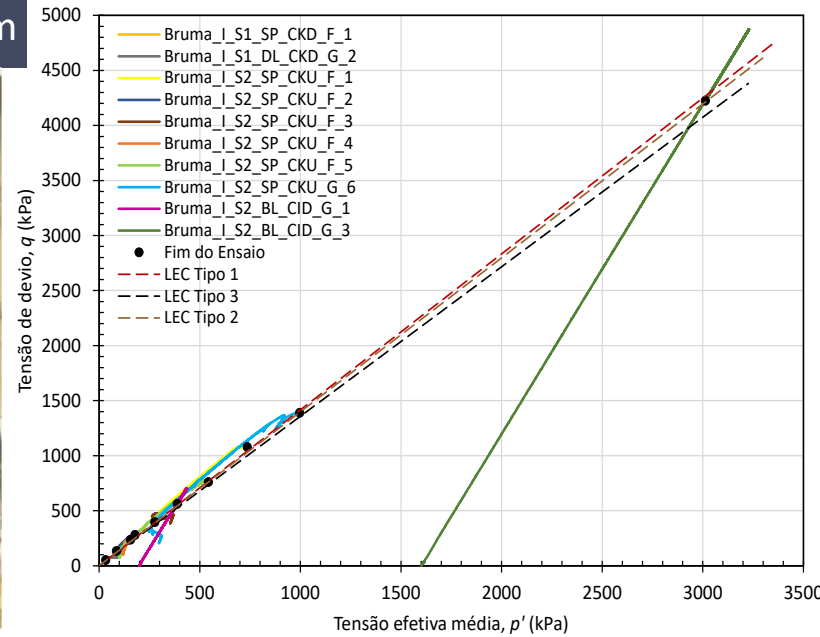
A limitação de localização marginal foi garantida com extremidades lubrificadas e pistão guiado (Reid et al. 2021)



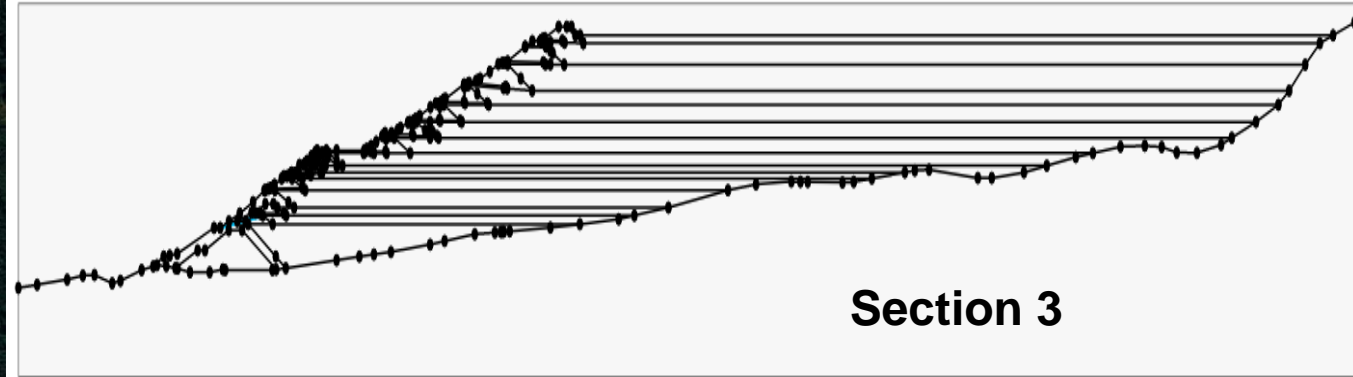
CSL de amostras INDEFORMADAS convergem



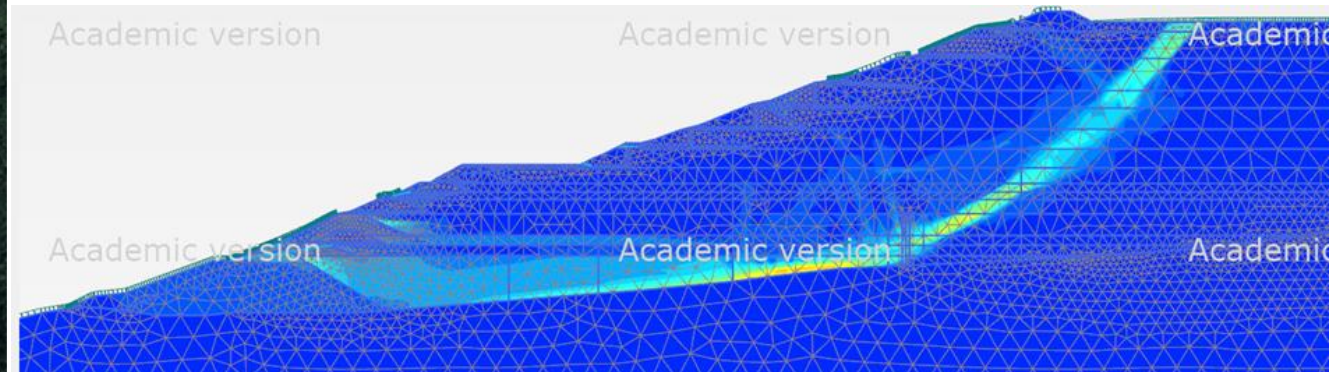
I.S2-SP-CKU



B1 - A história de 50 anos de deposição de lama *espigotada* - areias siltosas / siltes arenosos, rejeitos pesados e "slimes"

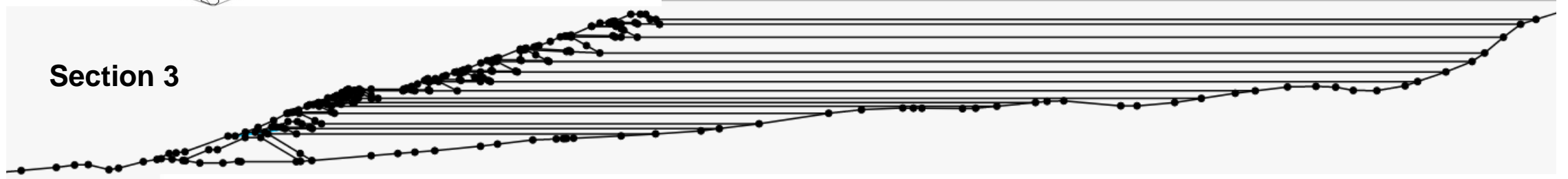
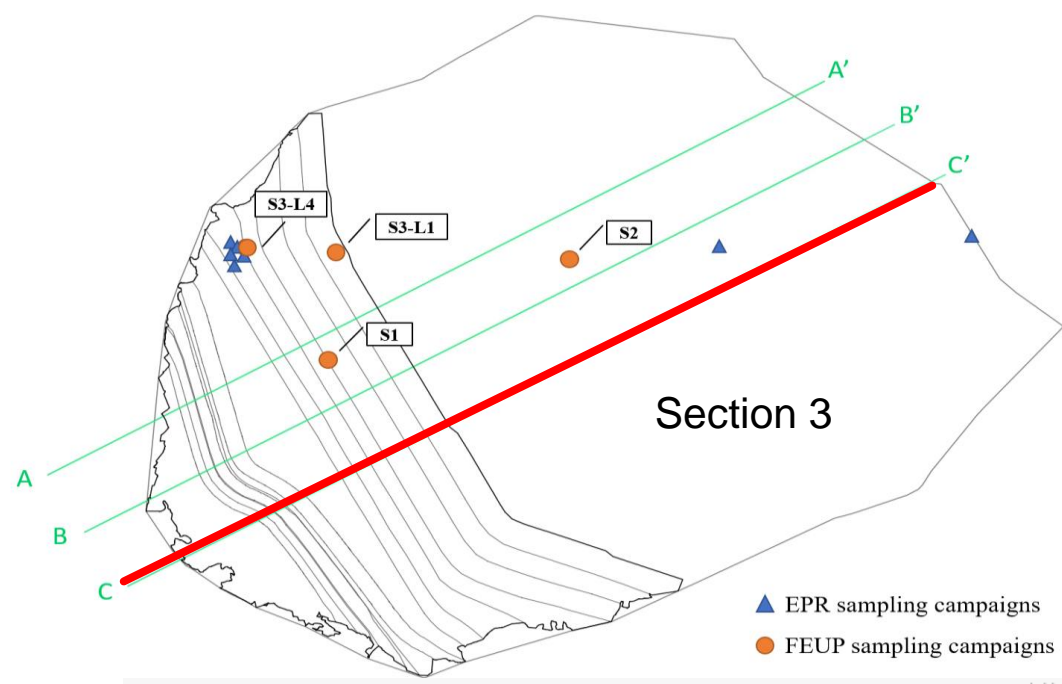


Constata-se bem a propagação da cedência por liquefação na secção 3: a partir dos contornos de deformações de cisalhamento de fase prévia ao colapso

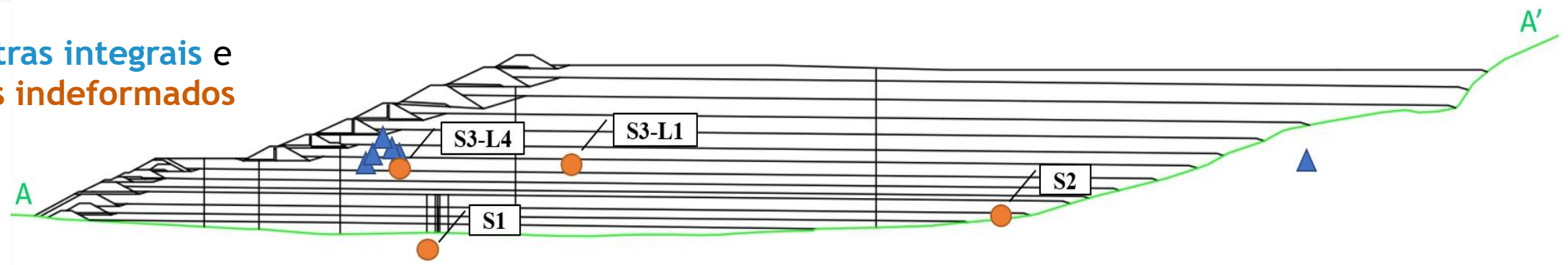


As considerações de resposta do sistema na barragem B1 tiveram que preceder os Métodos Numéricos Avançados (MEF, ...) e amostras representativas implícitas (integrais e não perturbadas)

Localização dos 3 locais experimentais para as diferentes campanhas de amostragem aqui projetada em posição: a) vista plana da barragem; b) ao lado da seção da barragem.



Amostras integrais e blocos indeformados



Campanhas de amostragem Post-mortem (integrais e indeformadas)



estão muito em consonância com dois dos CPTU mais informativos

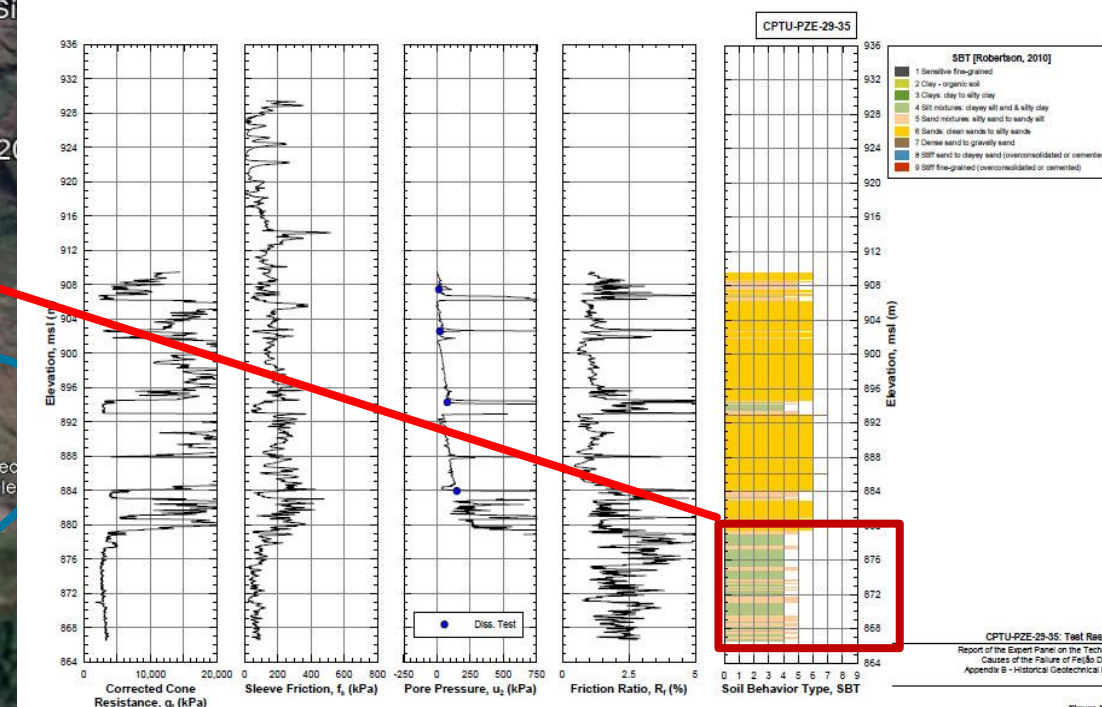
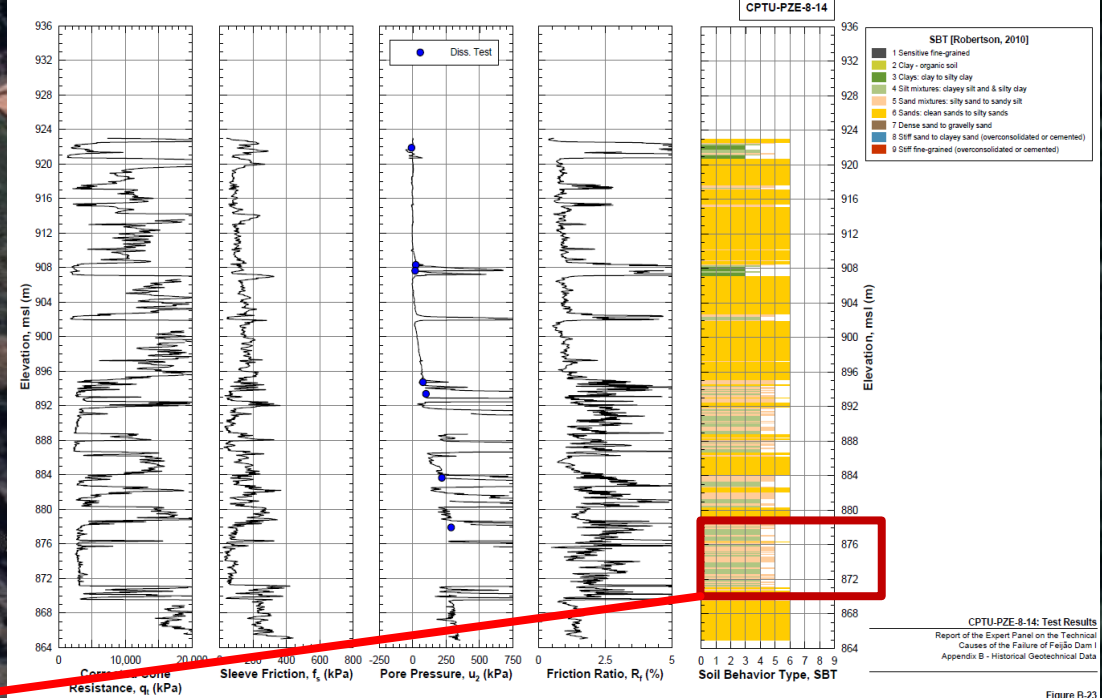
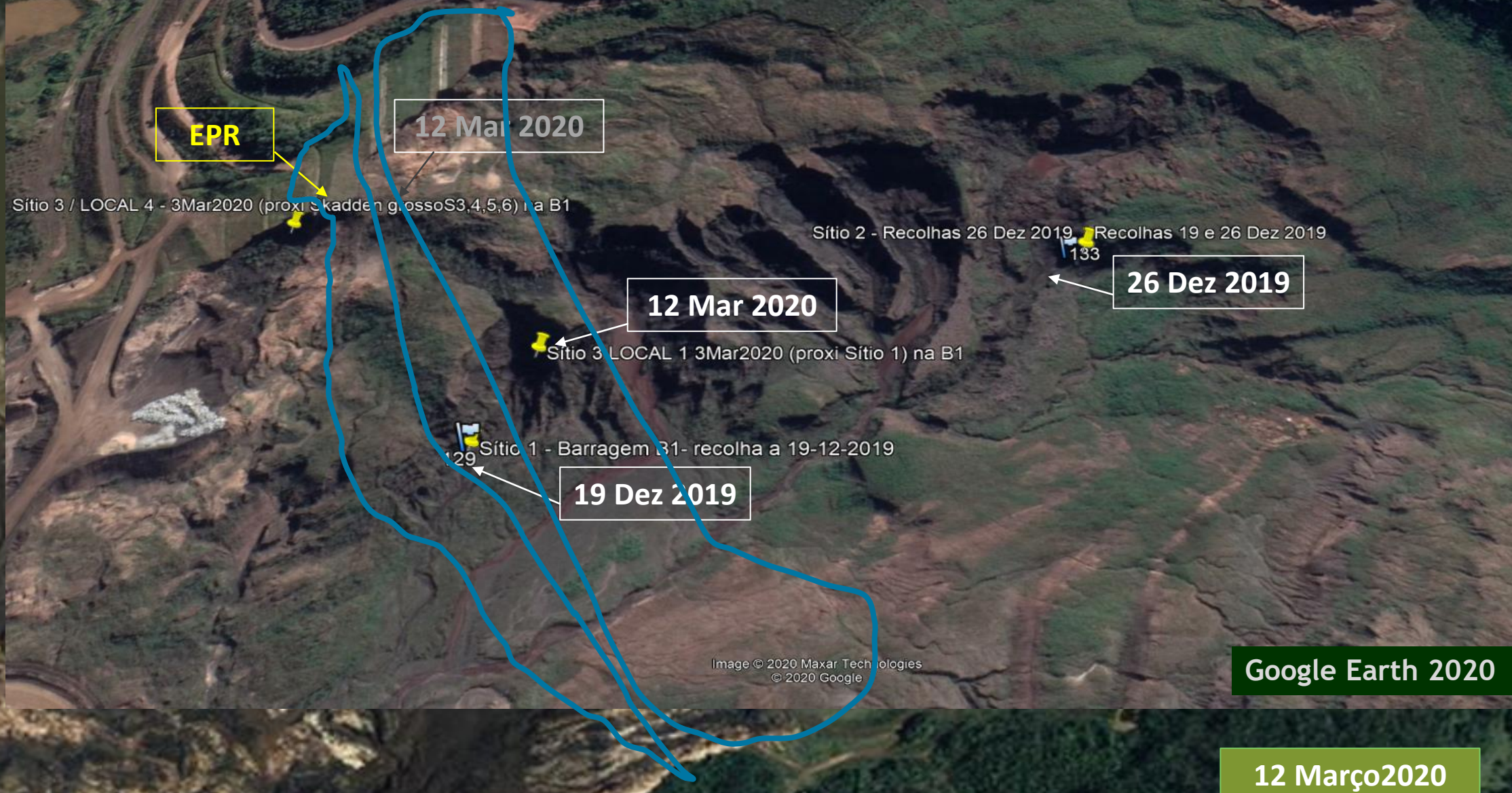


Image © 2020 Maxar Technologies
© 2020 Google

Campanhas de amostragem Post-mortem (integrais e indeformadas)



Assim tivemos que ir fundo na barragem B1 - amostras representativas em grandes blocos preservados (inteiros e indeformados)

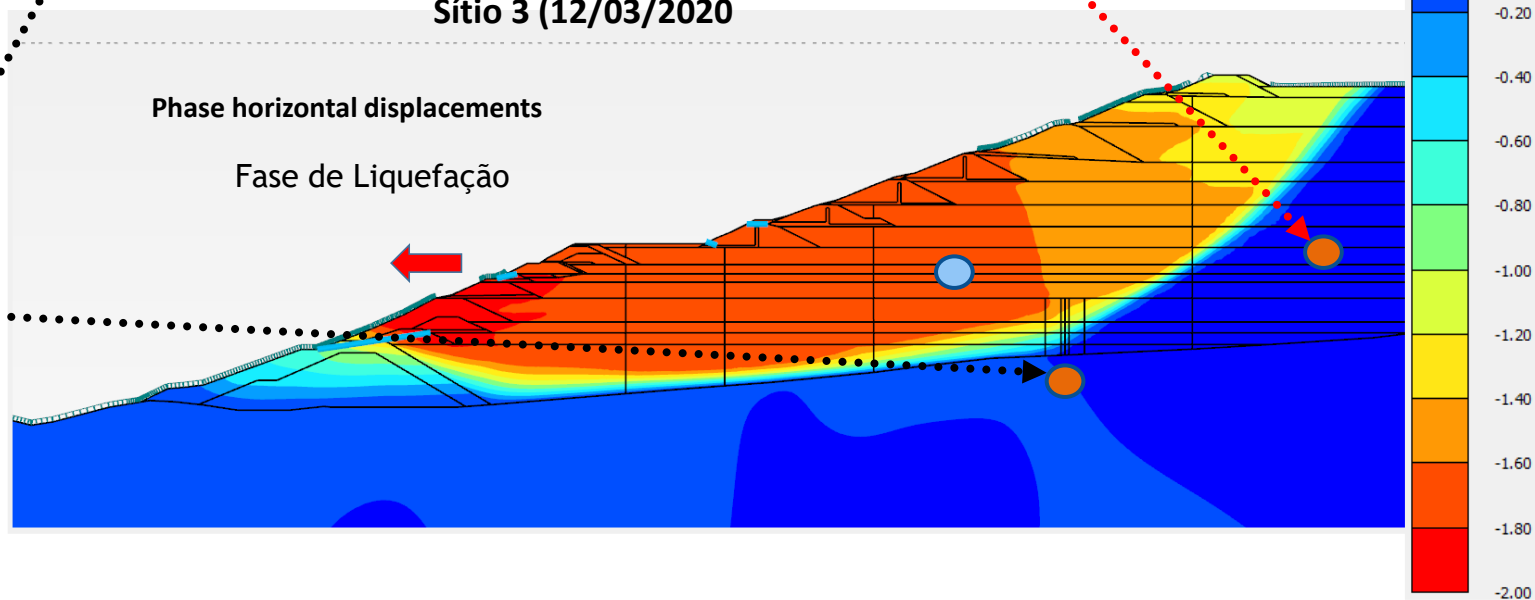
Geometria da Seção 3



Sítio 3 (12/03/2020)



Sítio 1 (12/19/2019)



amostragem post-mortem B1 -sítio 3

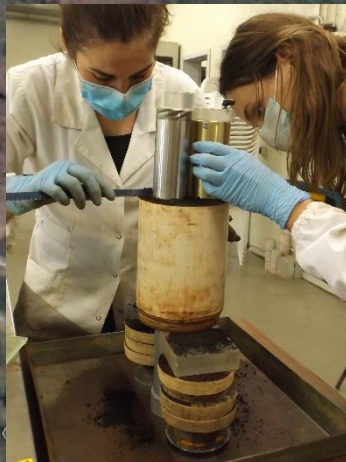
12 Mar 2020



Sítio L4



Location ID	Sample No. – Tailings Type
S1	bag 1 - Slimes
	bag 2 - Slimes
	bag 3 - Slimes
	bag 4 - Slimes
S2	bag 1 - Slimes
	bag 2 - Slimes
S3	bag 1 - Coarse Tailings
	bag 2 - Coarse Tailings
S4	bag 1 - Coarse Tailings
	bag 2 - Coarse Tailings
	bag 3 - Coarse Tailings
S5	bag 1 - Coarse Tailings
	bag 2 - Coarse Tailings
S6	bag 1 - Coarse Tailings

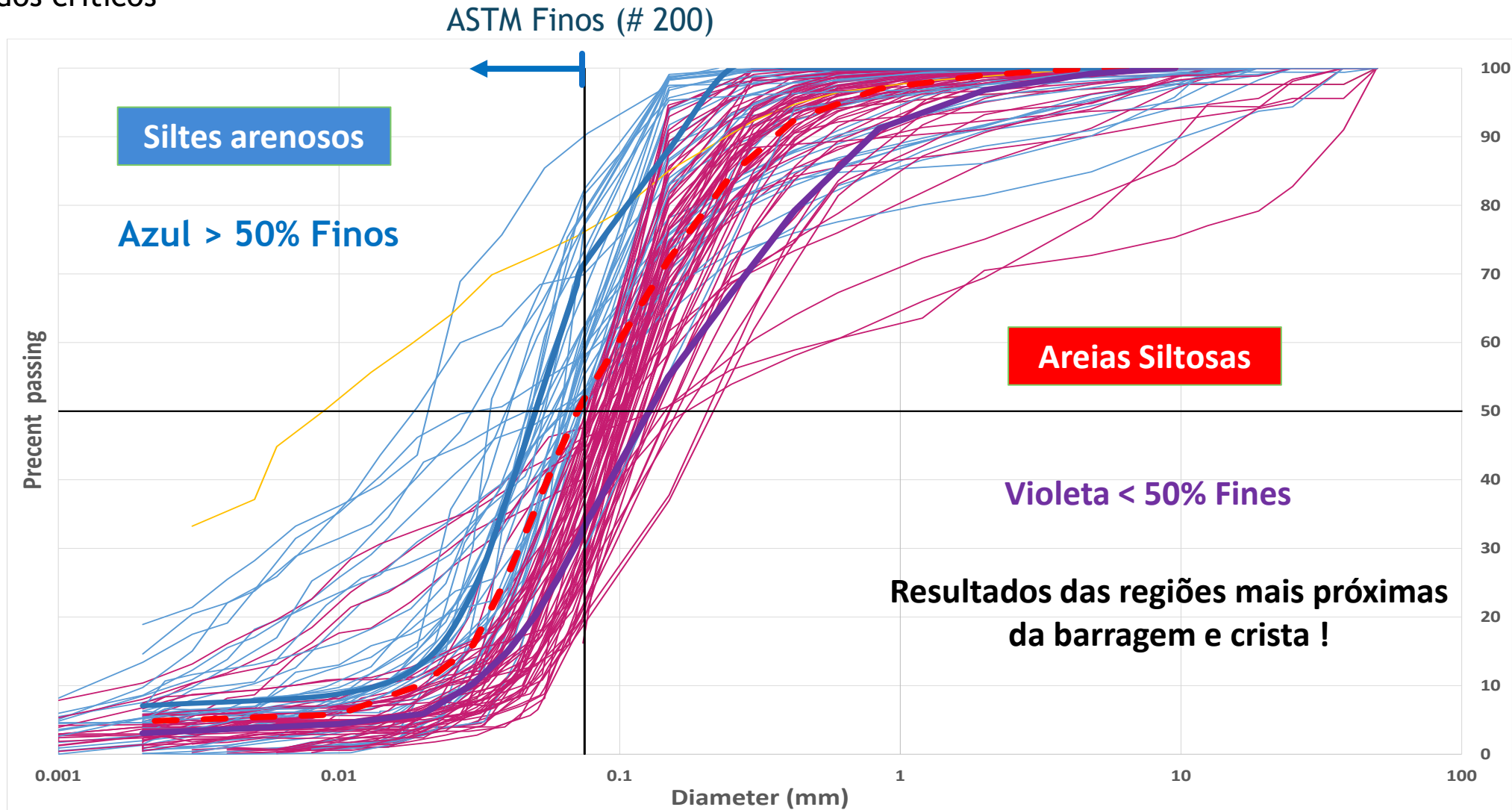


Amostras indeformadas: tubos de parede fina moldados diretamente e blocos

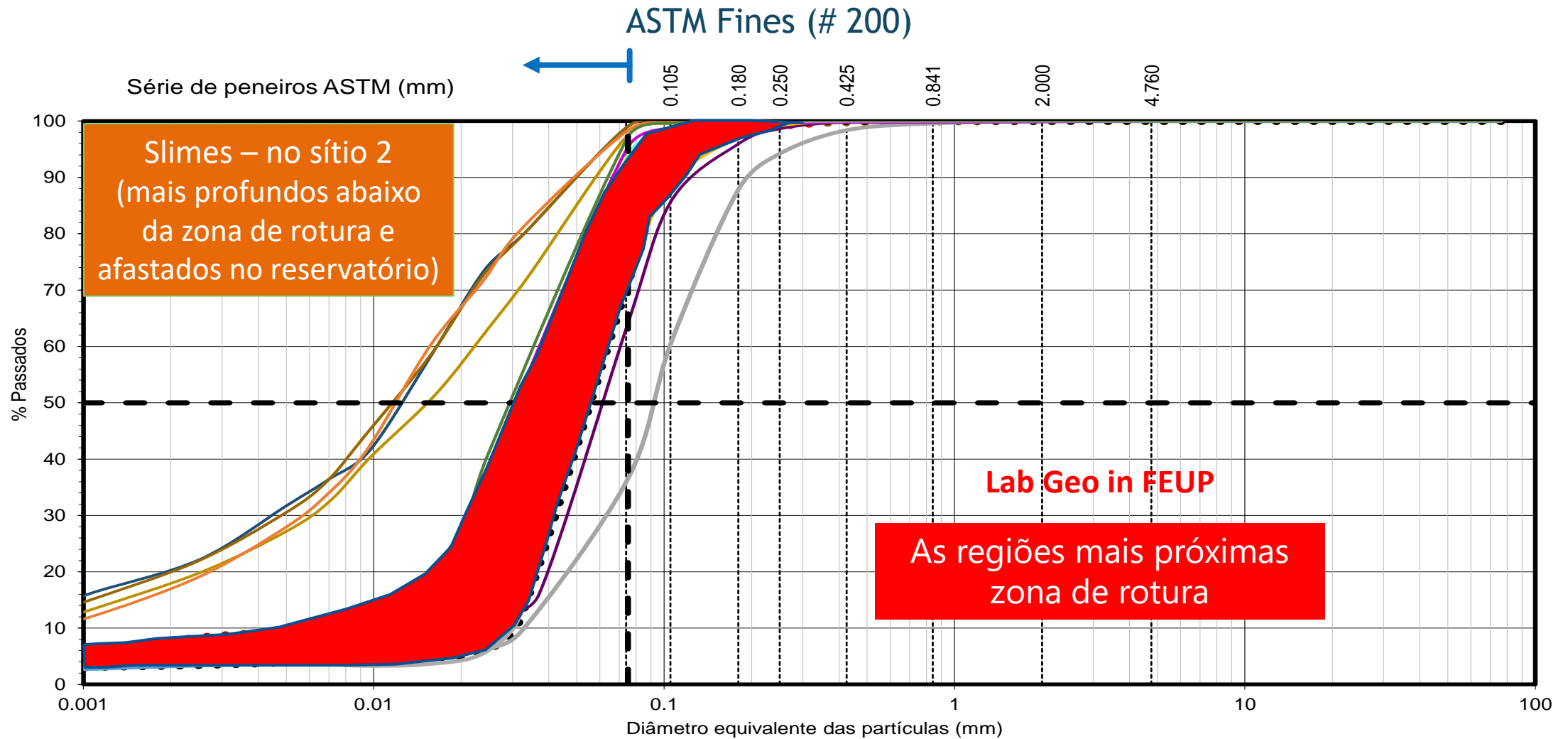


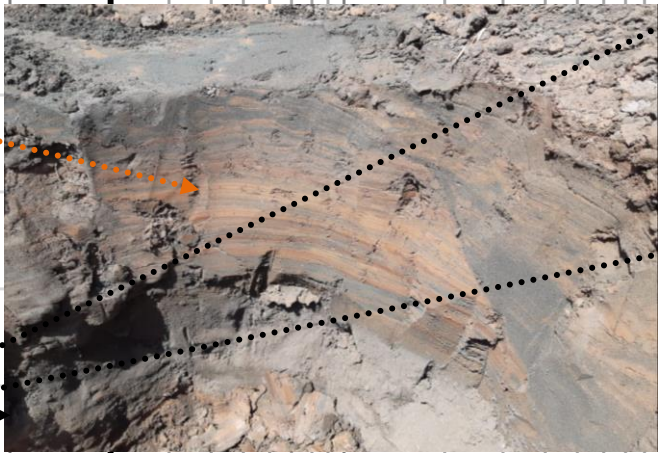
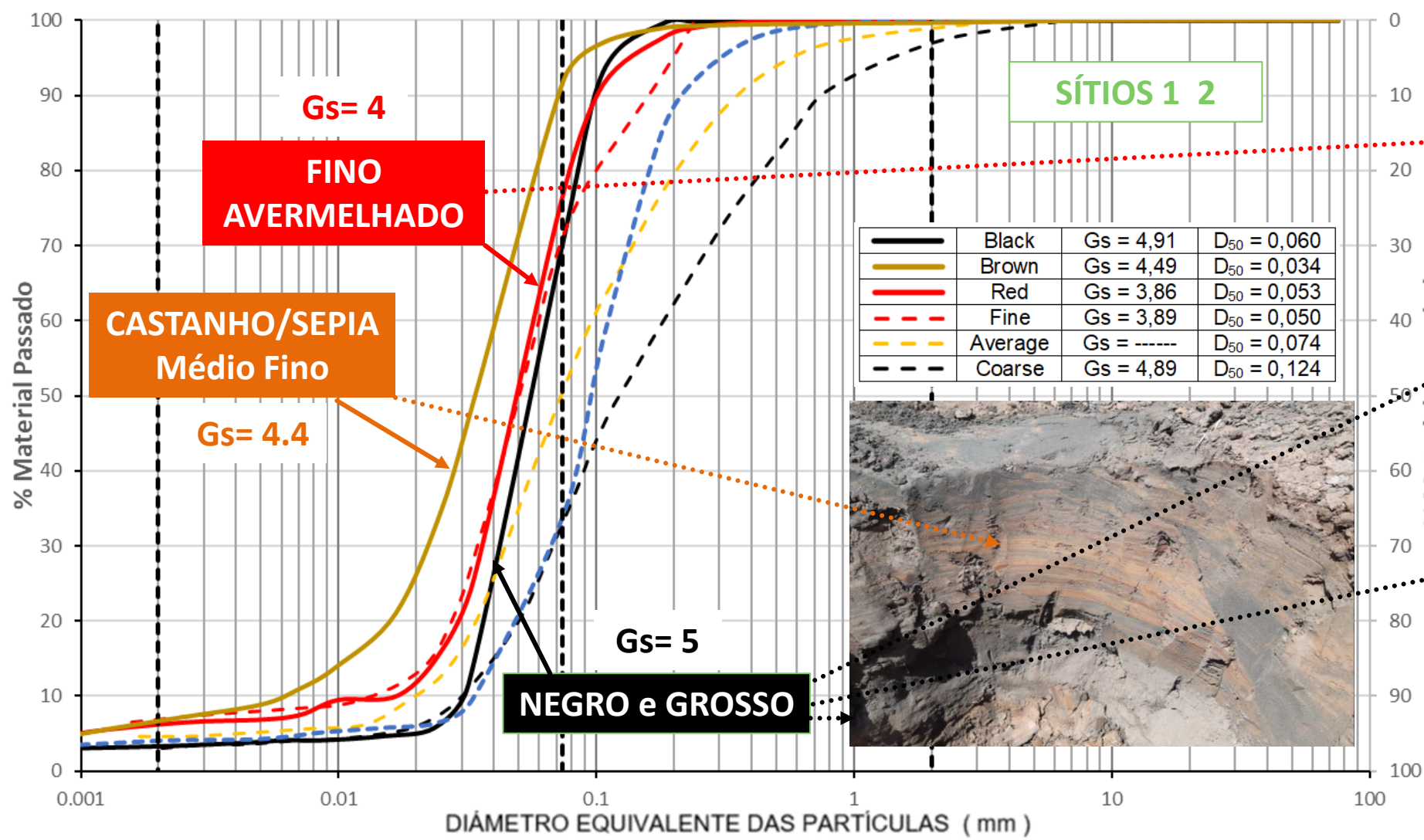
Resultados históricos disponíveis (214 amostras - integrais)

Com resultados de ensaios mecânicos revelando comportamentos dilatantes e erráticos; sem interpretações à luz da teoria dos estados críticos



Amostras FEUP – deformadas integrais - corpos de prova remoldados - e indeformadas

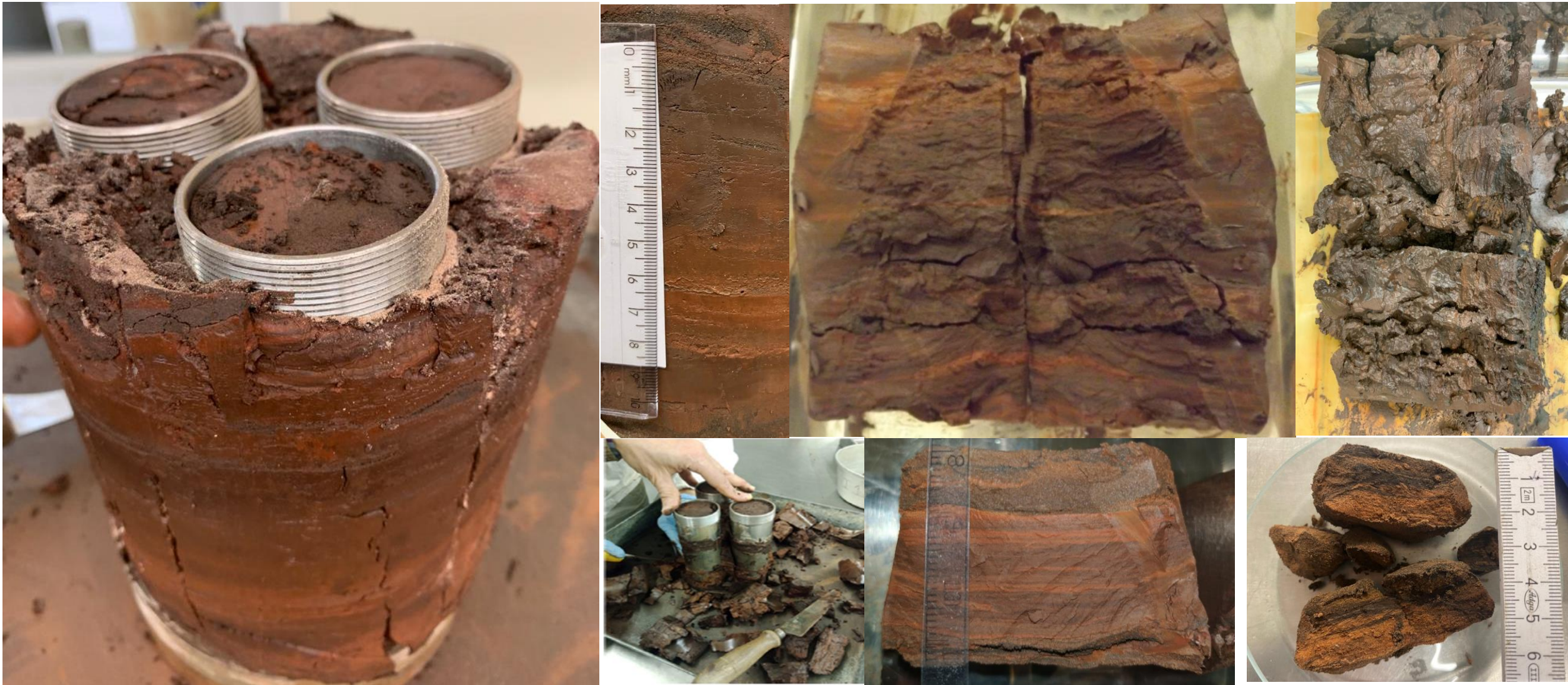




ARGIL	SILTE			AREIA			CASCALHO			CALHAU
	FINO	MÉDIO	GROSSO	FINA	MÉDIA	GROSSA	FINO	MÉDIO	GROSSO	
	0,002	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6	2	6	20	60

Amostras indeformadas: moldadas diretamente com tubos de parede delgada e blocos

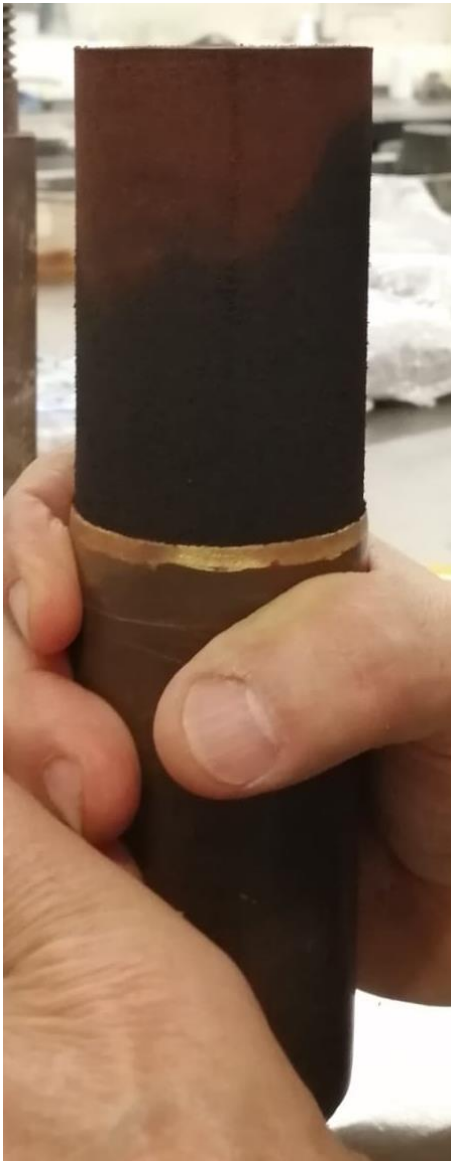
A mesma percepção observada em laboratório durante o corte e APÓS o ENSAIO (liquefeito)



Poucas amostras indeformadas: tubos e blocos de parede fina

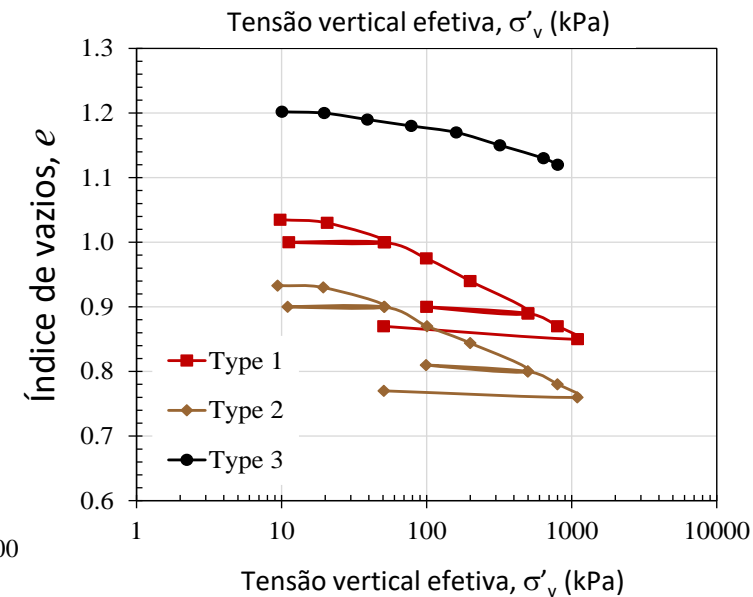
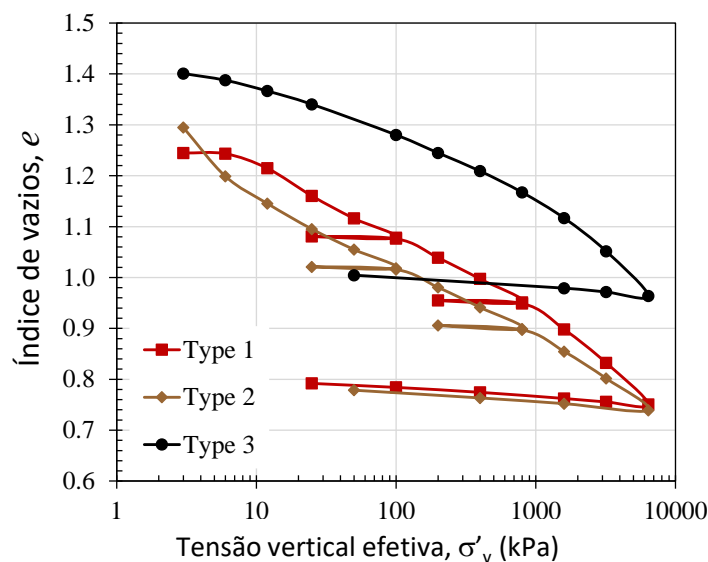
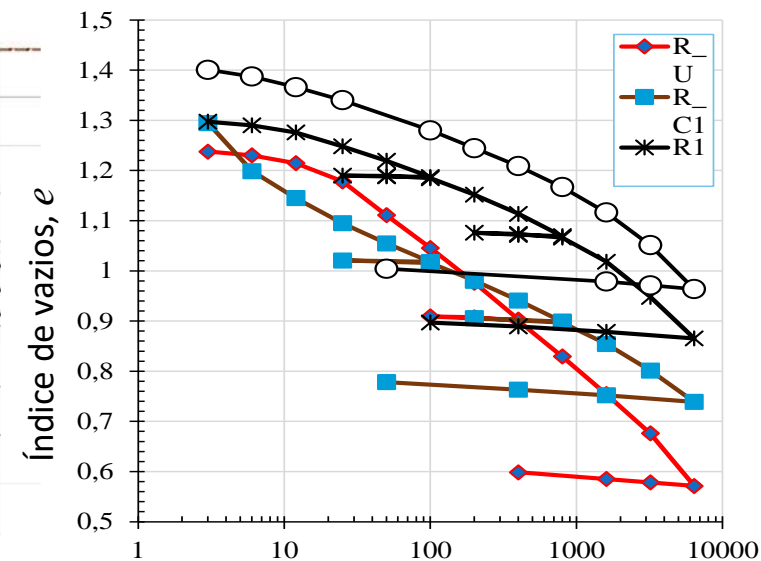
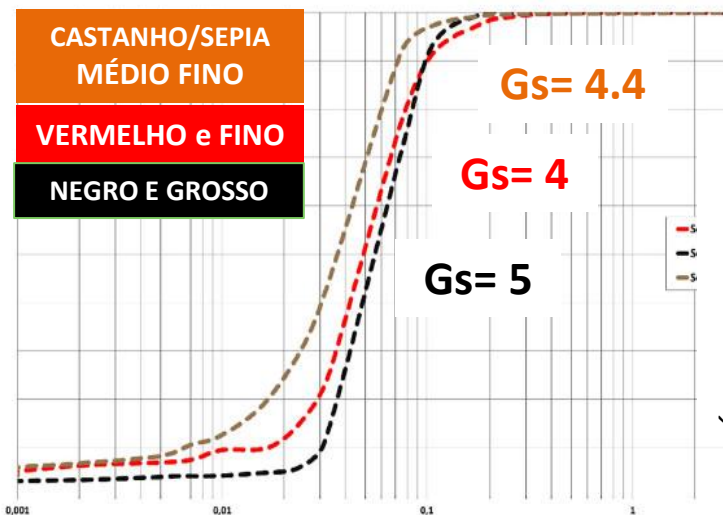
Moldagem no laboratório

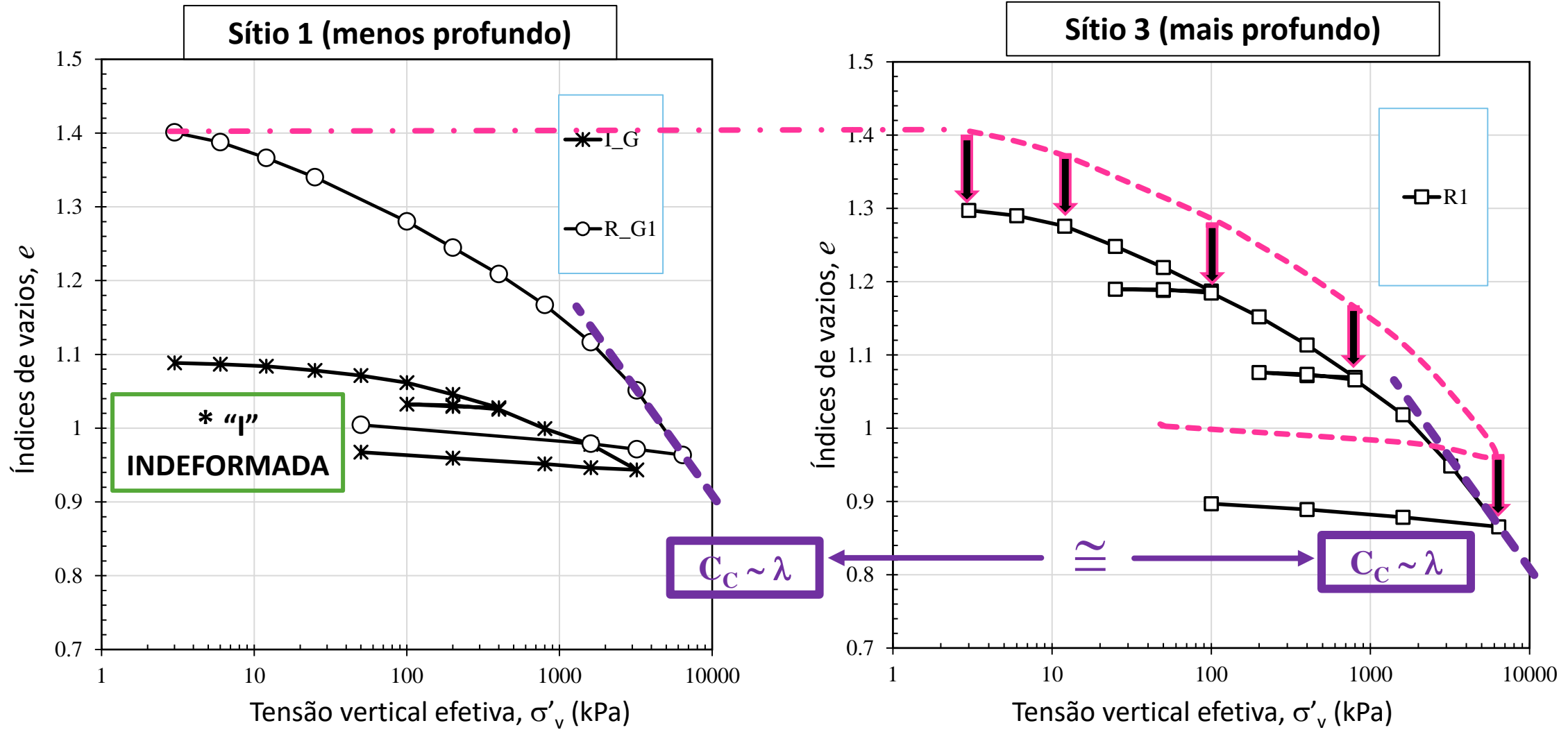
Ensaio triaxiais em compressão com leituras de ondas S e P (BE)



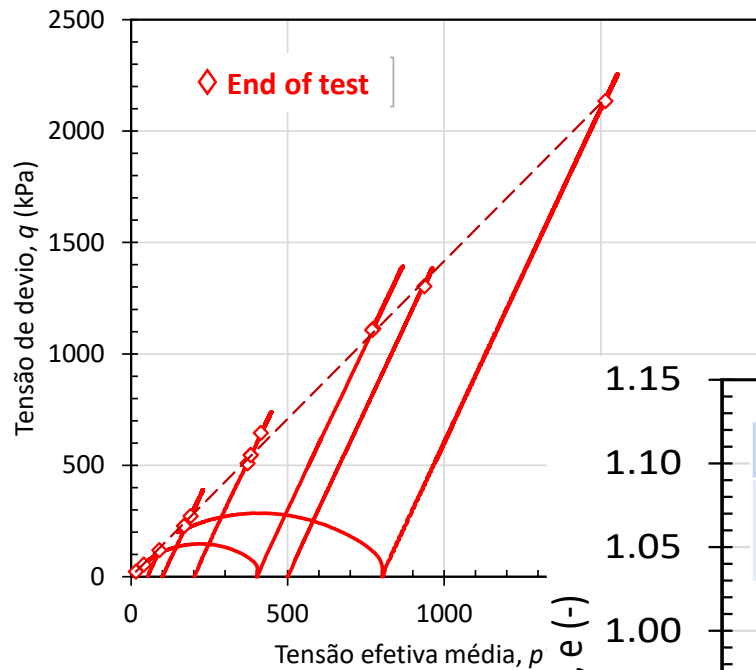
As amostras integrais da FEUP a serem reconstituídas em laboratório foram selecionadas por cores e textura nas três campanhas, seguindo o mesmo padrão e com os mesmos técnicos após "*brainstorming*" no local 1

Após uma **identificação visual precisa** da área exposta dos restos da barragem, a primeira campanha foi conduzida nas **massas implicadas na rotura (ainda de pé ou deslocadas em grandes blocos para zonas mais baixas, mas preservadas) no fundo dos rejeitos**, para o fundo da bacia da barragem destruída e em direção à margem direita. Outras duas campanhas foram realizadas tendo em vista a necessidade de recolher **tipologias distintas deste depósito e ensaiá-los de "per si"**.





Preto/pesado/AGran. similar -> clara evidência de evolução da posição da linha normalmente adensada

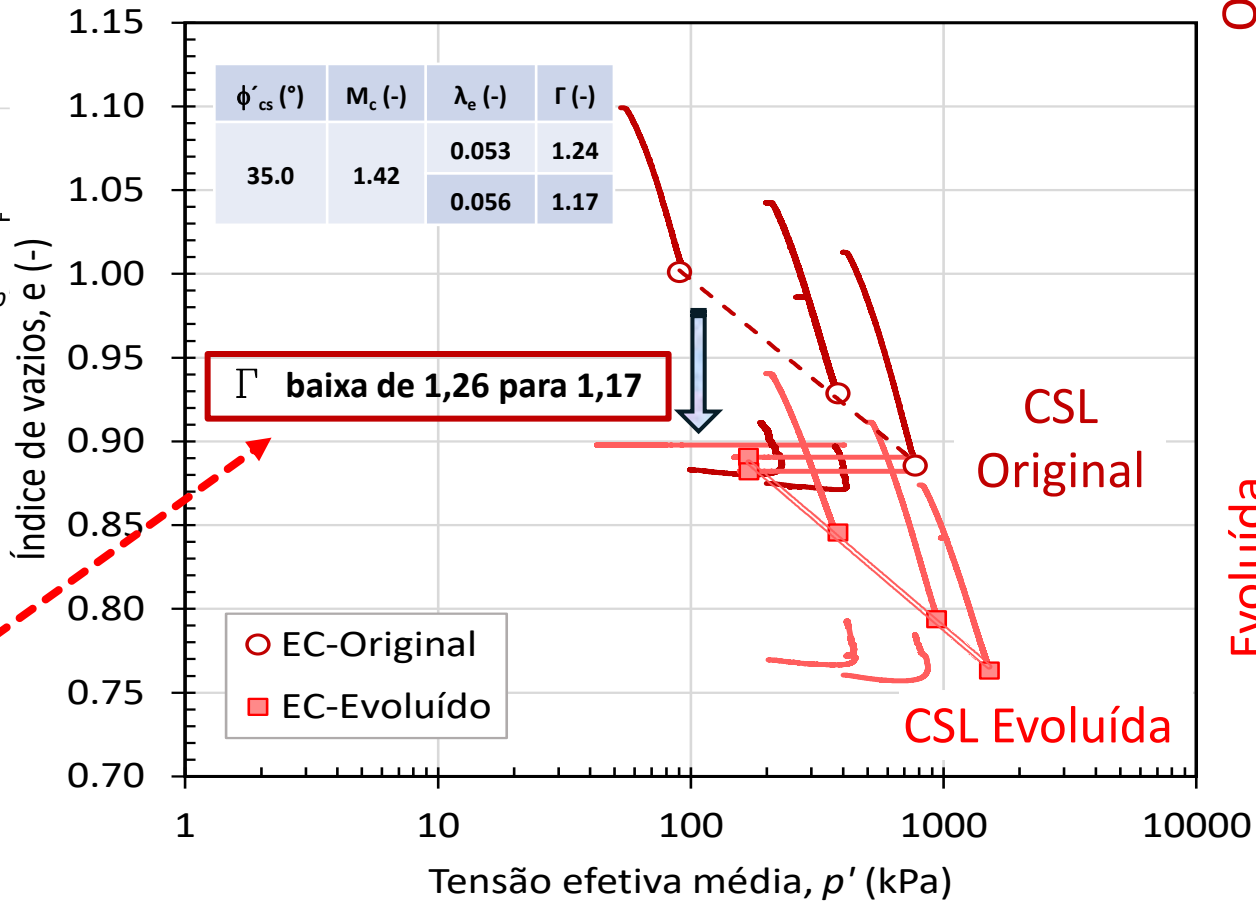


A Linha dos Estados Críticos (LEC)

A distribuição granulométrica antes e depois dessa evolução é semelhante, SEM SINAL de aumento de finos, MAS, Os SEM mostram uma evolução da MORFOLOGIA (cresce angularidade e rugosidade)

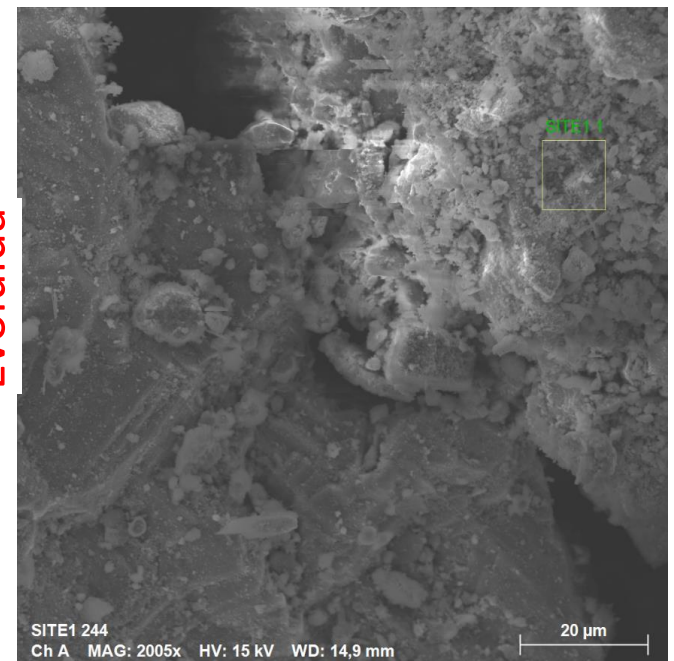
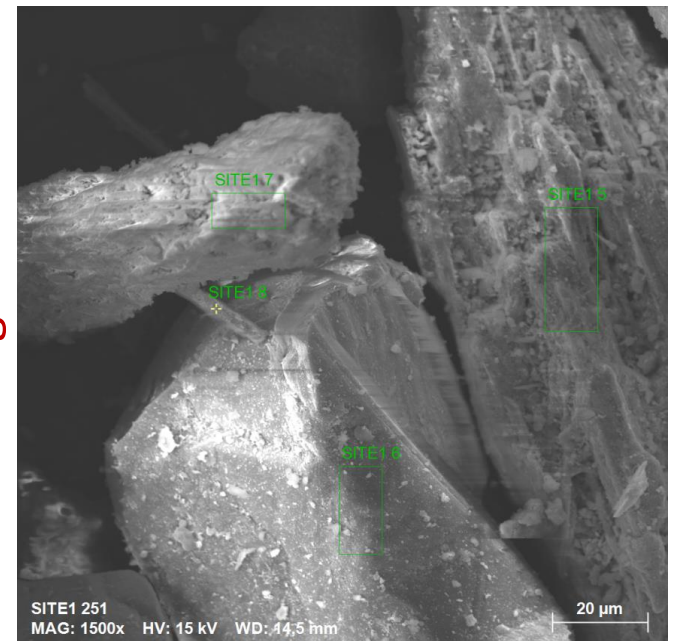
Rejeito vermelho e fino, menor % de Ferro – Tipo 1:
(a) $p'-q$; (b) $e-\log p'$

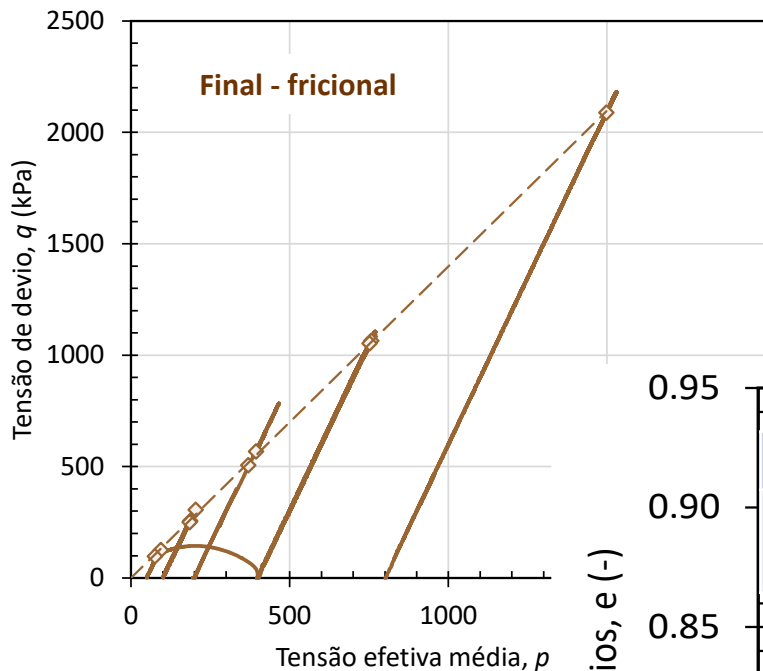
A LEC translada (DESCE)



Original

Evoluída





Linhas dos Estados Críticos

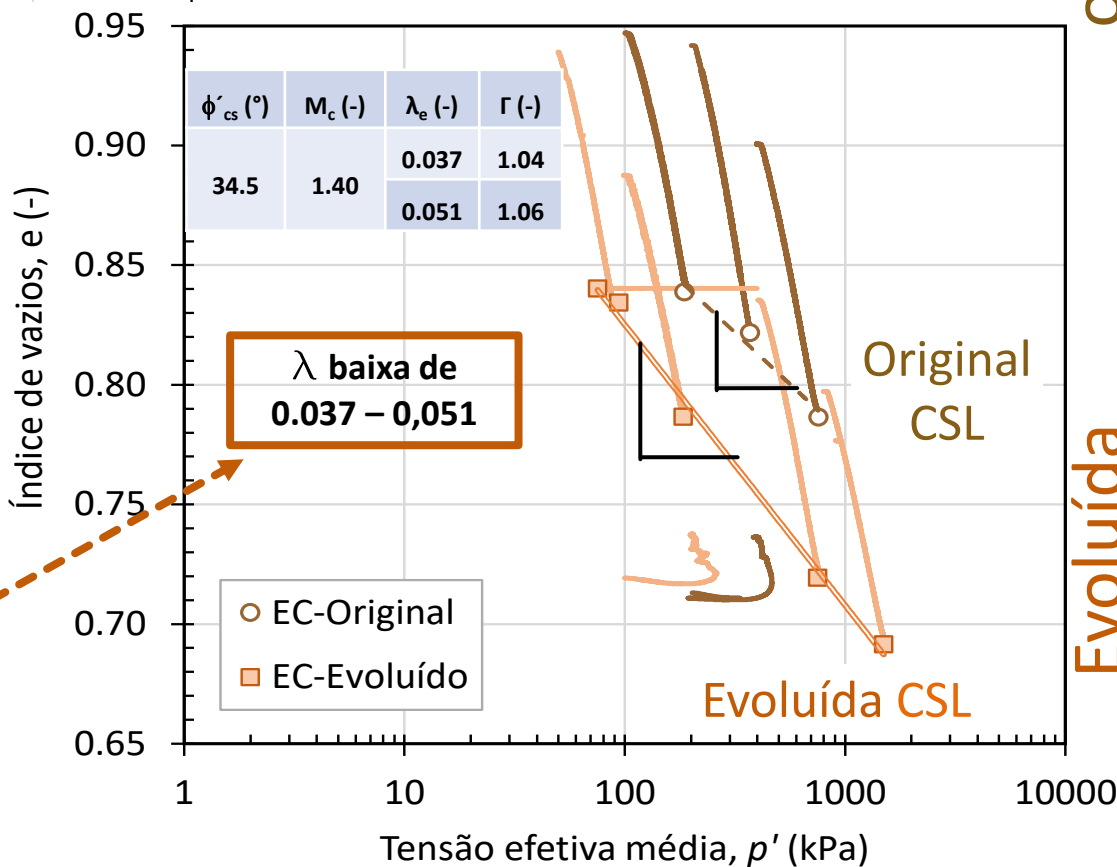
Rejeito castanho e fino,
intermédia % de Ferro– Tipo 2:

(a) $p'-q$; (b) $e-\log p'$

A inclinação da
LEC aumenta

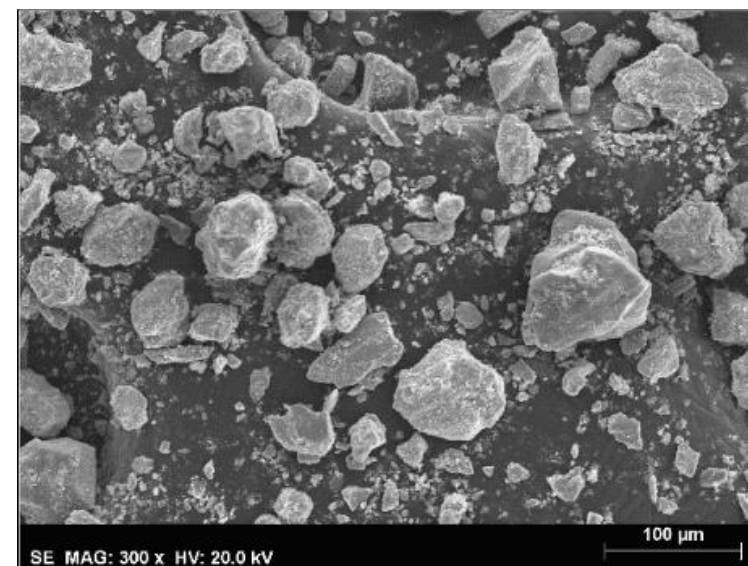
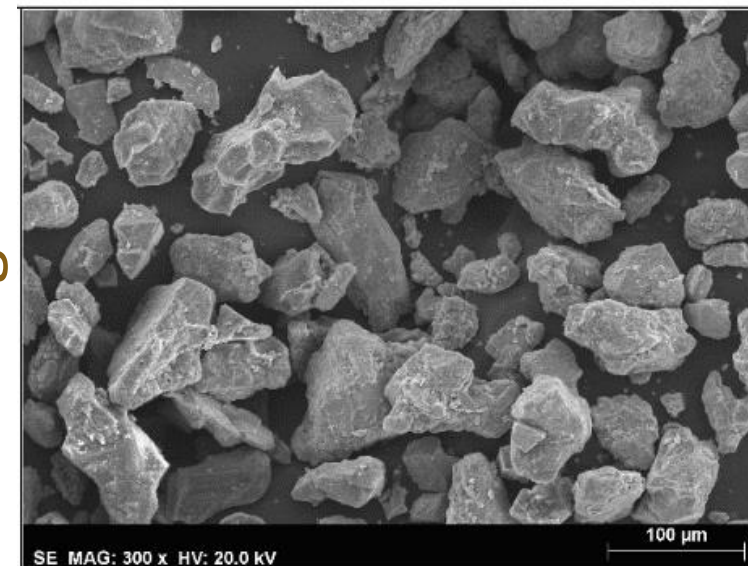
A distribuição granulométrica antes e depois dessa evolução não é muito distinta, mas há algum aumento de finos, MAS,

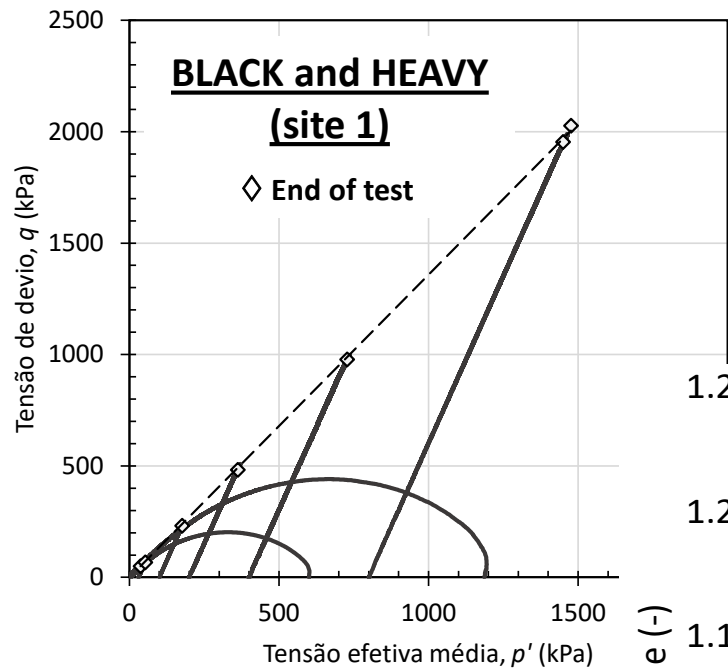
Os SEM mostram uma evolução da MORFOLOGIA (cresce a angularidade e rugosidade)



original

Evoluída





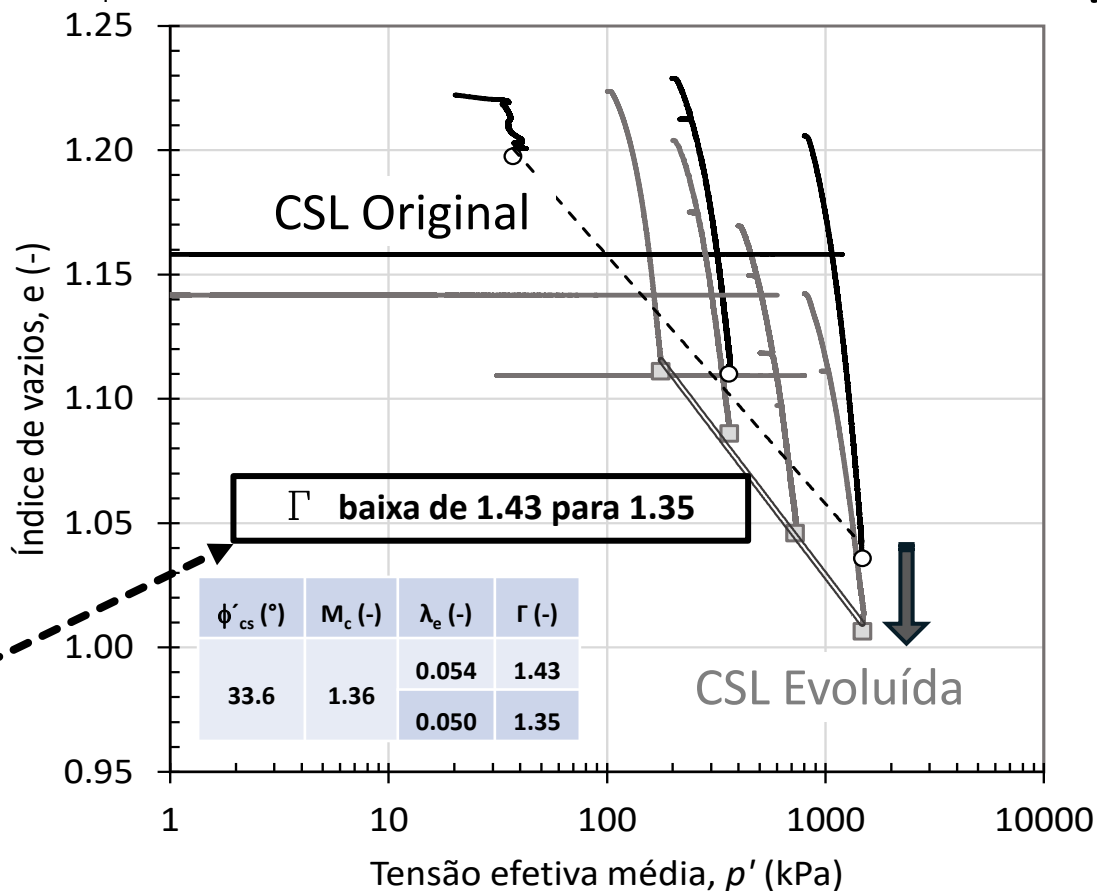
Linhas dos Estados Críticos

Rejeito castanho e grosso,
elevada % de Ferro– Tipo 3:
(a) $p'-q$; (b) $e-\log p'$

**A LEC translada
(DESCE)**

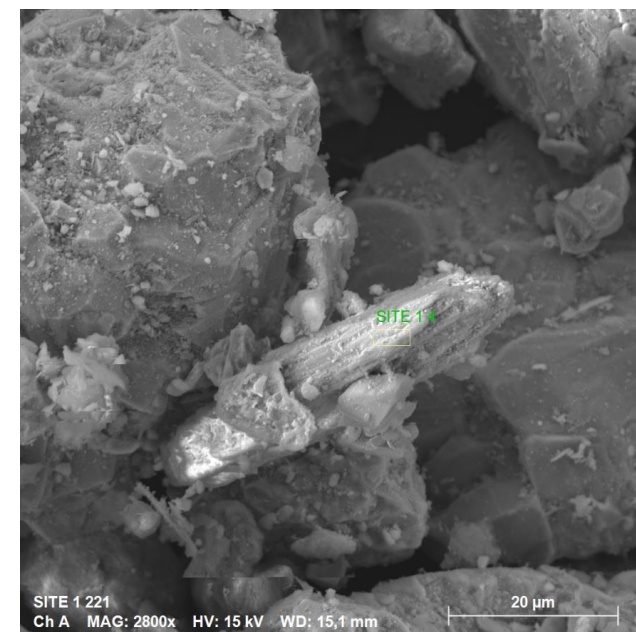
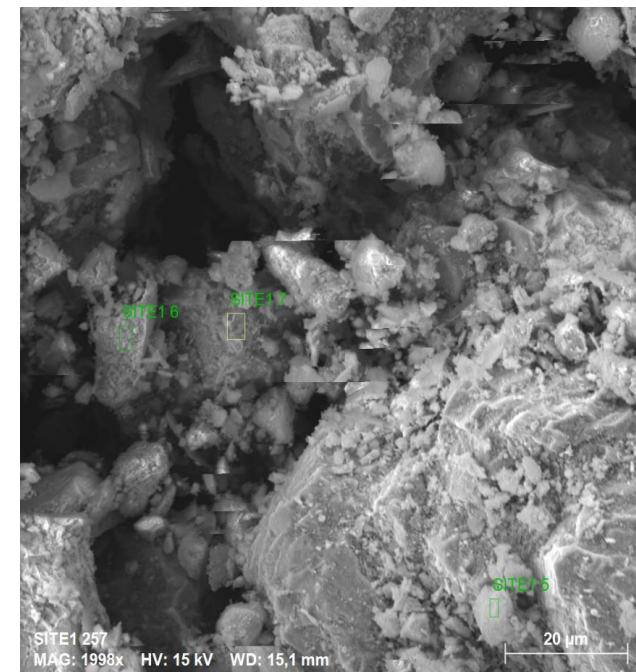
A distribuição granulométrica antes e depois
dessa evolução é IGUAL, SEM SINAL de
aumento de finos, MAS,

Os SEM mostram uma evolução
da MORFOLOGIA (cresce mais a
angularidade e menos a rugosidade)

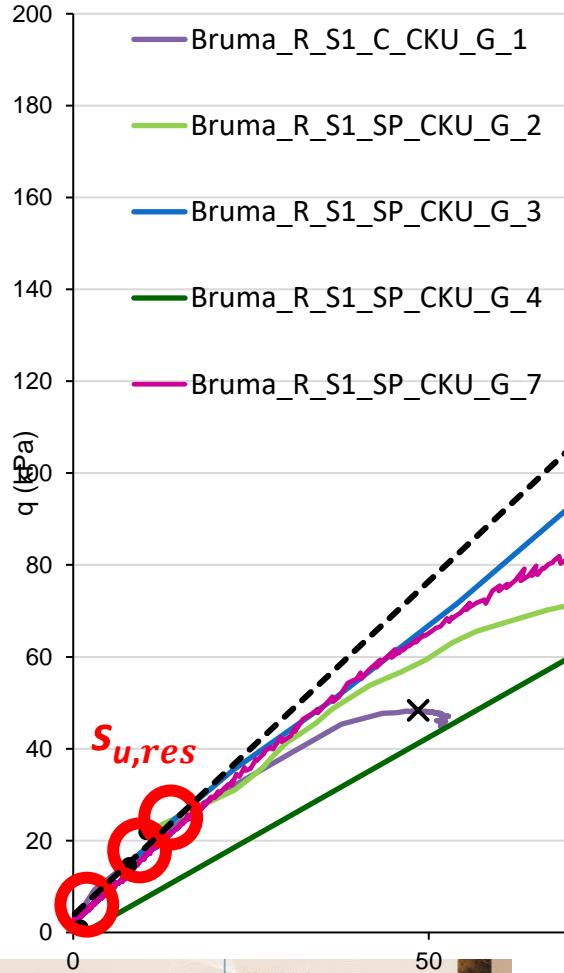
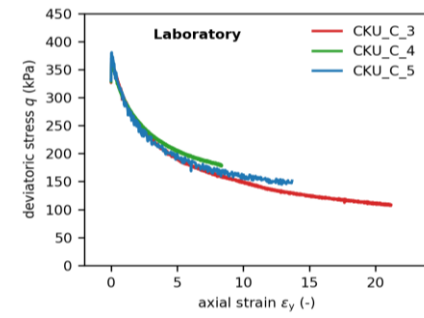
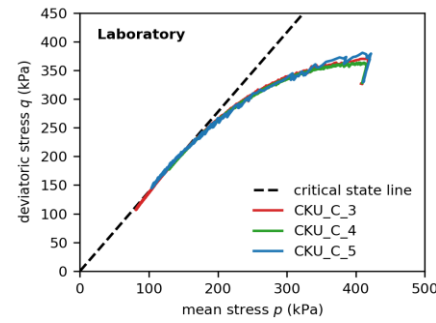


original

Evoluída

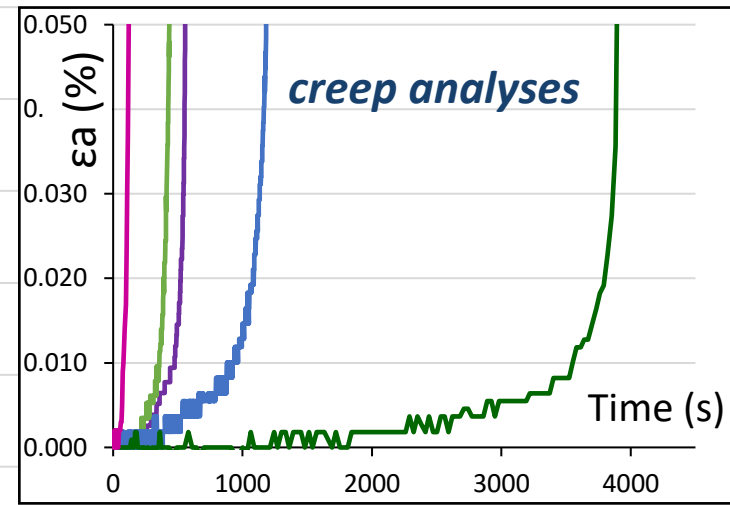


Ensaio CK₀U com deformação controlada conduzidos com distintas velocidades

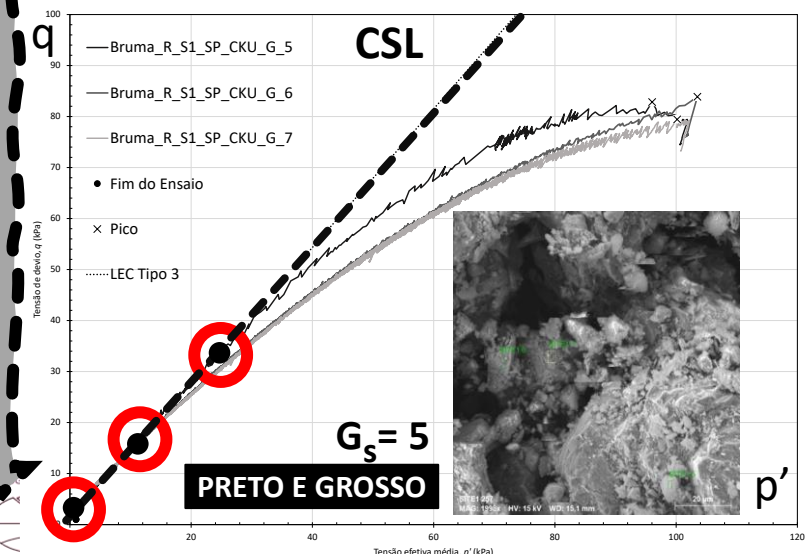
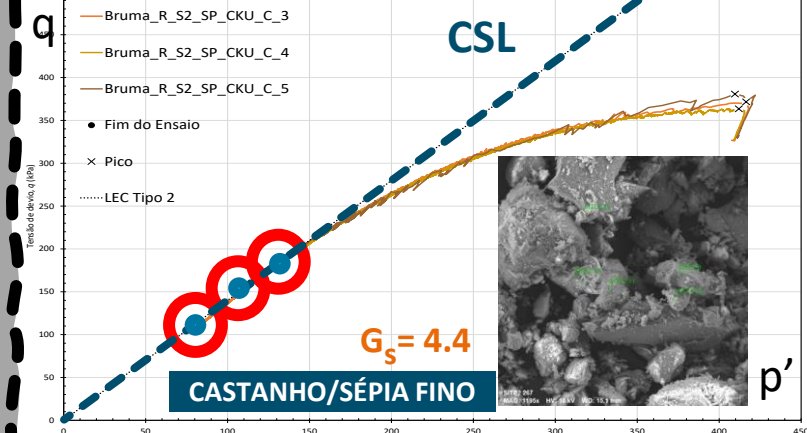
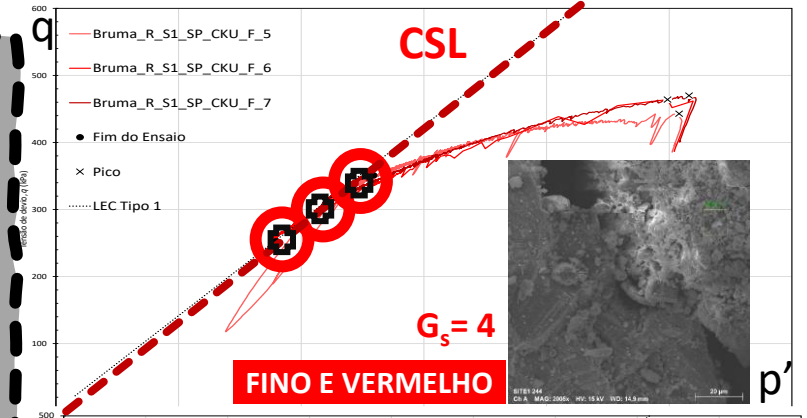


Trajatórias de tensão em ensaios não drenados a partir de confinamento $K_0=0,5$ CONDUZIDOS COM VELOCIDADES DE DEFORMAÇÃO DISTINTAS: 0.2; 0.02 & 0.002 mm/min

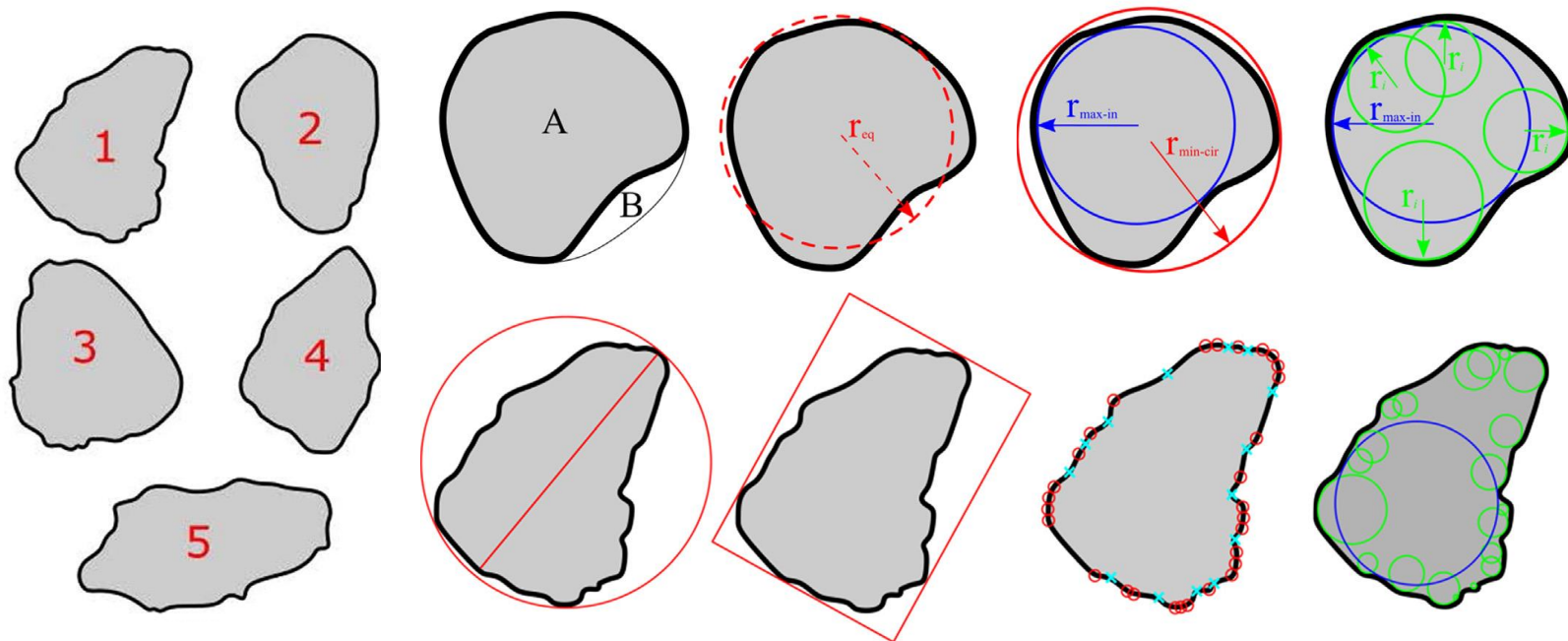
Não há sinais de "strain rate dependency"



Decrescente com a redondeza/rugosidade



A forma da partícula tem uma forte influência nos índices de vazios extremos (e_{max} e e_{min}) e em várias propriedades mecânicas, tais como a rigidez de pequena deformação (G_0), resistência ao cisalhamento nas areias. A título de exemplo, a areia angular das margens de Lisboa (*a areia TP foi envolvida pelo enorme terremoto de 1755 que destruiu a maior parte da capital e associada ao afundamento e deslizamento das lateral das edificações do Terreiro do Paço para o rio Tejo*) foi estudada no que respeita ao longamento versus largura, perímetro, área e textura. As análises foram feitas na **UCLondon** e a **morfologia das partículas** estimada com um algoritmo **MATLAB** implementado por Zheng & Hryciw (2015)



Partículas de areia TP-Lisboa: fotos de partículas tiradas com um microscópio óptico; Imagens binárias de partículas selecionadas e definições gráficas de parâmetros de forma de partícula (**índices morfológicos quantitativos**): (a) **convexidade**, (b) **Circularidade**; c) **Esfericidade**; d) **Redondeza** (Molina-Gómez, Viana da Fonseca (2021). *Soils & Foundations* 61, 836–856)

Estes são os resultados da análise da forma das partículas, mostrando que as partículas da areia TP-Lisbon são predominantemente subangulares de acordo com o Shape-Angularity Group Indicator (SAGI = 11,76) proposto por Altuhafi et al. (2016). Esta classificação indicou que as partículas da areia TP-Lisbon têm uma morfologia semelhante às areias naturais de sílica, como Ticino e Toyoura.

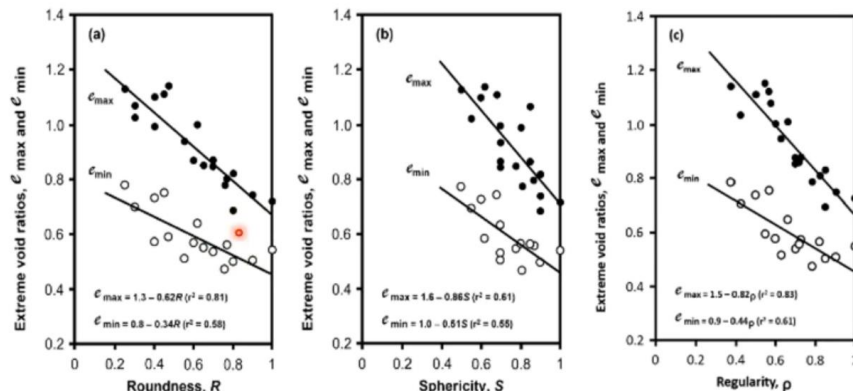
Parâmetros de forma TP-Sand

Particle shape parameter	Mathematical definition	Value
Convexity	$Cx = \frac{A}{A+B}$	0.95
Circularity	$Ci = \frac{2\sqrt{\pi A_p}}{P_p}$	0.88
Roundness	$R = \frac{\sum_{i=1}^N (r_i/N)}{r_{max}}$	0.38
Sphericity	$S = \frac{r_{max}-in}{r_{min}-cir}$	0.72
Regularity	$\rho = \frac{S+R}{2}$	0.55

Um índice descritivo alternativo é a REGULARIDADE, ρ

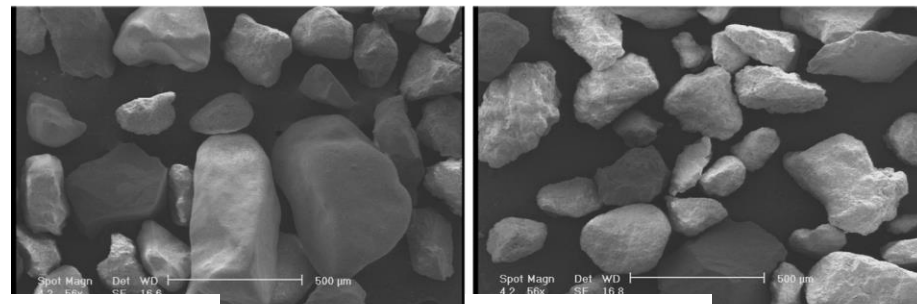
Cho et al. (2006)

$$\rho = (R+S)/2$$

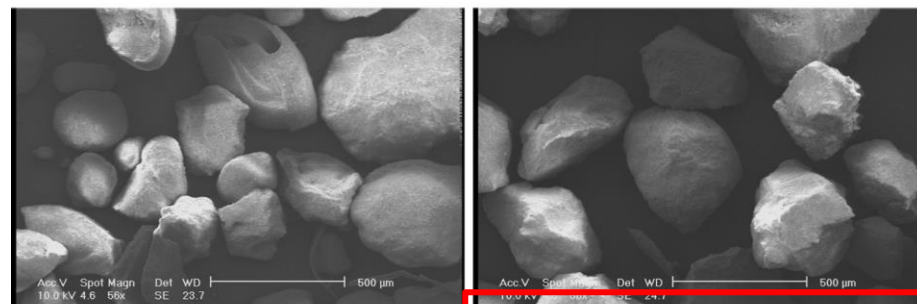


Lashkari et al. (2020) Instability... Acta Gotechnica

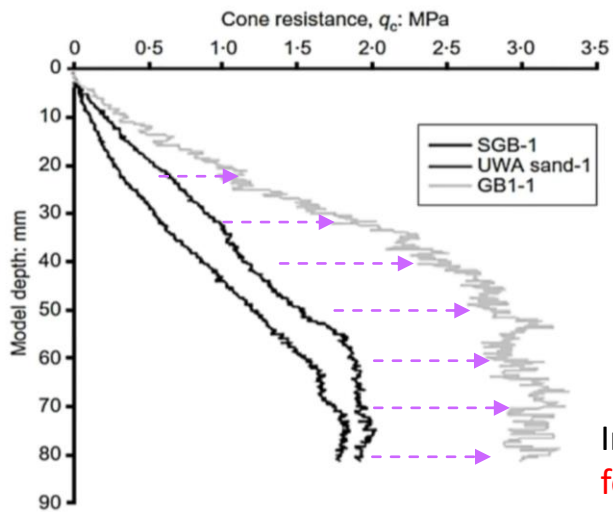
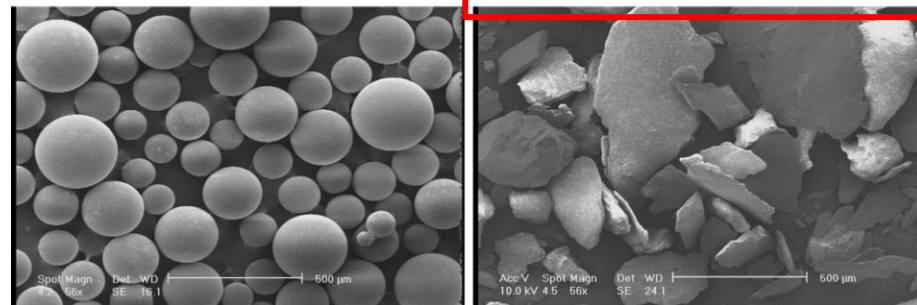
Babolsar sand **R = 0.6420** Qare-Aqaj sand **R = 0.6020**



Bushehr sand **R = 0.595** Clean Firoozkuh **R = 0.57...**



Glass beads **R = 0.9642** Golgohar tailings **R = 0.2835**



CPT end resistances (q_c) observed in centrifuge tests run at 50g on samples prepared at 20% relative density.

Liu and Lehane (2012)

Material	d_{50} (mm)	C_u	R	S
SGB	0.12	1.05	1	1
UWA sand	0.15	1.4	0.7	0.62
GB1	0.45	1.13	0.62	0.54

Baixa Redondeza (R) associado a baixa Instabilidade

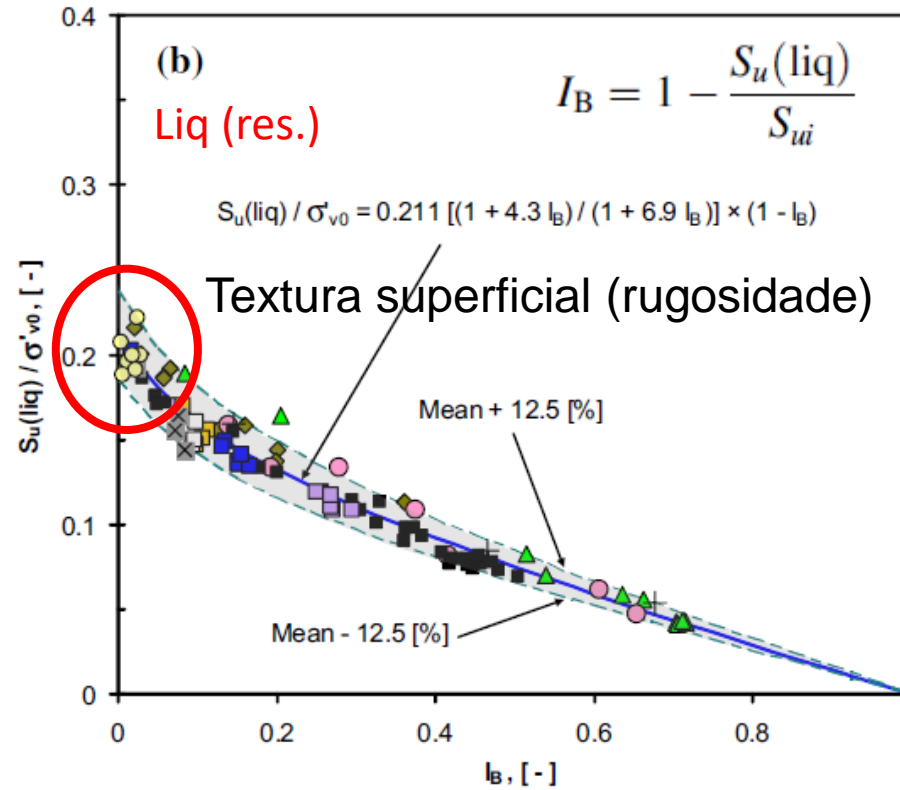
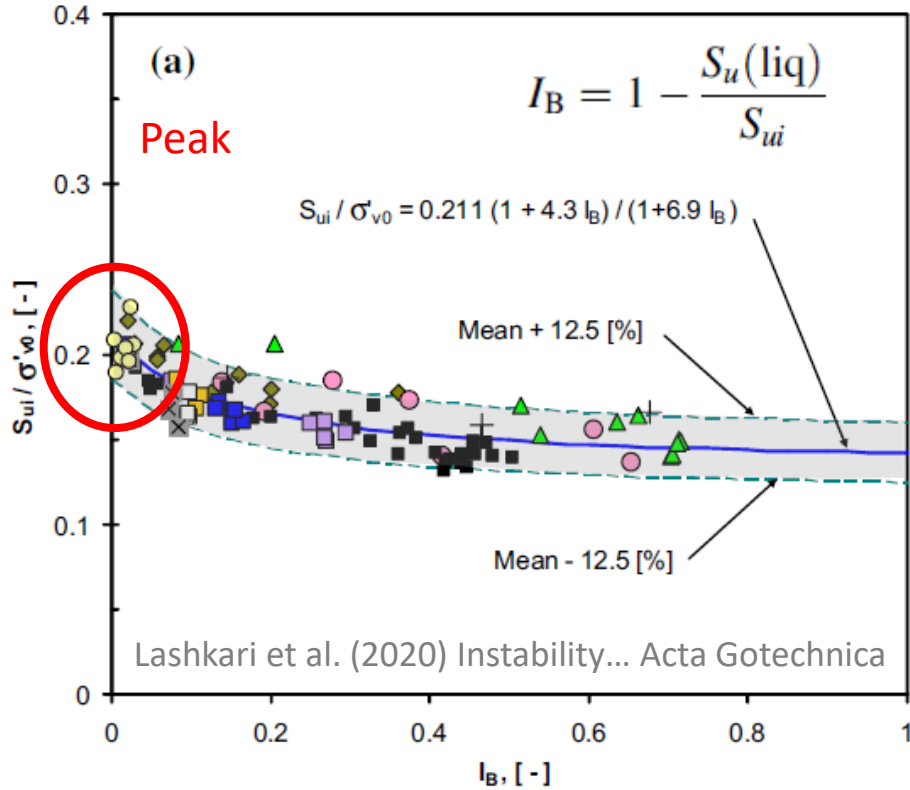
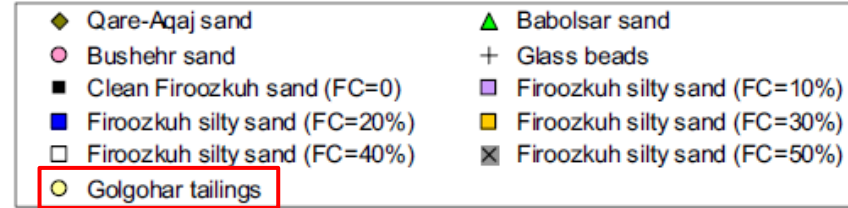
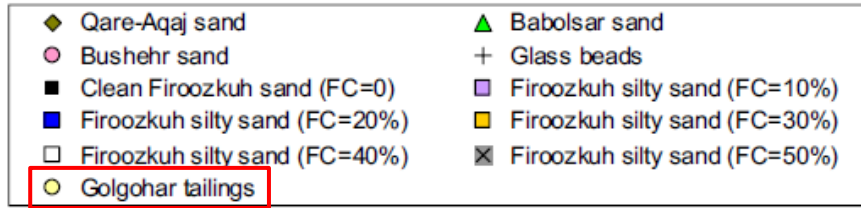
Interessante a comparação de solos arenosos e rejeito de ferro (Golgohar) (partículas angulares/lamelares, $R = 0.28$)

After Liu and Lehane (2012)

Correlações empíricas podem ser enganadoras

Baixa redondeza (R) – baixa fragilidade (I_B). *É assim???*

E em relação à textura superficial (roughness) ???

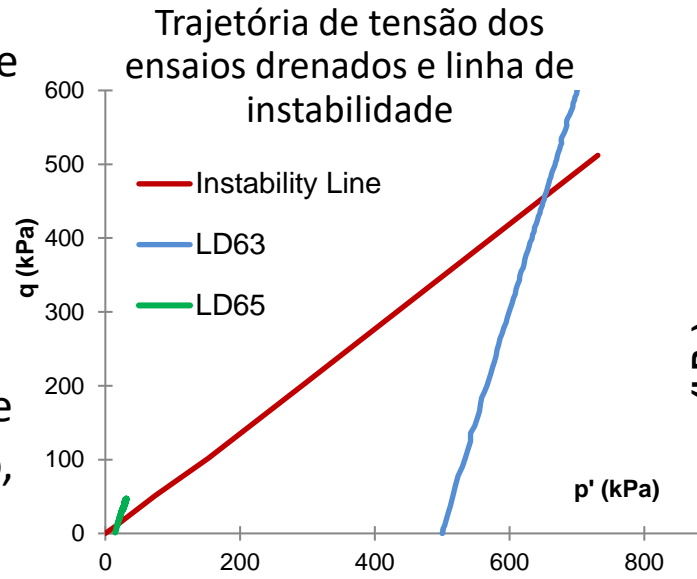


Irregularidade da superfície da partícula numa escala tão pequena que não é afetada pela forma geral do grão. **Índice de Textura/Rugosidade (IT)** é considerado num determinado nível de decomposição como a média aritmética dos valores de 240 quadrados dos coeficientes de que definem as três direções da curvas que definem a rugosidade :

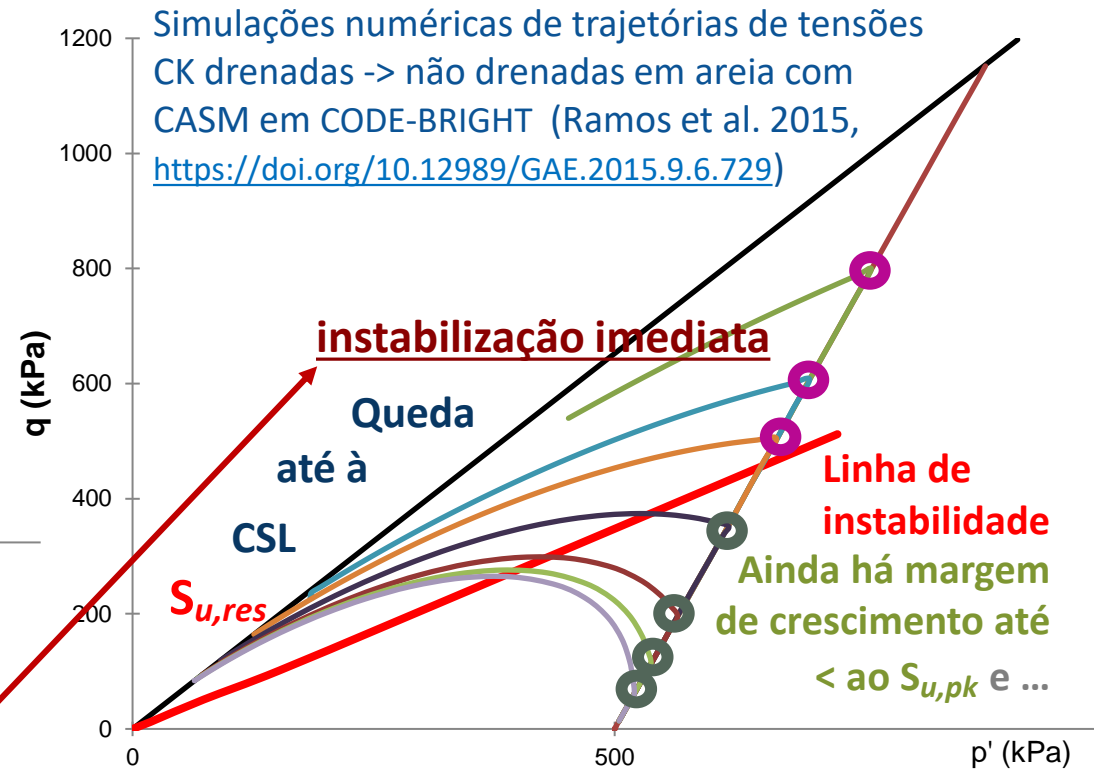
$$\frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N [D_{ij}(x, y)]^2$$

Variação da (a) resistência máxima (PICO) ao cisalhamento normalizada e da (b) resistência mínima (RESIDUAL) ao cisalhamento versus o índice de fragilidade [em caso de instabilidade]

A tensão efetiva monotónica define uma linha no plano q - p' , **uma região que controla o início do colapso do solo, INSTABILIDADE**. O locus de resistência máxima ao cisalhamento, PICO (estabelecido no plano q - p' e e - p') define o limite que desencadeia o colapso do solo, que função do índice de vazios.



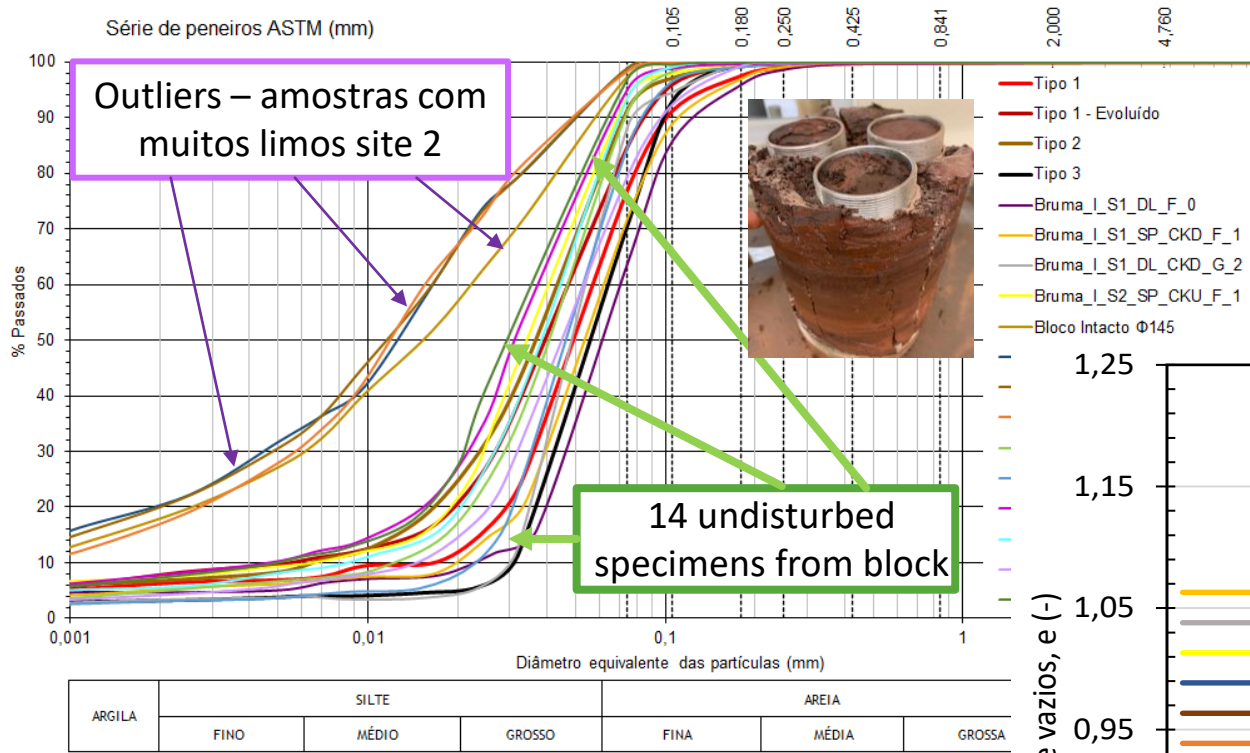
Em ensaios com início de carregamentos não drenados quando o estado de tensão inicial está acima da linha de instabilidade logo ocorre “colapso” para $S_{u,res}$ (instabilização imediata)



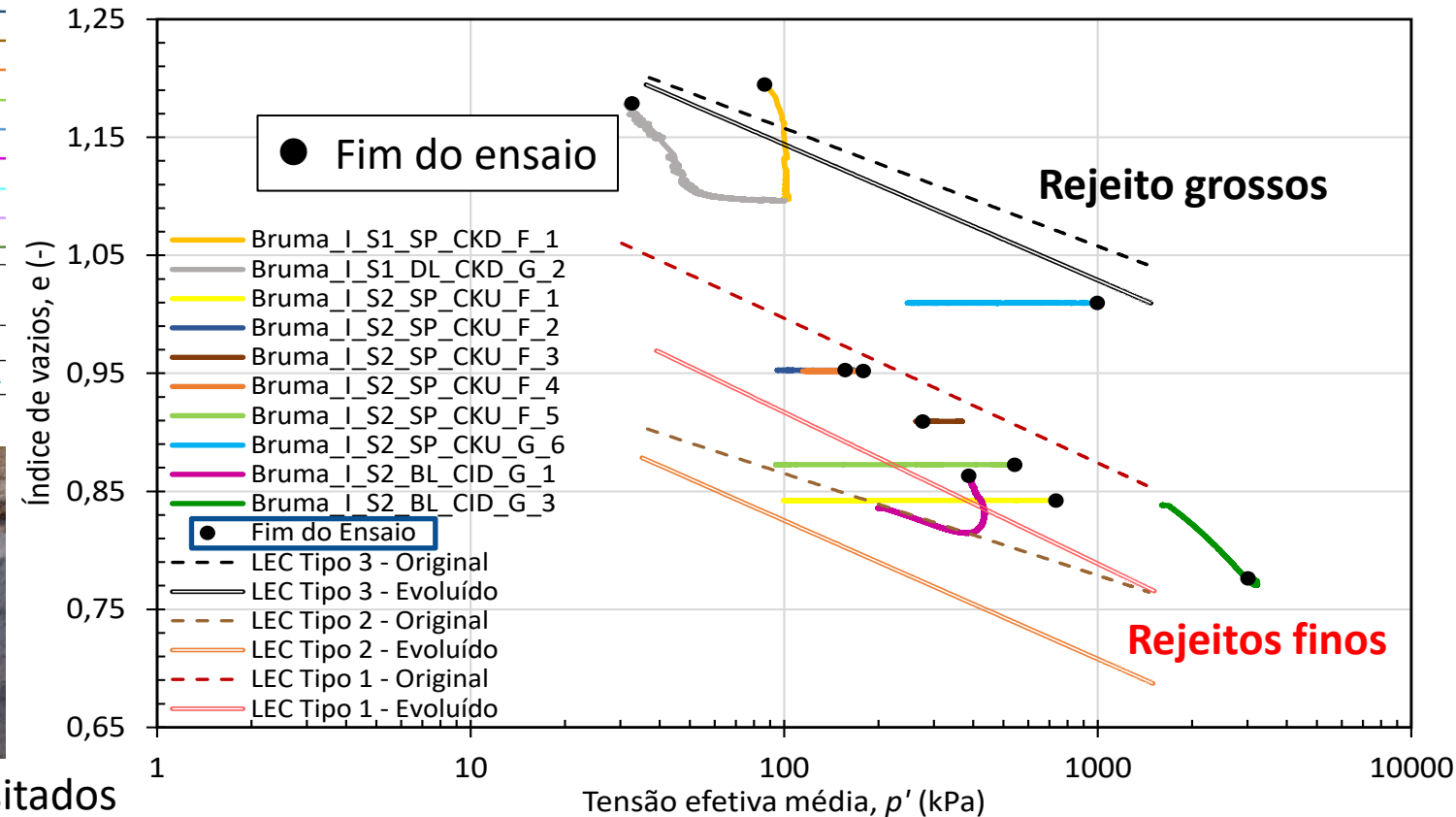
Se um ensaio começa não drenado antes de atingir a **linha de instabilidade**, segue uma típico trajetória de tensão não drenada, **com aumento da tensão deviatória enquanto a tensão média efetiva diminui**. À medida que o processo drenado passa a não drenado e isto ocorre em diferentes etapas, o valor p'_0 para cada simulação é diferente e, portanto, o ponto final de cada caminho de tensão é diferente. A maior tensão de cisalhamento mobilizada antes do amolecimento (**resistência não drenada de pico**), coincide com a interseção com a IL.

O ponto **final de cada trajetória em converge para a CSL**. Como o processo de drenado para não drenado ocorre em diferentes etapas, o valor p'_0 para cada simulação é diferente. Portanto, o ponto final de cada caminho de tensão é diferente

Poucos ensaios em amostras intactas para avaliar a representatividade da CSL definido em condições remoldadas



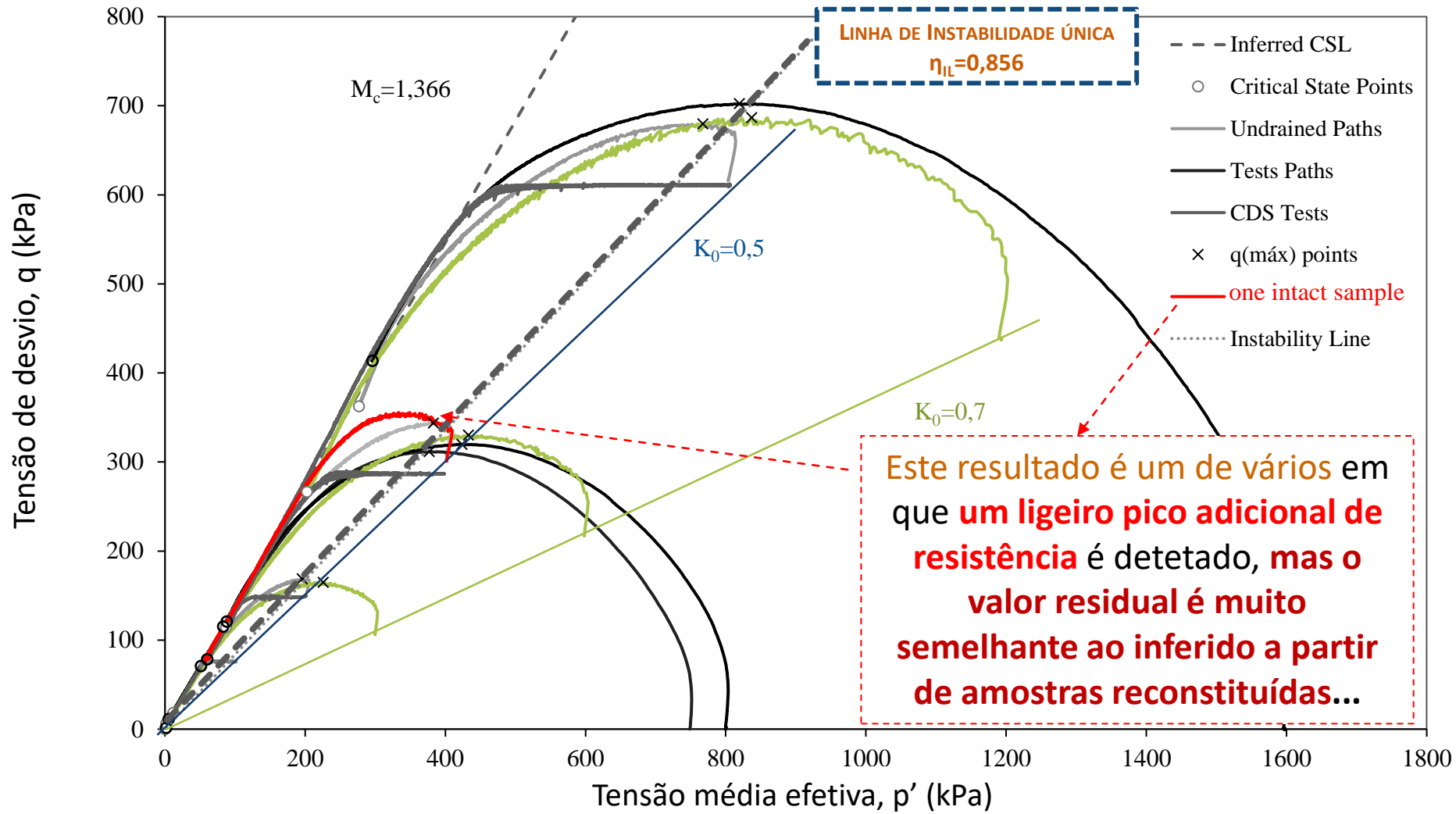
Enquanto a compressibilidade está bem alinhada com as amostras remoldadas, conforme apresentado acima, ... a **resistência última das amostras indeformadas dar-nos-ia o conforto em assumir os parâmetros do modelo para as análises numéricas de simulação do comportamento de B1**



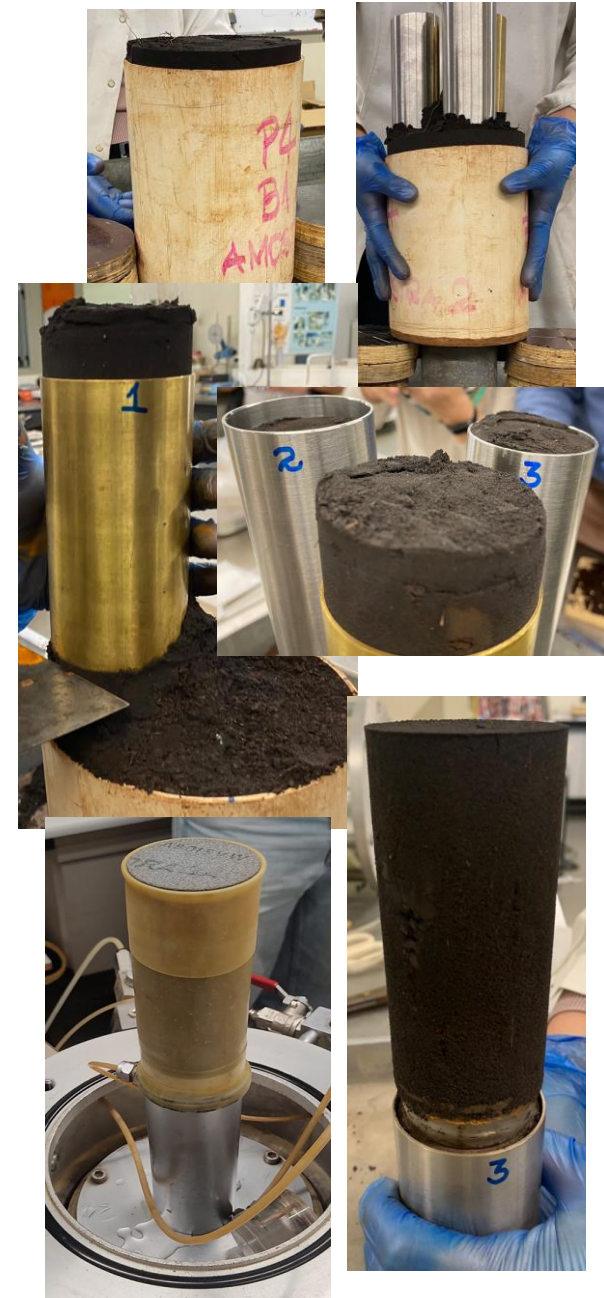
Os índices de vazios em corpos de prova intactos revelam valores altos, enquanto os poucos que são densos apresentaram em sua maioria elevada intercalação de diferentes tipos dos rejeitos depositados



E quanto ao pico não drenado e à resistência residual em amostras indeformadas



Este resultado é um de vários em que **um ligeiro pico adicional de resistência** é detetado, mas o **valor residual é muito semelhante ao inferido a partir de amostras reconstituídas...**



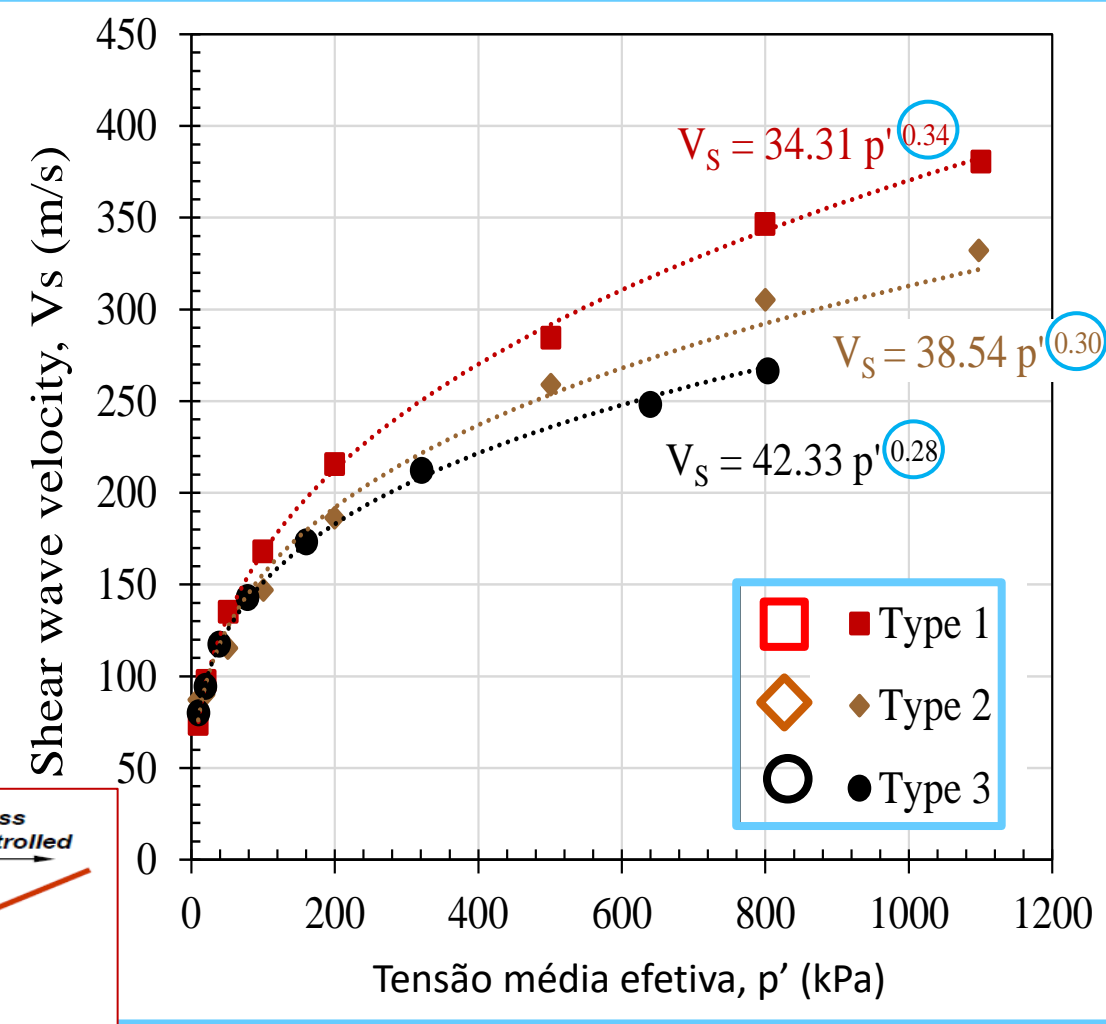
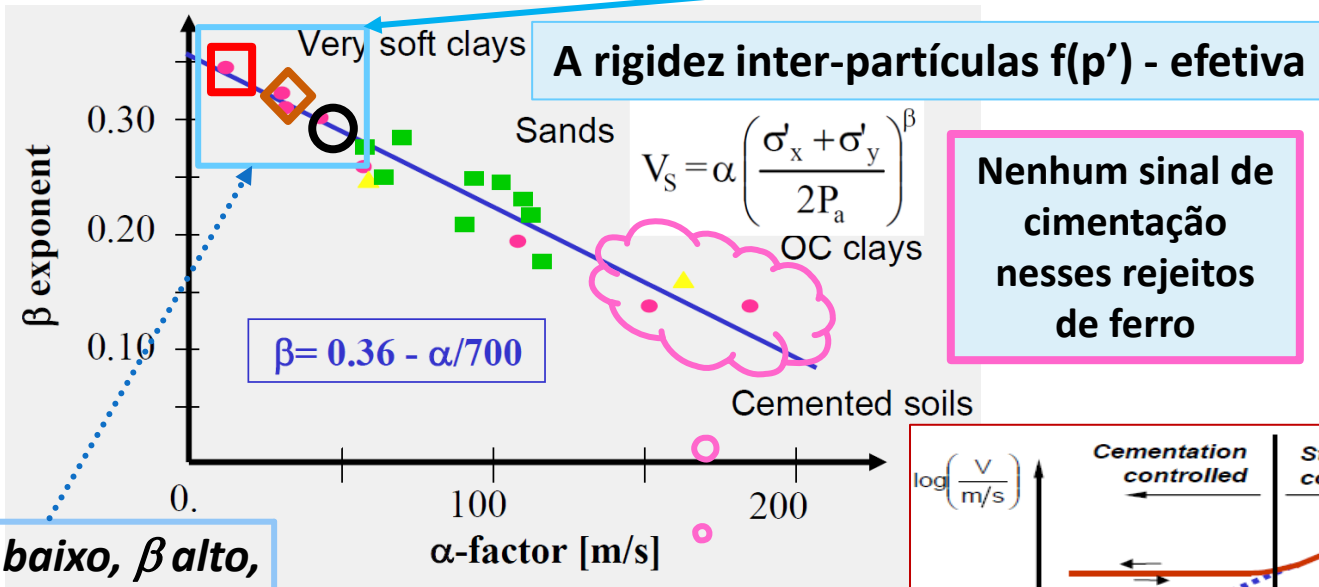
Variação da rigidez máxima (G_{max}) com o confinamento

A rigidez em pequenas deformação ("inicial" e elástica) é obtida por esses transdutores piezocerâmicos "S" (ensaios com tensões confinantes variáveis)

Esses resultados indicam uma elevada variação de V_s com a tensão de confinamento, expressa pelo expoente elevado das leis de ajuste, sendo ainda mais evidente (maior) na rejeito mais grosso e mais pesado ("preta"), o que é típico de solos com fábrica ou estrutura mais fraca (Santamarina, 2005).

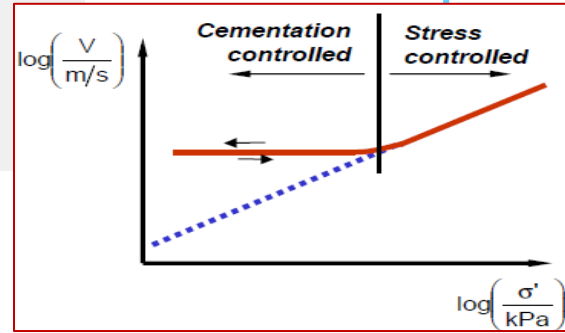
Das ondas de cisalhamento (S) com "bender elements":

$$G_{max} = G_0 = G_{el} = \rho \cdot V_s^2$$



α baixo, β alto, estrutura não cimentada

β baixo, α alto, estrutura cimentada



Avaliação de fábrica/estrutura/cimentação; fatores de influência: investigação em curso (ondas S...)

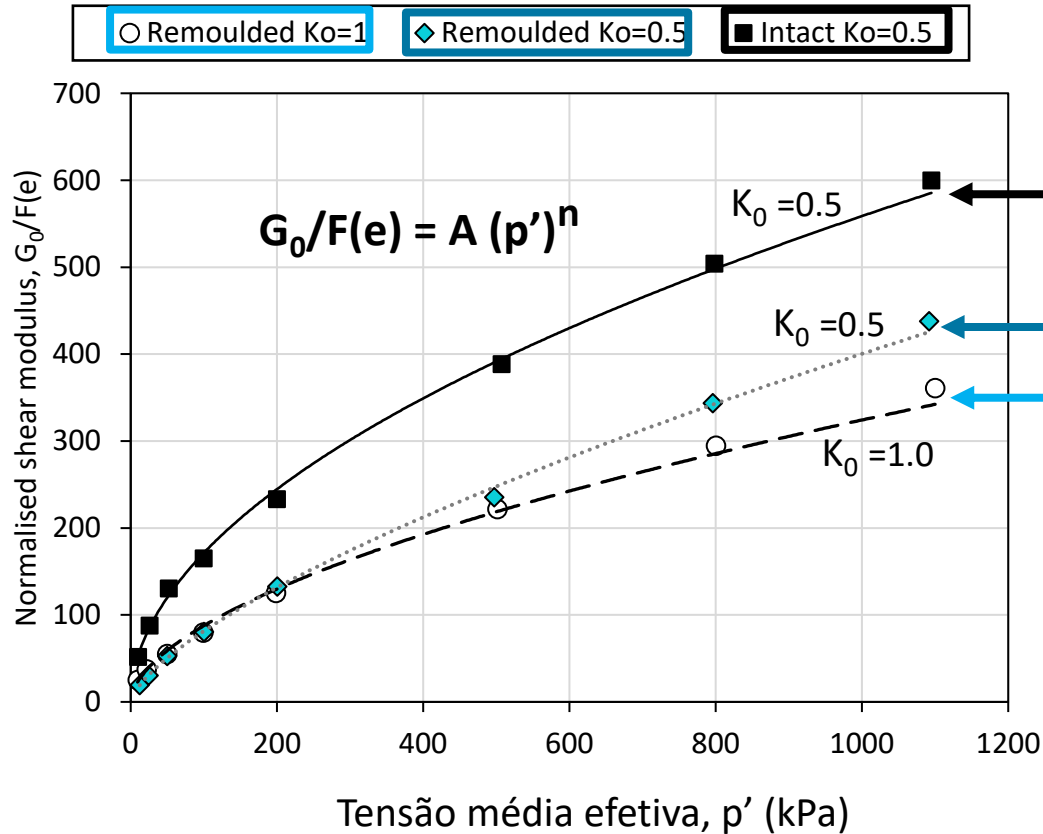
Índices de vazios iniciais semelhantes após saturação,
 $p' = 10 \text{ kPa}$

$e = 1.16$

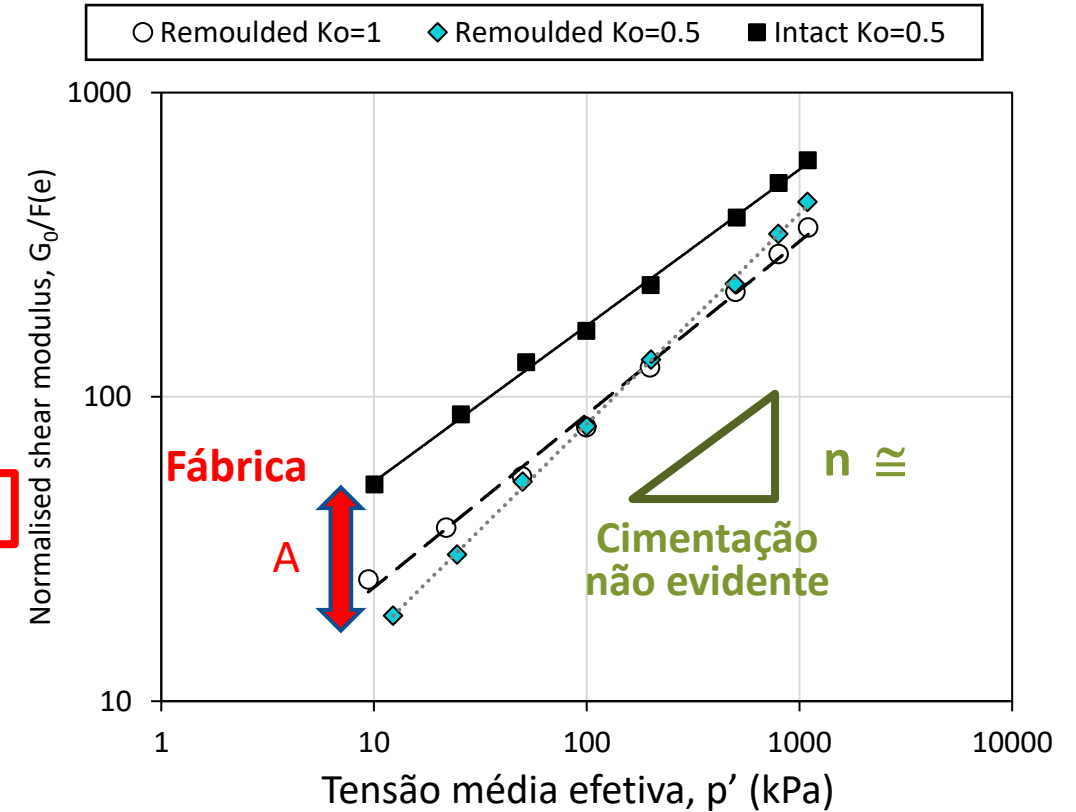
$e = 1.17$

$e = 1.15$

As duas taxas de tensão de consolidação em condições **remoldadas** denotam uma ligeira influência da **fábrica induzida**, enquanto a amostra de bloco intacta / indeformado tem um **n semelhante**, mas a constante **A é 3 vezes maior** (a fábrica é distinta)!

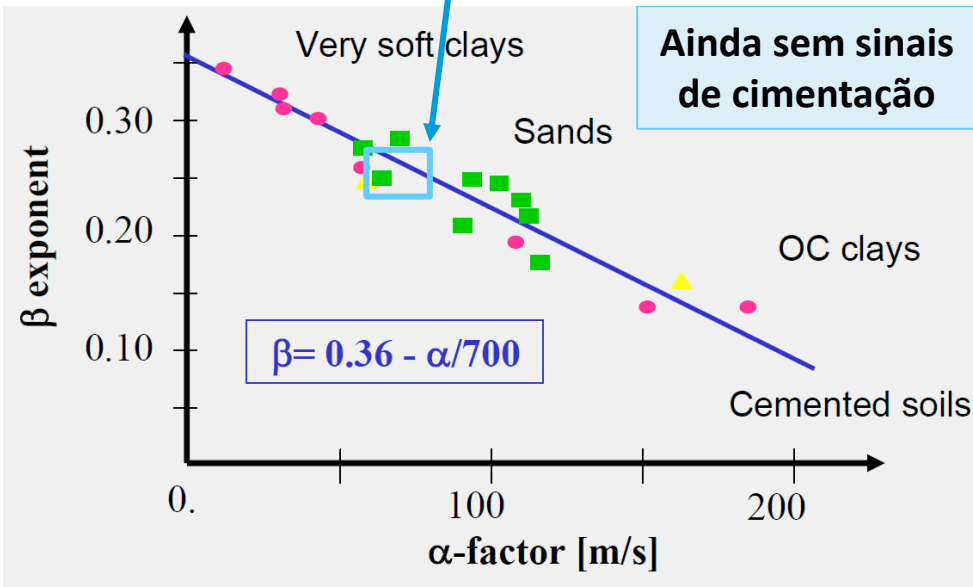
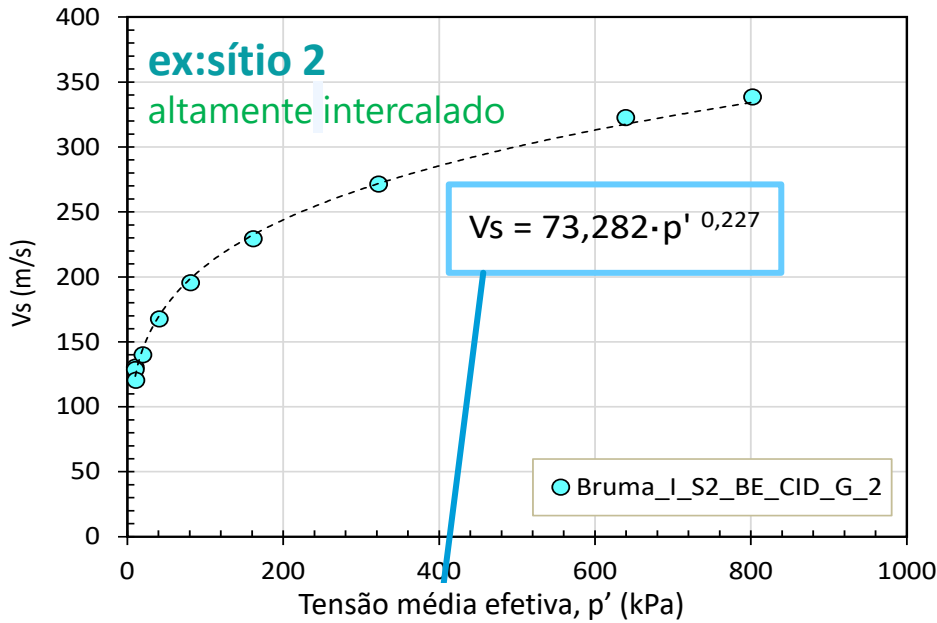


Fábrica Inerente



Diana Cordeiro, Davide Besenon, Fausto Molina and Isabela Caetano and Daniela Coelho

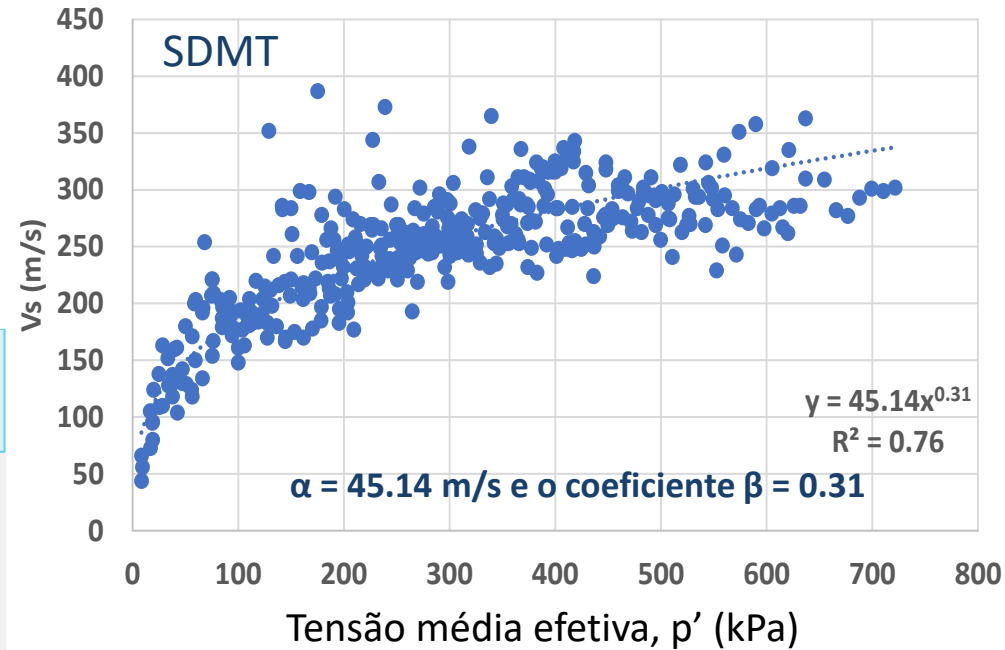
Rigidez máxima (G_0) vs tensão de confinamento



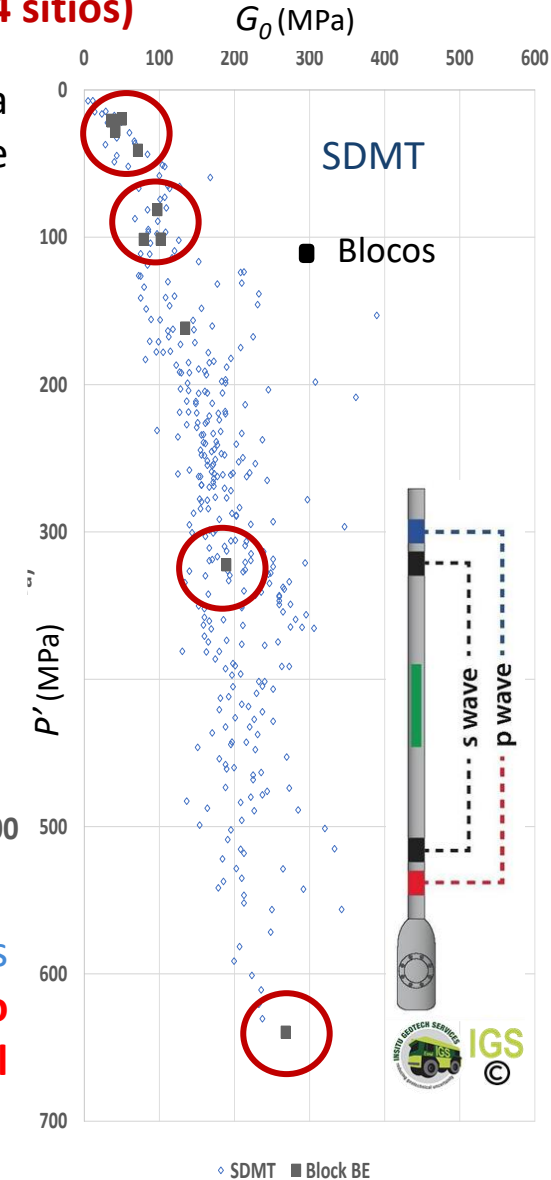
Determinação in situ (in loco) com o Seismic Dilatometer (Marchetti)

Enquadramento com a amostras intactas (Blocos de 4 sítios)

O SDMT na campanha de 2018 permitiu determinar a velocidade da onda de cisalhamento, V_s , cada 0,5m de avanço usando um método de intervalo direto de 1m



O exame dos dados de rigidez máxima para os rejeitos da Barragem 1 confirma que a **cimentação entre partículas não desempenha um papel significativo na mecânica desse material.**



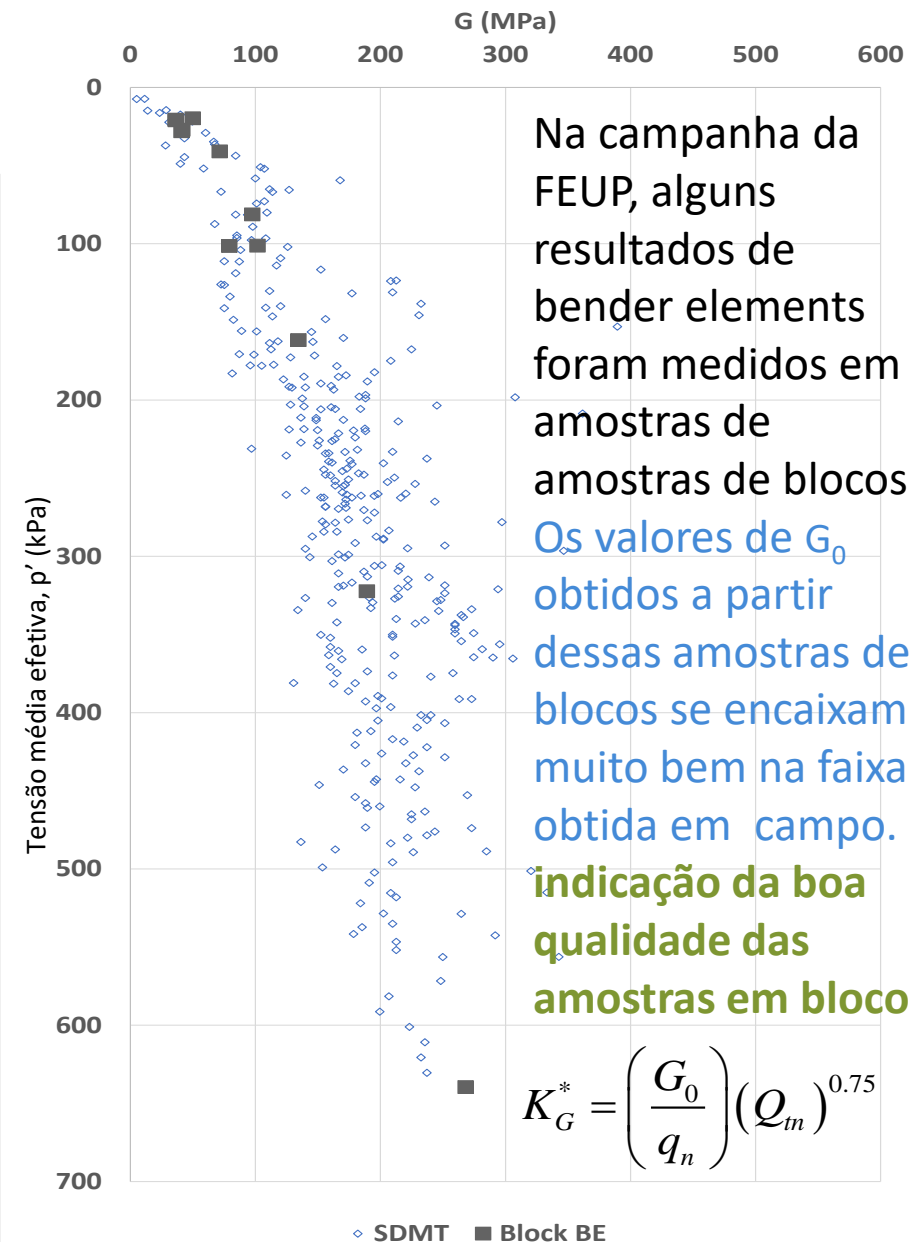
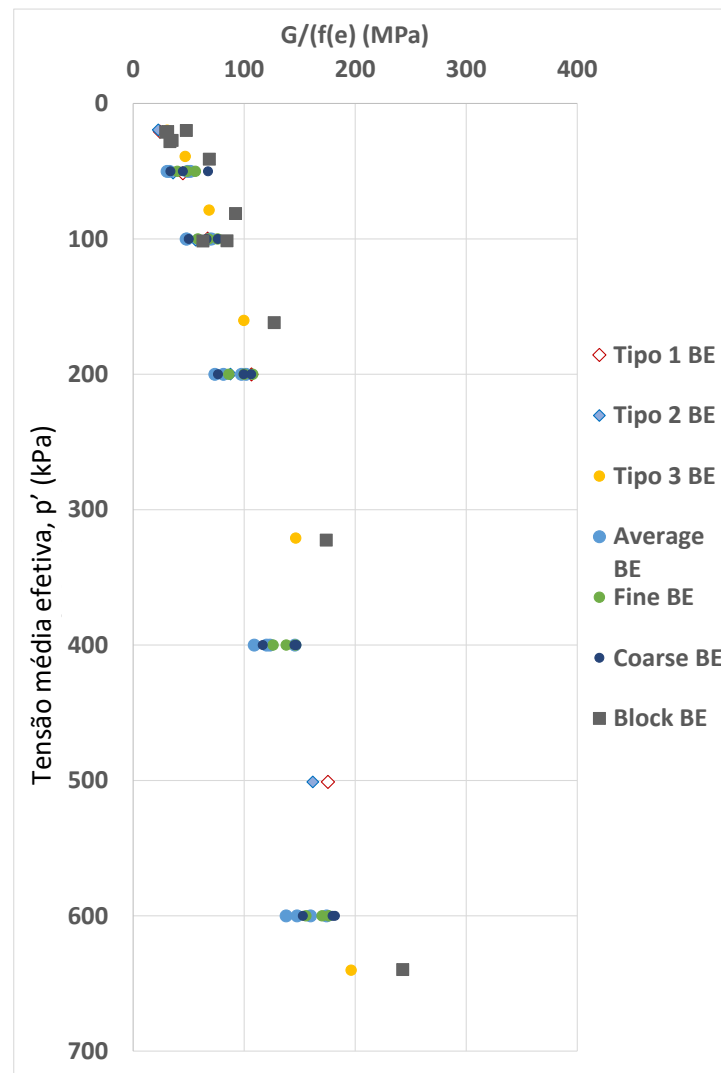
A ligação entre partículas pode desempenhar um papel significativo na mecânica do material depositado

So, no mesmo nível de tensão e densidade, a preparação de amostras muito soltas com “moist tamping” (conforme descrito), tiveram valores de G_0 , portanto, V_s em estreita analogia com o rejeito depositado.

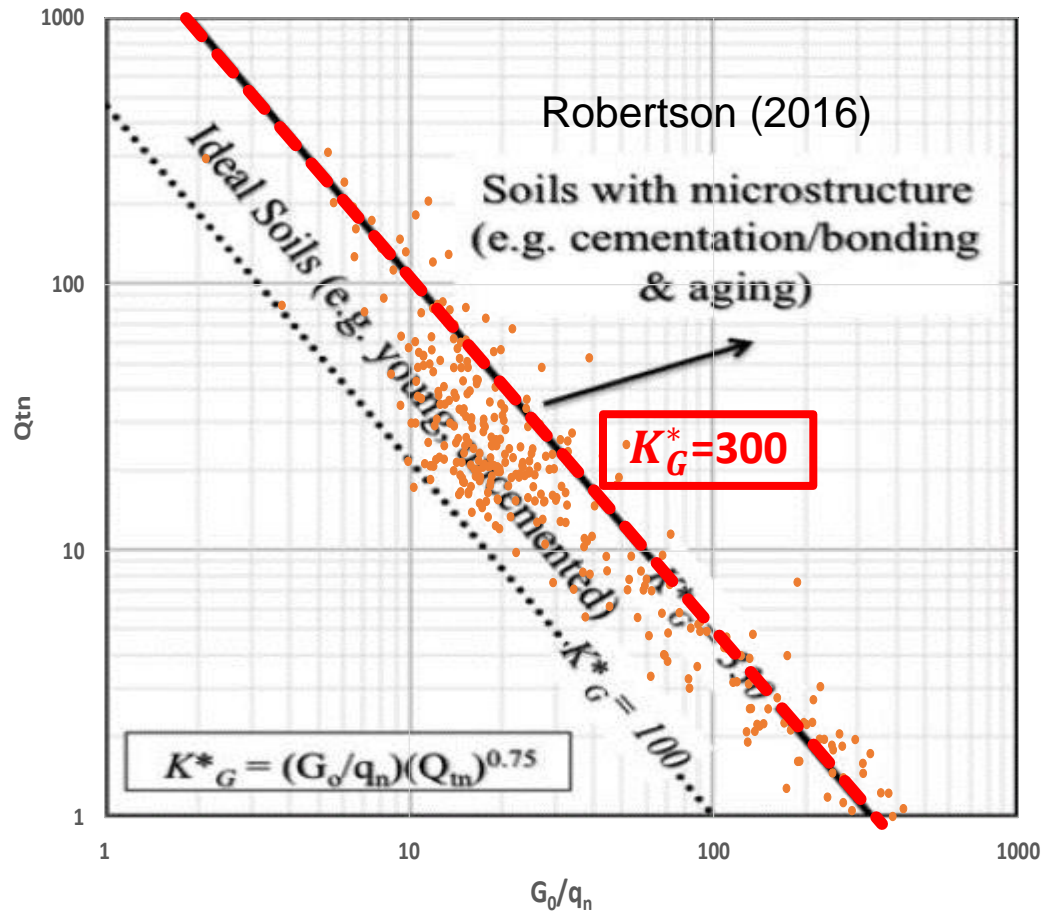
Assim,...

...o módulo de cisalhamento dinâmico, $G_0 (= \rho V_s^2)$, foi medido "in situ", utilizando o **dilatômetro sísmico de Marchetti (SDMT)**. Foram realizados 9 ensaios em 2 campanhas, somando mais de 300m de medições.

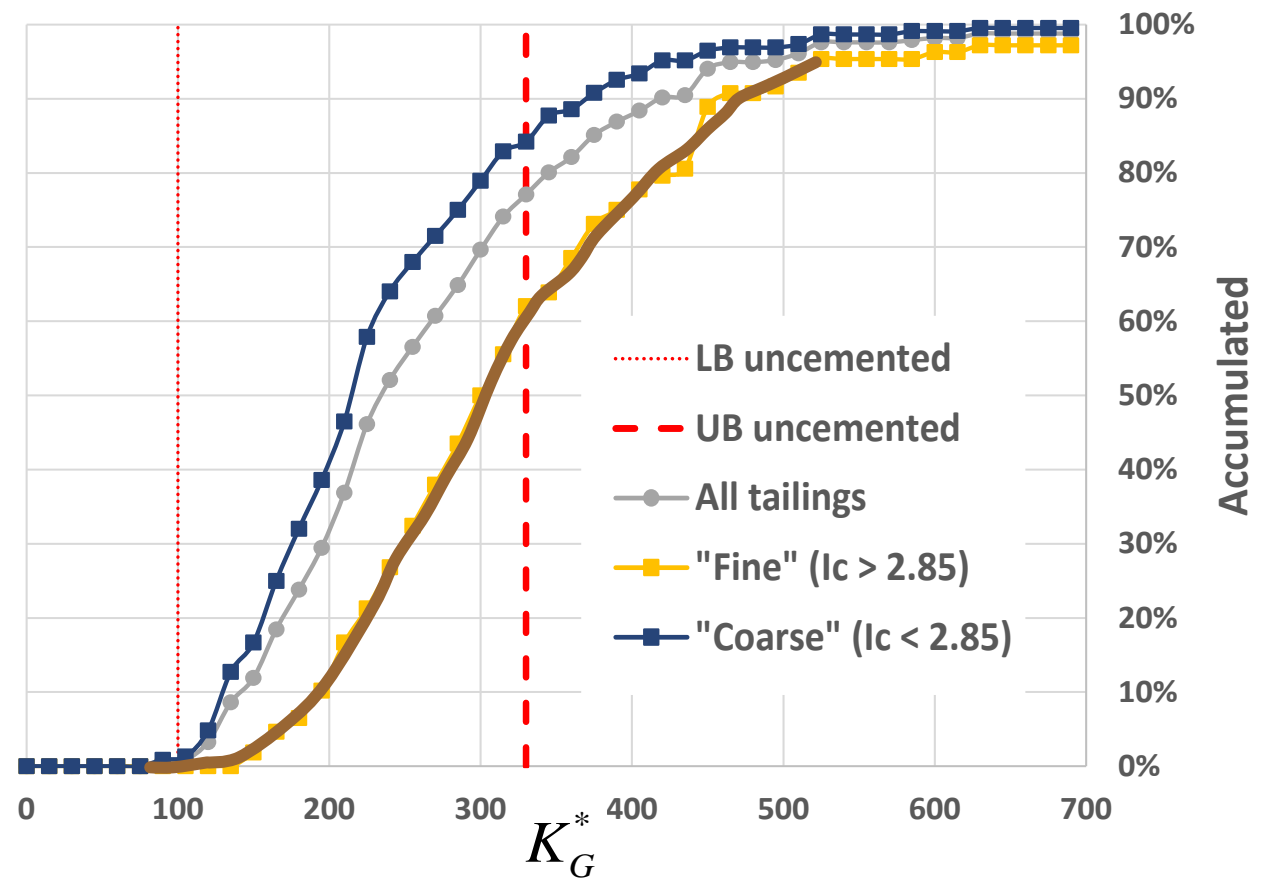
A regressão obtida das medidas de ondas de cisalhamento de rejeitos em barragens excluindo 2 “outliers”



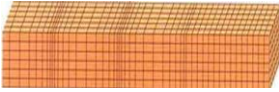
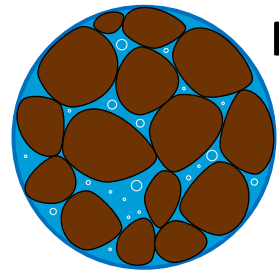
Em areias de sílica jovens e não cimentadas,
 K_G^* oscila entre 100 e 330.



Histogramas de K_G^* de todos os rejeitos distinguindo a frações de “Finos” e “Grossos”.



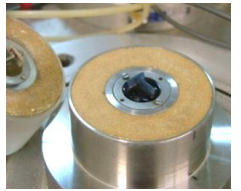
A fração de rejeito "Fina" tem uma percentagem maior (cerca de um terço) acima do limite nominal não cimentado: estes correspondem principalmente a dados com resistência de ponta muito baixa Q_{tn} .



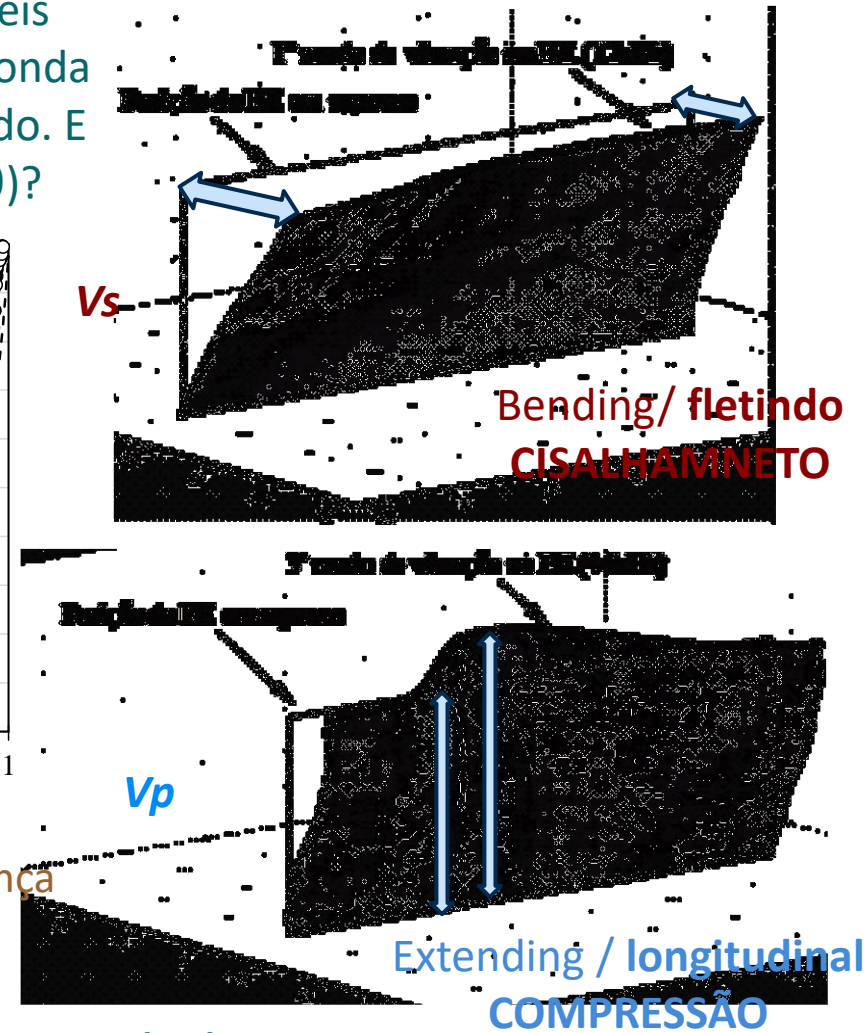
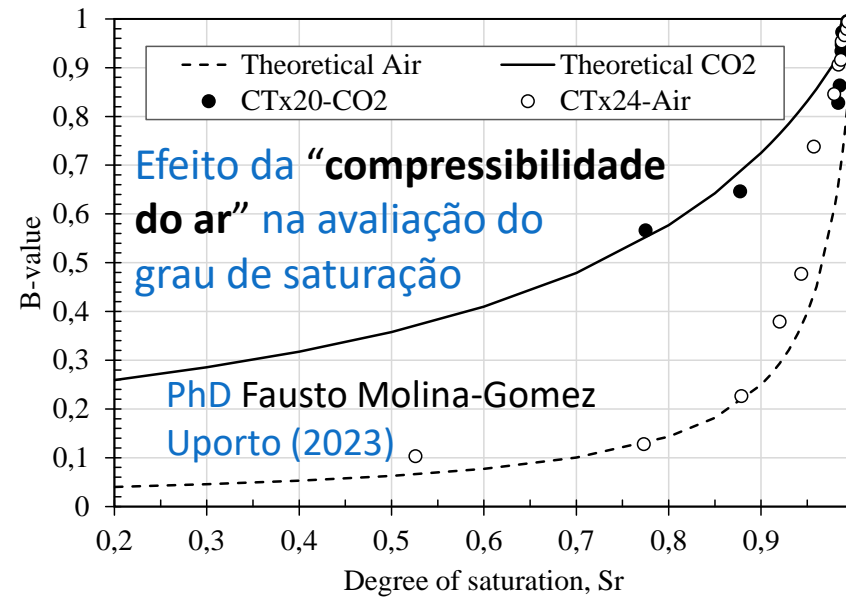
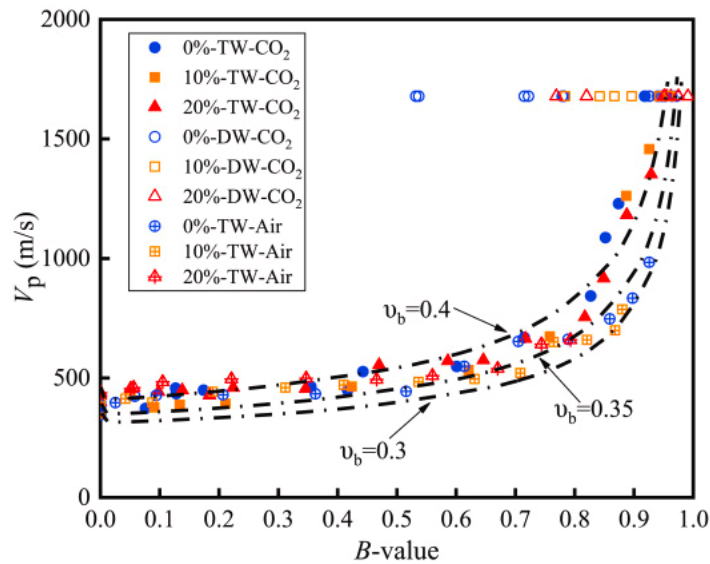
Rigidez volumétrica: Solo (fluido + esqueleto) Identificação rápida de materiais liquefeitos

O potencial das Ondas "P"

(saturados / parcialmente saturados / não saturados)



As medições das velocidades de, **ondas P** são altamente sensíveis para avaliar as condições de saturação. O valor da velocidade da onda de compressão (V_p) é maior que 1482 m/s se o solos está saturado. E no caso de muito elevados graus de saturação ($0.9 < S_r \leq 1.0$)?



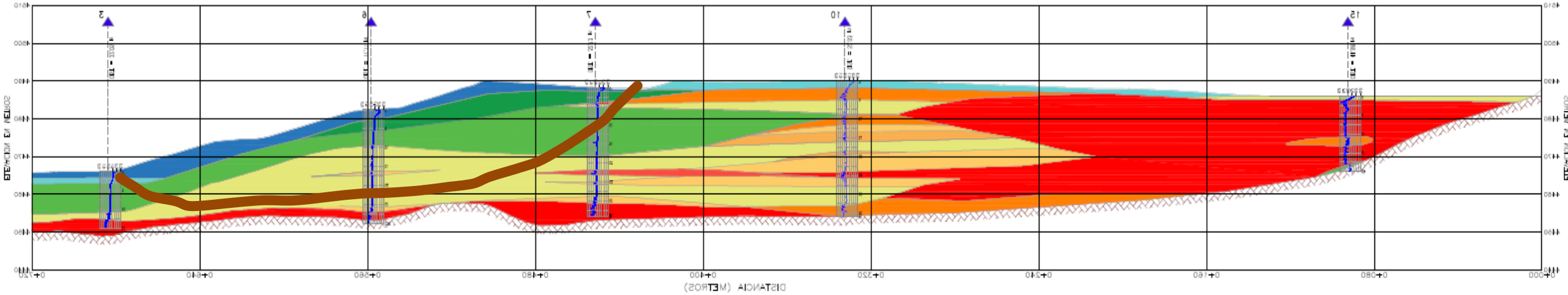
Na prática,

o monitoramento via piezômetros tem fortes limitações: grandes variações na presença maciça de contrastes de permeabilidade (FC), frequentemente associados a lençóis freáticos empoleirados. Os piezômetros não detetam zonas parcialmente saturadas, onde o ar ocluído pode ser propenso à liquefação

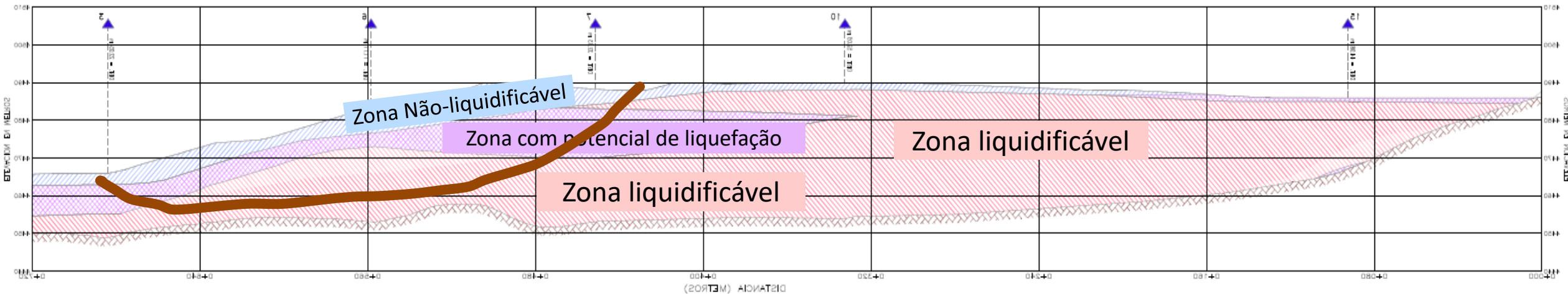
Velocidade da onda de compressão (V_p) resolvem

Análises de suscetibilidade em maciços depositados durante mais de 50 anos de operação?

PARÂMETRO de ESTADO – SECÇÃO AA'



POTENCIAL LIQUEFAÇÃO – SECÇÃO AA'

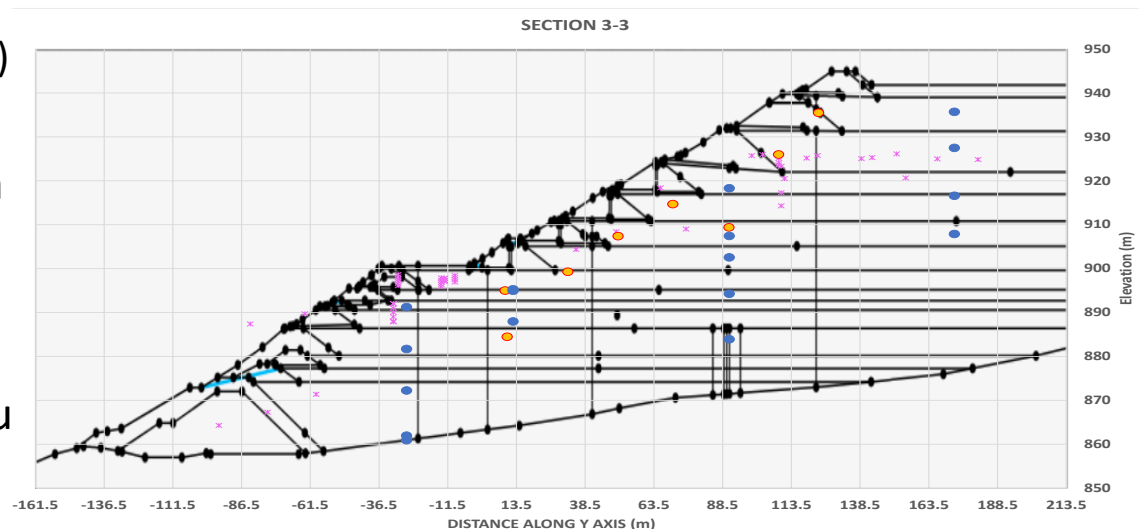


A análise completa de resultados dos ensaios anteriores foi feita para ter a imagem clara do método de deposição

Análises de suscetibilidade: Como poderemos lidar com camadas com esta variabilidade?

FINOS, GROSSOS e IMATERIAIS INTERMEDIÁRIOS (CIMNE, 2021)

Uma análise completa dos resultados dos ensaios anteriores foi realizada para ter uma imagem líquida do método de deposição em certos períodos. Embora relativamente mal documentado, ficou claro que **as práticas de construção e enchimento nesses estágios nem sempre eram idênticas**. A inspeção dos resultados do CPTu (que foram organizados ao longo dos trechos da barragem) mostrou que **as mudanças de estágio eram frequentemente coincidentes com mudanças significativas na resposta mecânica**.



		PERCENTAGE FINE TAILINGS					
		SECTION 3		ALIGNMENT			
		ALIGNMENT 1	ALIGNMENT 2	ALIGNMENT 3	ALIGNMENT 4	ALIGNMENT 5	ALIGNMENT 6
STAGE		1	2	3	4	5	6
STAGE 15						13%	
STAGE 14						45%	
STAGE 13					4%	69%	
STAGE 12					17%	54%	47%
STAGE 11					3%	4%	31%
STAGE 10					25%	64%	45%
STAGE 9				0%	9%	3%	20%
STAGE 8	0%	6%	21%	31%	21%		
STAGE 7	15%	7%	15%	100%			
STAGE 6	2%	2%	13%	100%			
STAGE 5	0%	7%	27%	46%			
STAGE 4	12%	2%	56%				
STAGE 3	29%		100%				
STAGE 2	4%		100%				
STAGE 1	18%		23%	100%			

Primeiro
zonamento

		SECTION 3					
		ALIGNMENT 1	ALIGNMENT 2	ALIGNMENT 3	ALIGNMENT 4	ALIGNMENT 5	ALIGNMENT 6
STAGE		1	2	3	4	5	6
STAGE 15						MIXTURE	FINE
STAGE 14						FINE	FINE
STAGE 13					COARSE	FINE	FINE
STAGE 12					MIXTURE	FINE	FINE
STAGE 11					COARSE	COARSE	FINE
STAGE 10					MIXTURE	FINE	FINE
STAGE 9				COARSE	COARSE	COARSE	FINE
STAGE 8	COARSE	COARSE	MIXTURE	MIXTURE	MIXTURE	FINE	FINE
STAGE 7	MIXTURE	COARSE	COARSE	MIXTURE	FINE	FINE	FINE
STAGE 6	COARSE	COARSE	MIXTURE	MIXTURE	FINE	FINE	FINE
STAGE 5	COARSE	COARSE	COARSE	MIXTURE	FINE	FINE	FINE
STAGE 4	MIXTURE	COARSE	COARSE	FINE	FINE		
STAGE 3	MIXTURE	MIXTURE	MIXTURE	FINE			
STAGE 2	COARSE	COARSE	COARSE	FINE			
STAGE 1	MIXTURE	MIXTURE	MIXTURE	FINE			

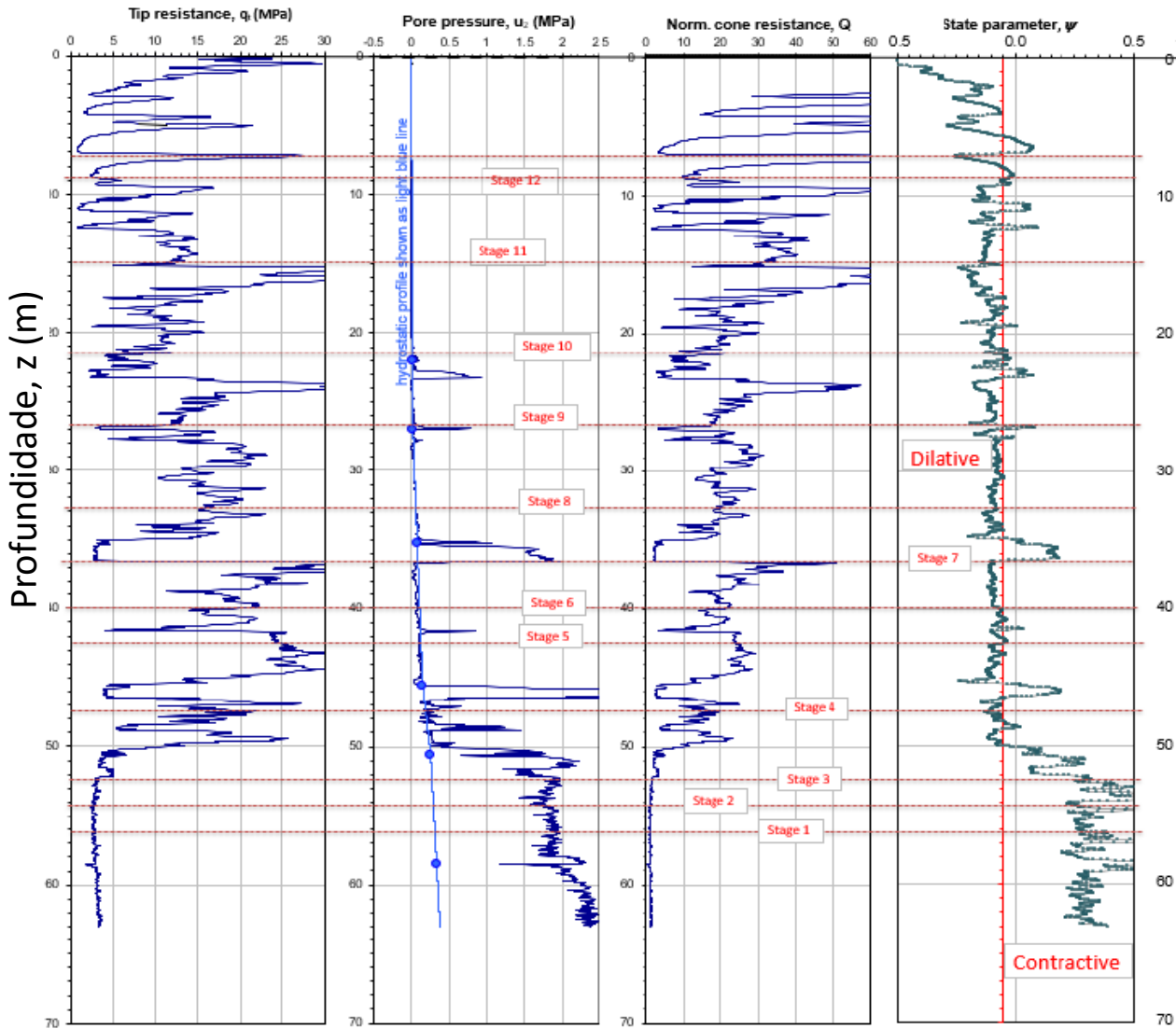
Simplificações
Numéricas

Perigo / Gatilho: requer análises (numéricas) hidromecânicas (Arroyo & Gens, 2021)

As abordagens baseadas em CPTu foram exploradas e decisivas?

Para modelar os materiais posicionados num modelo de solo, recorrendo ao **CPTu**, foram utilizados 38 pontos, chegando a quase **1km e 37000 “datapoints”** úteis (90% em rejeitos)

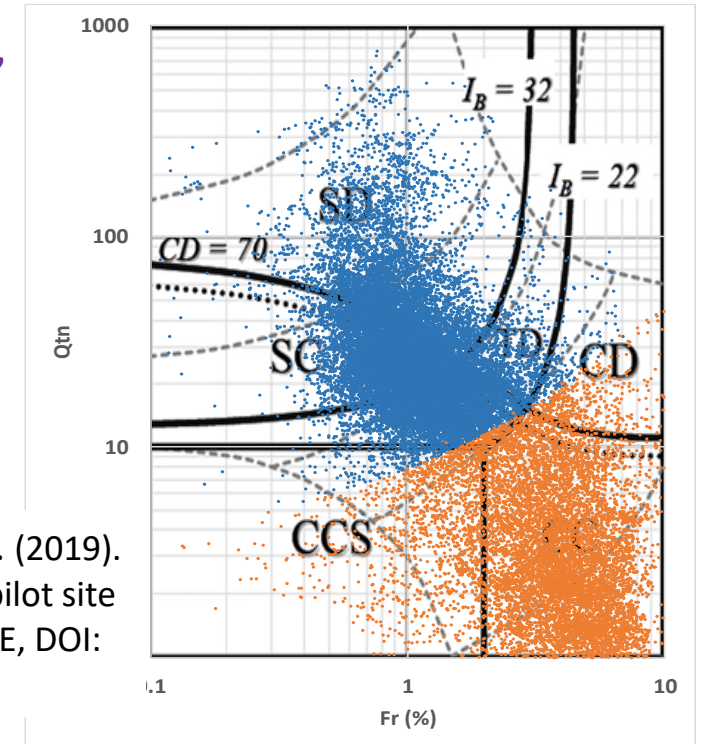
Os perfis da CPTU são muito variáveis e parecem aleatórios, mas **mostram alguma consistência em termos de estágios da construção** e mesmo na posição dos **pontos de ejeção**.

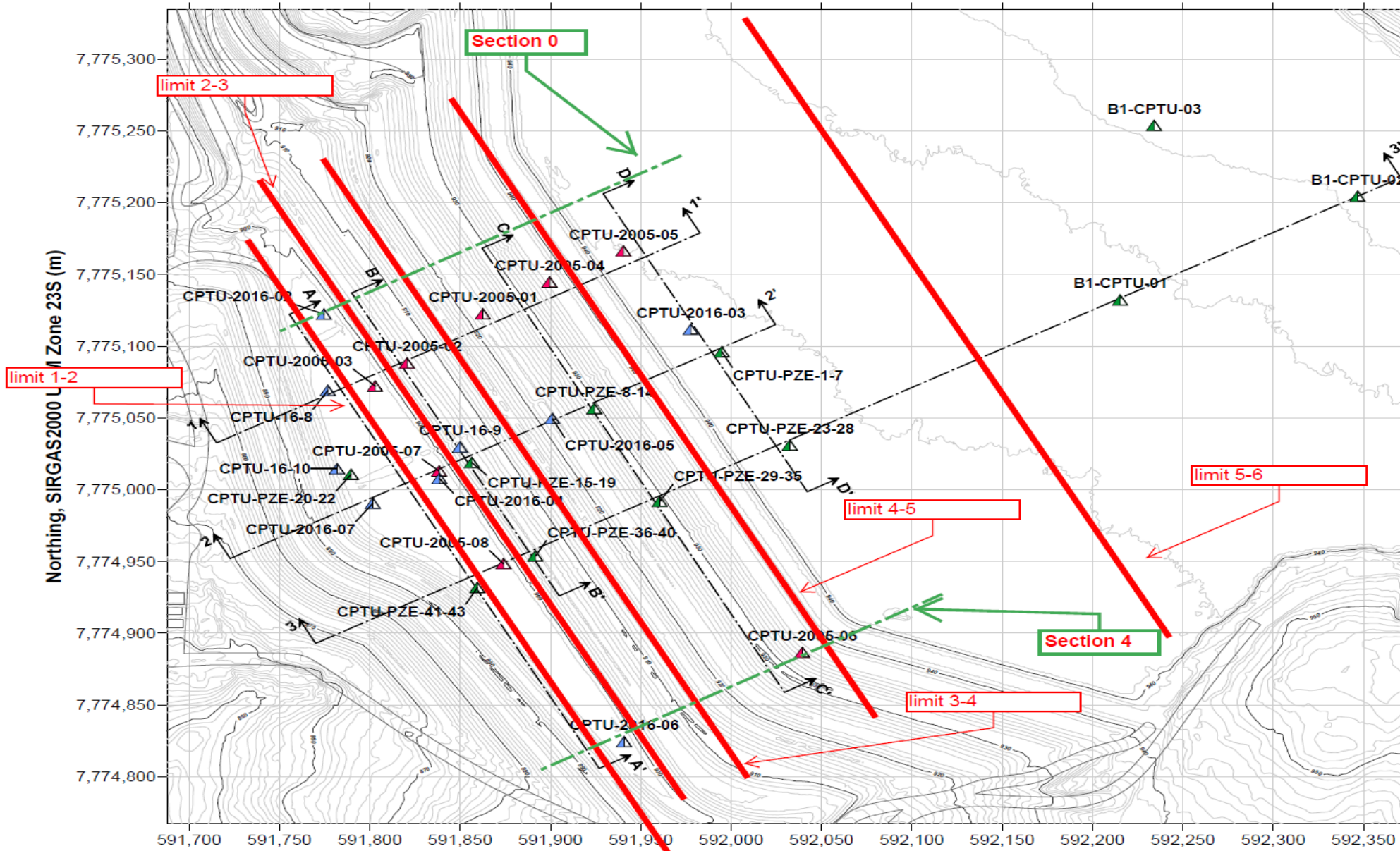


A subdivisão em clusters, visava separar

As frações **finas** e **as grossas**, **separam-se pela fronteira definida por um índice SBT index $I_c_{RW} = 2,85$**

Já adotado por Ferreira et al. (2019). “Liquefaction susceptibility ...pilot site in the greater Lisbon area”. BBE, DOI: 10.1007/s10518-019-00721





Symbol	Investigation Year
▲	2005
▲	2016
▲	2018

Os limites de permeabilidade se encaixaram bem com as evidências do CPTu, com a grande maioria dos testes de dissipação em locais classificados como "Finos"

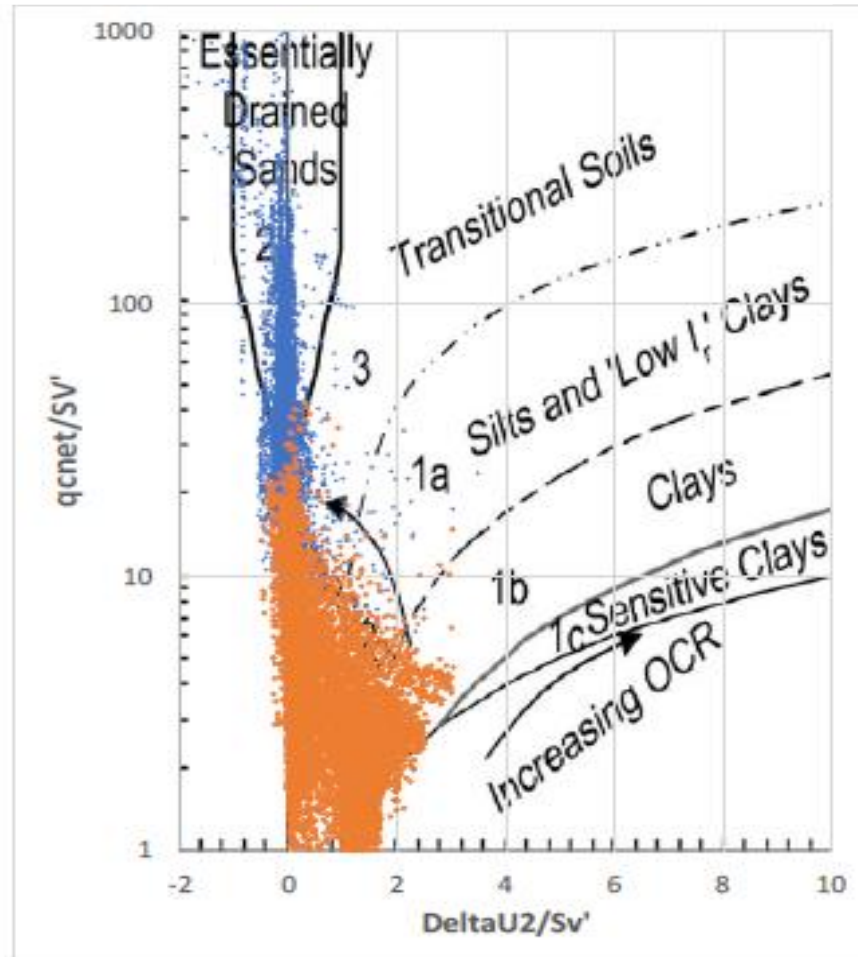
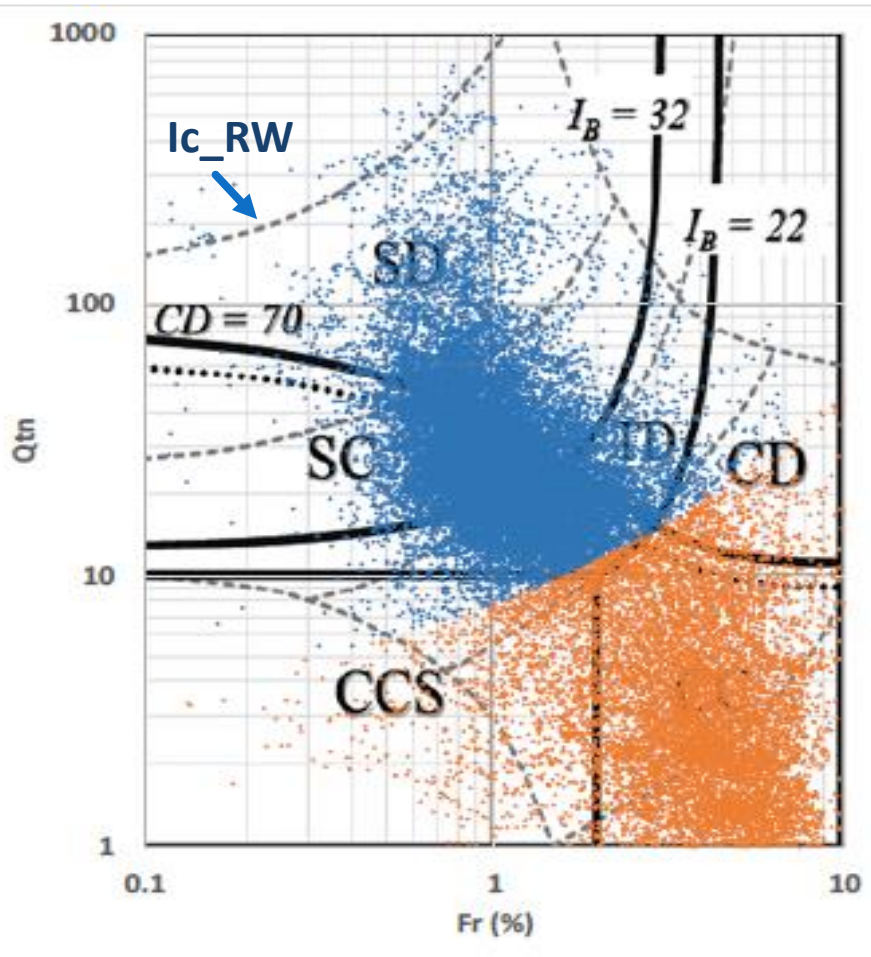
$$(I_{C_RW} > 2,85).$$

Restringindo a materiais "finos", as permeabilidades dos testes de dissipação de CPTu são quase todas $< 10^{-6}$ m/s.

O papel decisivo da CPTU no microzonamento dos "clusters" de rejeitos finos e grossos

CPTu **Finos** / **Grossos** distinção através do índice SBT **Ic_{RW} = 2,85**

Robertson and Wride (1998)
$$I_{c_RW} = \sqrt{\{3.47 - \log [Q]\}^2 + [1.22 + (\log F)]^2}$$

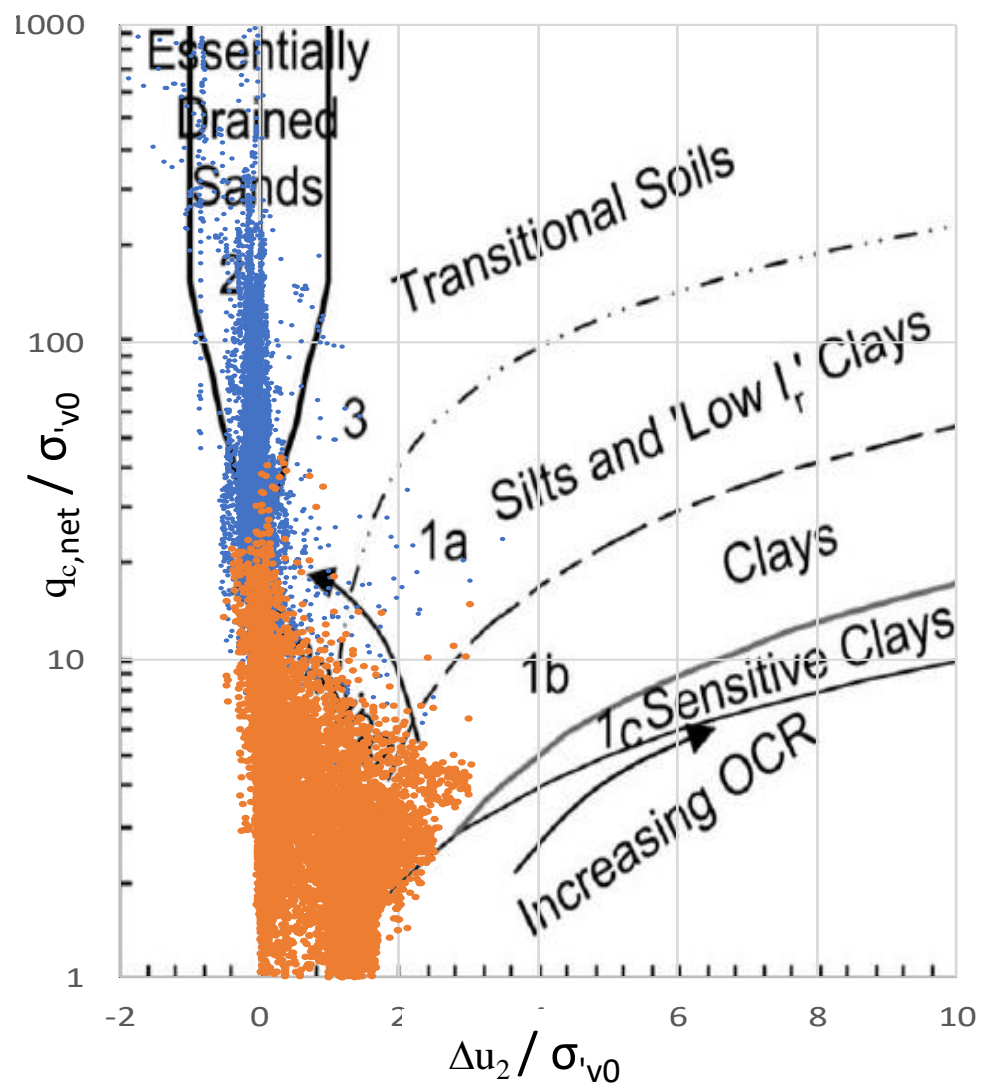
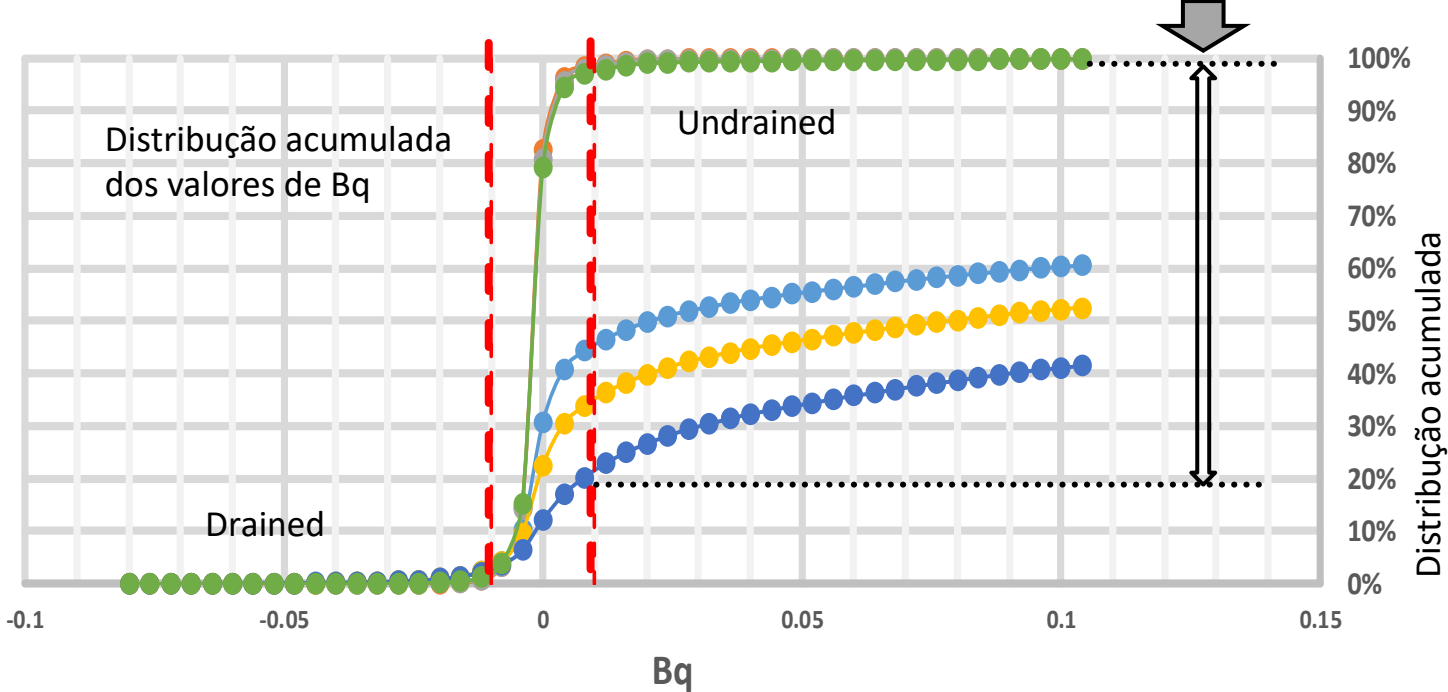


O papel decisivo do CPTU para a microzonamento das zonas ("clusters") de rejeitos finos e grossos

Permeabilidade a partir do Bq

Separação dos REJEITOS através de diferentes valores do **índice SBT [IC (RW)]**. As **linhas vermelhas** indicam a **região de resposta essencialmente drenada à penetração do CPTu, análises de Bq** (CIMNE, 2021)

- Tailings $I_c(RW) \geq 2.6$
- Tailings $I_c(RW) < 2.6$
- Tailings $I_c(RW) < 2.7$
- Tailings $I_c(RW) \geq 2.7$
- Tailings $I_c(RW) \geq 2.85$
- Tailings $I_c(RW) < 2.85$



SCHNEIDER ET AL (2012)

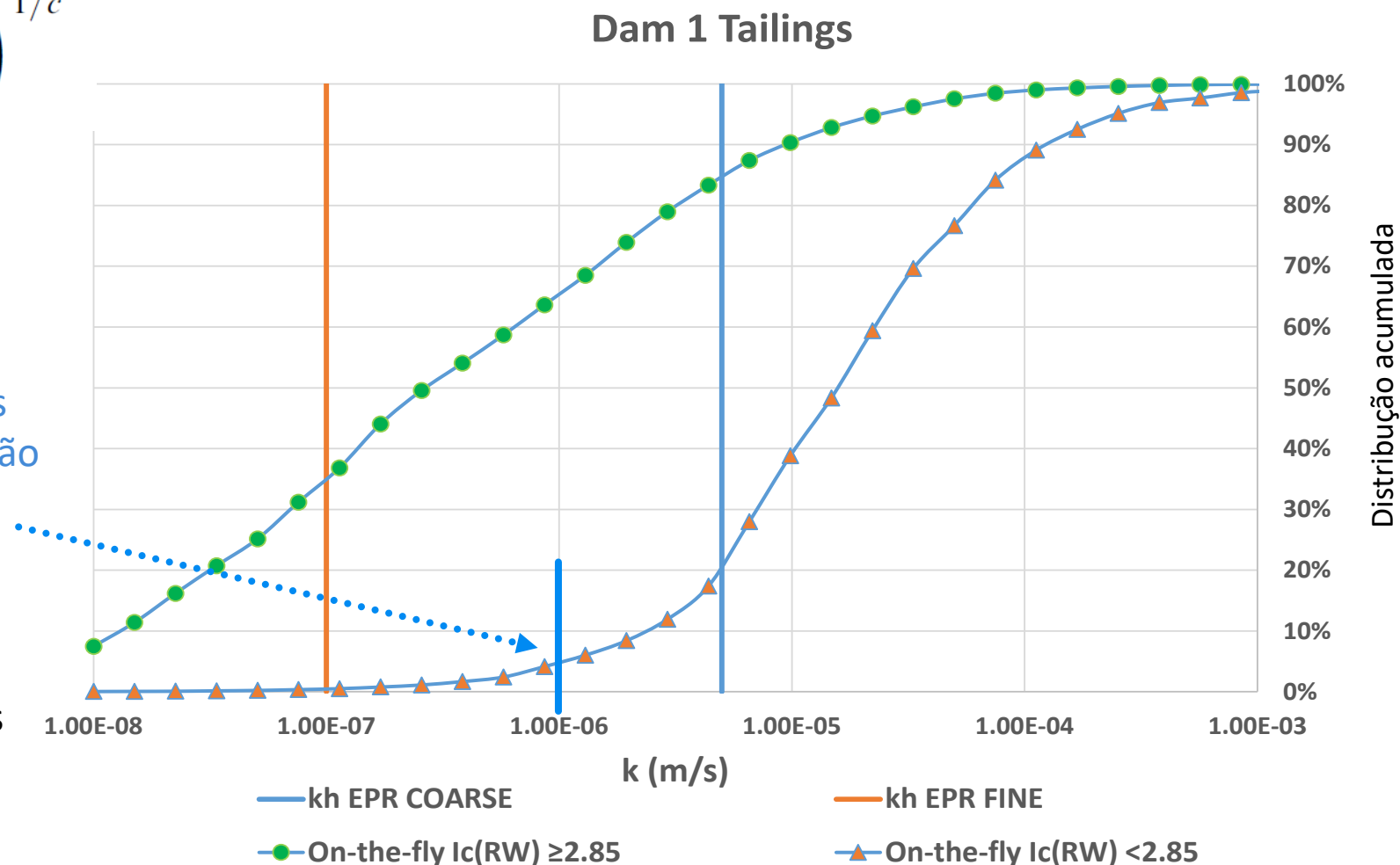
Excluindo-se os pontos onde não havia excesso de poropressão, **ainda restaram mais de 7000 pontos de rejeito classificados como "finos" e 4400 classificados como "grossos"** onde foi utilizada a formulação para avaliação da **condutividade hidráulica do piezocone on-the-fly** (Monforte et al., 2018 - Géotechnique Letters)

$$k = \frac{vd_c \gamma_w}{\sigma'_{v0}} \frac{\lambda}{(1 + e_0) V_{50}} \left(\frac{\Delta u_{ref}}{\Delta u} - 1 \right)^{1/c}$$

Os parâmetros envolvidos são cinco (c, V_{50} , Δu_{ref} ou a, λ , e_0). Dois parâmetros (λ , e_0) pode ser medido independentemente.

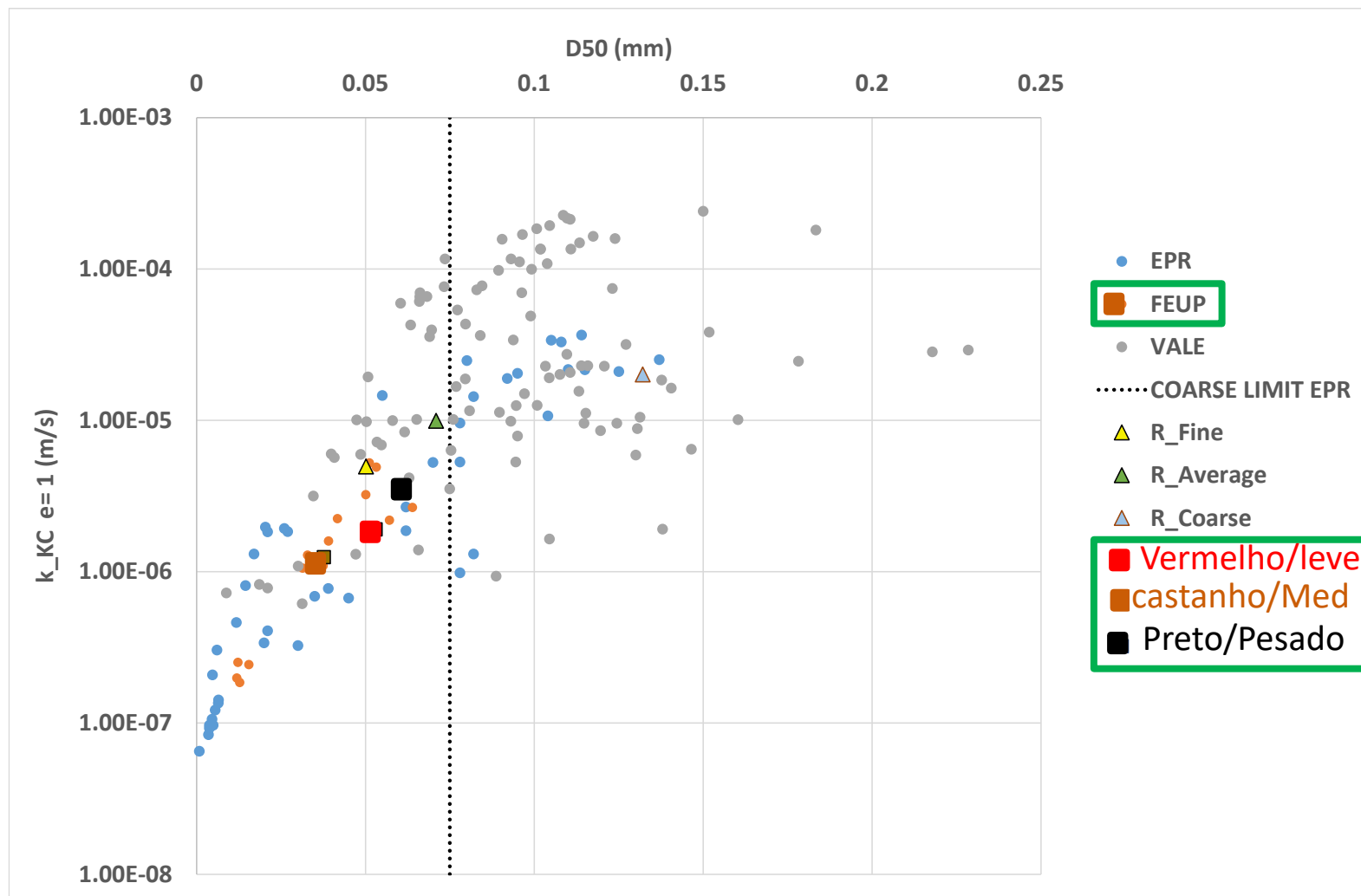
Os valores para "finos" interpretados pela permeabilidade "on-the-fly" são superiores aos dos ensaios de dissipação (o método não é preciso para materiais muito impermeáveis. acima de 10^{-6} m/s).

Interessante observar que para pontos "grosseiros", onde a permeabilidade "on-the-fly" é mais confiável, os valores obtidos são quase todos $>10^{-6}$ m/s, em boa concordância com a simulação G-PFEM.



Estabelecida a distinção de rejeitos no campo com base na permeabilidade, os **resultados laboratoriais** foram novamente considerados. Ao comparar os valores, deve-se ter em conta que as **permeabilidades estimadas do CPTu são horizontais**, enquanto que as permeabilidades em **laboratório são verticais**, aferidos pela proposta de Kozeny-Carman calibration, embora em condições remoldadas não seja determinante, esses ajuste foram devem ser feitos com amostras indeformadas.

Considerando as estimativas das permeabilidades em amostras representativas no laboratório concluiu-se que, para as zonas em que o CPTu identifica que os rejeitos “finos” apresentavam boa concordância entre os resultados de laboratório FEUP lab, particularmente os “Tipo 1 e Tipo 2” (Vermelho e castanho); já os do “Tipo 1” (preto) são classificados como “grossos”.

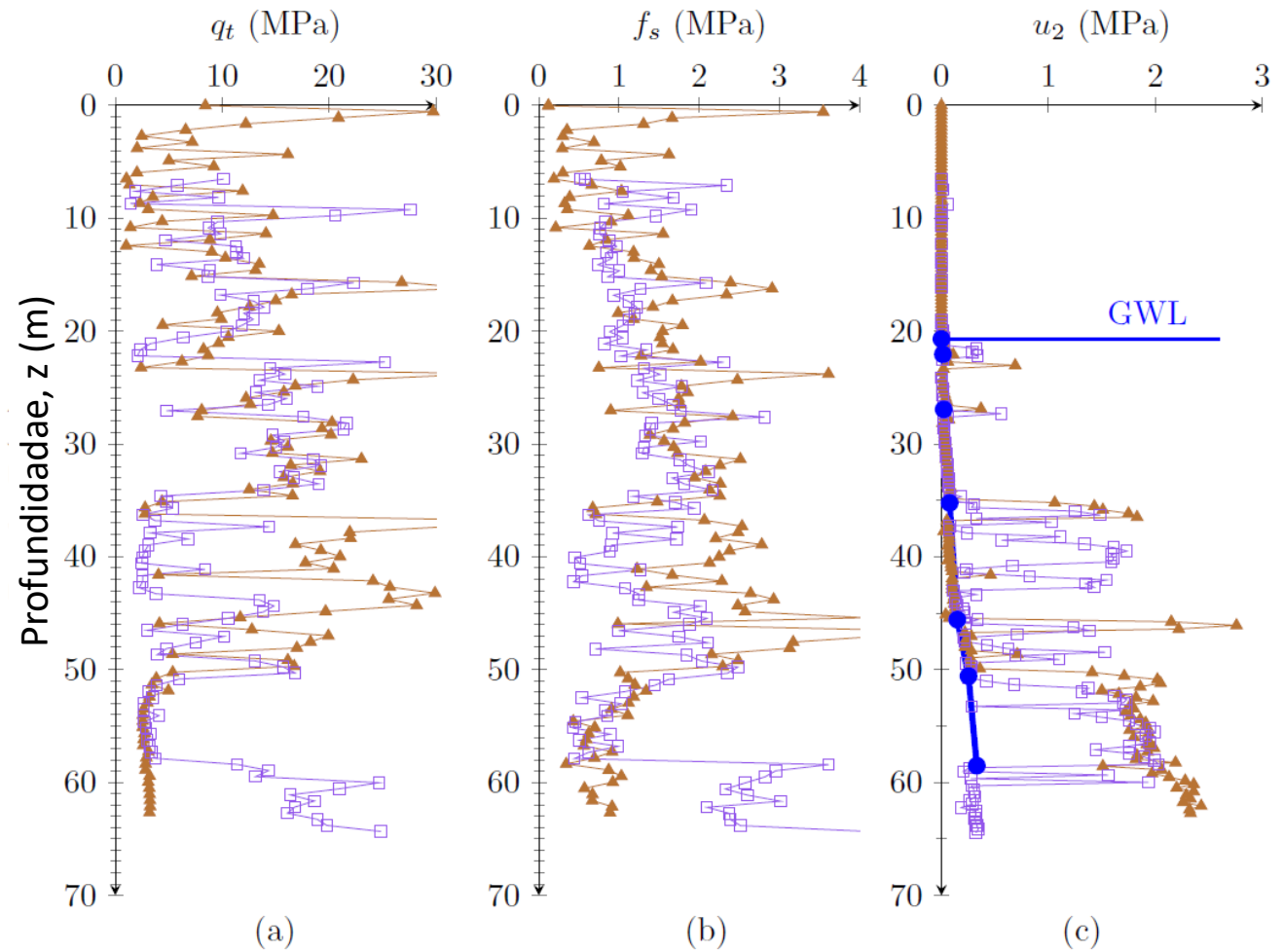
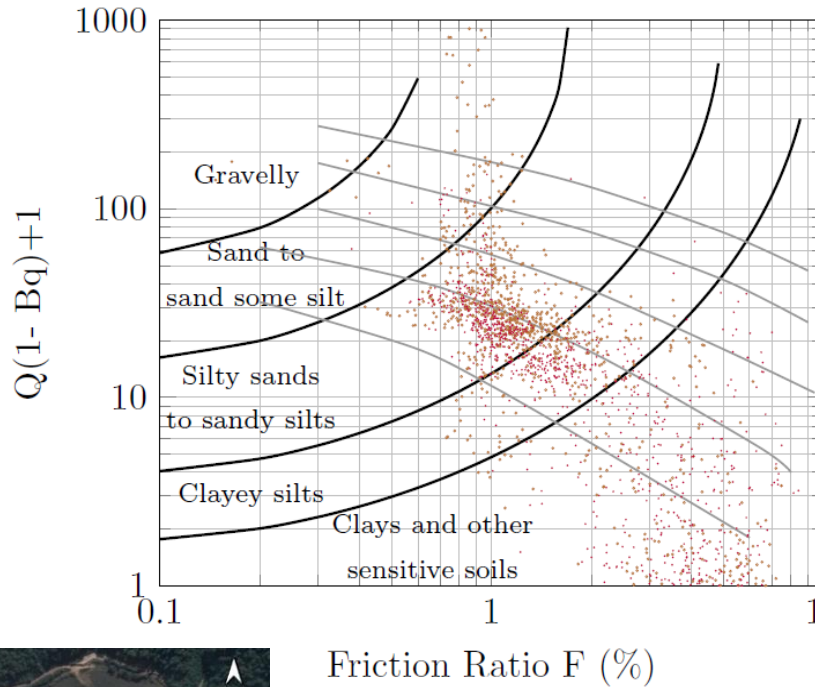


Suscetibilidade à liquefação de fluxo dos rejeitos de ferro a partir do CPTu

Abordagens pelo parâmetro de estado, ψ , e razão de tensão de cedência, YSR

Viana da Fonseca, Molina-Gómez, Fonseca, Davide Besençon

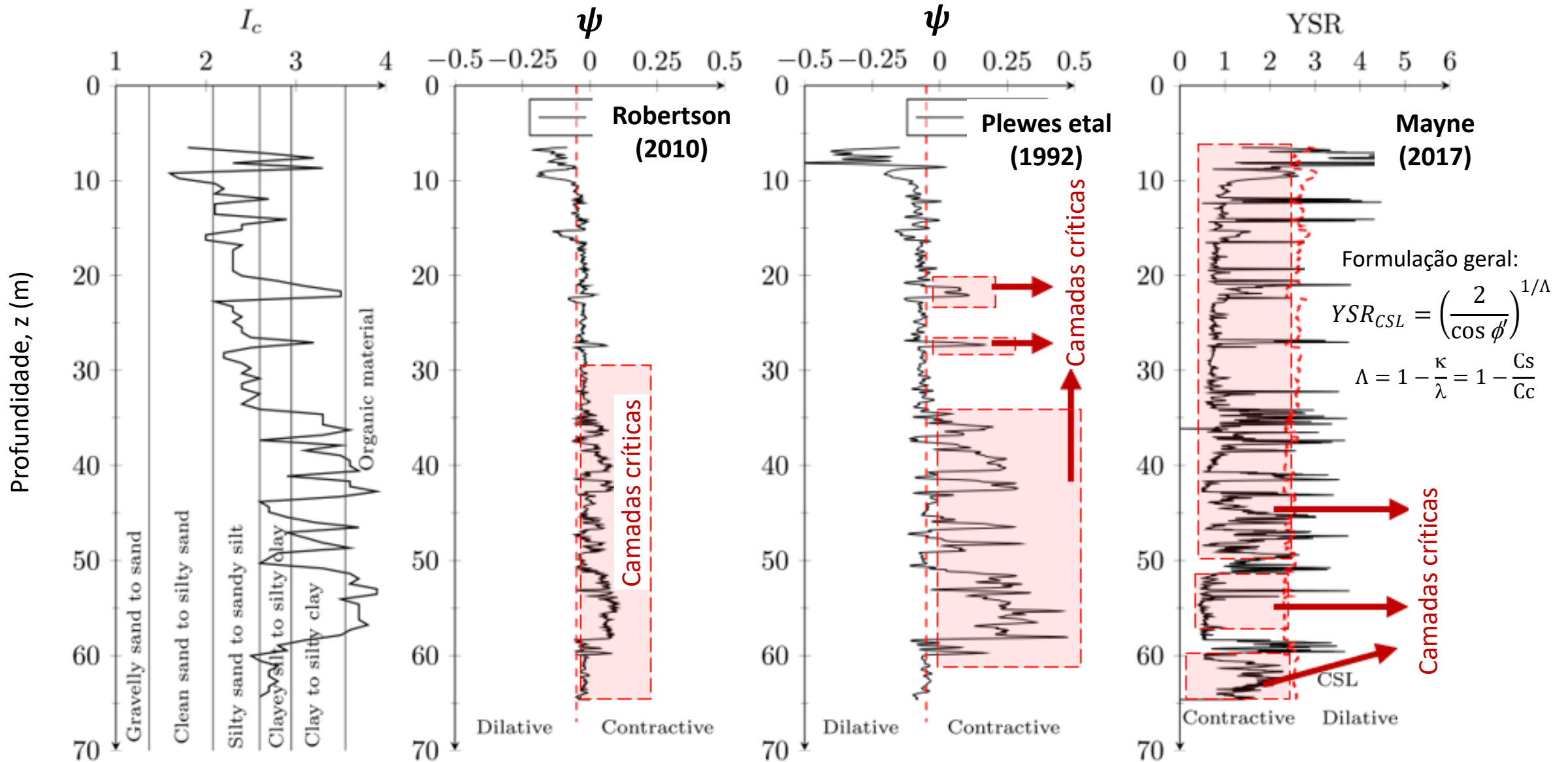
Gama muito ampla de materiais



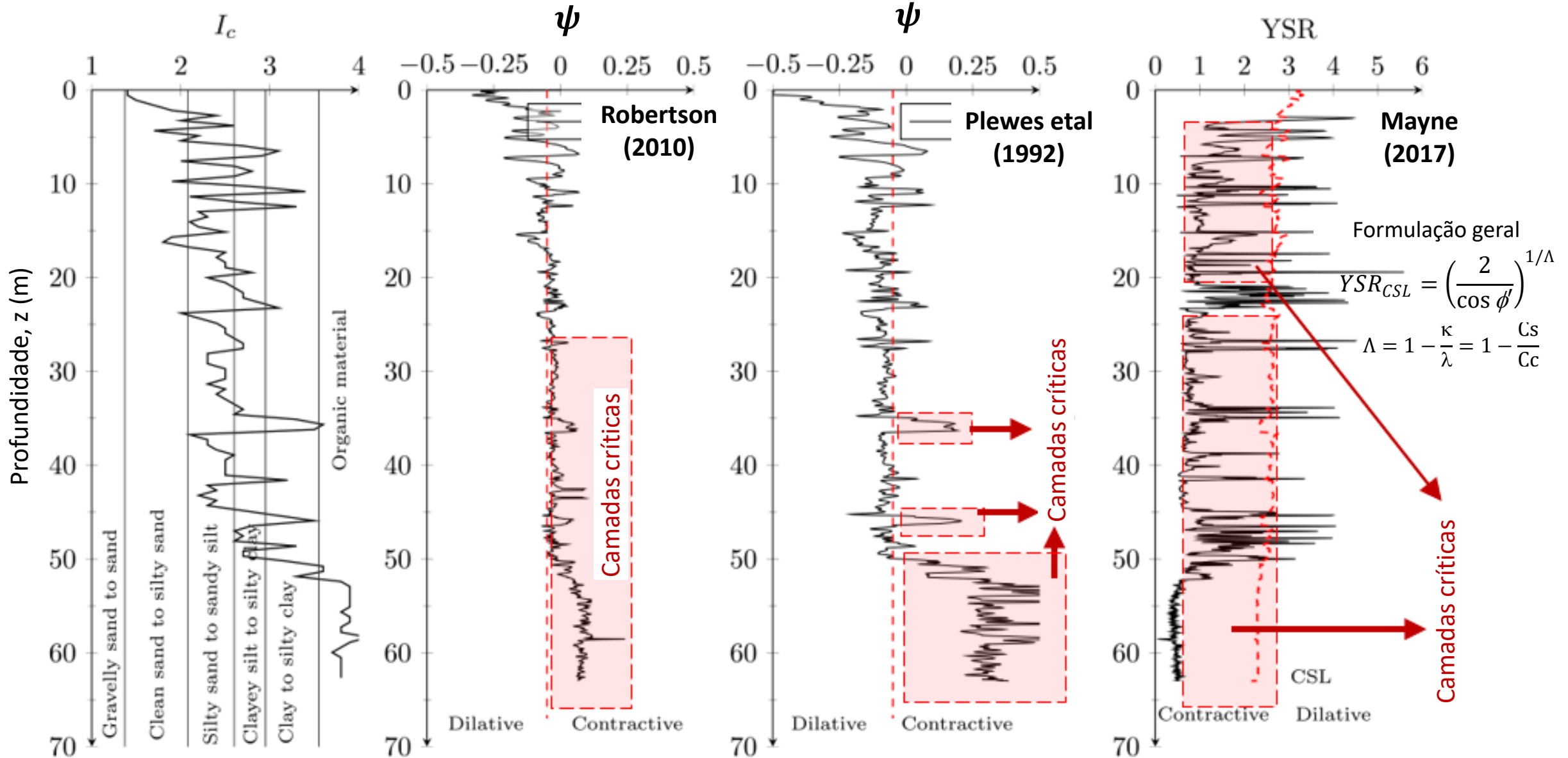
Perfis de CPT:
(a) q_t ; (b) f_s ; (c) u_2



Aplicação em Brumadinho: sondagem PZE 8-14 Abordagem pelo ψ e YSR



Aplicação em Brumadinho: sondagem PZE 29-35 - Abordagem pelo ψ e YSR



Os resultados da CPTU mostraram diferenças entre os perfis nos métodos abordados.

CONTUDO,

estas diferenças foram associadas a incertezas nos parâmetros de entrada utilizados no cálculo dos métodos de Plewes e YSR, que dependem de dados laboratoriais.

No caso da abordagem pelo método Jefferies and Shuttle, Widget, há diferenças significativas quando se distingue drenado e não drenado segundo as gamas de

B_q , para intervalos de:

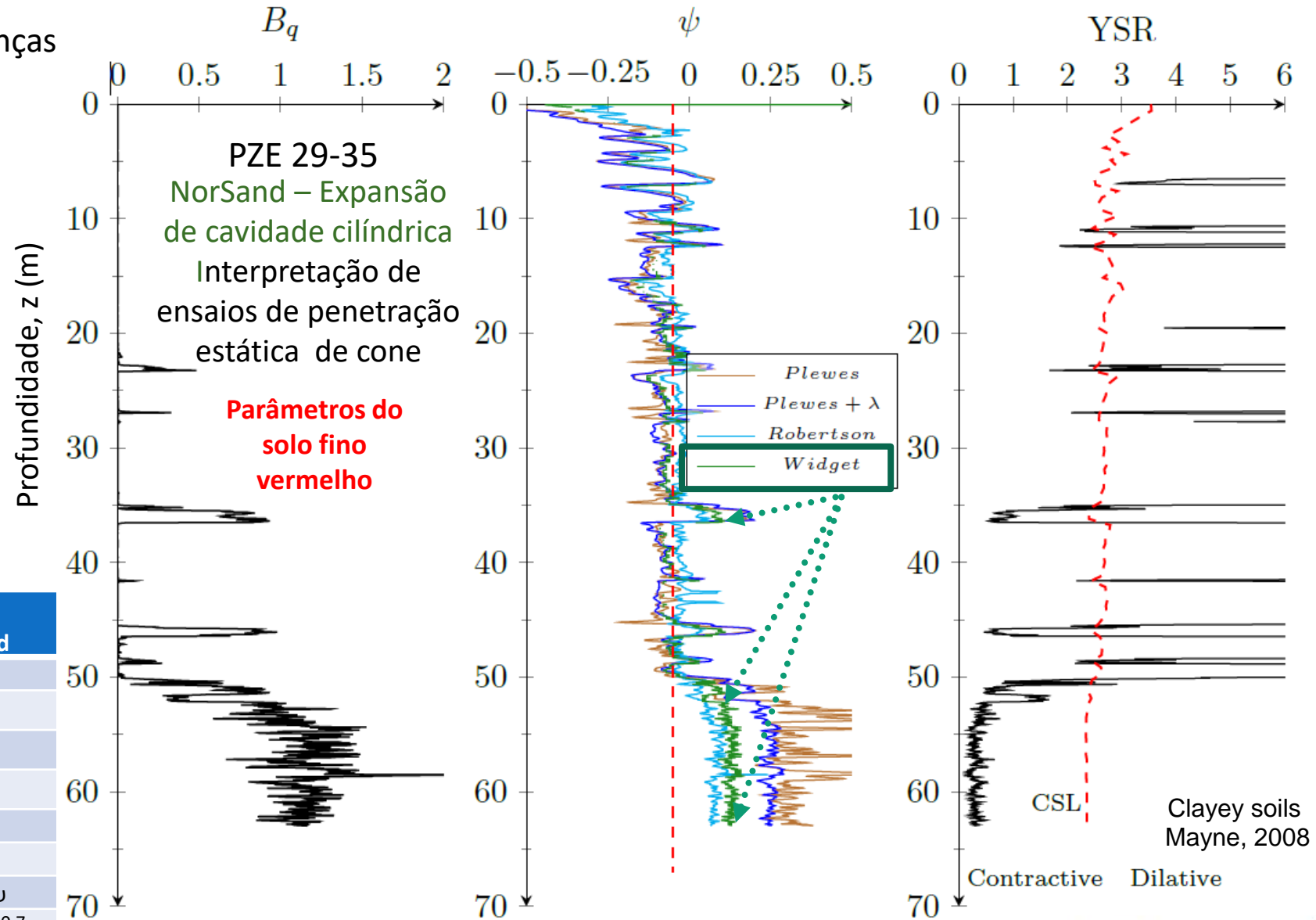
➤ 0,02 a -0,02, para condições drenadas

➤ 1 a 1,5, para cond.s não drenadas

sendo o intervalo parcial. drenado

Estado crítico e Parâmetros NorSand	
$\Gamma_{@1kPa}$	1.174
λ_e	0.056
M_{tc}	1.42
ϕ'_{cs}	35°
N_{cs}	0.42
χ	7.0
H	115 - 950 ψ
G^*	$70 * (p'/100)^{0,7}$

* p' input in kPa, G result in MPa

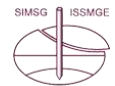


Sobrestima as compacidades in-situ nos materiais contrácteis, há medida que os rejeitos são mais soltos (Fourie et al, 2021)

$$OCR = 2 \left[\frac{1}{1,95M + 1} \left(\frac{q_t - u_b}{\sigma_{v0}'} \right) \right]^{1/2}$$

10ª Lição James K. Mitchell Lecture

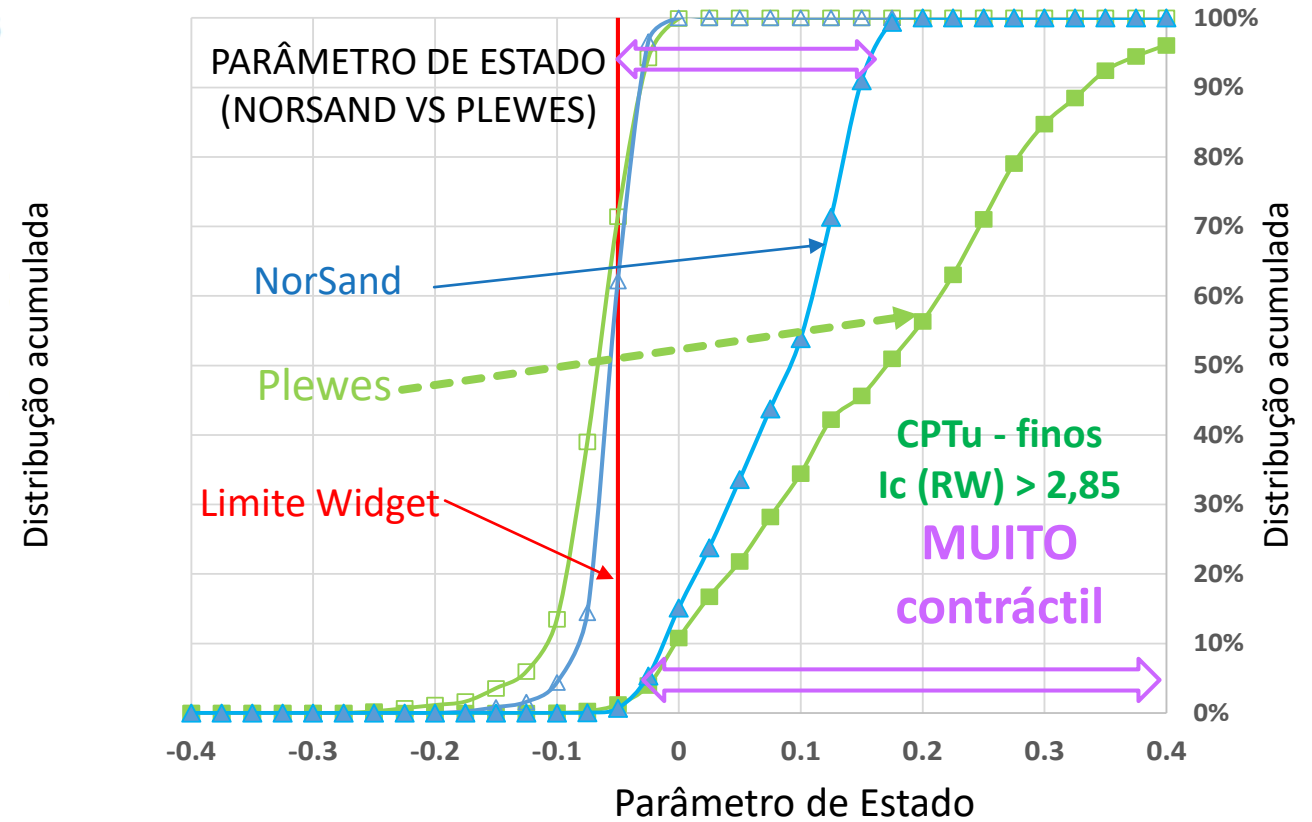
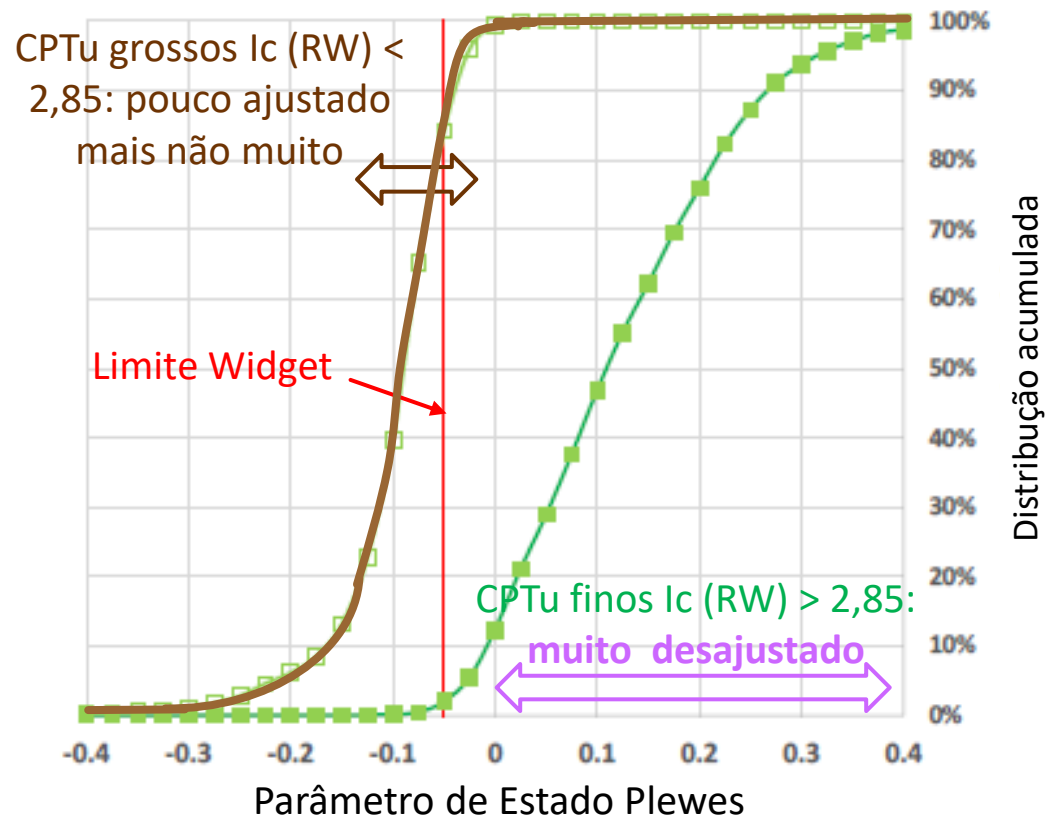
António Viana da Fonseca (viana@fe.up.pt)



Ground Property Characterization from In-Situ Tests



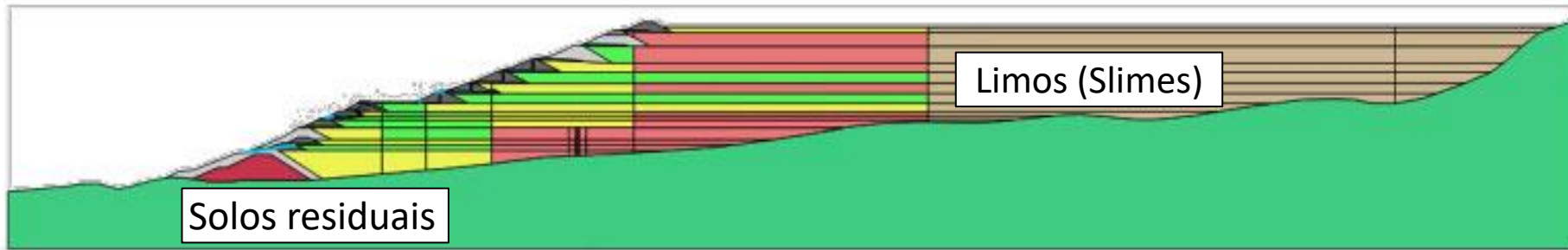
O parâmetro de estado foi estimado aproximadamente considerando as amostras de blocos (relevância para as recolhas FEUP/VALE). A faixa de índices de vazios é ampla e há muita incerteza sobre a tensão efetiva "in situ" instalada. No entanto, tomando $e = 1$, como valor médio, $e = 1,25$, como valor máximo e considerando as posições CSL para materiais de referência, parece que as estimativas CPTu do parâmetro de estado são plausíveis (relatório CIMNE, 2021)



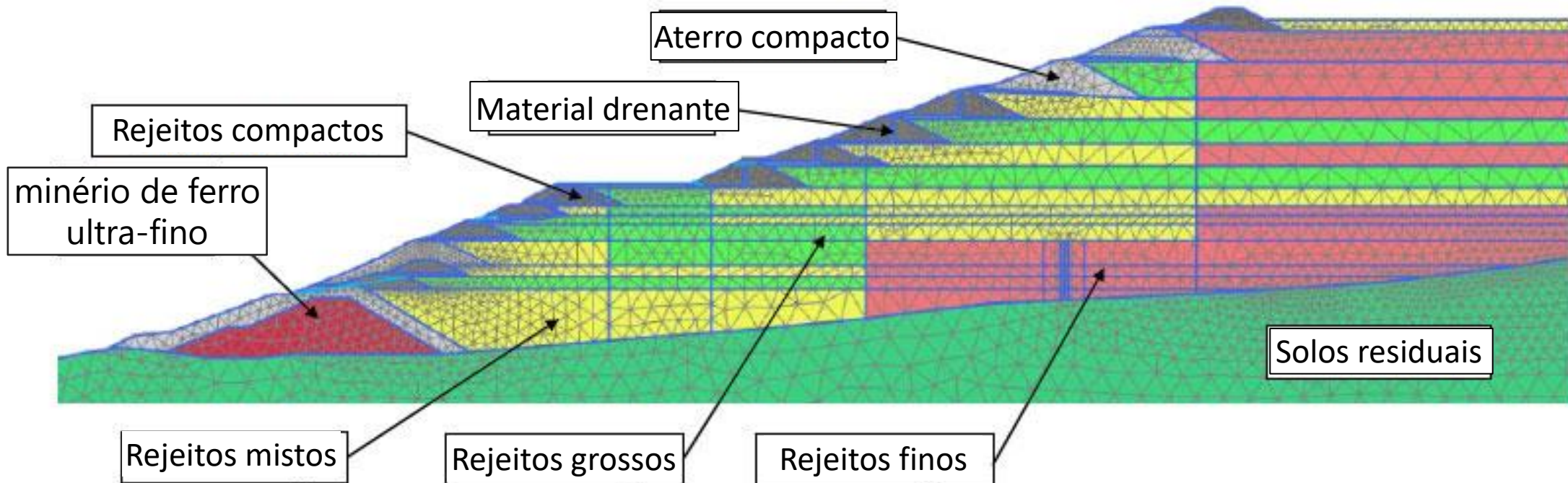
Usando expansão da cavidade de NorSand (Widget, Shuttle & Jefferies) a dispersão é menor

Distribuição acumulada dos valores do Parâmetro de Estado "In situ" para os dois perfis **CPTu-PZE-29-35** e **CPTu-PZE-8-14** usando os métodos de Plewes e Nor-Sand (Widget, Shuttle & Jefferies)

Concluído este processo pode prosseguir-se para as análises numéricas



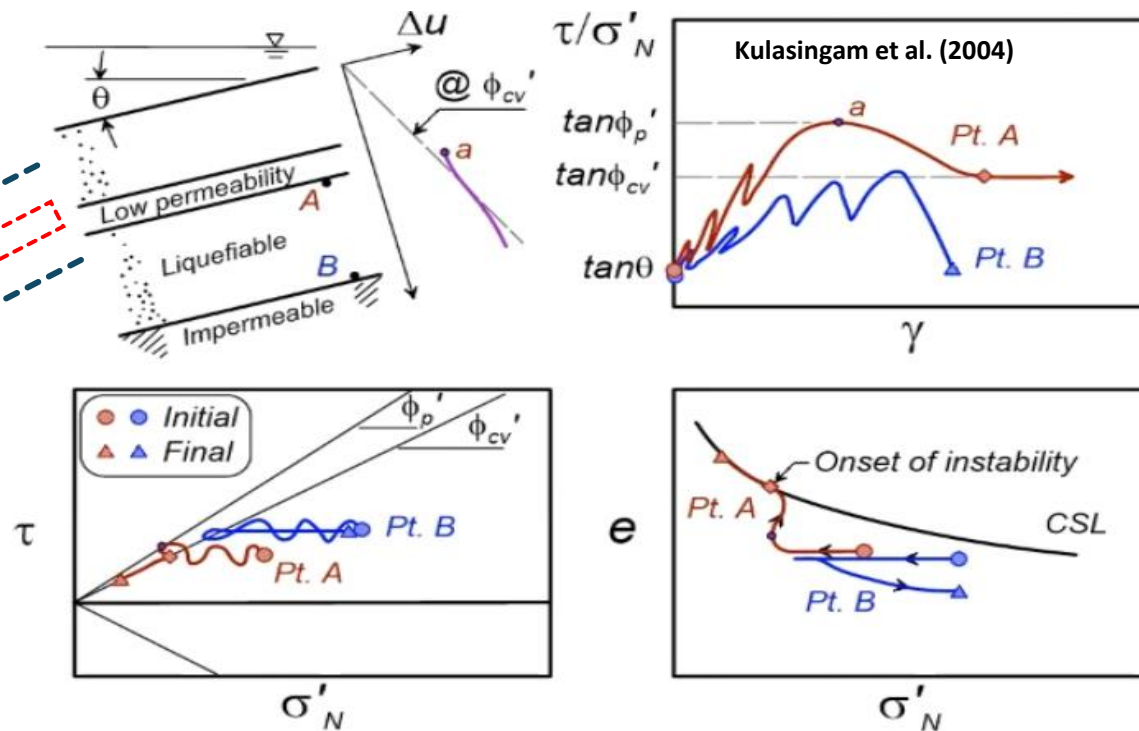
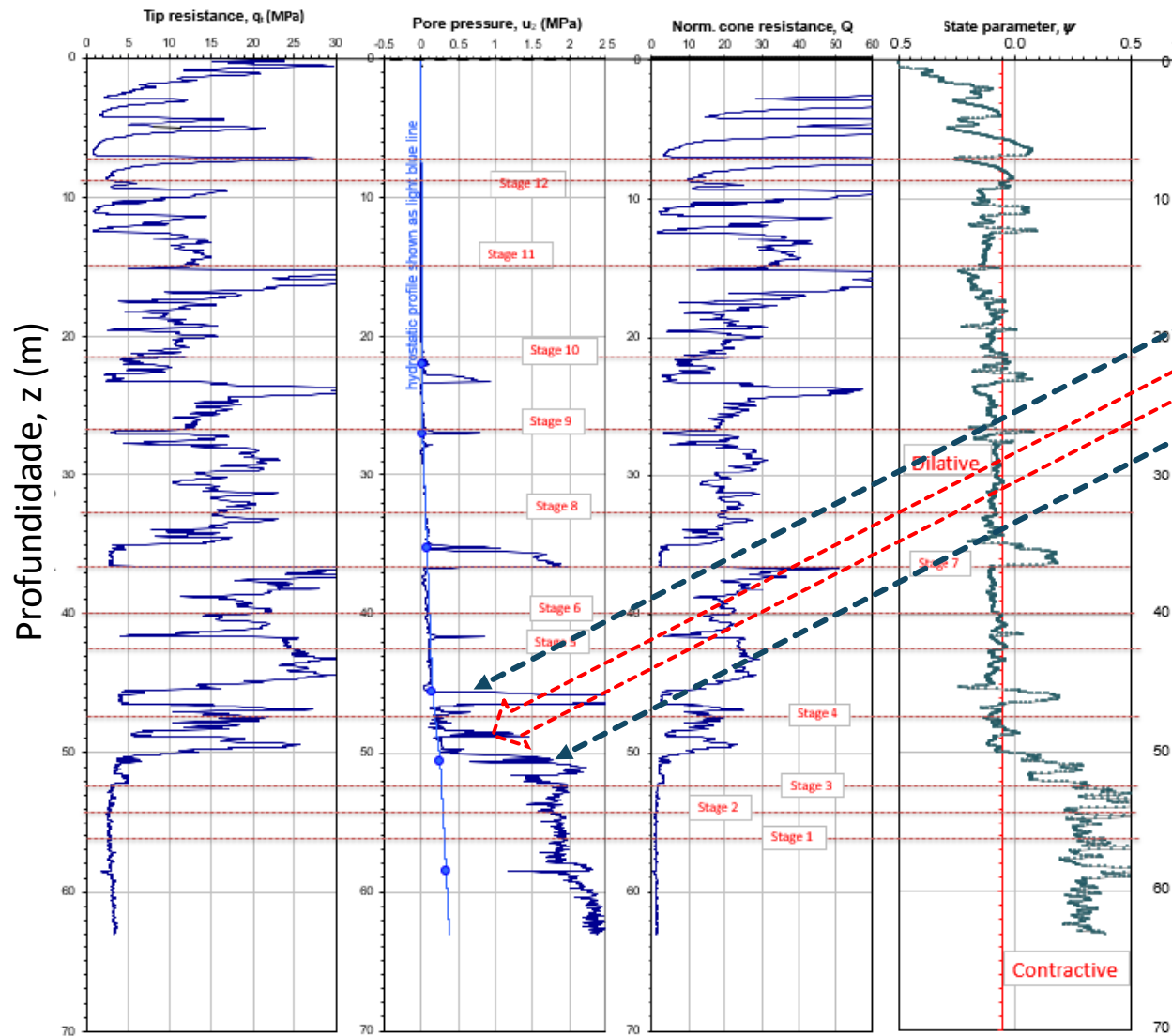
Estruturação dos blocos / clusters CIMNE/UPC !



A estratificação é condição favorável, quando o sistema tem diversos fluxos de água de entrada e a estratificação potencializa a instalação de "correntes" de água muito distintas. A resistência "residual" é muito difícil de identificar, especialmente se

houver drenagem parcial quando há redistribuição dos vazios. **Devido à difusão de excesso de poropressões pode causar instabilidade.**

Resposta Sistémica



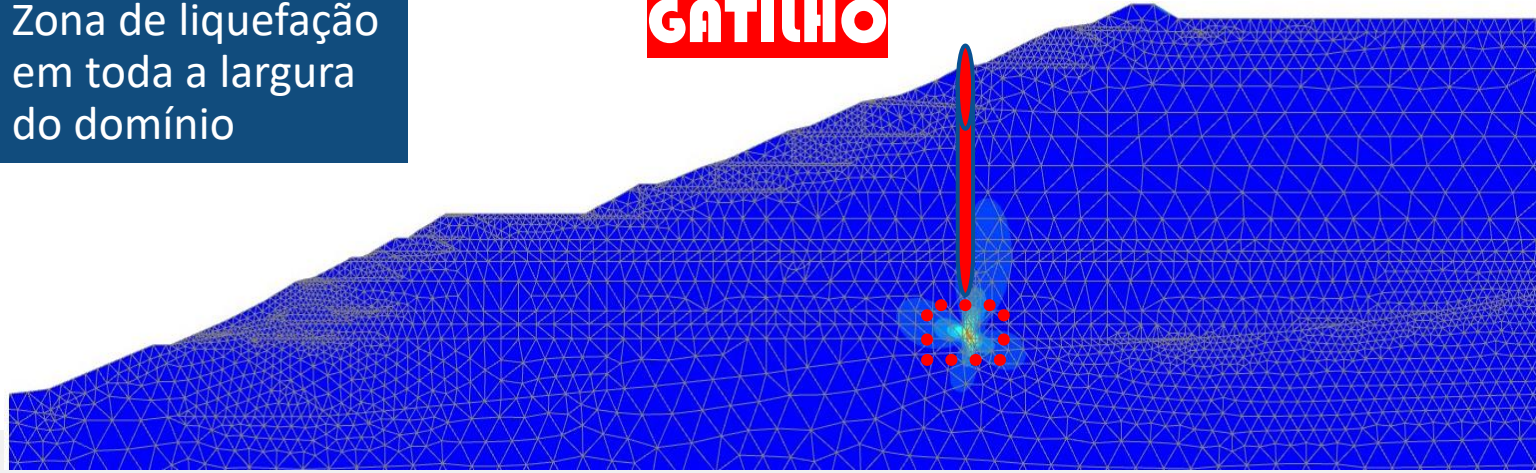
O escoamento dá-se num tempo que decorre até à definição de S_{u_Liq} (caindo até à CSL)

Neste casos os pontos A e B têm índices de vazios distintos.

O INÍCIO DA INSTABILIDADE seguirá para distintos estados finais.

Zona de liquefação
em toda a largura
do domínio

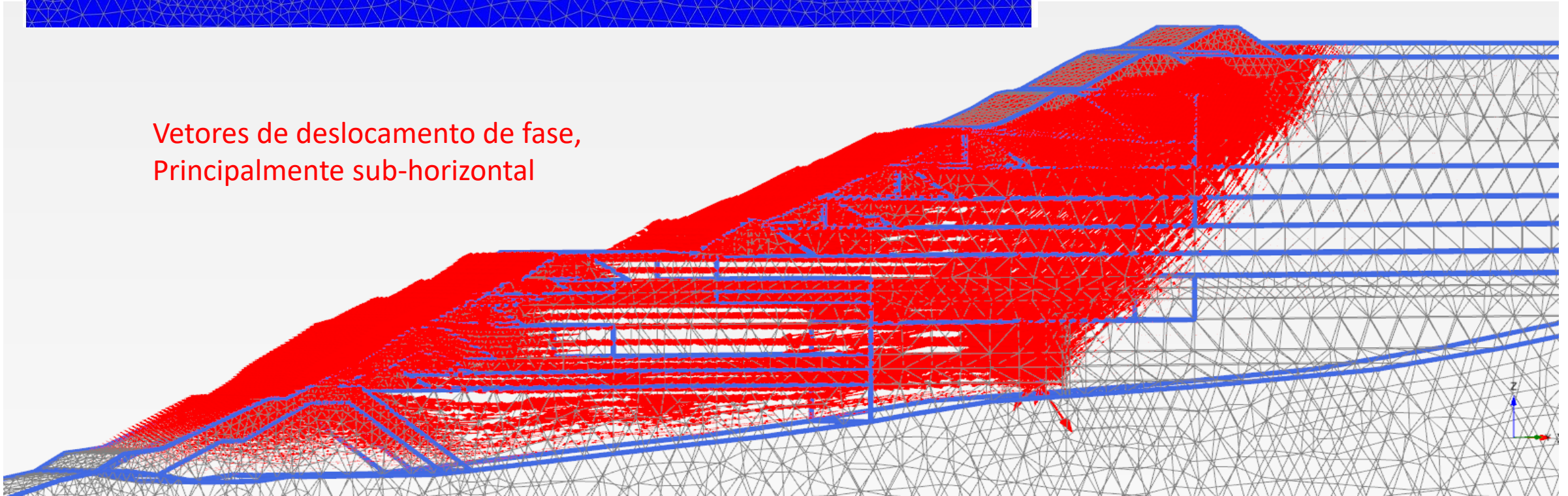
GATILHO



B1 Section 3: 3D-slice analyses
(CMINE / UPC, 2021)

cadeia rápida de escoamento
lateral para jusante começando na
parte inferior

Vetores de deslocamento de fase,
Principalmente sub-horizontal



TC221 Webinar, Nov. 2022 sobre a Resistência não drenada MÍNIMA ou RESIDUAL ($S_{u,min}$ ou $S_{u,res}$)

Que resistência se mobiliza após desencadeamento da liquefação? Quando se recupera as forças Newtonianas?

O parâmetro de estado não captura a existência de qualquer cisalhamento estático pré-instalado (ou seja, p' é indiferente de a razão de tensões, K_0 , em estado ser isotrópica ou anisotrópica; **assim, qualquer distância do estado inicial à CSL no plano $e-p'$** pode estar ser associada a uma tensão de **cisalhamento estático nula** ou, em oposição, **muito alta**. Por isso, é altamente recomendável:

- determinar $S_{u,min}$ ($S_{u,res}$) com recurso a **ensaios in situ** (estado *de facto*, FVT / Piezo Bal ?) ou/e
- determinar as **tensões de cisalhamento estáticas**, τ_{static} and K_0 através de análise numérica, mesmo com modelos constitutivos tensão-deformação relativamente simples; *in situ tests* também são úteis (SBPT, PMT, DMT).

Esperando que todo o sistema siga esses caminhos na redistribuição do equilíbrio entre os elementos.

Quando o estado de tensão residual é atingido, essa tensão seria mantida constante ou seguiria a CSL até zero ou simplesmente deveria se mobilizar fricção, eventualmente endurecendo?

Hoje, porém cresce a confiança em **RECORRER A ANÁLISES NUMÉRICAS – DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO - ACOPLADAS**, quando comparadas com o **Equilíbrio Limite** [utilizando (s_u/σ'_{v0}) de pico e residual]. Mas é muito útil fornecer abordagens conservadoras para propósitos mais imediatos, como seja a satisfação de **Fatores de Segurança regulamentares**, **caso** as pessoas não sejam capazes de executá-las bem (**ou não lidem bem com as bases paramétricas dos modelos expandidos do CSSM já disponíveis, como o CASM**). Muitos reguladores o exigem.

$S_{u,res}$ ($S_{u,min}$) por retroanálise métodos numéricos de casos históricos de roturas por liquefação

O desencadeamento da liquefação é uma questão difícil de resolver, dada a incerteza dos gatilhos. É resolvida impondo ao modelo de cálculo, por simplicidade e **quando se atinge o máximo valor da resistência** (que pode ser o valor da tensão deviatória ou de cisalhamento de pico ou de cedência – associados ao estado instável), **as tensões caem para valores residuais, até estabilizarem na convergência com a CSL (comp. atrítico)**. Esta é **erradamente designada de liquefeita**. A geração de incrementos da poropressão num sistema estratificado que favorece o influxo da água para a camada onde se **cria um escoamento, com características de “torrente”**. O fenómeno foi estudado pelo **Prof. Susumo Iai** a retroanálise do generizado deslizamento de **Petobo** aquando do terramoto de **Palu** (Indonésia, 2018). Durante o sismo observou-se um **“filme/lâmina” de água sob pressão, por baixo da crosta mais superficial (uma camada muito pouco permeável), na camada de areia subjacente**. Em 1985, Whitman, enfatizava que o aumento de poropressões nas fronteiras de solos granulares pode gerar essa “lâmina” de água, numa “RESPOSTA SISTÉMICA” (sic): **“it is only necessary for a thin layer at the top the “sand” to loosen enough that its steady state resistance becomes less than the static shear stress”**.

No trabalho recente de Boulanger & Lai (2022)* demonstra-se que: **Solos arenosos com camadas intermédias siltosas são mais propensos à rotura por fluxo do que em bolsas de rejeitos arenosos homogéneos**. Em encostas íngremes de rejeitos com estrutura laminar, espera-se que uma deformação localizada próxima à camada menos permeável acumulando uma pressão excessiva na água dos poros, desenvolvendo uma cadeia rápida de espalhamento lateral em direção a jusante

* 20th ICSMGE, Sydney 2022

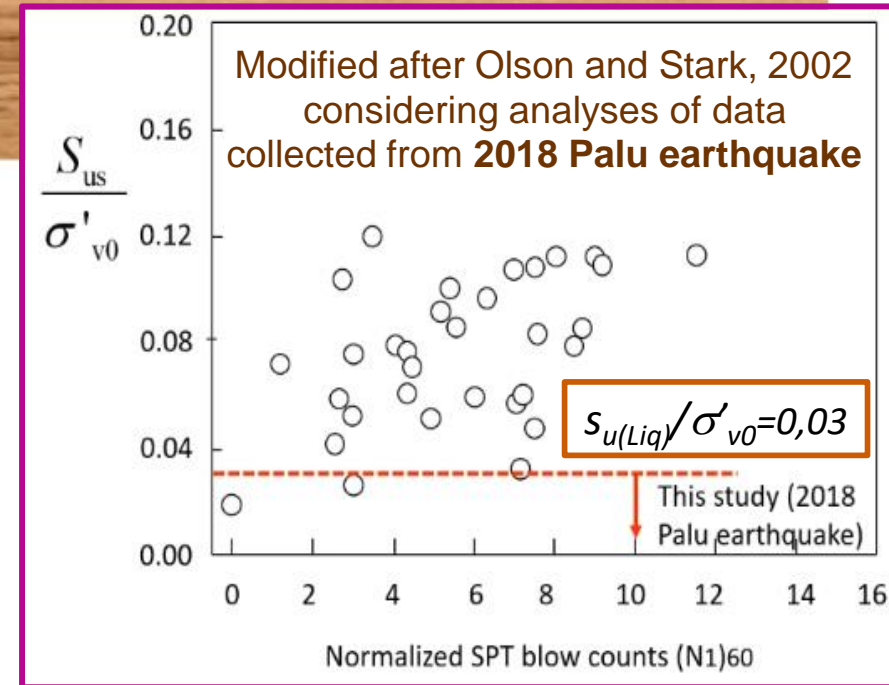
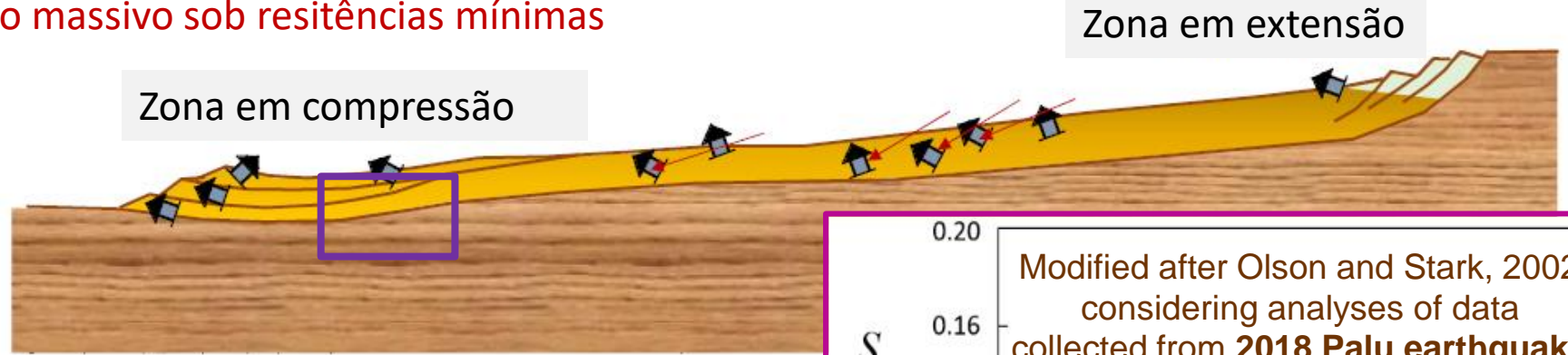
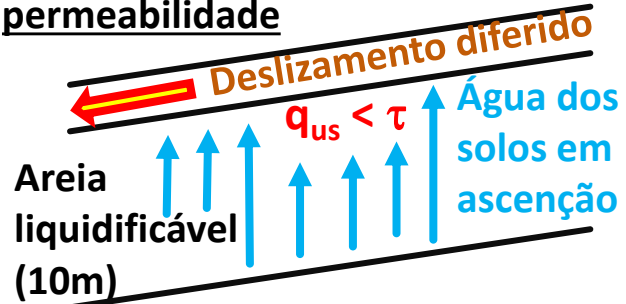
$S_{u,res}$ ($S_{u,min}$) por retroanálise métodos numéricos de casos históricos de roturas por liquefação

Adap. de Prof. Susumo Iai (2021) Mecanismo de Liquefação induzido pelo sismo de 2018, PALU (FLIP cons. Japan)

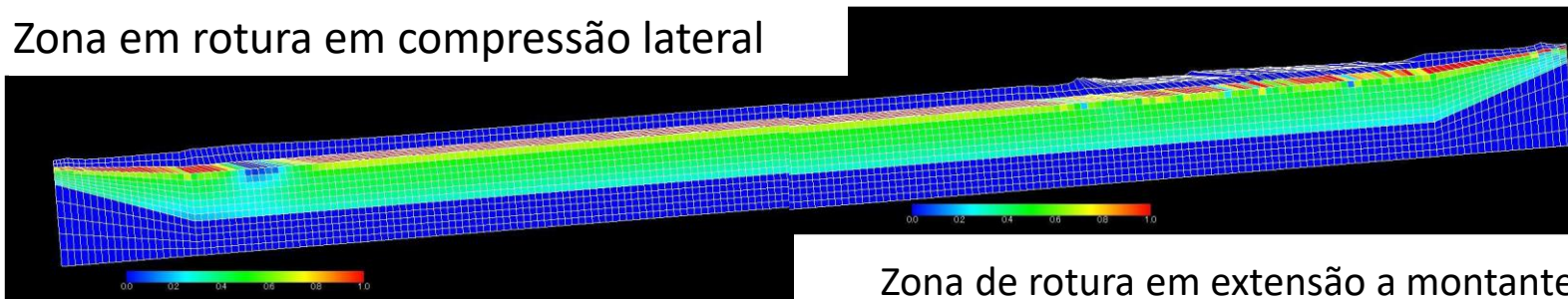
Vibração no solos no aluvião solto saturado > Geração de pressão de poros > Redistribuição das tensões devido à dissipação de poropressões > criação do filme de água > resistência ao cisalhamento em queda para residual > **Fluxo generalizado**
Mobiliza-se assim um **escorregamento massivo sob resistências mínimas**

PETOBO: rotura por fluxo progressivo

Camada/crosta (2m) de baixa permeabilidade



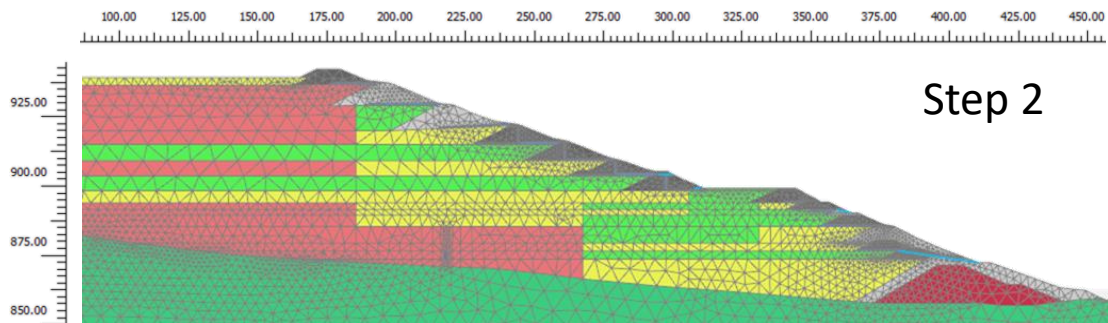
Zona em rotura em compressão lateral



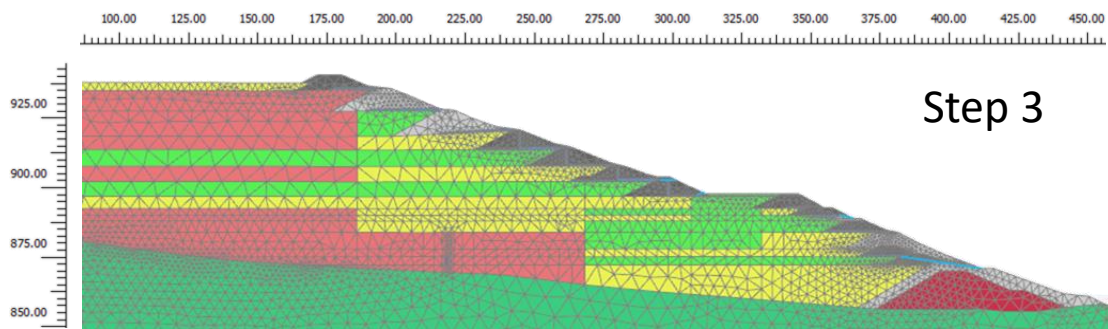
Zona de rotura em extensão a montante: deslizamento desde o topo ao longo de centro

B1 revisitada para retroanálise da resistência última

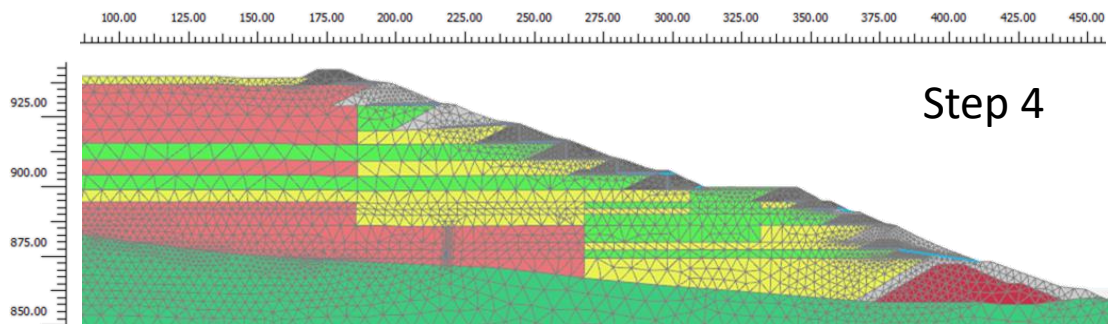
Malha deformada



Step 2



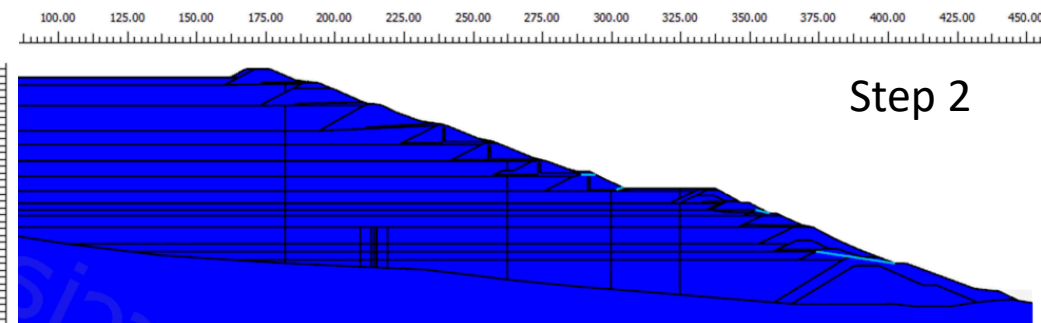
Step 3



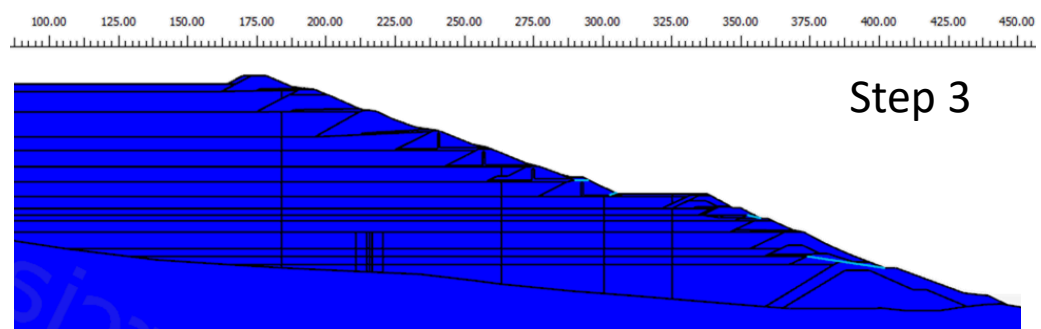
Step 4

Malha deformada

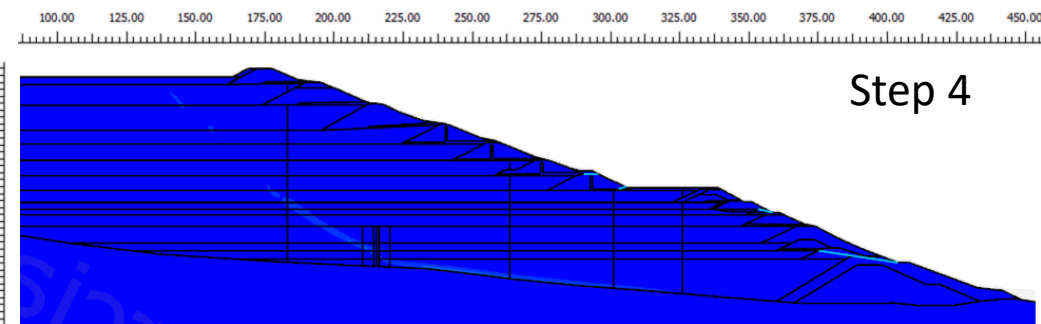
Deformações distorcionais incrementais



Step 2



Step 3

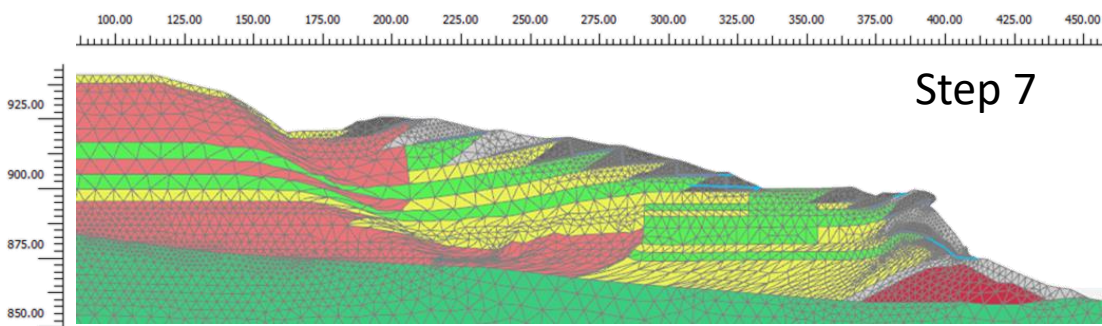
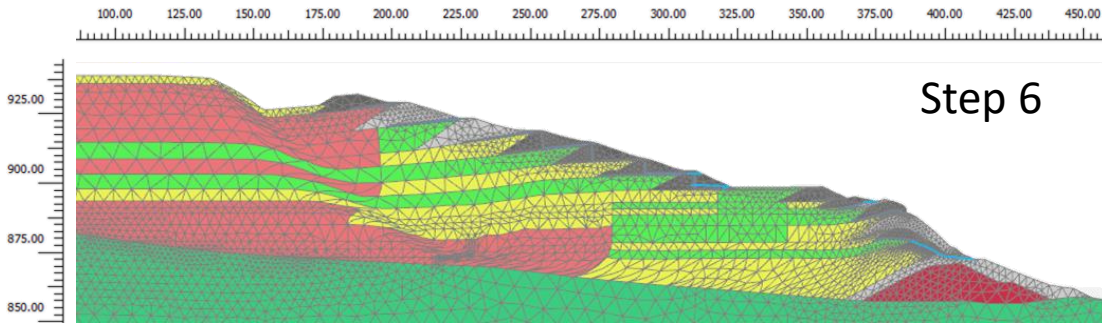
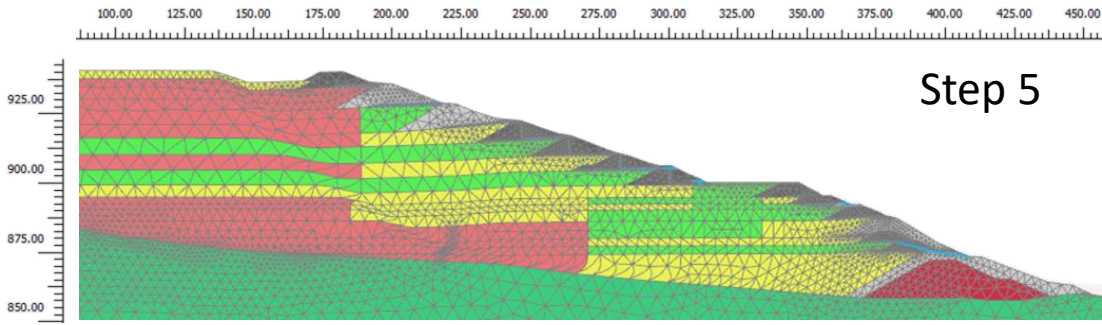


Step 4

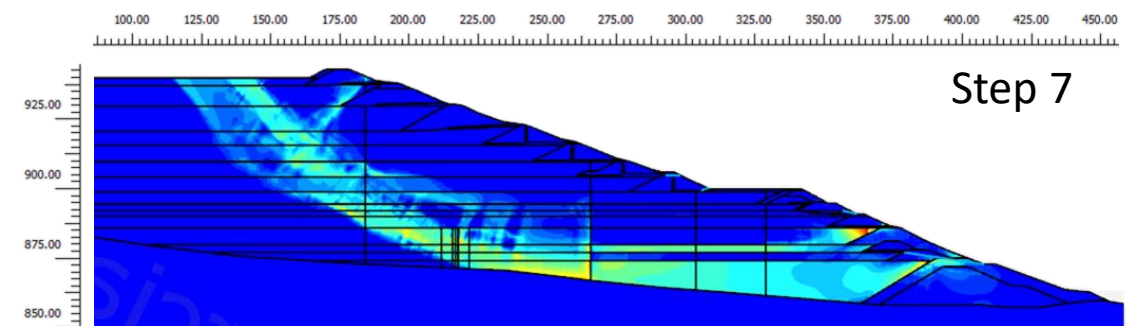
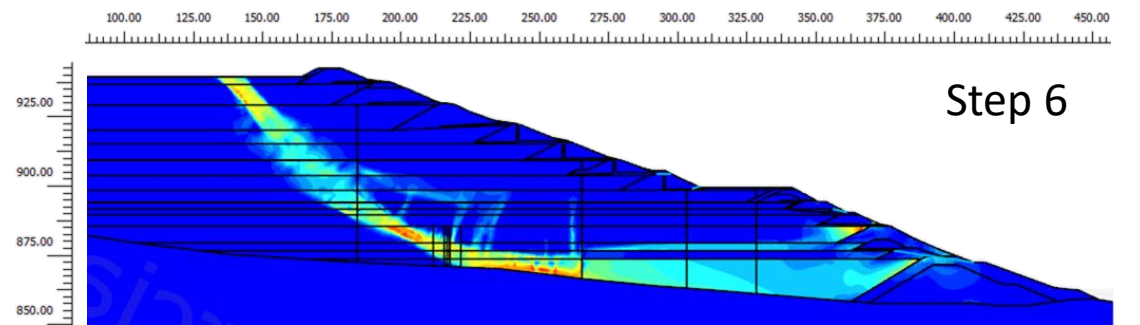
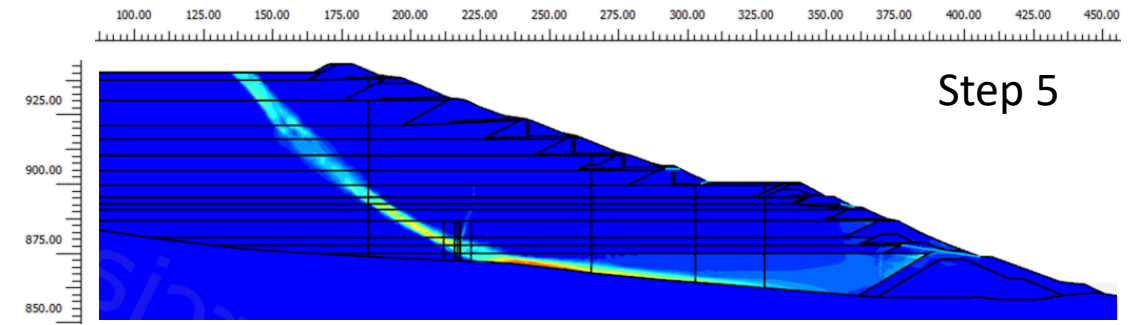
Incrementos das deformações distorcionais

B1 revisitada para retroanálise da resistência última

Malha deformada



Deformações distorcionais incrementais



Malha deformada

Incrementos das deformações distorcionais

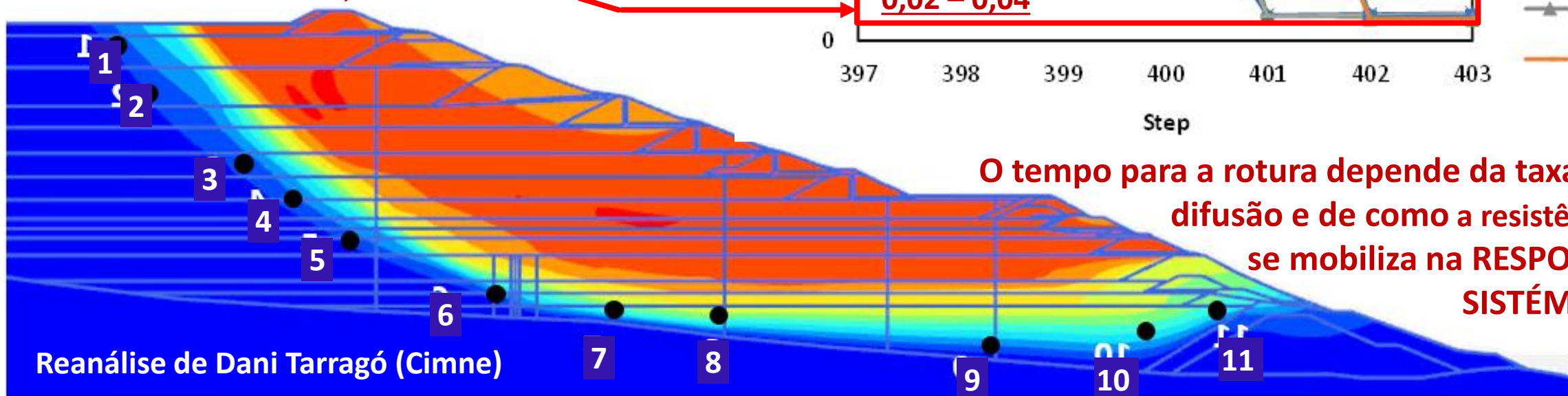
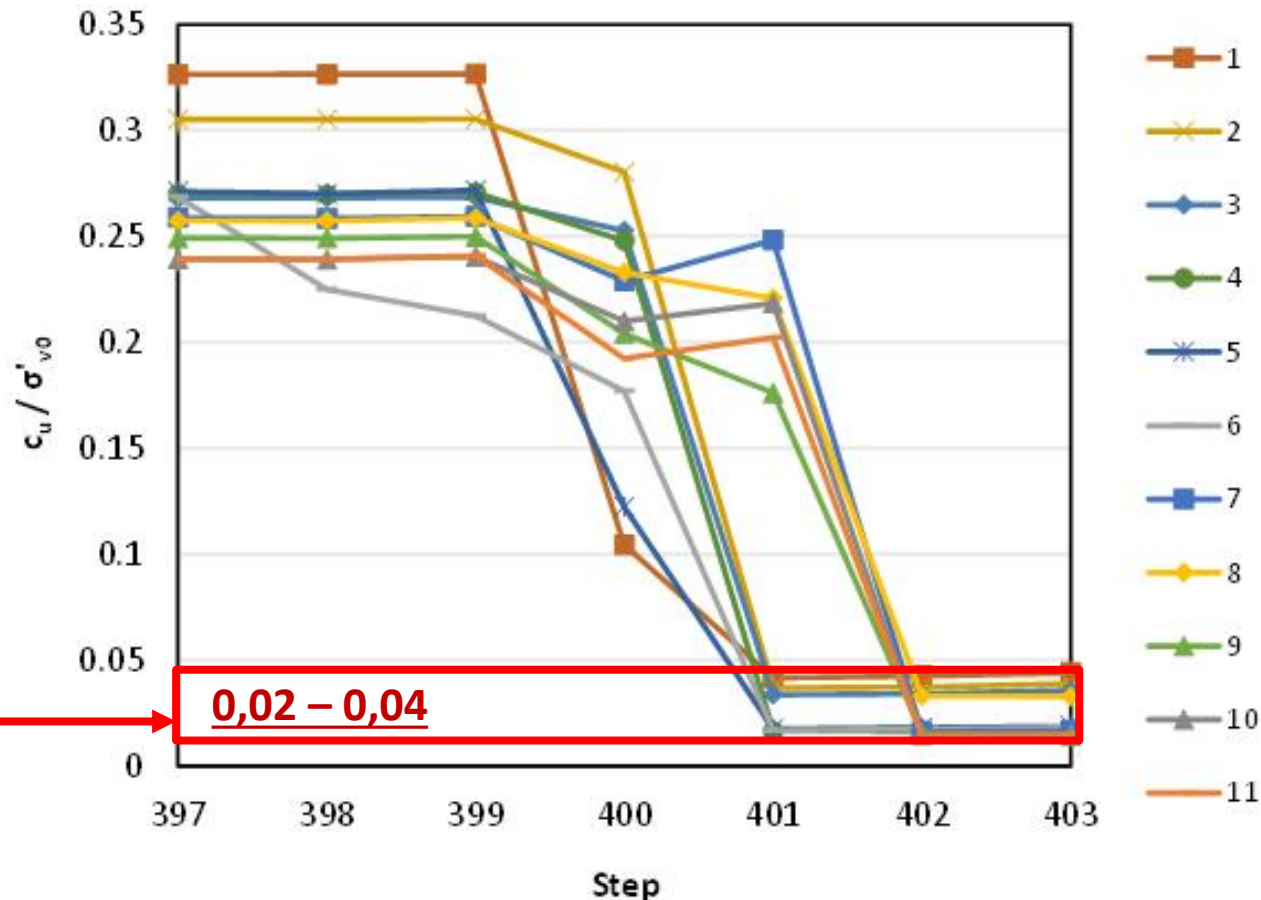
Ainda a retro-análise B1:

Progressão da resistência ao longo das banda de rotura

A resistência “residual” (τ_{res}), é difícil de identificar, especialmente se algum carregamento induzir drenagem parcial e redistribuir vazios com a difusão dos excessos das poropressões, criando instabilidade

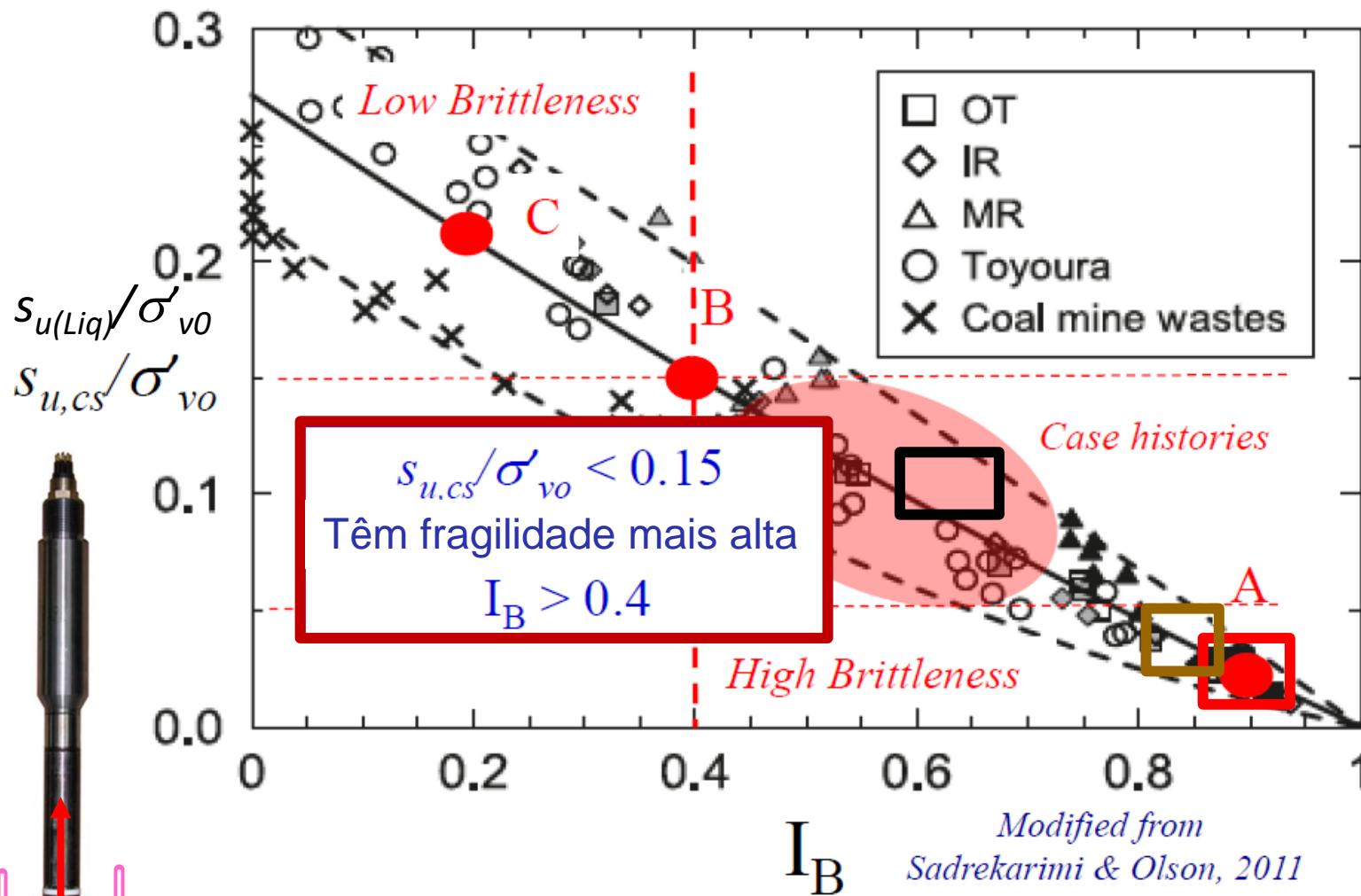
Uma avaliação cuidada da evolução das tensões de desvio normalizadas $(q/2)/\sigma'_{v0}$, revela a tendência para uma generalizada mobilização de resistências muito baixas na banda de rotura

$$(s_{u, res})/\sigma'_{v0} (= 0,02 - 0,04)$$



O tempo para a rotura depende da taxa de difusão e de como a resistência se mobiliza na RESPOSTA SISTÉMICA

Reanálise de Dani Tarragó (Cimne)



Valores de referência de resistência e índices de fragilidade
Barragem 1, Brumadinho

Symbol	Description	Coarse Tailings	Tailings Mixtures	Fine Tailings
S	Normalized peak TXK_0C undrained strength	0.46	0.39	0.32
$S_{u(Pico)}/\sigma'_{vo}$	Normalized peak undrained strength	0.3	0.26	0.21
$S_{u(Res)}/\sigma'_{vo}$	Normalized residual undrained strength	0.12	0.04	0.02
I_B	Bishop brittleness index	0.59	0.83	0.90

Exceções devem ser cuidadosamente identificadas em materiais intermediários, entre os granulares e os mais finos e plásticos, (ex. rejeitos de minério de ferro)

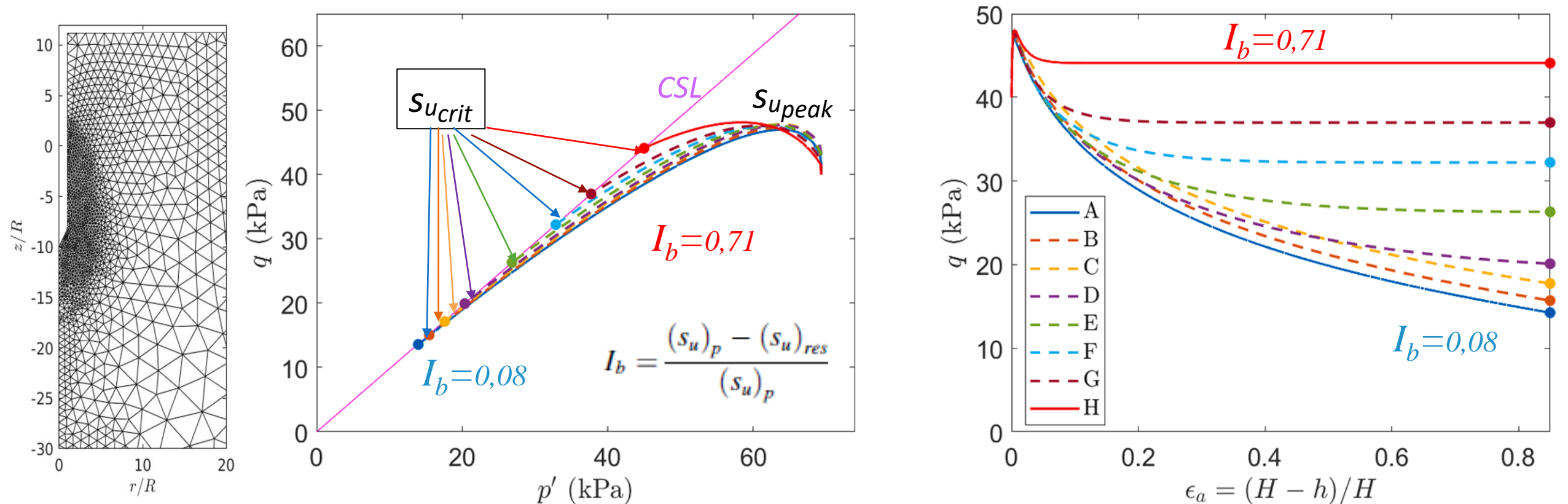
Os valores muito baixos de RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO RESIDUAL podem ser definidos por ensaios (laboratório – Tx com controlo de deformação - ou in situ – com o “PIEZOBAL”, por ex.), mas foram abordados por análises retroativas

(?) ÍNDICE de FRAGILIDADE (?)

(I_B) VERSUS $S_{u(Liq)}/\sigma'_{vo}$

Análise Numérica (PSEM) da penetração de cones em solos liquidificáveis tirando partido do intervalo entre a ponta do cone ($s_{u_{peak}}$) e do anel poroso de leitura u_2 ($s_{u_{res}}$)

Fragilidade: ensaios CK₀U de trajetórias de tensões controladas

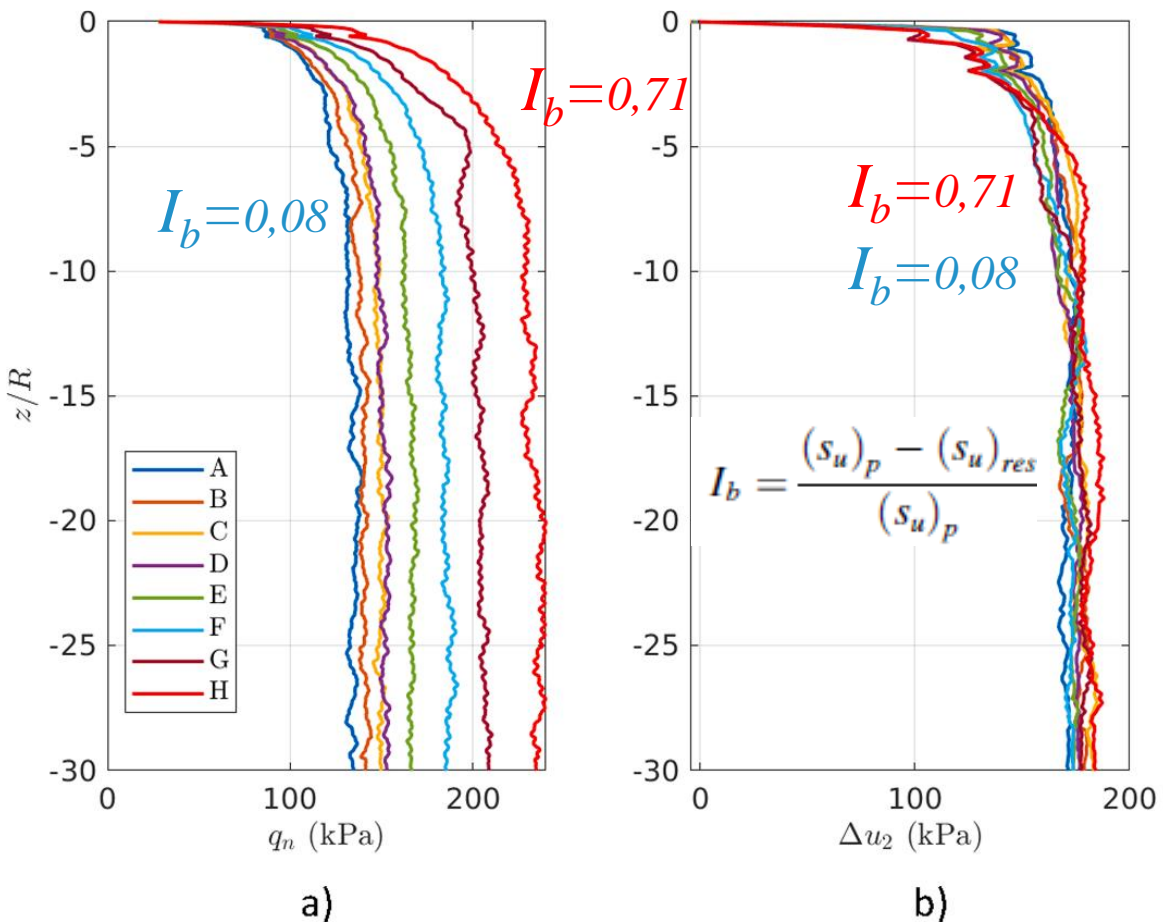


Materiais A a H (mesmo $S_{u_{peak}}$, mas muito distintos $S_{u_{res}} \cong S_{u_{crit}}$): comportamento preferencial pelos avanços (a) Undrained stress paths, (b) Deviatoric stress vs. axial strain.

Monforte et al. 2021, 2022)

CPTU em solos com diferentes fragilidades e liquidificáveis

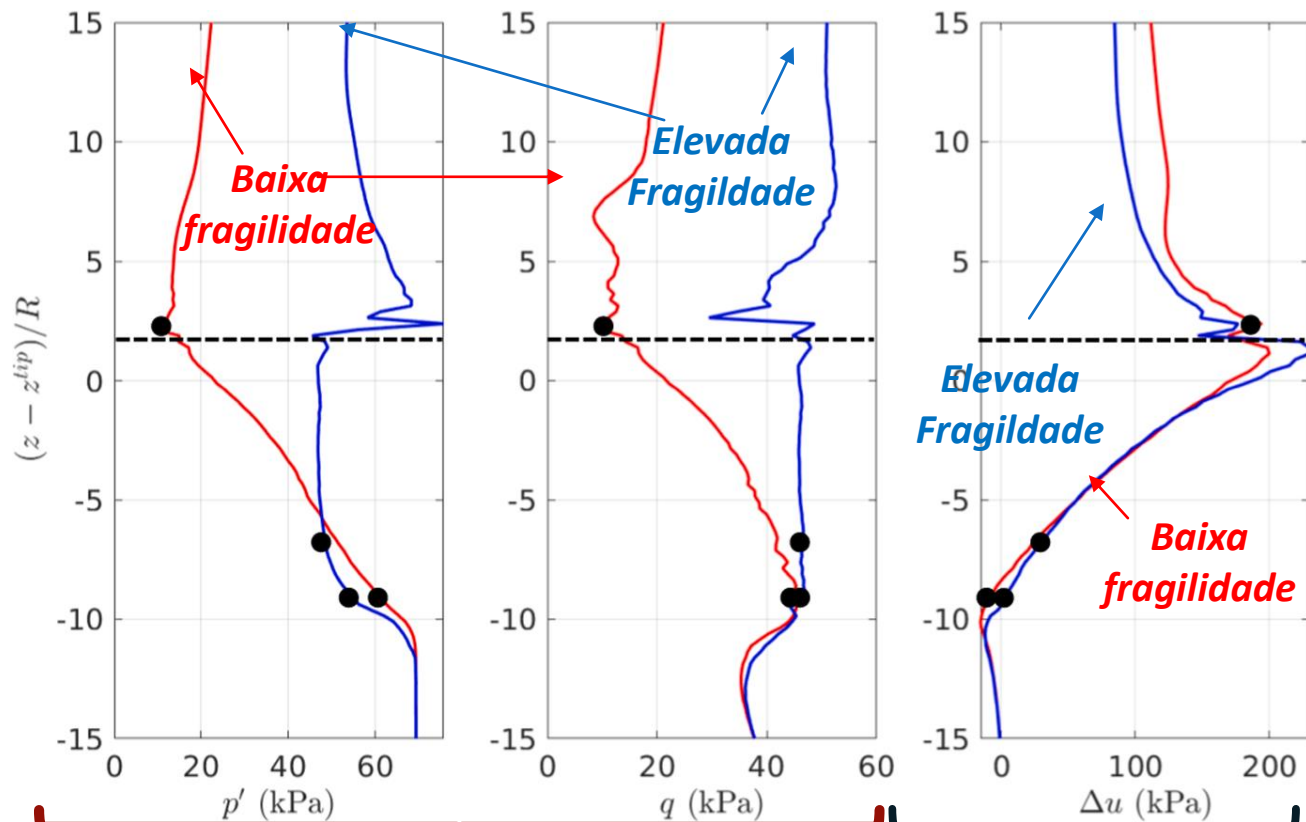
Monforte et al. 2021, 2022)



Materialis A a H (mesmo $S_{u_{peak}}$, muitos distintos $S_{u_{res}} \cong$

$(S_{u_{crit}})$: comportamento triaxial não drenado. (a) trajetórias de tensão não drenados, (b) Tensão deviatória vs. deformação axial.

Variação de: (a) tensão efetiva média, (b) tensão desviatória, (c) excesso de poropressão

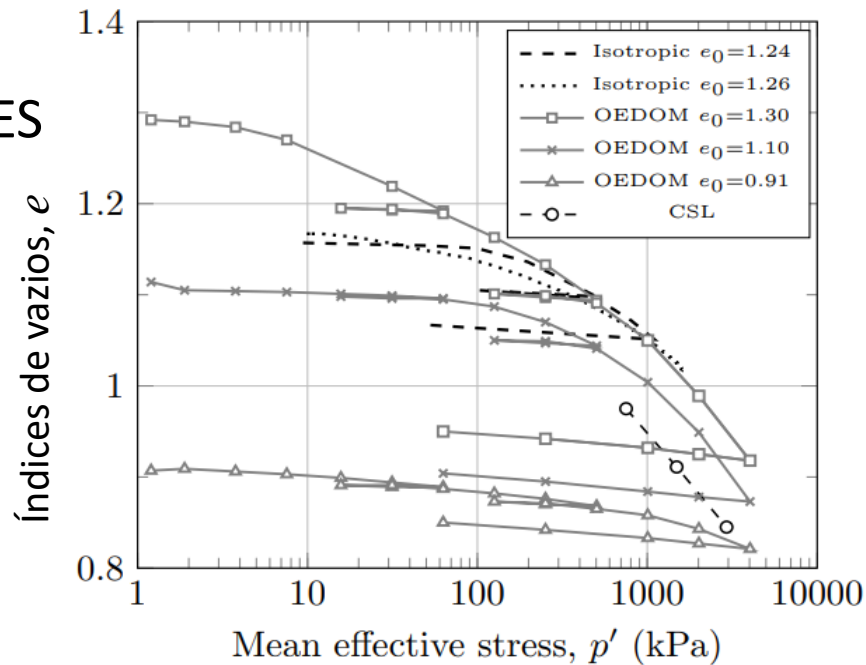


Tensões muito distintas medidas na ponta do cone (q_t)

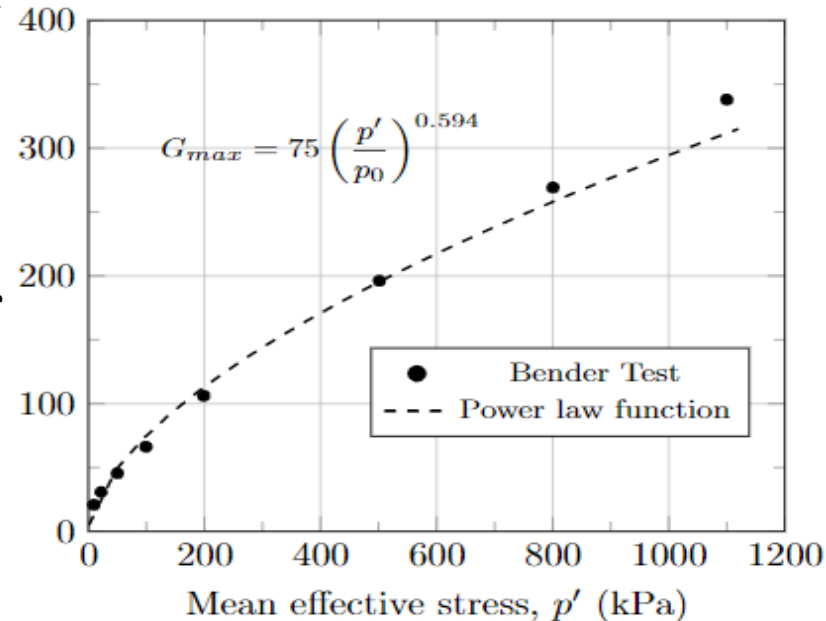
Muito parecido com Δu (pressões de poros U2)

ENSAIOS COMPLEMENTARES SÍTIO 3

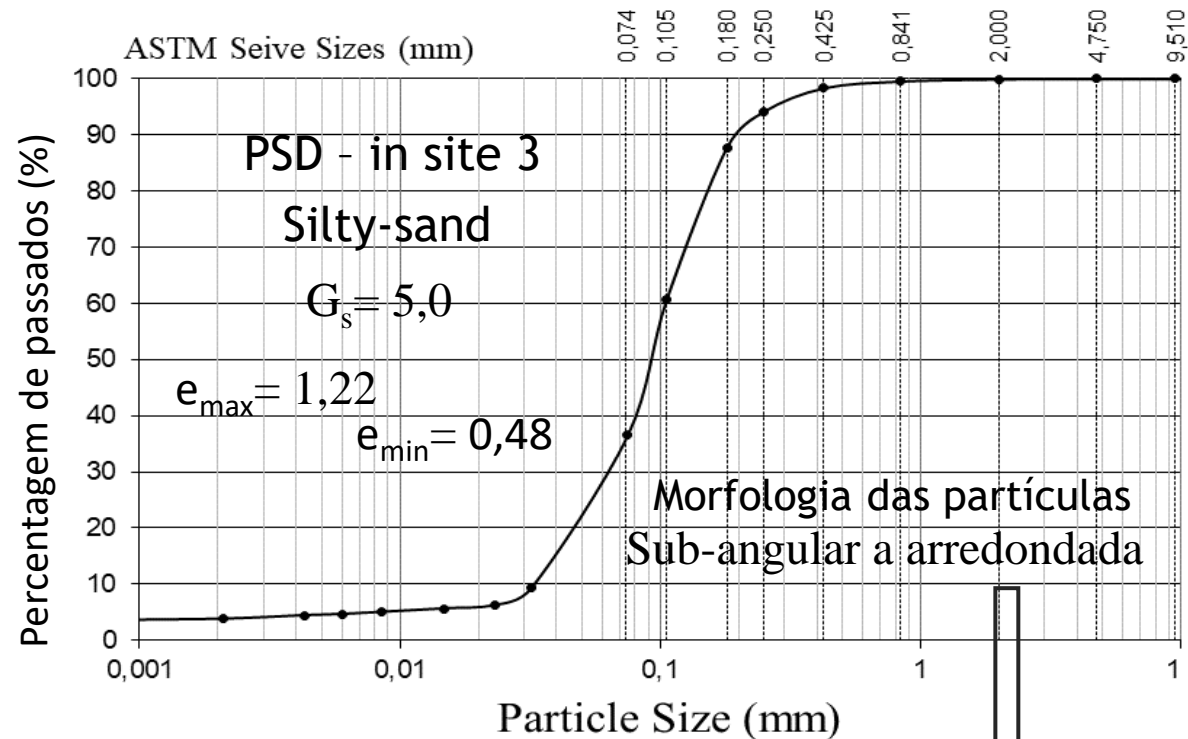
Curvas de
adensamento
edométrico e
isotrópico



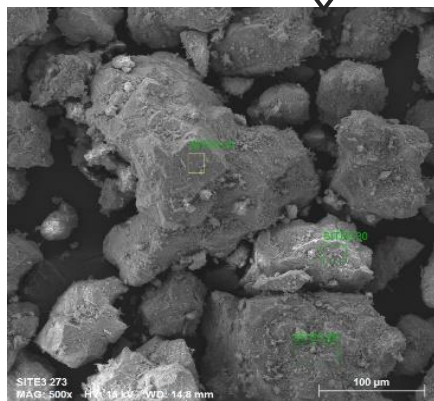
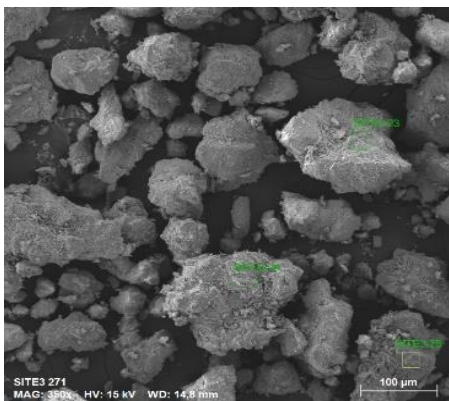
Módulo de distorção máximo G_{max} , MPa



G_{max} versus
nível de tensão



CLAY	SILT			SAND			GRAVEL
	FINE	MEDIUM	COARSE	FINE	MEDIUM	COARSE	



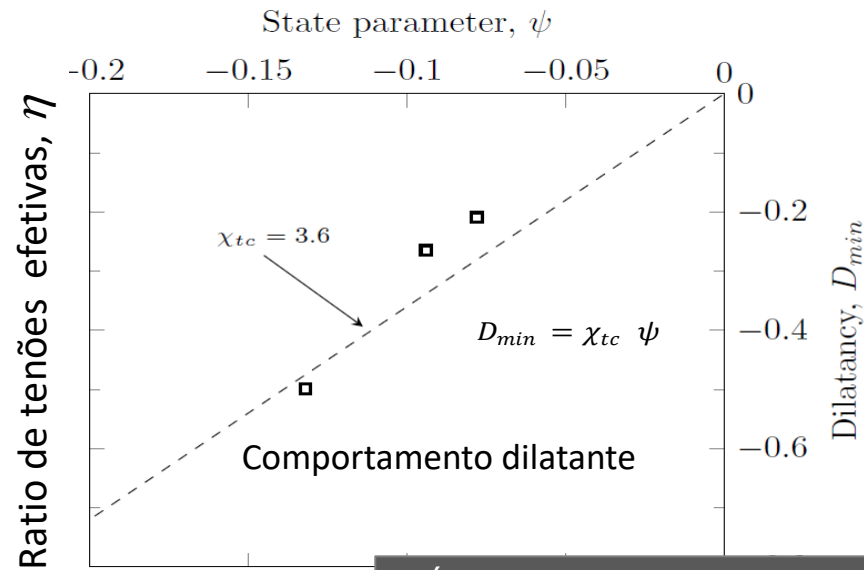
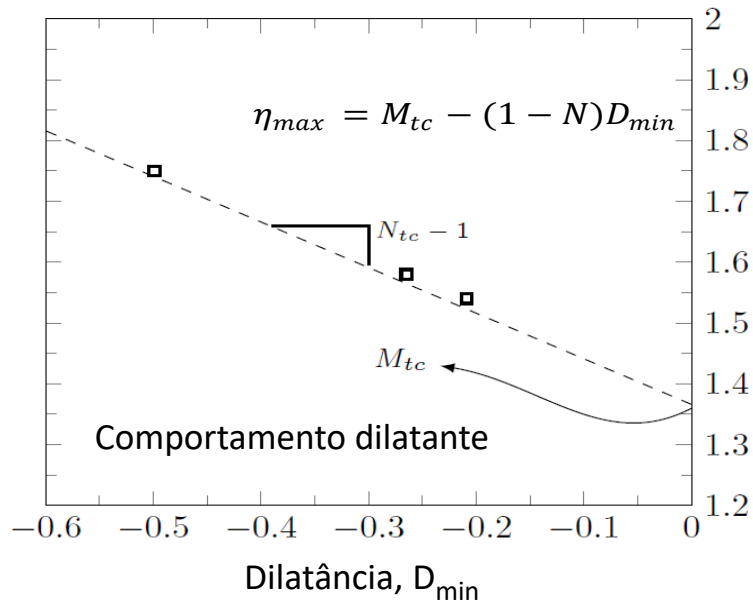
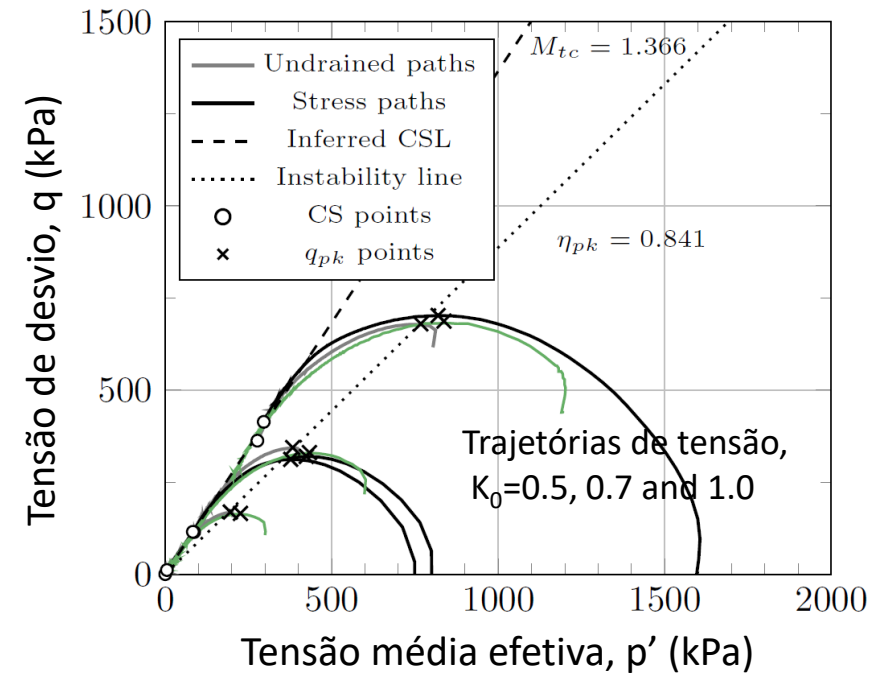
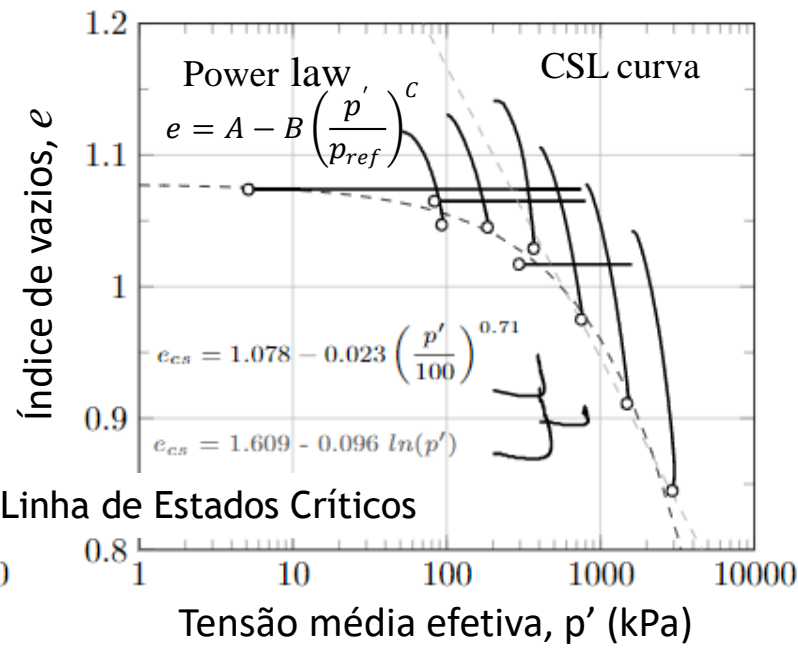
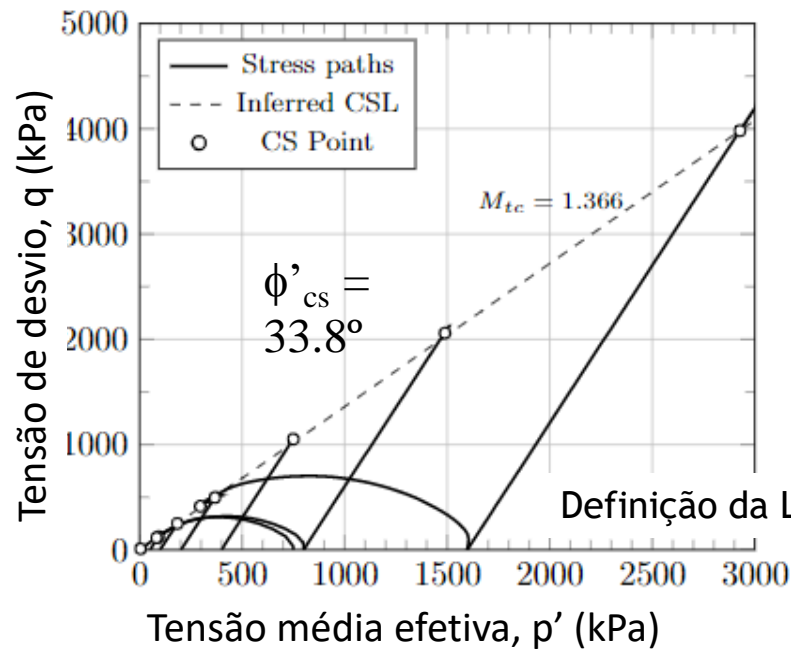
10ª Lição James K. Mitchell Lecture

António Viana da Fonseca (viana@fe.up.pt)

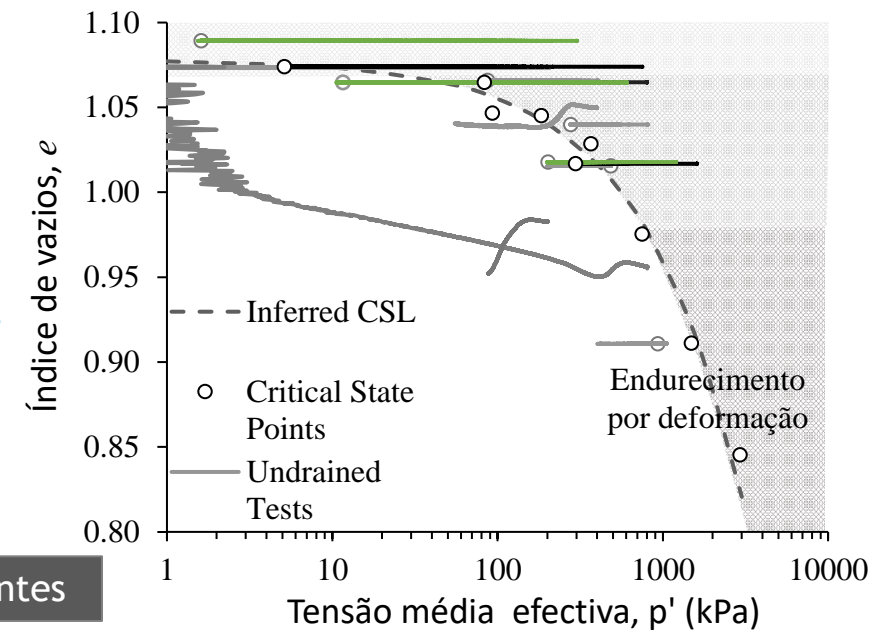


Ground Property Characterization
from In-Situ Tests

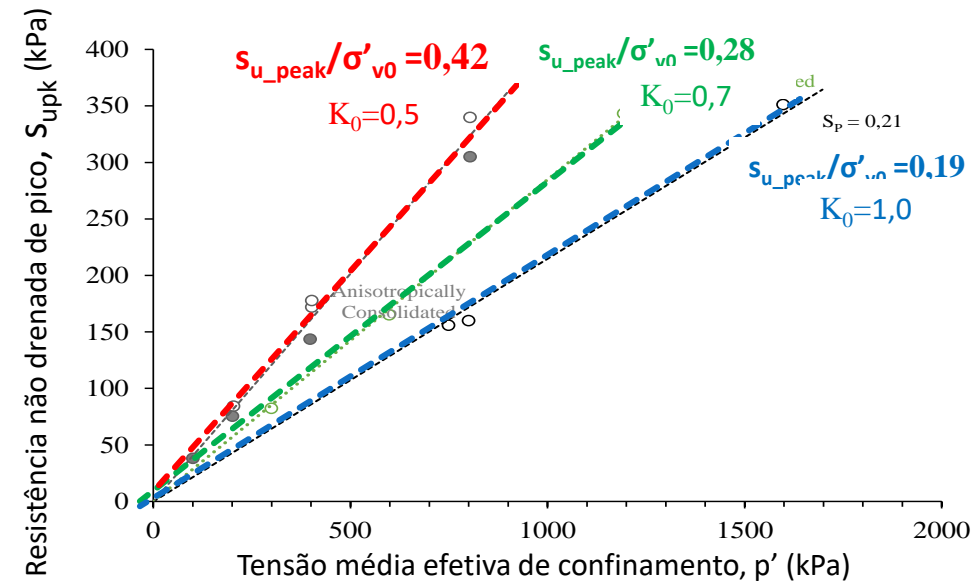
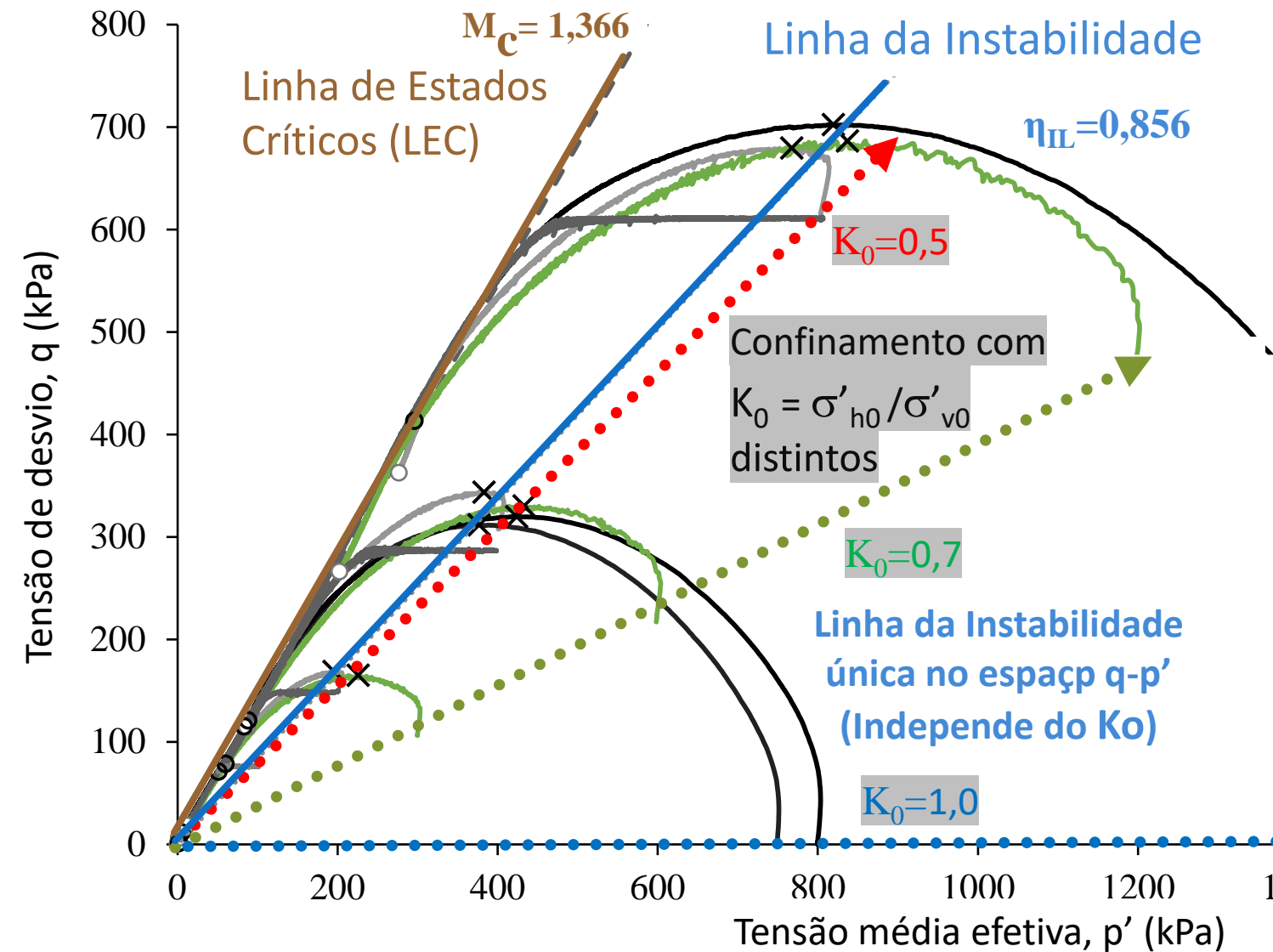




SÍTIO 3 - ensaios mais recentes



Ensaio com controlo total em tensão e deformação (σ_v e σ_h independentes)

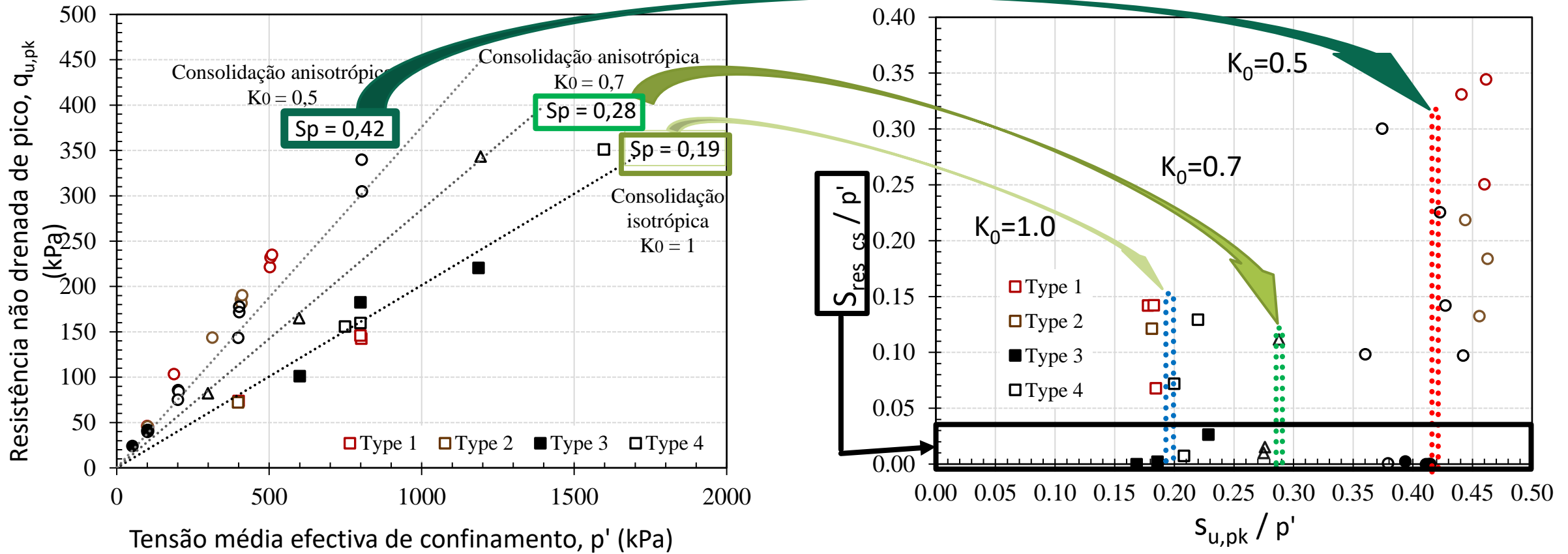


MAS
 A Resistência de pico normalizada é distinta
 $S_{u_peak} / \sigma'_{v0}$ depende de K_0

Full control cells
 Bishop-Wesley

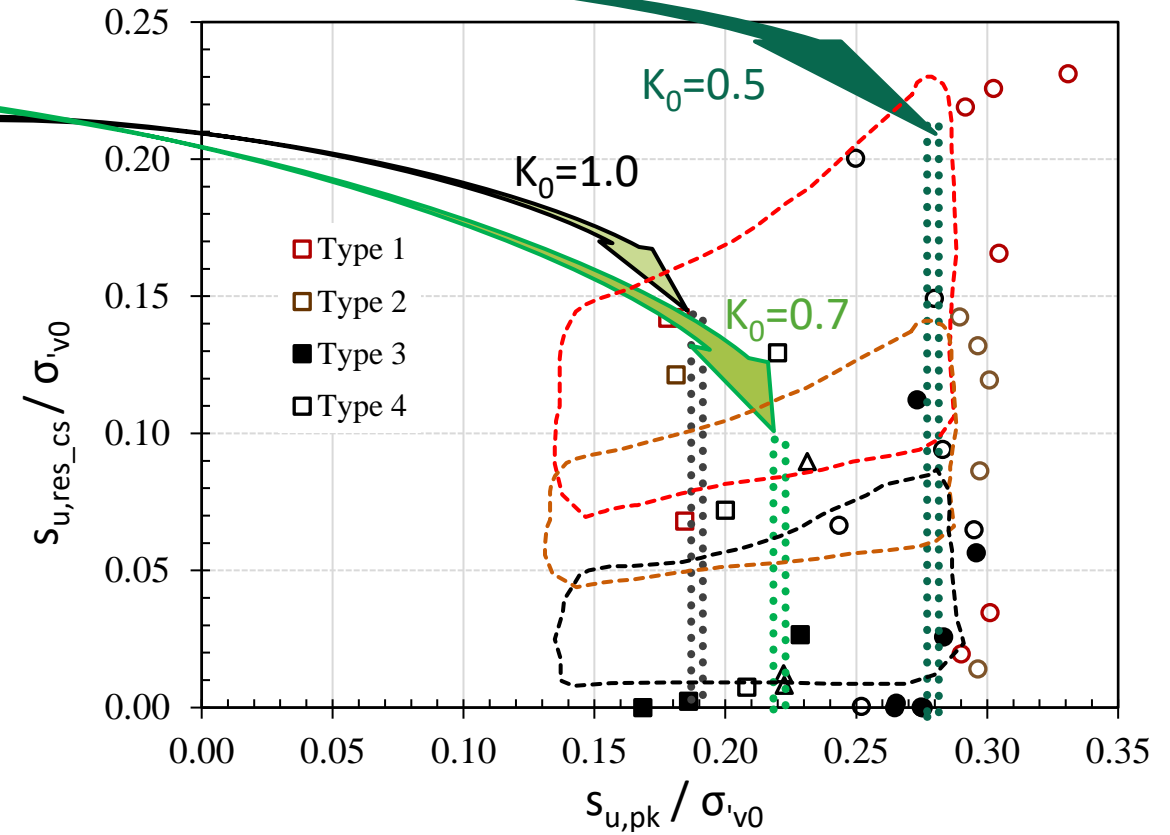
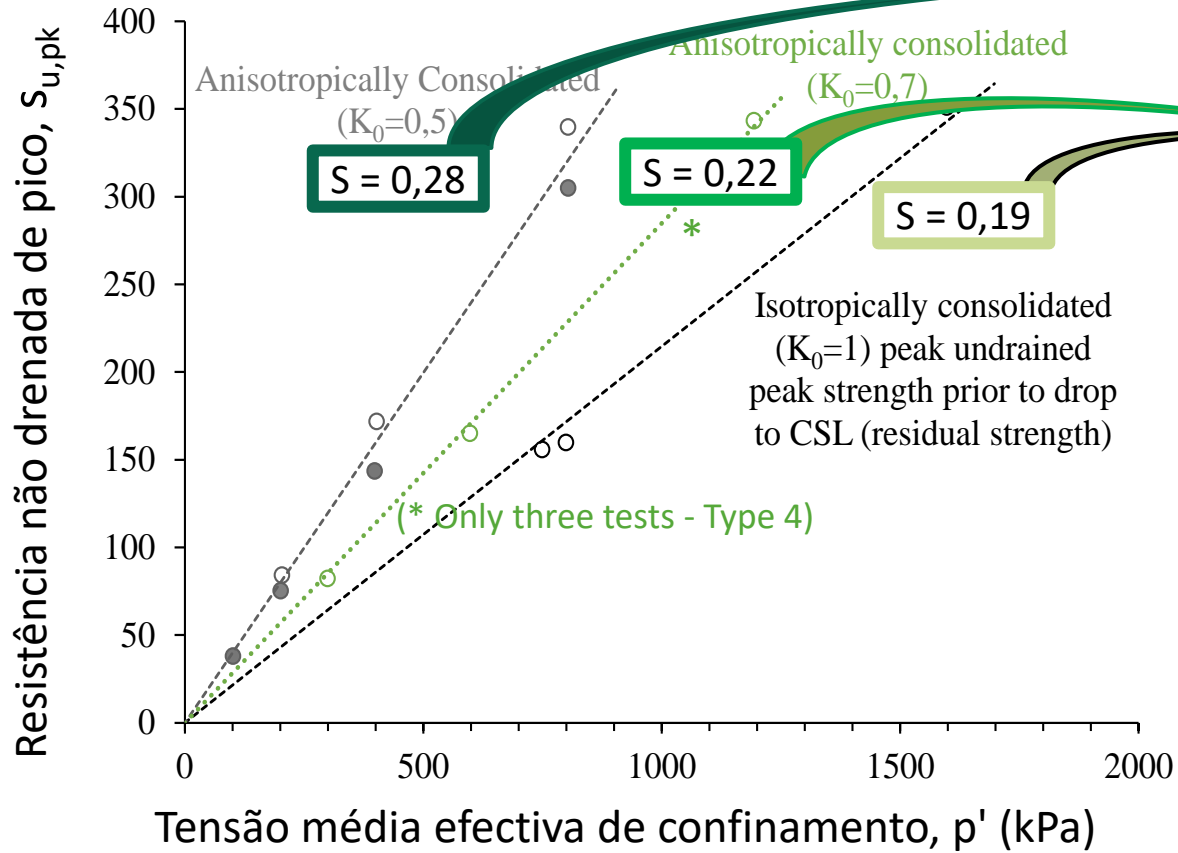


Razão da resistência não drenada de pico com a tensão efectiva média correspondente a distintos valores de K_0 (1,0; 0,7; 0,5)



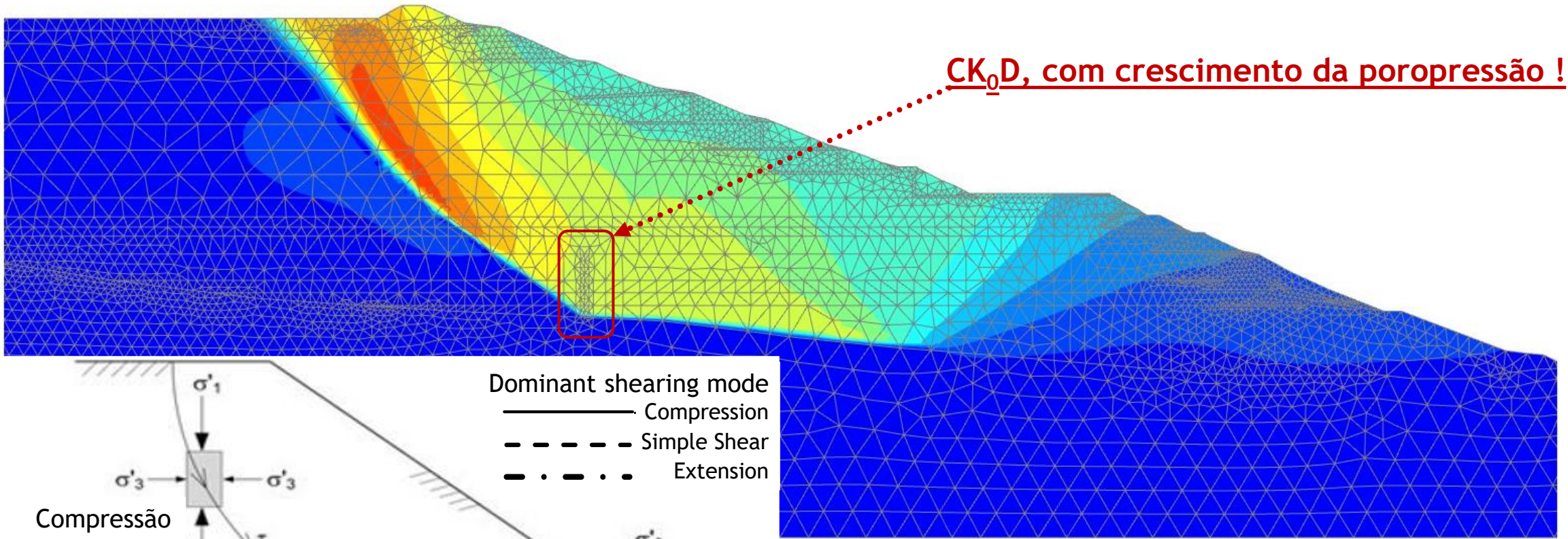
Efeito do material (*três tipos de solos estudados em 2020, painel B1 CIMNE/FEUP*) e anisotropia inerente devido a razões distintas de tensões principais no processo de confinamento, nos valores de resistência máxima e última não drenada. Os símbolos completos correspondem a amostras consolidadas anisotropicamente e os símbolos vazios a consolidadas isotropicamente

Razão da RESISTENCIA NÃO DRENADA DE PICO E RESIDUAL com a TENSÃO VERTICAL DE CONFINAMENTO (em repouso) para distintos valores de K_0 (1,0; 0,7; 0,5)

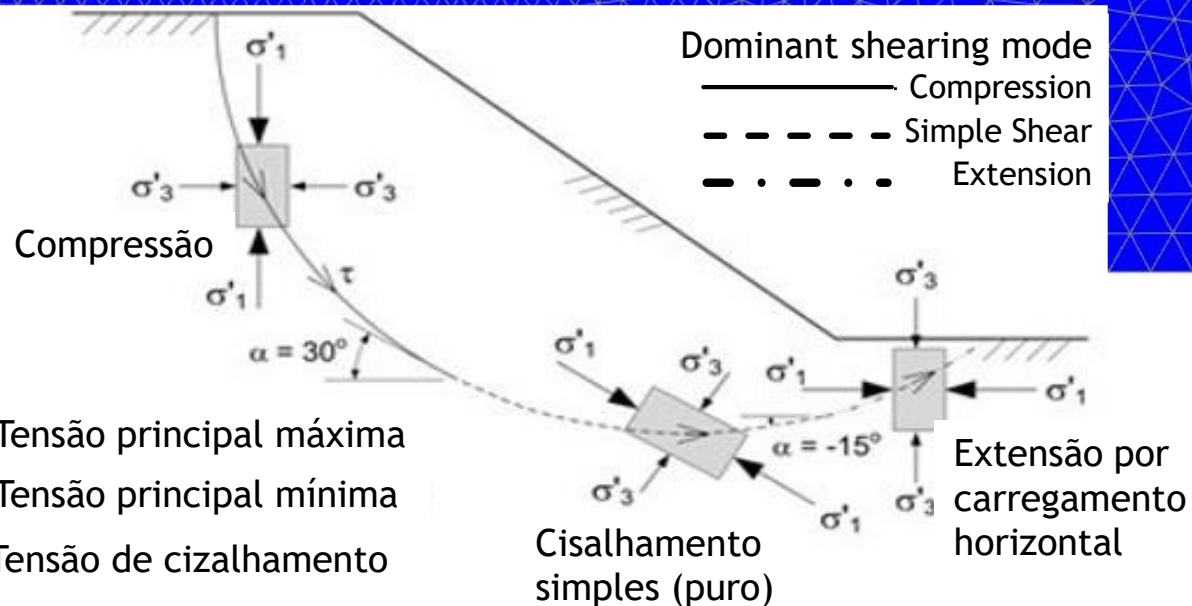


Efeito do material (*três tipos de solos estudados em 2020, painel B1 CIMNE/FEUP*) e anisotropia inerente devido a razões distintas de tensões principais no processo de confinamento, nos valores de resistência máxima e última não drenada. Os símbolos completos correspondem a amostras consolidadas anisotropicamente e os símbolos vazios a consolidadas isotrópicas

Análises numéricas acopladas em tensões efetivas (FDM ou MEF, ...) acomodando o estado de tensão em repouso em CASM na barragem B1 (alteamentos progressivos com fluxo associado durante os anos de operação)



Dominant shearing mode
 ————— Compression
 - - - - - Simple Shear
 - . - . - . Extension



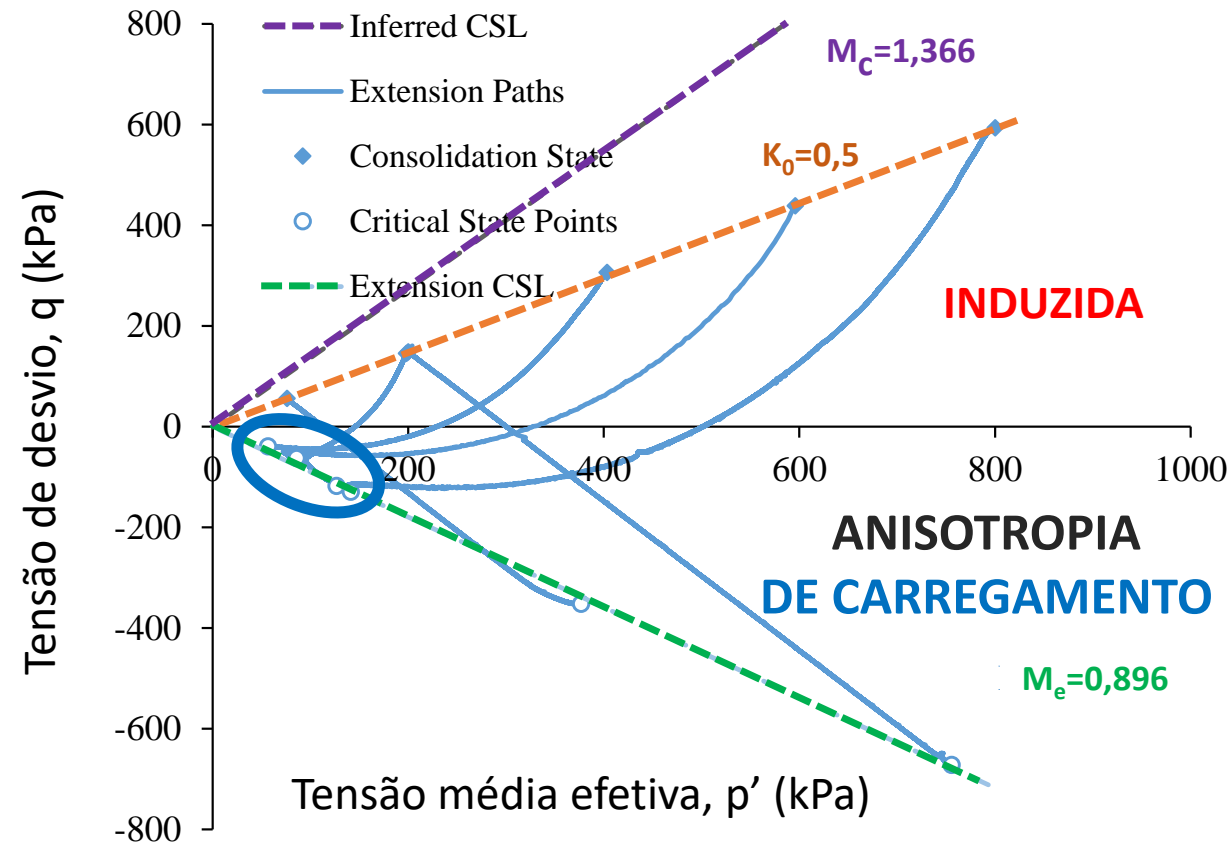
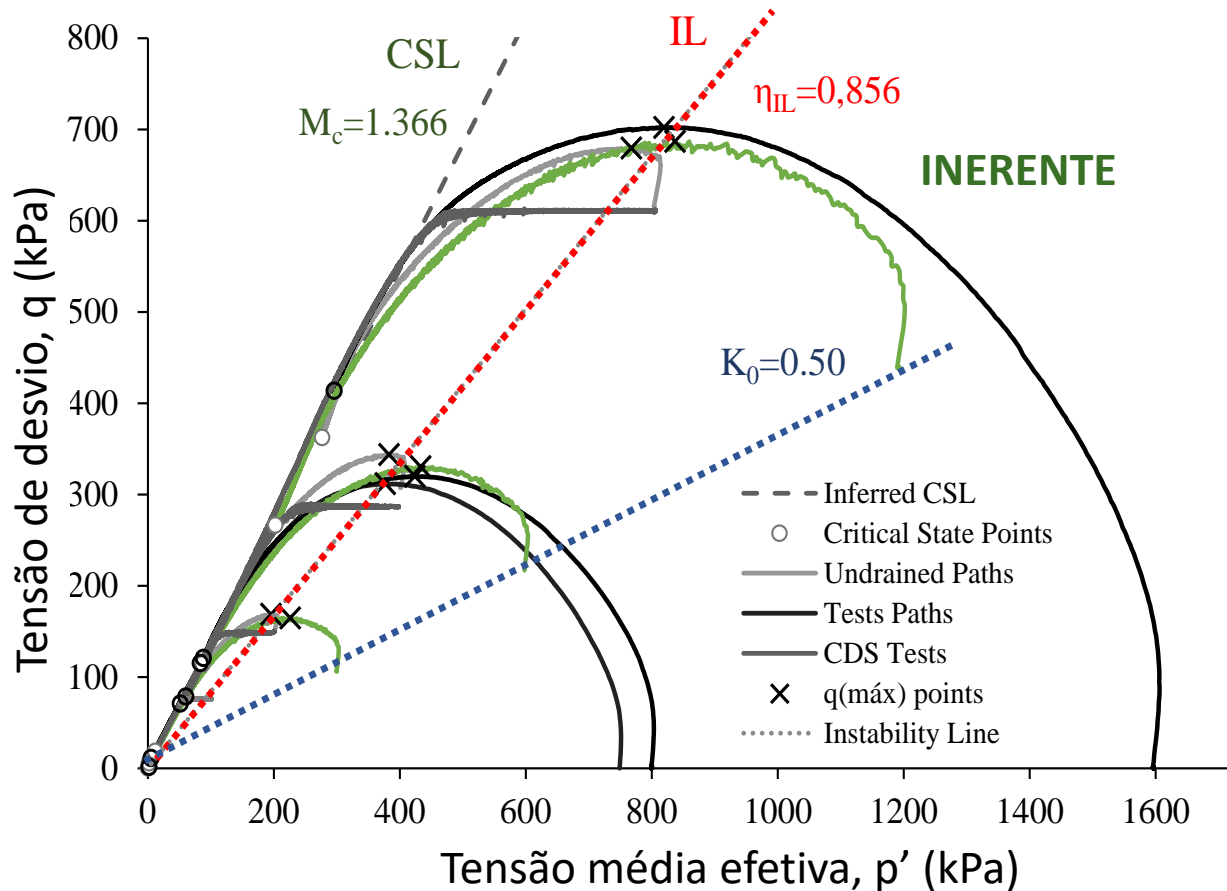
σ'_1 - Tensão principal máxima
 σ'_3 - Tensão principal mínima
 τ - Tensão de cisalhamento

Os ensaios com trajetórias de tensão da consolidação K_0 são essenciais para a avaliação de ações de carregamento não drenado, eventualmente desencadeando a liquefação

QUÃO RELEVANTE É A ANISOTROPIA?

INERENTE / INDUZIDA

K_0 VARIÁVEL

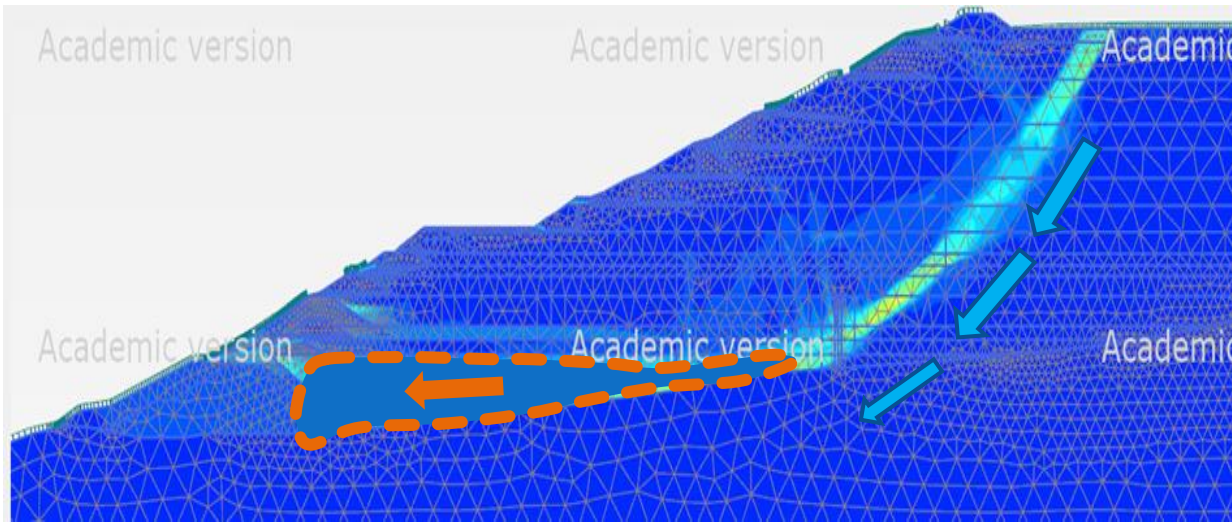


A Razão de Resistência Não Drenada Residual (CSL)

$$S_{u,cs} / \sigma'_{v0} = S_{u,liq} / \sigma'_{v0} \cong 0,06$$

Online / **Inversão** / Rotação

que esperamos se tivermos um mecanismo de falha progressivo, mas rápido?



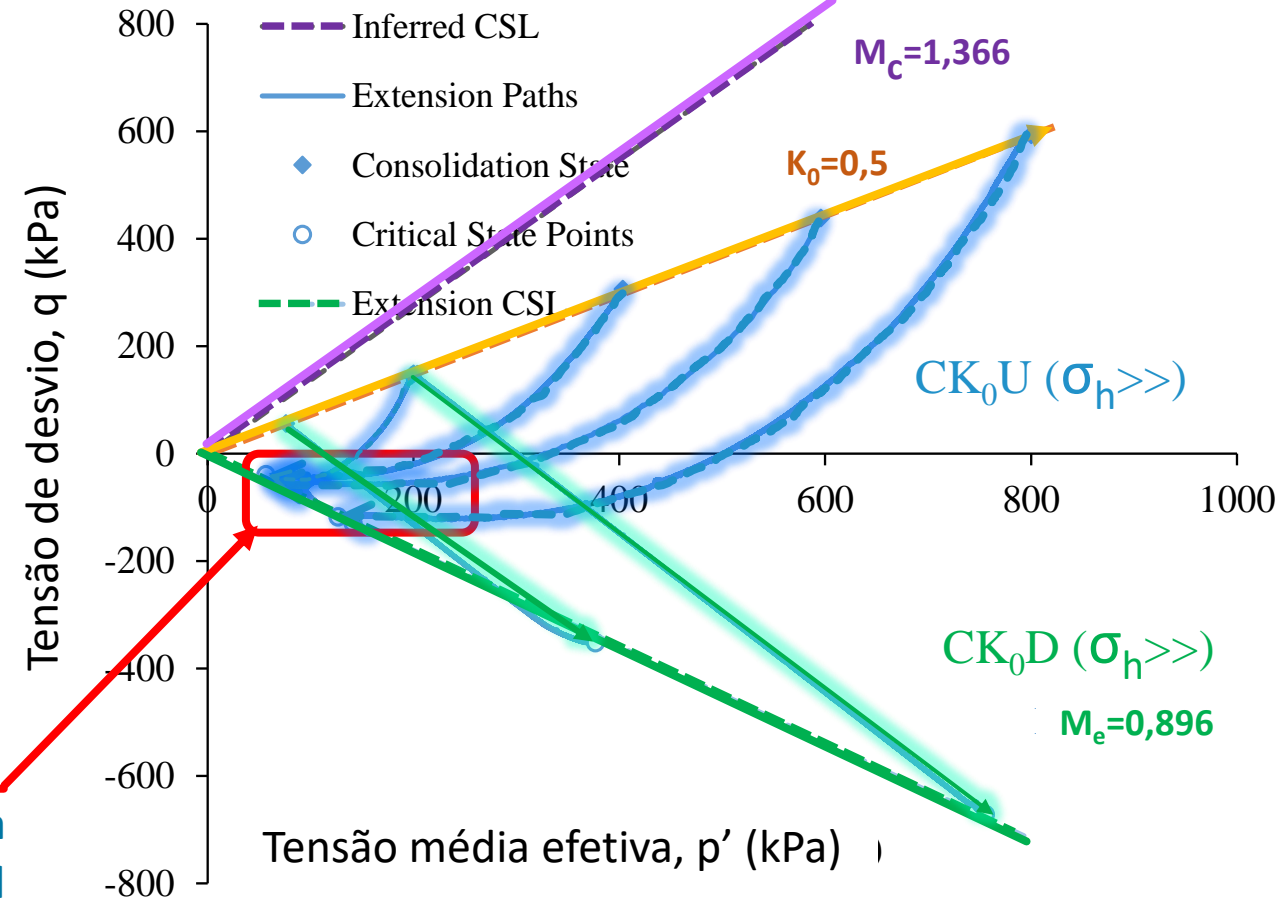
O aumento das tensões laterais ($\sigma_h [\sigma_1 \& \sigma_2] > \sigma_v [\sigma_3] \text{ const}$) em condições drenadas mostram CSL isotrópico inerente

Enquanto em condições NÃO DRENADAS, as trajetórias de tensão desenvolvem excessos de poropressões muito altas!

Os resultados, acumulados na FEUP em sistemas de controlo de stress-paths, revelaram uma **EXTREMA ANISOTROPIA** das linhas de **instabilidade em EXTENSÃO** (a resistência máxima ao cisalhamento não drenada em compressão lateral

Podemos avaliar essa grande variedade de caminhos de tensão com liquefação de fluxo em extensão (LAB):

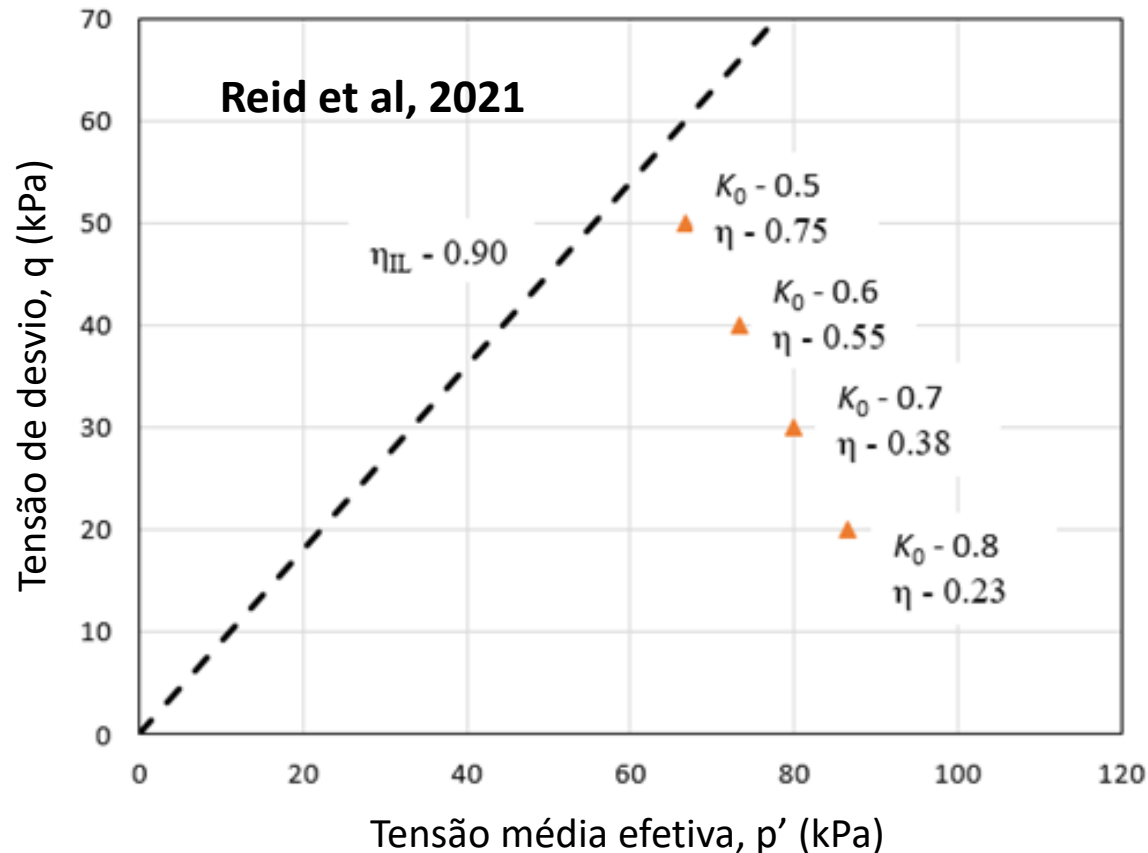
O aumento das pressões laterais deve ser tratado em sistemas de trajetória de tensão que condições anisotrópicas (K_0) como derivadas de uma fase de deposição em estado estacionário



INCERTEZAS RELACIONADAS COM A AVALIAÇÃO DO DESENCADEAMENTO DA LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA (Reid et al, 2021)

➤ Razão geostática de tensões, K_0

A incerteza inerente ao K_0 ($=\sigma'_h / \sigma'_v$) instalado nas estruturas geotécnicas tende a ser relacionado o parâmetro de estado Ψ derivado de CPT foi muito discutido e em detalhe Jefferies and Been (2015).



Embora haja uma sensação de que a IL não depende da condição K_0 inicial, se a FÁBRICA do SOLO tiver a mesma forma, a **resistência residual pós-pico** seria única.

$S_{u_{res}}$ ou $S_{u_{cv}}$ serão diferentes !!!

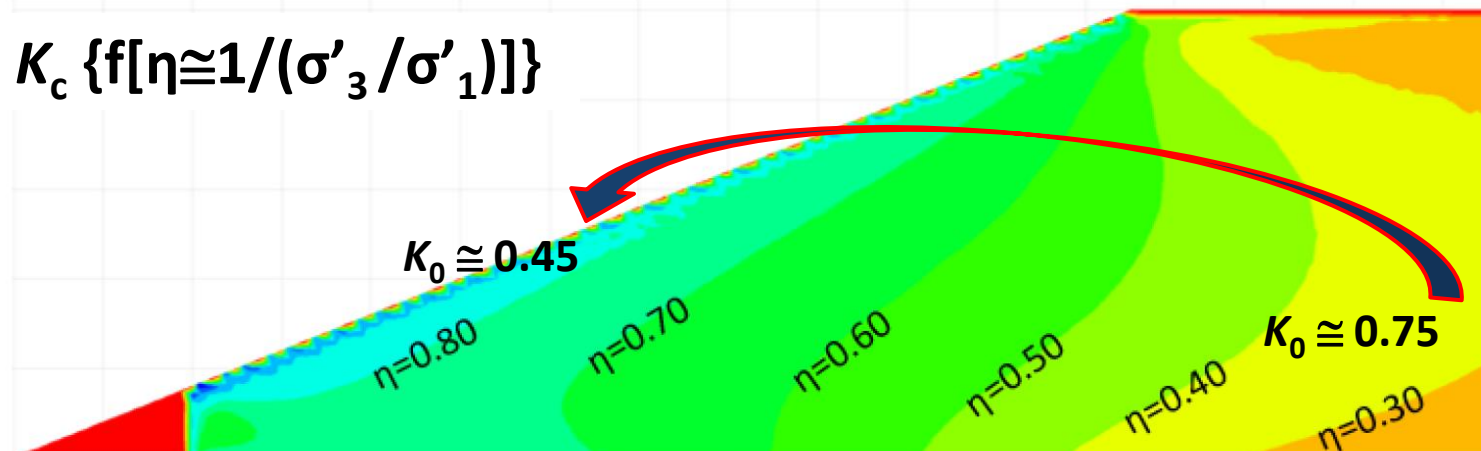
Mas o próprio parâmetro de estado, Ψ , da B1 depende da distribuição da razão geostática de tensões of K_0 ($=...$)

O efeito do ângulo de tensão principal nas condições de tensão de instabilidade

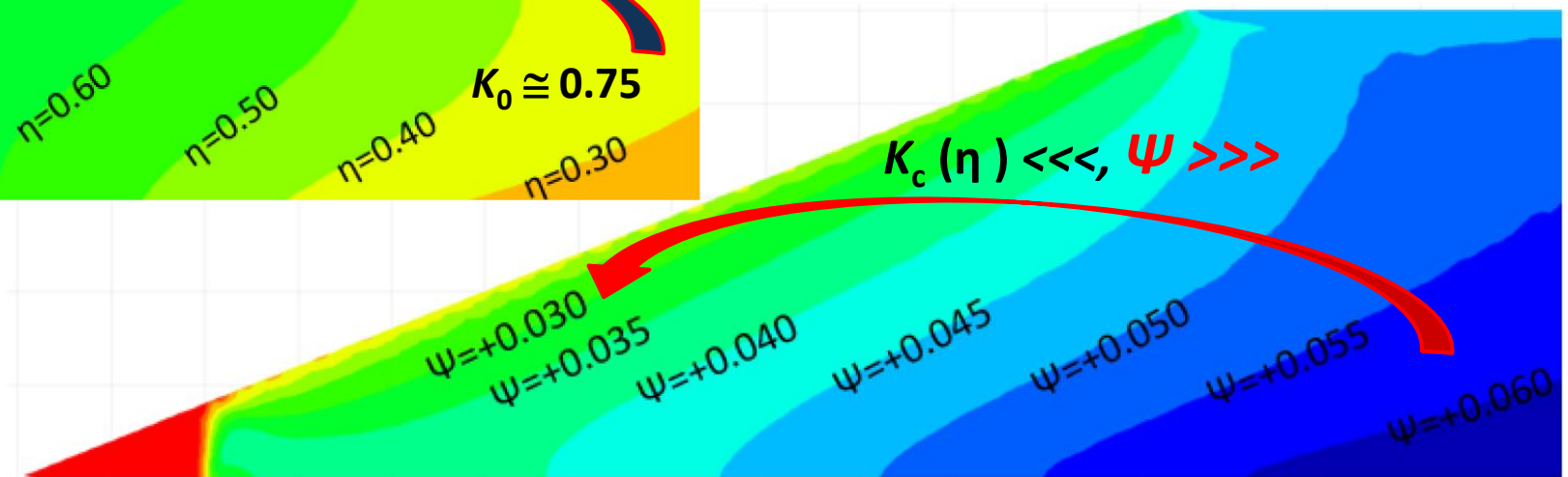
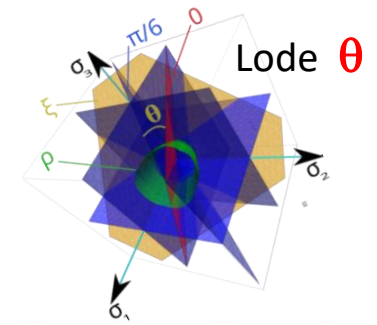
A razão geostática de tensões, $\eta [f(K_0)]$ tem elevada influência no parâmetro de estado (ψ)

Abaixo de uma inclinação onde α ou θ giram (aí a tensão efetiva vertical não é tensão principal), as condições de deformação plana prevalecem e a deformação lateral é possível, o valor K_c (σ'_3 / σ'_1) é mais útil. Diferentes modelos são comparados em Reid et al, e o termo K_0 é usado para introduzir a alta dependência do parâmetro estado com $\eta [f(K_0)]$

$$K_c \{f[\eta \cong 1/(\sigma'_3 / \sigma'_1)]\}$$



Reid et al, 2021

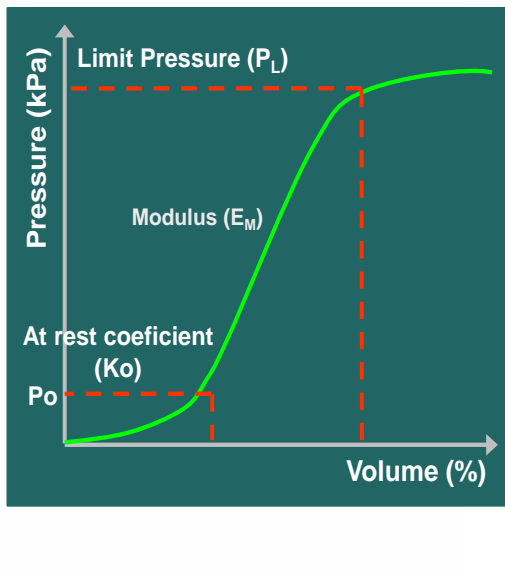


O estado atual do conhecimento das condições de tensão in situ e da anisotropia da fábrica é tal que uma incerteza significativa parece inevitável na tentativa de identificar exatamente quando um determinado talude pode sofrer o desencadeamento de liquefação estática: **MAIS ENSAIOS IN SITU FORNECE MAIS E MELHOR CONHECIMENTO SOBRE O ESTADO DE TENSÃO EM REPOUSO**

Pressiómetro com "Pre-furação" pressuremeter for soils and rocks

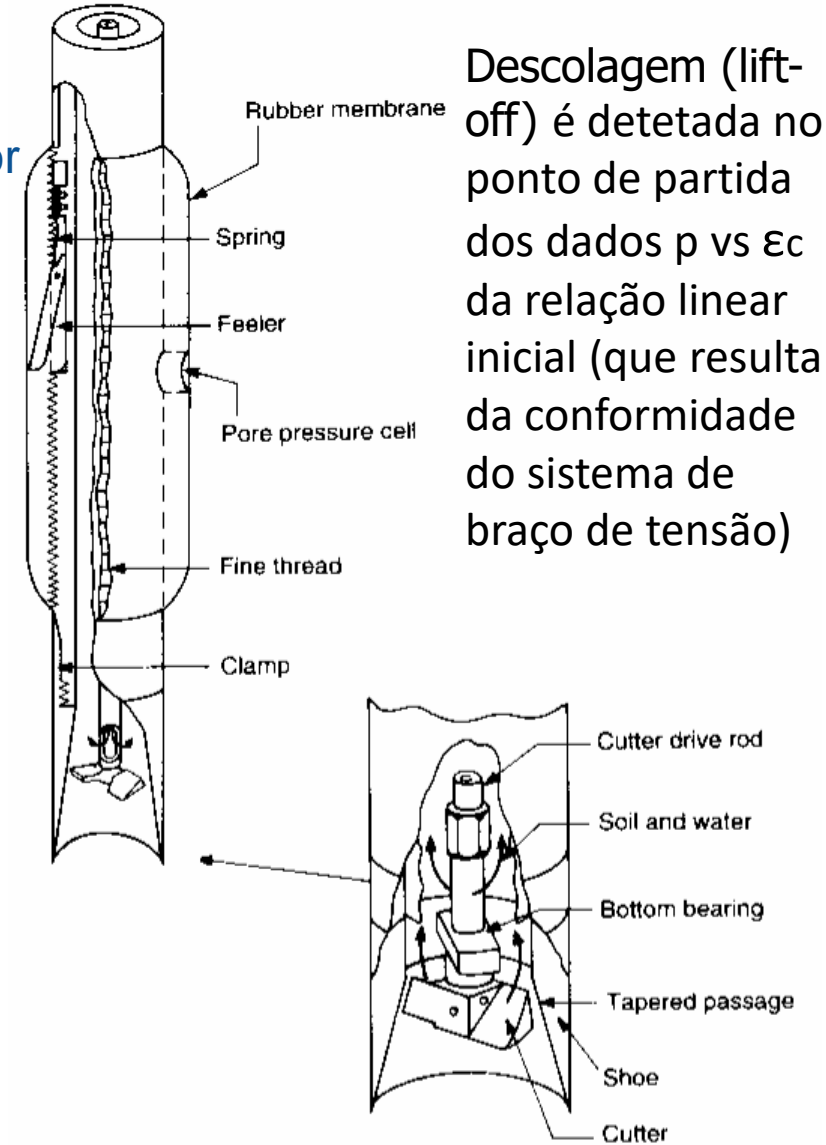
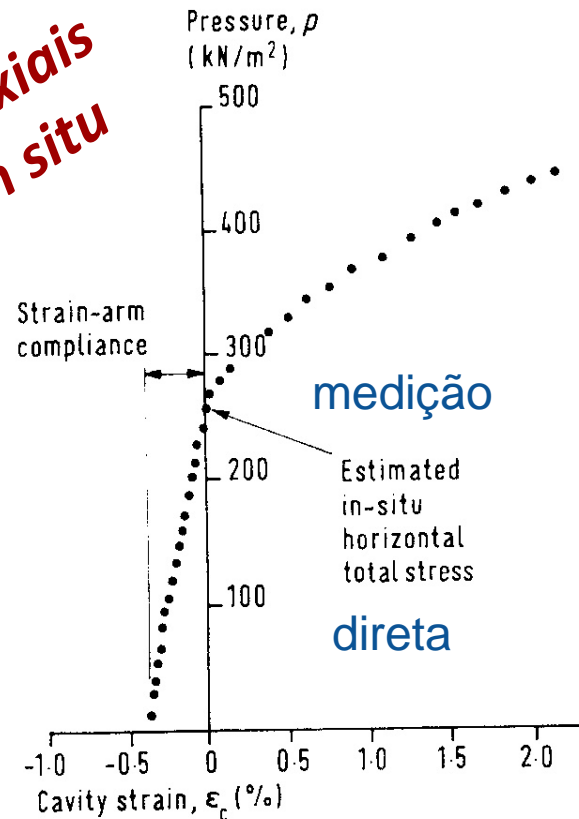
Tensão de confinamento lateral
PMT

Sonda cilíndrica, inflada no furo cilíndrico, mede a pressão versus expansão radial)



Pressiómetro auto-perfurador "Self-boring pressuremeter"

Triaxiais in situ



Descolagem (lift-off) é detetada no ponto de partida dos dados p vs ϵ_c da relação linear inicial (que resulta da conformidade do sistema de braço de tensão)

O SDMT apresenta o melhor compromisso entre a necessidade de determinar:

os TRÊS FATORES mais críticos a serem identificados

ESTADO (ψ , função de K_0), CONDIÇÃO de SATURAÇÃO (S_r) e FRAGILIDADE ($I_R = G_0/s_u$)

NOVO

SDMT Cone
(SDMT-CPT)

Estado de tensão de repouso (K_0)

K_D contém informação sobre a história de tensão:

$$K_D = \frac{(p_0 - u_0)}{\sigma'_v}$$

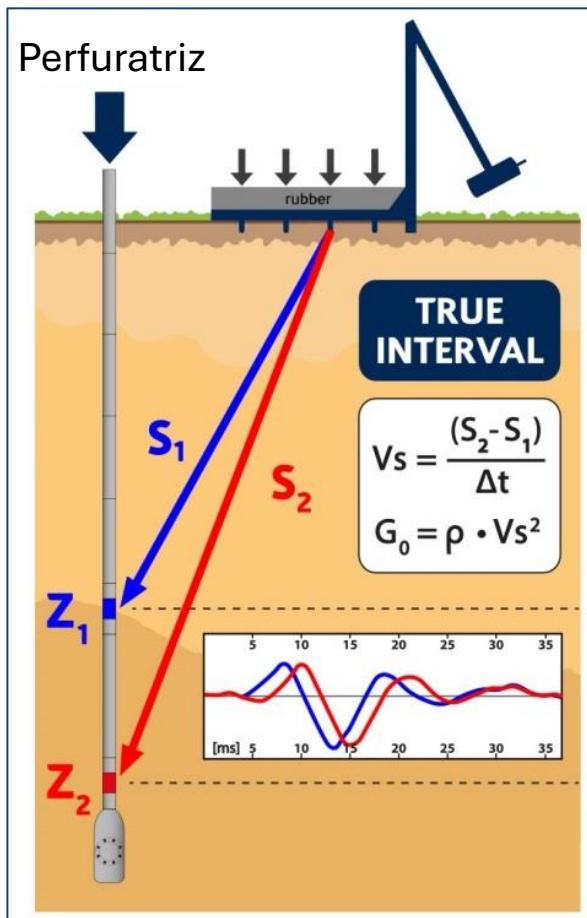
fórmula similar a K_0 : $(p_0 - u_0) \rightarrow \sigma'_h$

K_D é um “amplificador” do K_0 , p_0 , logo σ_h sobe com a cravação

Aproximad./ $K_D \approx 4K_0$ E.g. in NC $K_0 \approx 0.5$ and $K_D \approx 2$

K_D correlaciona bem com OCR (RSA) e K_0

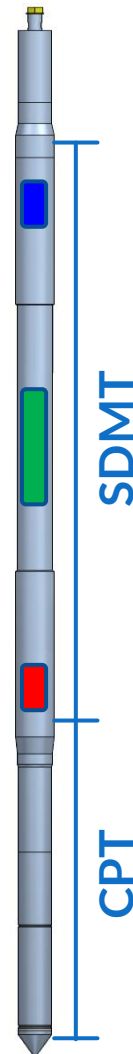
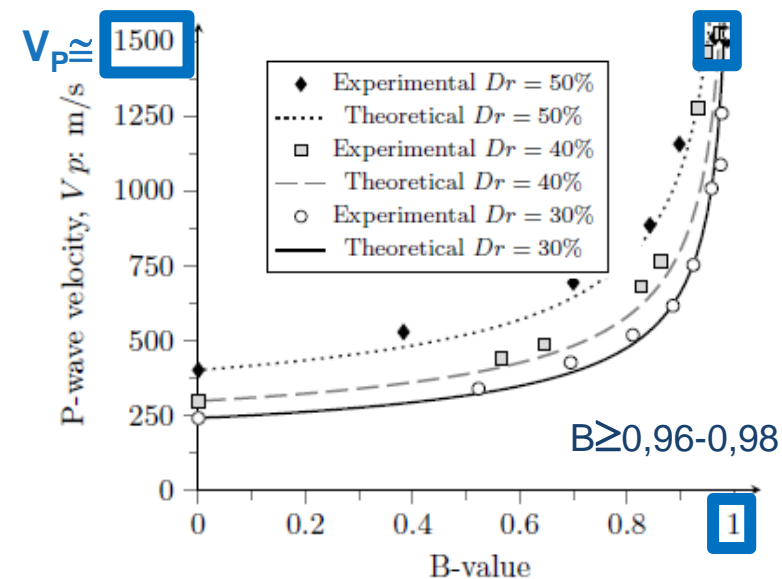
Identificação de zonas específicas de K_0



Módulo de distorção elástico (G_0)

E a v_s sísmica tem um módulo muito preciso para det. de veloc.s de ondas P que são muito sensíveis à saturação

Total vs parcial Saturação (V_p)



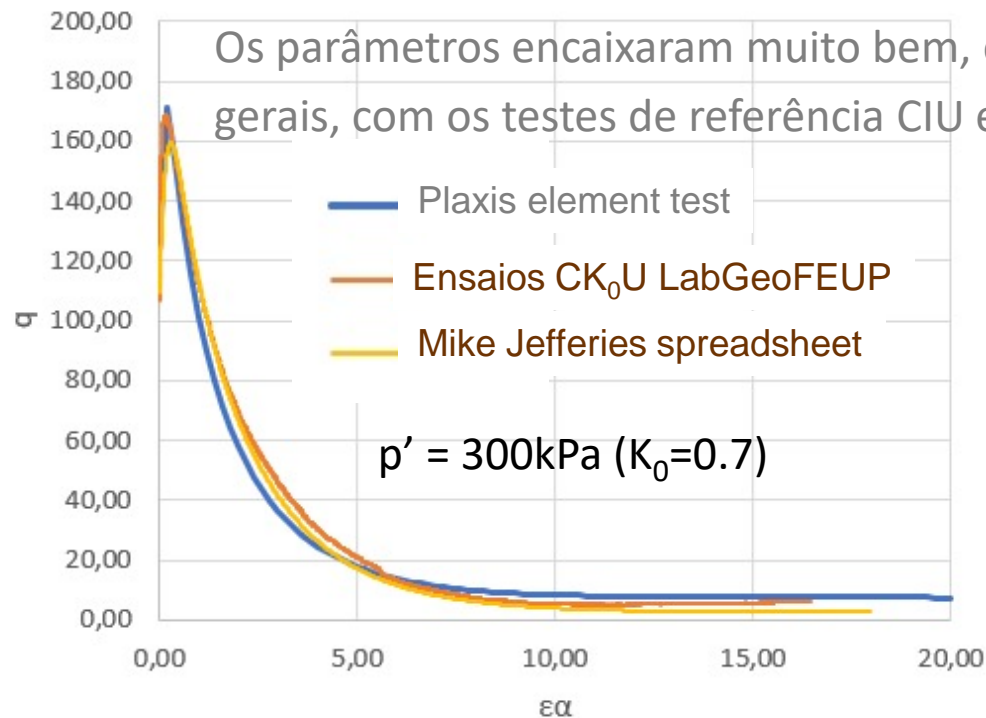
SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM MODELOS AVANÇADOS (SIMULATION WITH ADVANCED MODELS), i.e. ABORDAGEM NORSAND BASEADA EM UM REJEITO BEM ESTUDADO DE MINAS GERAIS (BR)

Com base num amplo número de ensaios triaxiais ISOTROPICAMENTE CONSOLIDADOS com as melhores práticas de procedimentos laboratoriais para definir o conjunto completo de parâmetros em (soltas e densas em carregamentos drenadas e não drenadas), mais a variação de G_0 com aumento isotrópico p' (Tx com bender elements). Os parâmetros resultantes são:

Propriedades do solo Parâmetros do modelo NorSand

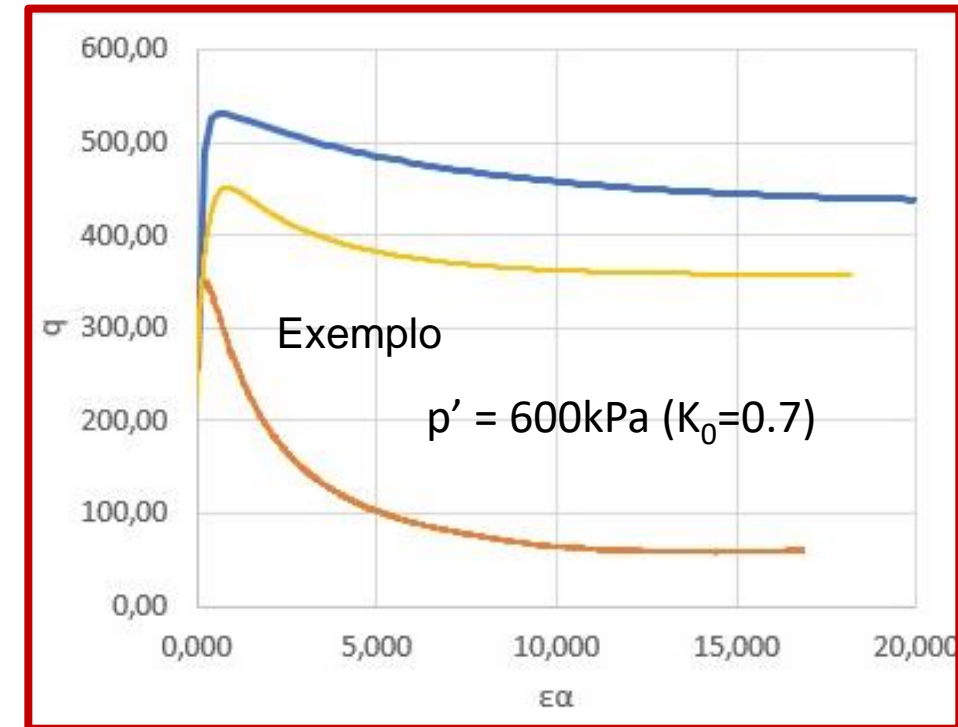
a	b	c	M_{tc}	ϕ'_{cs}	N_{cs}	χ	H	G^*
0.867	0.049	0,451	1.35	35°	0.59	6.2	95 - 620 ψ	53 * $(p'/100)^{0.595}$

* CSL curva: $e_c = a - b \cdot (p'/p_{ref})^c$; ** p' input em kPa, G resultado em MPa



CONTUDO

ensaios de compressão consolidados em condições anisotrópicas CK_0U ($K_0 = 0.7$), carregados não drenados NÃO FORAM bem modelados ->



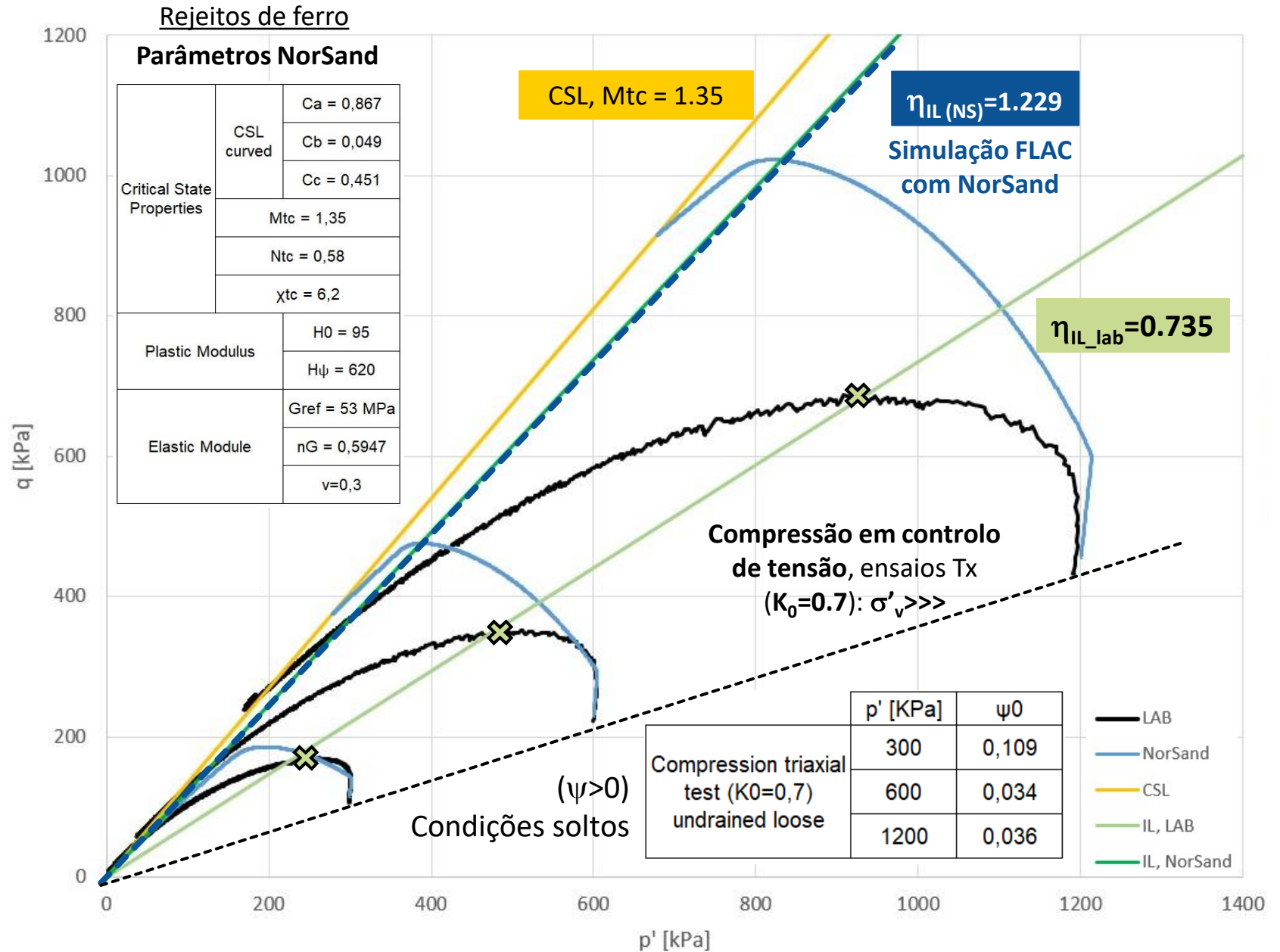
ANÁLISE NUMÉRICA COM MODELOS AVANÇADOS

Estudos sobre a influência inerente à fábrica induzida no comportamento dos rejeitos

Quão importante pode ser ignorar a anisotropia dos caminhos de consolidação induzidos e as condições de caminho de tensão de carregamento pós-reposo em ensaios triaxiais minuciosamente conduzidos, ao ajustar seu comportamento com modelos de CSSM avançados, com capacidades de instabilidade (como NorSand, mas em uma calibração de testes isotrópicos)?

Santana, F.

Tese de Mestrado (FEUP 2022)

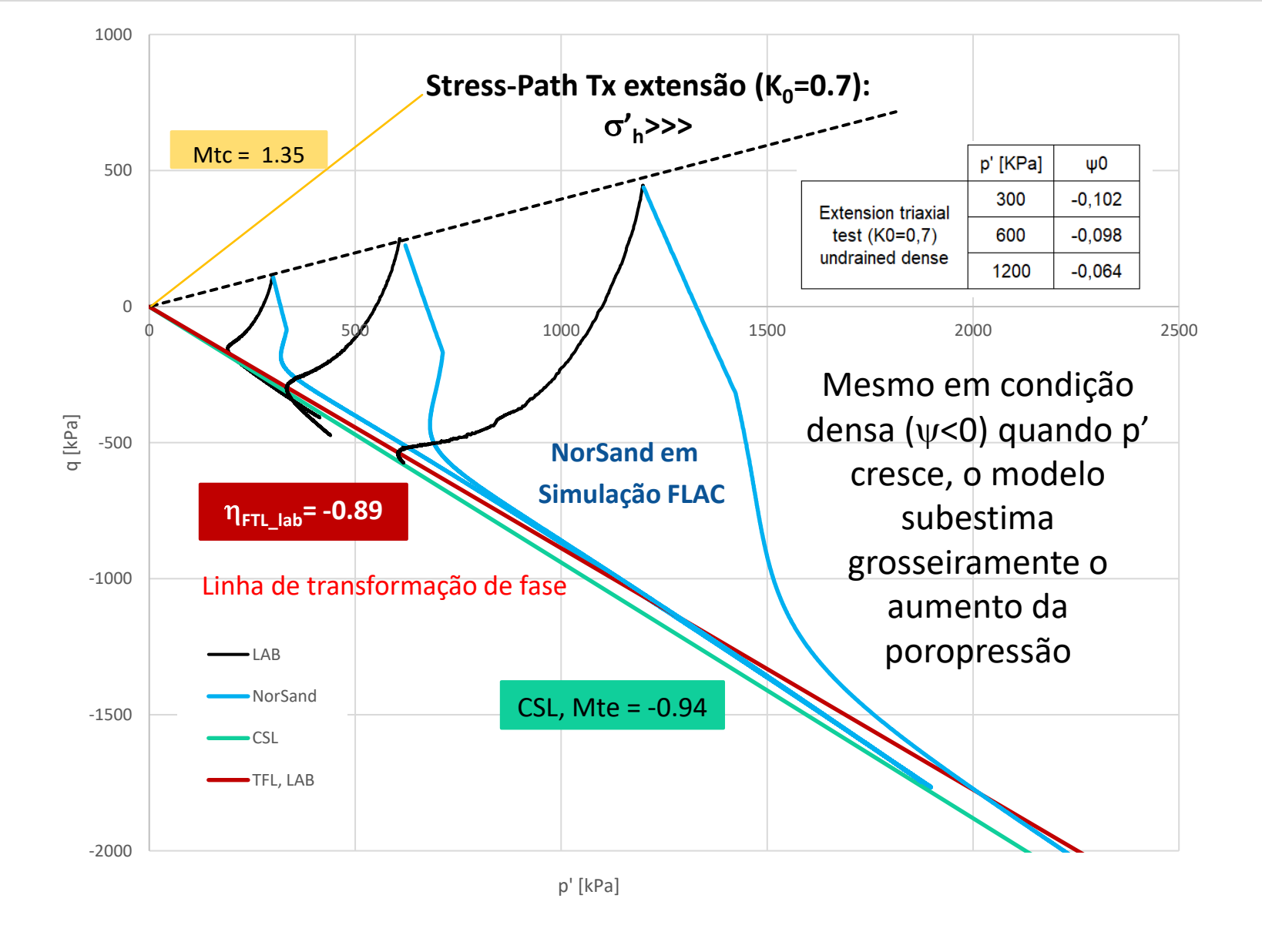


SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM MODELOS AVANÇADOS

Alguns ensaios *stress-path* $CK_{0(=0.7)}U$ em extensão foram conduzidos por compressão lateral (horizontal) e o problema agravou-se porque, mesmo em amostras densas ensaiadas em condições não drenadas, claramente não são bem reproduzidas em termos de aumento da pressão dos poros e, portanto, os pontos de transformação de fase são muito distintos

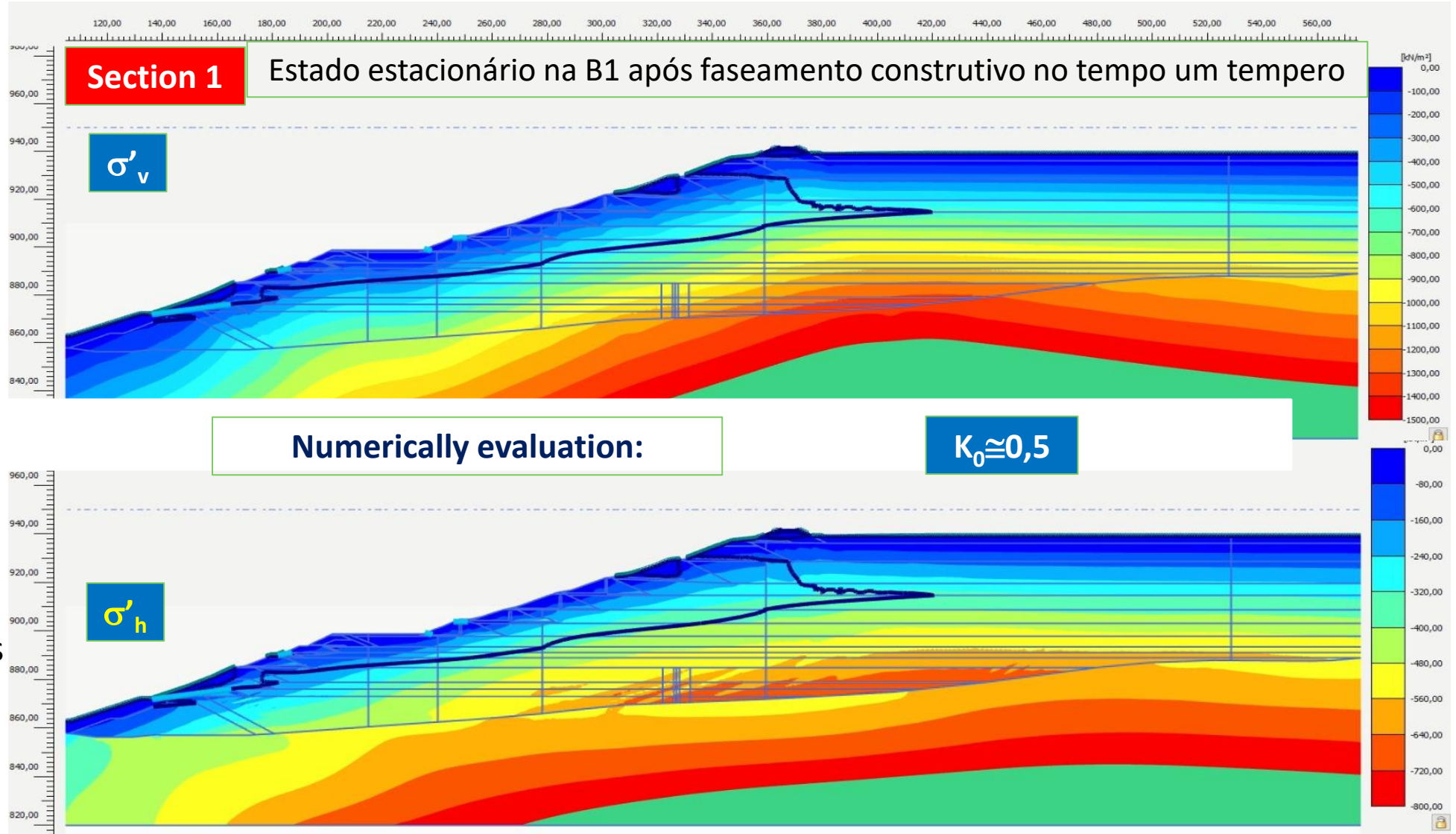
HÁ, ASSIM, UM EFEITO DETERMINANTE DA ANISOTROPIA INERENTE E INDUZIDA QUE CONDICIONA A MODELAÇÃO DAS TSF, QUANDO SE USAM MODELOS ISOTRÓPICOS

TEMOS UM DESAFIO (α, β, θ)



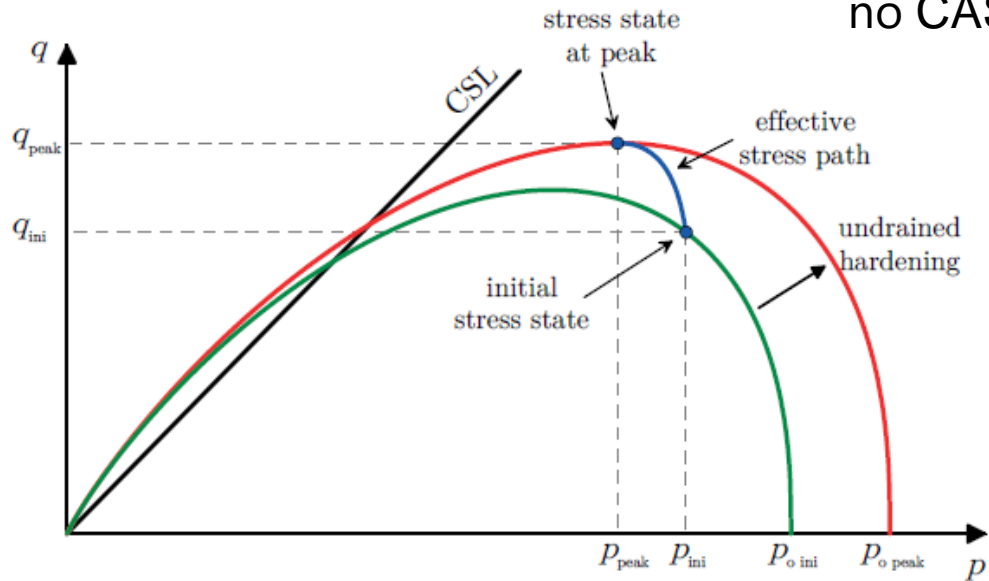
Um compromisso pode ser assumido **SE** a calibração do modelo nas TSF onde K_0 é variável em vista de sua geometria, for feita **a partir de ensaios triaxiais conduzidos a partir dos prováveis estados de repouso K_0**

Para as análises numéricas da Barragem B1 foi utilizado o modelo CASM. Foram decididos testes a serem conduzidos em um compromisso das taxas de tensão esperadas, mas também foram baseados nos estados estacionários gerados pelo tempo de sedimentação durante as fases sequenciais e tomando o tempo de pluviação

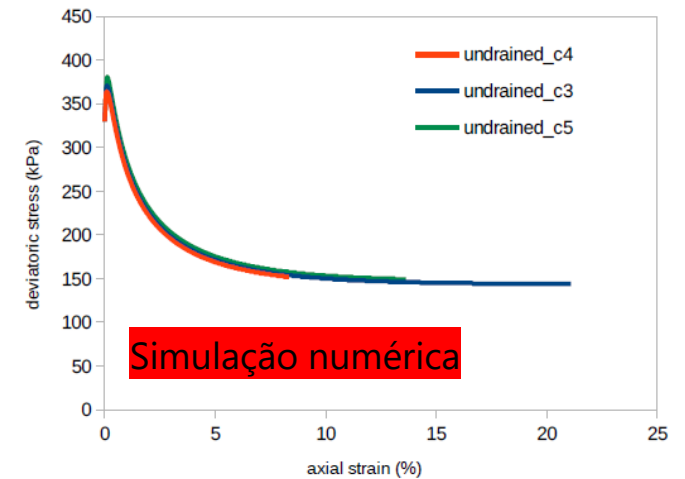
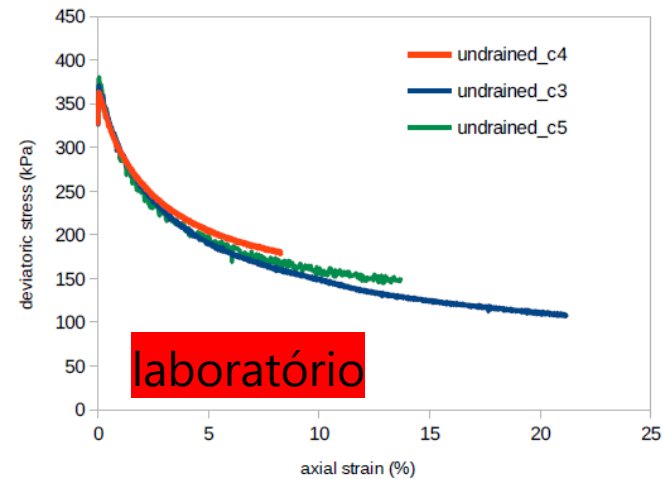
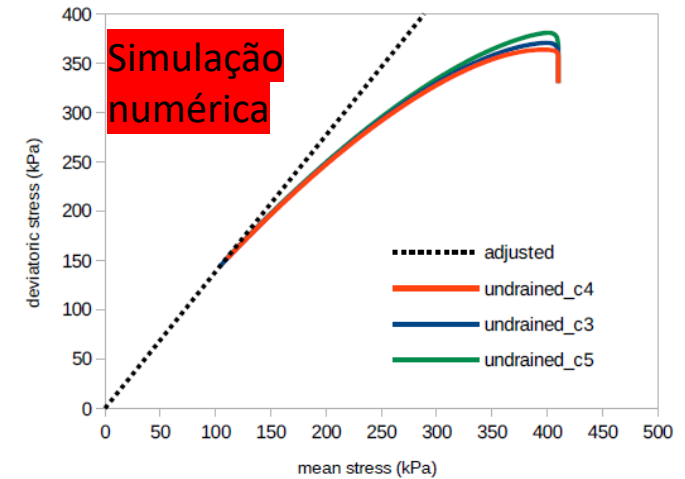
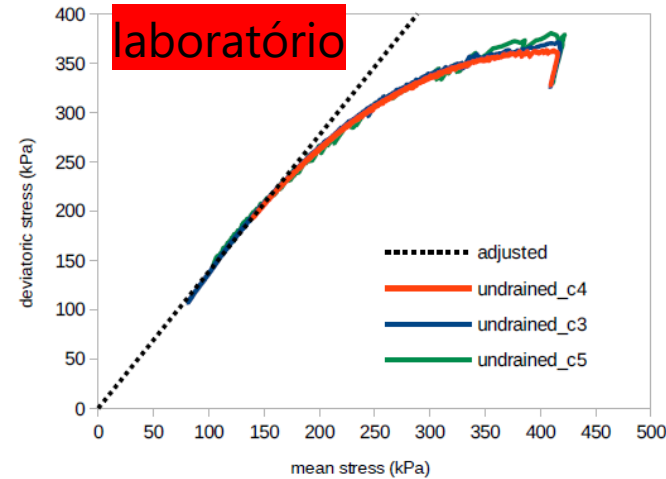


O resultado é relocado na figura, mas agora usando o nível de tensão efetiva média de consolidação como referência e a correspondente a um K_0 esperado. Isso indica um valor médio geral $S = 0,46$ para os rejeitos de referência que foram testados em laboratório. Se usarmos um modelo isotrópico, ele funcionará apesar de ter isotrópico ou anisotrópico

Mobilização da resistência não drenada de pico no CASM



O máximo possível de parâmetros para o modelo para reproduzir os caminhos de tensão para outras condições K_0 , tensão instalada antes do perigo (como na extensão tal como em caminhos de por carregamento lateral.



Será esta a solução final?

Não, precisamos de modelos que lidem com anisotropia inerente e induzida

Considerações sobre perigo de liquefação e trajetórias de tensão

Ações vibracionais com energia induzida suficiente (como terremotos ou explosões ou máquina, basculantes, perfuradoras) são fatores desencadeantes de liquefação de alto potencial. Ainda assim, eles devem ser tratados sob abordagens de estado crítico. Modelos como PM4Sand, SaniSand (ICFEP) estão agora lidando com esse problema geomecânico. (ex: www.liquefact.eu).

Solos liquefeitos onde surgem incrementos de poropressão para valores r_u (u/σ'_v) próximos a um, são propensos a atingir um confinamento efetivo nulo entre partículas, enquanto que um declive inclinado ou em zonas onde os planos de tensões principais são inclinados, como na proximidade da barragem "parede" / face (Reid et al., 2021), **fluirá rapidamente para baixo, desenvolvendo um mecanismo de colapso semelhante ao de quando há uma remoção lateral de massas** (como erosão na face do rio – por exemplo, falha da barragem de Mespruit, Manica et al., 2022)) **ou o afundamento ou assentamento rápido da fundação** abaixo da sapata a jusante, conforme descrito e modelado na falha da barragem de Alarcon (ver Gens et al., 2019).

Todos esses mecanismos potencializam, em condições de carregamento parcial ou total não drenado, uma rápida distribuição de tensões pós-pico sob diversas direções (compressão / extensão) com rotações e inversões de tensões principais que atualmente são ignoradas em “ensaios laboratoriais avançados”. **Os modelos por si só também são, frequentemente, limitados na reprodução desses caminhos, especialmente se não considerarem efeitos de anisotropia inerentes ou induzidos.**

Adaptando as palavras do **Professor Norbert Morgenstern** (entrevista GB em 6/09/2024)

(sic ...) a minha mensagem advinda de Victor de Mello vai em direção ao que penso ser a decisiva adoção do Projeto Baseado no Comportamento (**Performance Based Design, PBD**) para compreender plenamente todas as suas implicações e o seu poder para grandes avanços futuros.

Muitas pessoas podem contribuir para caracterização dos materiais (propriedades e estado), para uma melhor instrumentação e para as mais avançadas metodologias computação que podem ajudar a lidar melhor com a complexidade dessas estruturas técnicas complexas.

Sendo boa e necessária esta intenção, não nos podemos alhear das correções sistemáticas devidas às incertezas de estruturas "vivas" (em construção) que obrigam a reinterpretar sistematicamente a sua condição e comportamento em relação a solicitações específicas (eventualmente "gatilhos" que conduzam a instabilidade por liquefação) que permitam a adoção de novas/ajustadas soluções conceptuais (eventualmente para mitigação de risco)...

Se não for assim continuaremos no passado a imaginar que o "projeto é definitivo"! Recorrendo ao PBD como uma forma contínua de procurar reconhecer a evolução da vulnerabilidade, poderemos integrar as melhores práticas nos grandes projetos das TSF e incrementar a salvaguarda das pessoas e bens. (...)

Agradecimentos

O trabalho experimental na FEUP e a interpretação dos resultados foram suportados financeiramente pelo contrato entre o CIMNE e a VALE, e, conforme acordado com o MPF, integraram também as atividades de investigação do CONSTRUCT – Instituto de Investigação e Desenvolvimento (I&D) em Estruturas e Construção, financiadas por fundos nacionais FCT/MCTES (PIDDAC), com o Financiamento Base –UIDB/04708/2020

Os agradecimentos devem-se especialmente ao Prof. Marcos Arroyo e ao Prof. Antonio Gens, do CIMNE, que estiveram diretamente envolvidos na definição dos ensaios laboratoriais para definição dos parâmetros constitutivos necessários para os modelos utilizados nas análises numéricas e pela colaboração com a FEUP na modelação. Isso foi feito por meio de contrato entre a CIMNE e a VALE, S.A., em Termo de Cooperação do Ministério Público Federal (MPF). A FEUP, enquanto parceira do CIMNE, reconhece a colaboração da VALE no terreno e o apoio do MPF, nas campanhas de amostragem.

Deve-se um agradecimento especial e pessoal ao Dr. Sebastião Oliveira (MPF) e ao Eng. Leonardo Mesquita (PF) pelo empenho na organização, execução e ilustração do trabalho de campo, viabilizando o desafiador trabalho de coleta das amostras representativas e o seu transporte para o LabGEO em condições seguras, conforme atestado pela VALE, SA

Um reconhecimento amigável ao Prof. Antonio Mendonça da Universidade Federal de Minas Gerais por uma preciosa dedicação aos trabalhos de amostragem e condicionamento, especialmente na 2ª e 3ª campanhas.

Este trabalho só foi possível com a grande e contínua dedicação (período de pandemia COVID-19) de um grande grupo de colegas e investigadores do grupo de geotecnologia no Departamento de Engenharia Civil. Na FEUP: António Fonseca, Cristiana Fonseca, Daniela Coelho, Diana Cordeiro, Davide Besenzon e Fausto Molina.

Algumas referências bibliográficas aconselhadas (1)

- Arroyo, M., Gens, A. 2022. “Computational Analyses of Dam I Failure at the Corrego de Feijao Mine in Brumadinho”. Final Report, VALE S.A. (<http://tinyurl.com/5n8ftcay>),
- Besenzon, D., 2024. Liquefaction of Mine Tailing Storage Facilities: Material Characterization and Numerical Analysis. PhD, University of Porto (FEUP)
- Bishop, A.W. (1967). Progressive failure – with special reference to the mechanism causing it. Procs of the Geotechnical Conf. on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks, Oslo, Vol. 2, pp. 142–150
- Boulanger, R. (2022). Nonlinear dynamic analyses involving soil liquefaction or cyclic softening. Proc.s, 20th ICSMGE State of the Art and Invited Lectures, Rahman and Jaksa (eds), Australian Geomechanics Society, Sydney. 351-379. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Chapuis, R.P., Aubertin, M. 2003. On the use of the Kozeny–Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. Canadian Geotechnical Journal, 40: 616-628. <https://doi.org/10.1139/t03-013>
- Cho, G.-C., Dodds, J., Santamarina, J.C., 2006. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 132, 591–602. ASCE, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591))
- Chu, J. and Wanatowski, D. 2008. Instability conditions of loose sand in plane-strain. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134(1): 136–142. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:1\(13\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:1(13))
- Chu, J. and Wanatowski, D. 2009. Effect of loading mode on strain softening and instability behaviour of sand in plane strain tests. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(1): 108-120. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:1\(108\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:1(108))
- Cordeiro, D., Molina-Gómez, F., Ferreira, C., Rios, S., Viana da Fonseca, A. (2022). Cyclic Liquefaction Resistance of an Alluvial Natural Sand: A Comparison between Fully and Partially Saturated Condition, Geotechnics, 2(1), 1-13. (<https://doi.org/10.3390/geotechnics2010001>)
- Ferreira, C., Díaz-Durán, F., da Fonseca, A.V., Cascante, G., 2021. New approach to concurrent Vs and Vp measurements using bender elements. Geotechnical Testing Journal, ASTM 44 (6), 1801-1820. <https://doi.org/10.1520/GTJ20200207>
- Fotovat, A., Sadrekarimi, A., 2022. Instability of a gold mine tailings subjected to different stress paths. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 148(5), 04022020-1 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002780](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002780)
- Fourie, A.B., Tshabalala, L., 2005. Initiation of static liquefaction and the role of K_0 consolidation. Canadian Geotechnical Journal 42(3): 892–906. <https://doi.org/10.1139/T05-026>
- Hight, D., Dias, T.G.S. (2023). Does the anisotropy of the collapse/instability surface play a role when assessing the stability of tailings dams?, 1-ICGTMW, Geomin 2023, Ouro Preto (<https://www.issmge.org/news/proceedings-of-1st-international-conference-on-geotechnics-of-tailings-and-mine-waste>, pp. 222-235)
- Iai, S. (2021). Mechanism of PALU Liquefaction EQ 2018 - Delayed flow failure. FLIP Consortium, Japan. PDF presentation in: <https://www.hatti.or.id/files/2021/HATTI.pdf>
- Iai, S., Tobita, T. (2022). Nonlinear dynamic analyses for evaluating seismic ground deformation—Delayed flow failure. Proc.s, 20th ICSMGE State of the Art and Invited Lectures, Rahman and Jaksa (eds), Australian Geomechanics Society, Sydney. 381-401. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Jefferies M and Been K (2016) Soil Liquefaction: A Critical State Approach, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Jefferies, M., Morgenstern, N. R., Van Zyl, D. V., and Wates, J. (2019). Report on NTSF Embankment Failure. Cadia Valley Ope.s for Ashurst., NEWCREST Tech. report, South Orange, NSW, Australia.

Algumas referências bibliográficas aconselhadas (2)

- Ladd, R., 1978. Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, ASCE, ASTM, 1(1): 16-23. <https://doi.org/10.1520/GTJ10364J>
- Lade, P.V. 1992. Static instability and liquefaction of loose fine sandy slopes. *ASCE Journal of Geotech. Eng.* 118(1): 51-71. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:1\(51\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:1(51))
- Lade, P.V. 1993. Initiation of static instability in the submarine Nerlerk Berm. *Canadian Geotech. J.* 30(6): 895-904. <https://doi.org/10.1139/t93-088>
- Laera, A., Miranda, V.H., Azeiteiro, R.J.N., Bui, T., Brasile, S., Brinkgreve, R.B.J. 2024. Finite element modelling of a tailings dam using the Clay And Sand Model. *Procs of the XVIII ECSMGE 2024, Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*. ISBN 978-1-032-54816-6, ISSMGE.
- Mánica, M., Gens, A., Vaunat, J., Ruiz, D.F., 2018. Nonlocal plasticity modelling of strain localisation in stiff clays. *Computers and Geotechnics* 103, 138–150. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.07.008>
- Mánica, M.A., Arroyo, M., Gens, A., Monforte, L., 2022. Application of a critical state model to the Merriespruit tailings dam failure. 175 (2), 151-165. <https://doi.org/10.1680/JGEEN.21.00001>
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behaviour*. (577pages). New York: John Wiley & Sons
- Monforte, L., Gens, A., Arroyo, M., Mánica, M., Carbonell, J.M. (2021). Analysis of cone penetration in brittle liquefiable soils. *Computers and Geotechnics*, 134, 104123 doi: [10.1016/j.compgeo.2021.104123](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104123)
- Monforte, L., Arroyo, M., & Gens, A. (2023). A relation between cone metrics and the state parameter for liquefiable soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 60(11) <https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0377>
- Murthy, T. G., Loukidis, D., Carraro, J. A.H., Prezzi, M., Salgado, R. (2007). Undrained monotonic response of clean and silty sands. *Géotechnique*, 57(3): 273–288. Doi: 10.1680/geot.2007.57.3.273.
- Molina-Gómez, F., Ramos, C., Ferreira, C., Viana da Fonseca, A. 2020. *Performance of Gel-Push sampling in liquefiable soils*. *Géotechnique Letters*, 10, 1–6, <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00073>
- Molina-Gómez, F., Viana da Fonseca, A., 2021. Key geomechanical properties of the historically liquefiable TP-Lisbon sand. *Soils and Foundations* 61, 836–856. <https://doi.org/10.1016/J.SANDF.2021.03.004>
- Pezeshki, A., & Ahmadi, M. M. (2021). In Situ State of Tailing Silts Using a Numerical Model of Piezocone Penetration Test Developed by Norsand Model. *International Journal of Geomechanics*, 22(1), 04021264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002250](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002250)
- Rabbi, A.T.Md.Z., Rahman, Md.M., Cameron, D.A., 2018. Undrained Behaviour of Silty Sand and the Role of Isotropic and K_0 Consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, , ASCE 144 (4). 04018014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001859](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001859)
- Ramos, C., Viana da Fonseca, A., & Vaunat, J. (2015). Modeling flow instability of an Algerian sand with the dilatancy rule in CASM. *Geomechanics and Engineering*, 9(6), 729–742. <https://doi.org/10.12989/gae.2015.9.6.729>
- Reid, D., Fourie, A., Ayala, J.L., Dickinson, S., Ochoa-Cornejo, F., Fanni, R., Garfias, J., Viana da Fonseca, A., Ghafghazi, M., Ovalle, C., Riemer, M., Rismanchian, A., Olivera, R., Suazo, G., 2020. Results of a critical state line testing round robin programme. 71(7) 616-630. <https://doi.org/10.1680/JGEOT.19.P.373>
- Reid, D., Dickinson, S., Mital, U., Fanni, R., Fourie A., 2022. On some uncertainties related to static liquefaction triggering assessments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering* 175(2): 181–199, <https://doi.org/10.1680/jgeen.21.00054>
- Riemer, M.F., Seed, R.B., 1997. Factors Affecting Apparent Position of Steady-State Line. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123, 281–288. ASCE, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:3(281).
- Rios, S., Ciantia, M., Gonzalez, N., Arroyo, M., & Viana da Fonseca, A. (2016). Simplifying calibration of bonded elasto-plastic models. *Computers and Geotechnics*, 73, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.11.019>

Algumas referências bibliográficas aconselhadas (3)

- Robertson, P.K., Wride, C.E., 1998. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical J.* 35, 442–459. <https://doi.org/10.1139/T98-017>
- Robertson, P.K., de Melo, L., Williams, D.J., Wilson, W., 2019. Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I. <http://www.b1technicalinvestigation.com/>
- Schnaid, F., Bedin, J., Viana da Fonseca, A., Costa-Fillho, L. de M. 2013. Stiffness and strength governing the static liquefaction of tailings, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(12), 2136–2144. ([http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000924](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000924)).
- Shuttle, D. & Jefferies, M. (2016). Determining silt state from CPTu. *Geotechnical Research, ICE*, 3(3): 90-118. <https://doi.org/10.1680/jgere.16.00008>
- Silva, J.P., Rissoli, A.L.C, Cacciari, P.P., Viana da Fonseca, A., Scheuermann Filho, H.C., Wagner, A.C., Carvalho, J.V.deA., Festugato, L., Consoli, N.V. (2024). Triaxial testing response of compacted iron ore tailings considering a broad spectrum of confining pressures, *Soils and Foundations*, 64, 10143861, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101438>
- Smith, K., Fanni, R., Chapman, P., Reid, D., 2019. Critical State Testing of Tailings: Comparison between Various Tailings and Implications for Design, in: *Proc.s of Tailings and Mine Waste*. pp. 1183–1195.
- Soares, M., Viana Da Fonseca, A., 2016. Factors affecting steady state locus in triaxial tests. *Geotechnical Testing Journal* 39, 1056–1078. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150228>
- Verdugo, R., Ishihara, K., 1996. The Steady State of Sandy Soils. *Soils and Foundations* 36, 81–91. https://doi.org/10.3208/sandf.36.2_81
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., Fahey, M., 2009. A framework interpreting bender element tests, combining time-domain and frequency-domain methods. *Geotechnical Testing Journal* 32, 91–107. <https://doi.org/10.1520/GTJ100974>
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., Ramos, C., & Molina-Gómez, F. 2019. The geotechnical test site in the greater Lisbon area for liquefaction characterisation and sample quality control of cohesionless soils. *AIMS Geosciences*, 5(2): 325–343, DOI: 10.3934/geosci.2019.2.325
- Viana da Fonseca, A., Cordeiro, D., Molina-Gómez, F., 2021a. Recommended Procedures to Assess Critical State Locus from Triaxial Tests in Cohesionless Remoulded Samples. *Geotechnics* 2021, 1, 95–127. <https://doi.org/10.3390/GEOTECHNICS1010006>
- Viana da Fonseca, A., Besenzon, D., Molina-Gómez, F., Viana da Fonseca, A. (2022). Flow liquefaction susceptibility of pond filled iron ore mining tailings from CPTu data: A comparison between state parameter and yield-stress-ratio approaches. *Proc.s 20th ICSMGE*, Rahman and Jaksa (eds), Australian Geomechanics Society, Sydney, 4423-4428. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Viana da Fonseca, A., Molina-Gomez, F., Besenzon, D., Coelho, D. (2023). The influence of stress induced anisotropy in undrained yield and ultimate shear strengths in brittle loose deposited silts, 8th Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials, Porto, E3S Wes of Conferences, Vol. 544, # 14006 <https://www.e3s-conferences.org/> (<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454414006>)
- Yamamuro, J.A., Lade, P.V., 1996. Drained Sand Behaviour in Axisymmetric Tests at High Pressures. *Journal of Geotechnical Engineering* 122 (2), 109–119. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:2\(109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:2(109))
- Yang, J., Luo, X.D., 2015. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 84, 196–213. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2015.08.001>
- Yu, H.S., Khong, C., Wang, J., Zhang G. (2005). Experimental evaluation and extension of a simple critical state model for sand. *Granular Matter* 7, 213–225. <https://doi.org/10.1007/s10035-005-0209-y>
- Wagner, A.C., de Sousa Silva, J.P., de Azambuja Carvalho, J.V., Cezar Rissoli, A.L., Cacciari, P.P., Chaves, H.M., Scheuermann Filho, H.C., Consoli N.C., 2022. Mechanical behaviour of iron ore tailings under standard compression and extension triaxial stress paths. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* doi:10.1016/j.jrmge.2022.11.013



Bolonha, 10 de Junho de 2022, Dia de Portugal, de
Camões e das Comunidades Portuguesas
ou melhor, o dia da Lusofonia

A versão original desta lição em Inglês está em publicação no Journal of Geomechanics and Geoengineering (Taylor & Francis)



19 / 03 / 1930 ↔ 17 / 12 / 2023

God bless Jim, for the inspiration

Obrigado