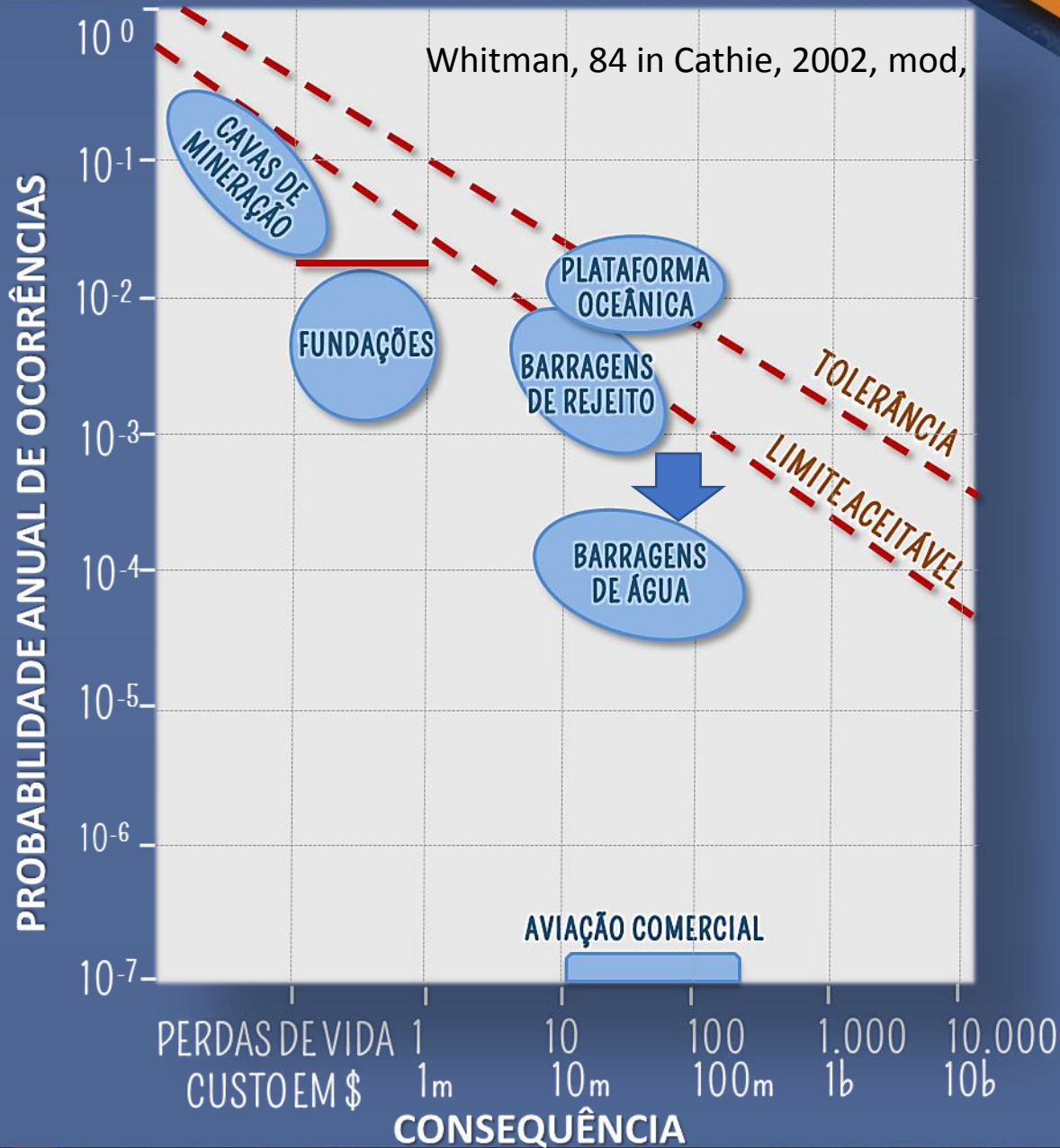


Transformando
Incertezas em
Confiança

***PROJETO E GESTÃO DE SISTEMA DE
REJEITOS – PERSPECTIVAS NO BRASIL***

Paulo Cella
Diretor

RISCO EM ATIVIDADES ECONÔMICAS

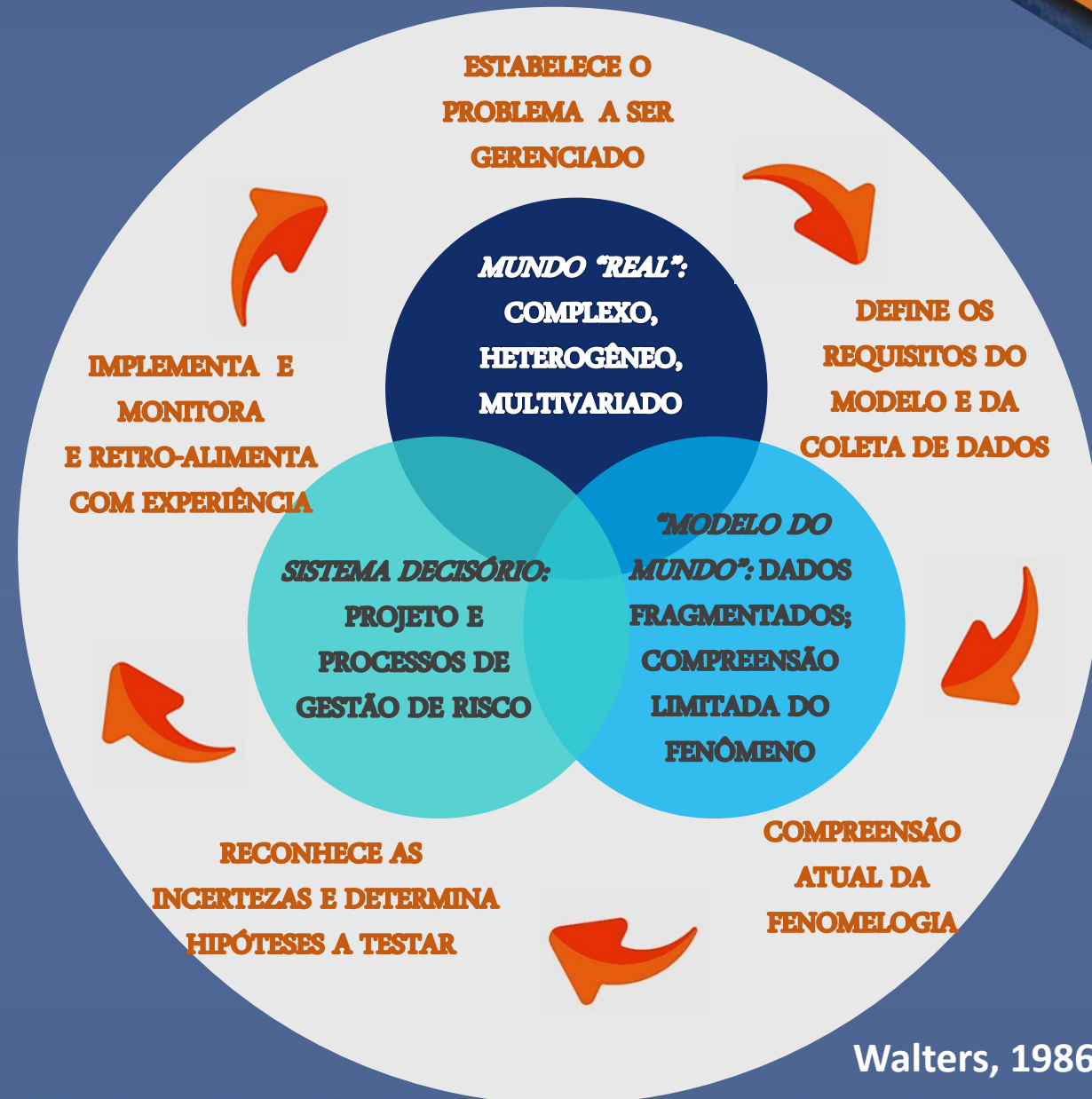


TAXA ANUAL DE EVENTOS X PERDAS

BARRAGENS DE REJEITOS 10 X MAIS QUE BARRAGENS DE ÁGUA

EXPOSIÇÃO AO RISCO: Adensamento demográfico

DESAFIO: No Mínimo a equiparação com a taxa de rupturas das barragens de água



Walters, 1986-modificado

SISTEMAS DE ALTA COMPLEXIDADE

INTERDISCIPLINAR

*ALTAMENTE ESPECIALIZADO
(liquefação, sismicidade, processo,
operação)*

*DESAFIO: A representação do
'mundo real' em modelos cada vez
mais confiáveis*



Ruptura de Fundão (Nov. 2015) – fonte Relatório Painel
<http://fundaoinvestigation.com/pt-br>

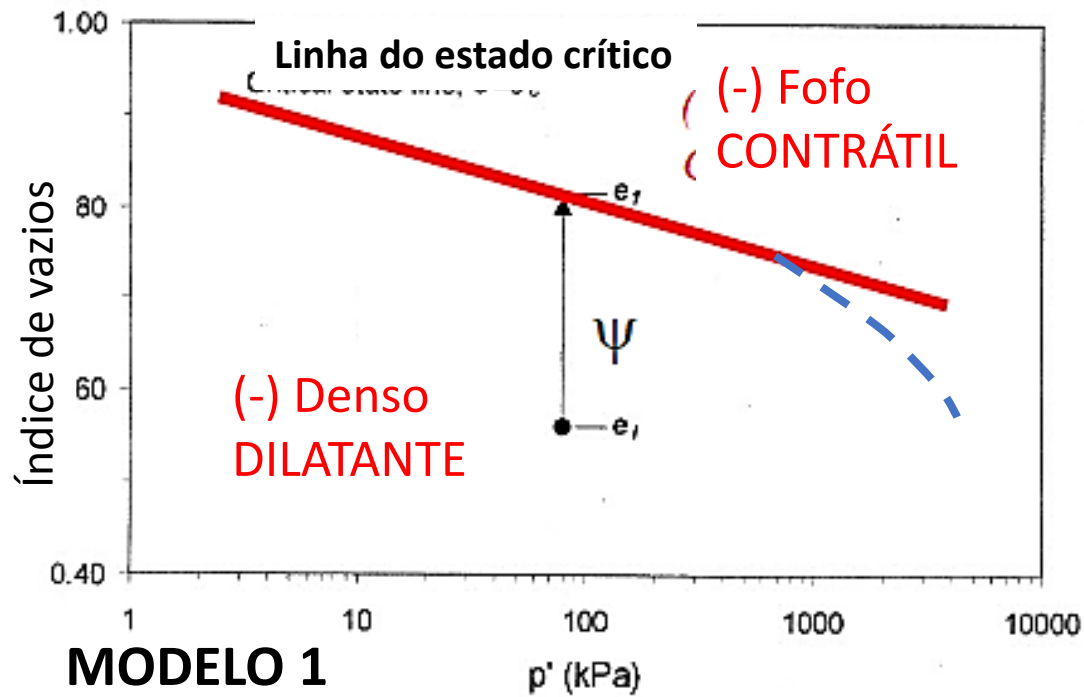
AUMENTAR A CONFIABILIDADE

*PREVISÃO DO FENÔMENO E
PARAMETRIZAÇÃO*

*NORMATIZAÇÃO RIGOROSA DAS
FERRAMENTAS DE INVESTIGAÇÃO*

MÉTODOS DE ANÁLISE

LIQUEFAÇÃO – TRIAGEM



PREVISIBILIDADE E PARAMETRIZAÇÃO

INÍCIO: CASOS HISTÓRICOS ATÉ
VIRADA 70 – 80: Correlações com SPT

GRANDE AVANÇO TEÓRICO A
PARTIR DOS ANOS 80 – 90: CPTu;
Câmaras de Calibração (2 ton); MEF
expansão de cavidade esférica

CONSOLIDAÇÃO DE DOIS GRANDES
MODELOS DE ABORDAGEM

Shuttle & Jefferies, 2016

✓ Jefferies & Bean, 2016: consolidam mais de 40 anos de pesquisa sobre a liquefação com uso da abordagem do Estado Crítico e da Câmara de Calibração

✓ Parâmetro de estado Ψ a partir de propriedades do estado crítico, plasticidade e elasticidade

$$\Psi = -\ln(Q_p/k) / m$$

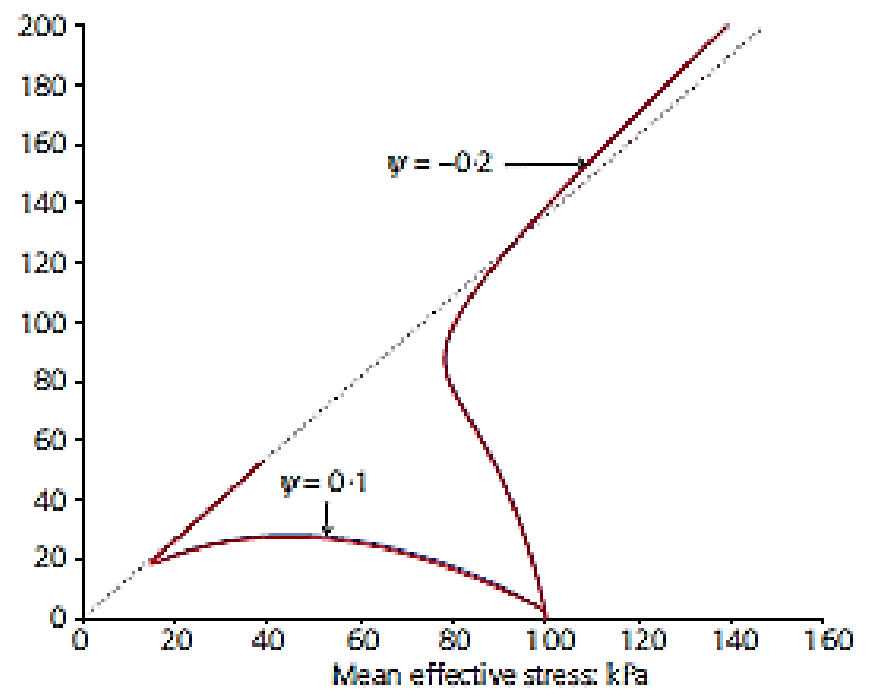
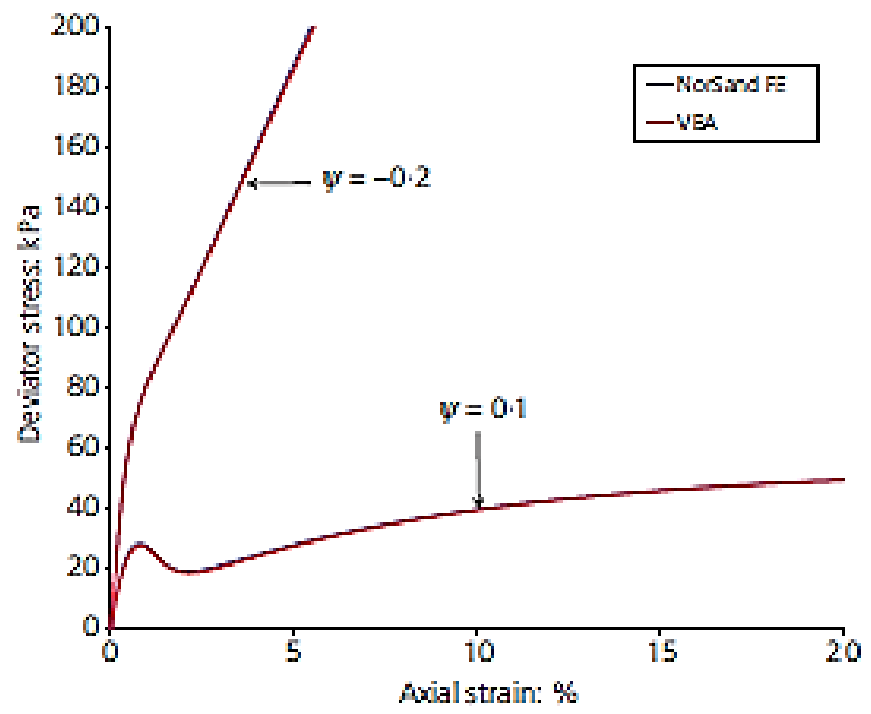
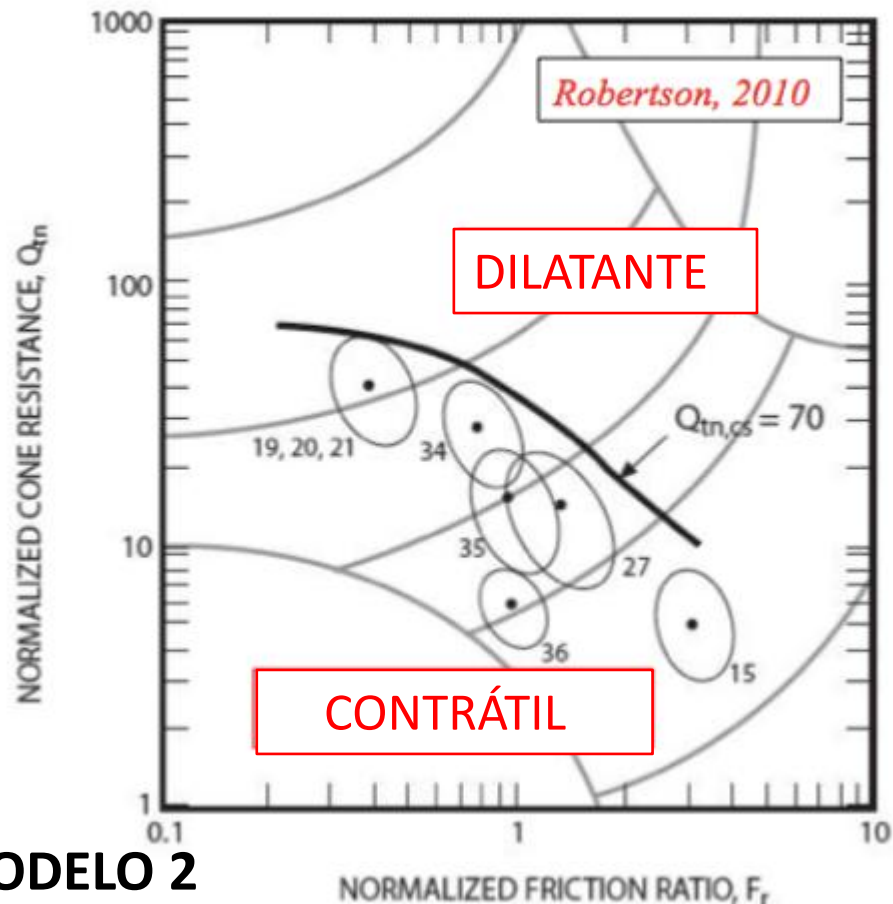


Figure 17. Verification of viscoplastic finite-element (FE) implementation of NorSand in undrained triaxial compression of silt

LIQUEFAÇÃO – TRIAGEM



MODELO 2

✓ Robertson et al, 1998/2009/2010/2016: consolidam modelo conjugado na interpretação de casos históricos de liquefação e resistência normalizada no cone

PREVISIBILIDADE E PARAMETRIZAÇÃO

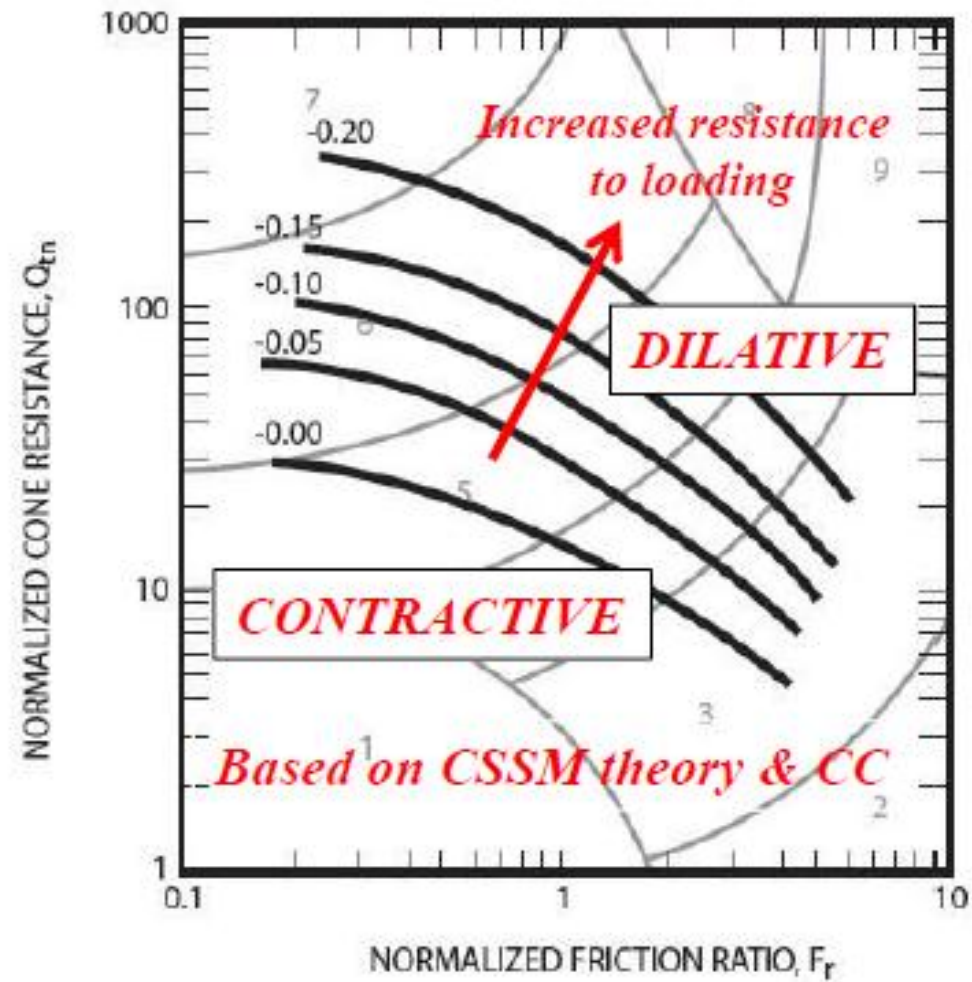
INÍCIO: CASOS HISTÓRICOS ATÉ VIRADA 70 – 80: Correlações com SPT

GRANDE AVANÇO TEÓRICO A PARTIR DOS ANOS 80 – 90: CPT_u; Câmaras de Calibração (2 ton); MEF expansão de cavidade esféricas

CONSOLIDAÇÃO DE DOIS GRANDES MODELOS DE ABORDAGEM

$$\psi \sim 0.56 - 0.33 \log Q_{tn,cs}$$

State Parameter, Ψ



COROLÁRIO 1:

A suscetibilidade à liquefação ancorada nas correlações da resistência do cone com propriedades ‘in situ’ está em constante evolução e a confiabilidade é bastante satisfatória, atualmente.

COROLÁRIO 2:

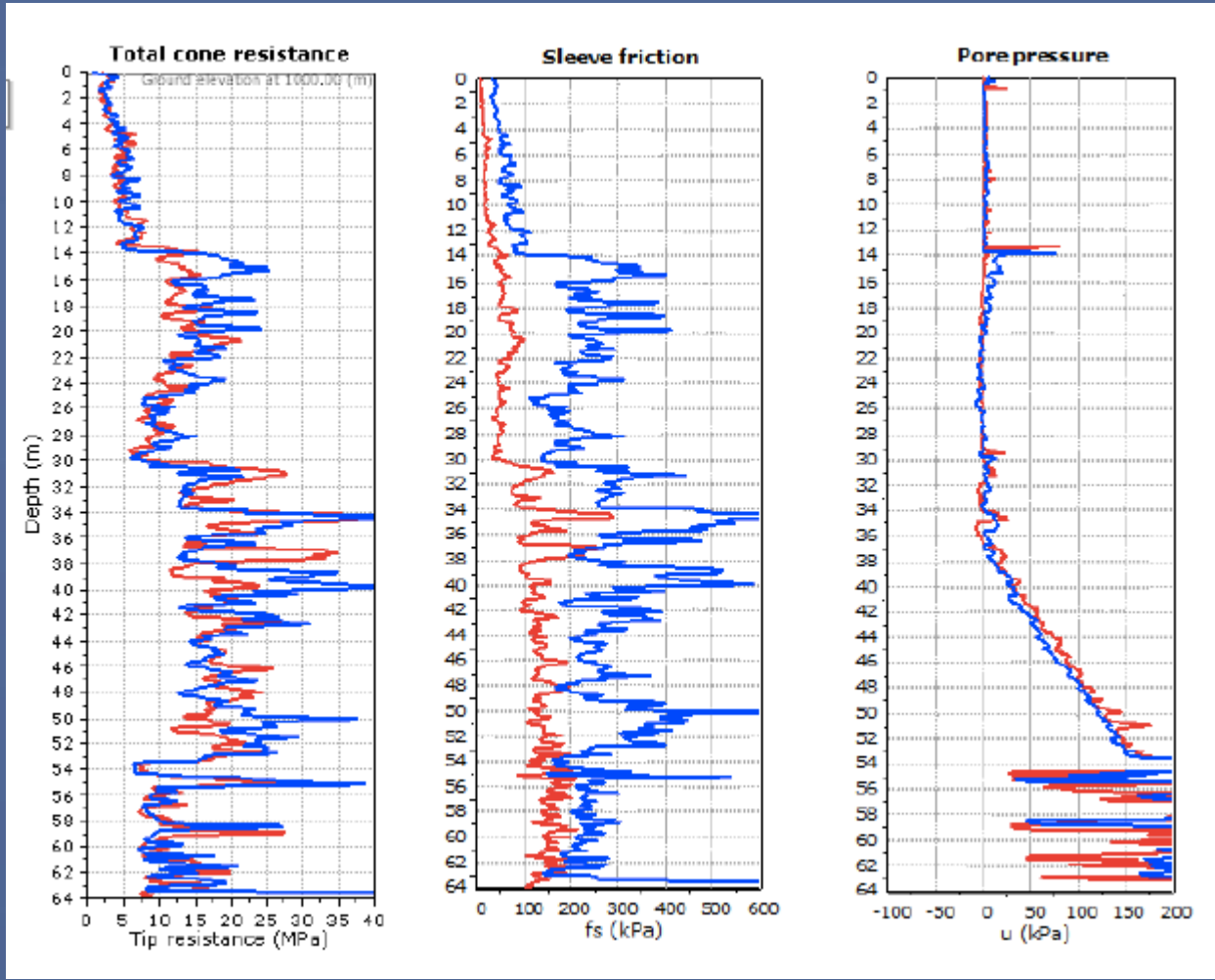
Os ‘gatilhos’ da liquefação podem ser acionados com alterações mínimas no equilíbrio do depósito e devem ser sempre assumidos para solos indicados como suscetíveis na “triagem” com ψ ou $Q_{tn,cs}$.

AUMENTAR A CONFIABILIDADE

**PREVISÃO DO FENÔMENO E
PARAMETRIZAÇÃO**

Variação mínima no diâmetro da luva lateral do cone – ASTM-12: tolerância de +0,35mm

LIQUEFAÇÃO



AUMENTAR A CONFIABILIDADE

NORMATIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE INVESTIGAÇÃO

A resistência de ponta ' q_t ' foi pouco afetada pela luva desgastada, cujo diâmetro era inferior ao da ponta do cone, mas o atrito lateral ' f ' foi bastante afetado (Samarco, 2017)

**Neves Corvo: silte 'subaquático' (argila sensível) trocou-se os sensores de ponta e lateral (u_2)/teste 'in situ' (Shuttle & Jefferies, 2016)*

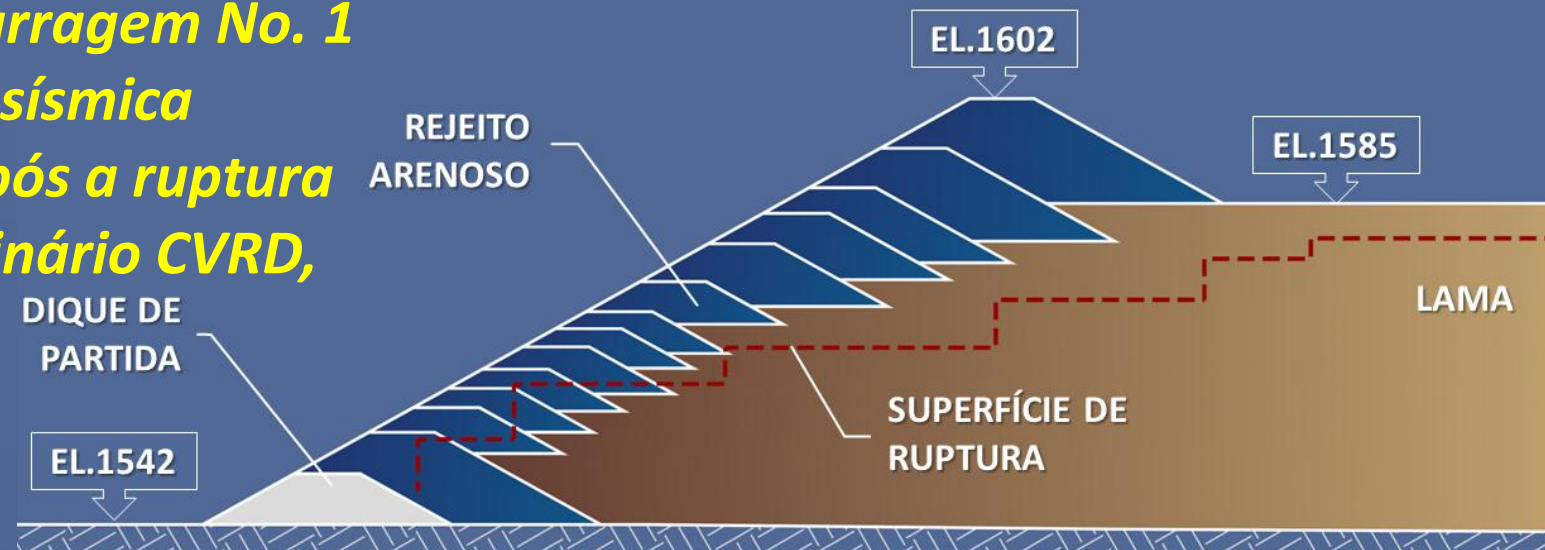
LIQUEFAÇÃO

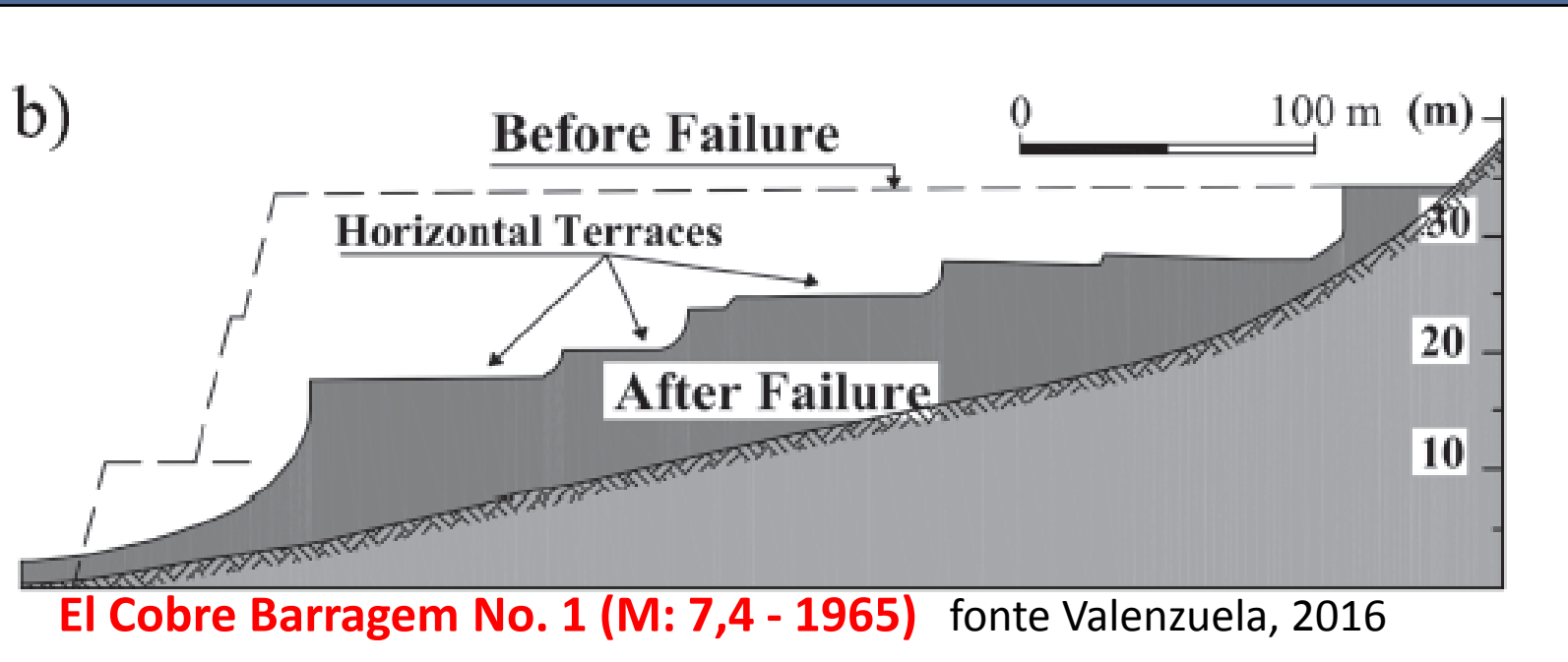


AUMENTAR A CONFIABILIDADE

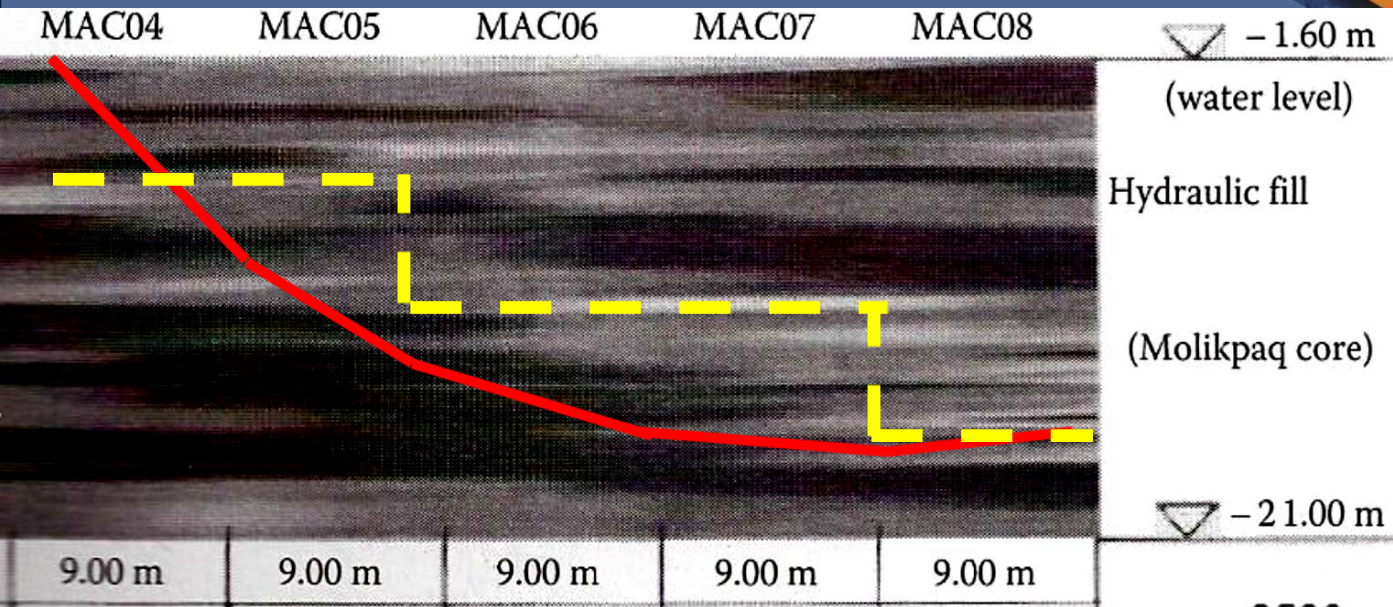
MÉTODO DE ANÁLISE

Barahona, Chile (M: 8,3 - 1928) – Barragem No. 1
Ruptura progressiva por liquefação sísmica
seguida de deslizamento de fluxo após a ruptura
do dique de partida (Troncoso, Seminário CVRD,
2006)





LIQUEFAÇÃO

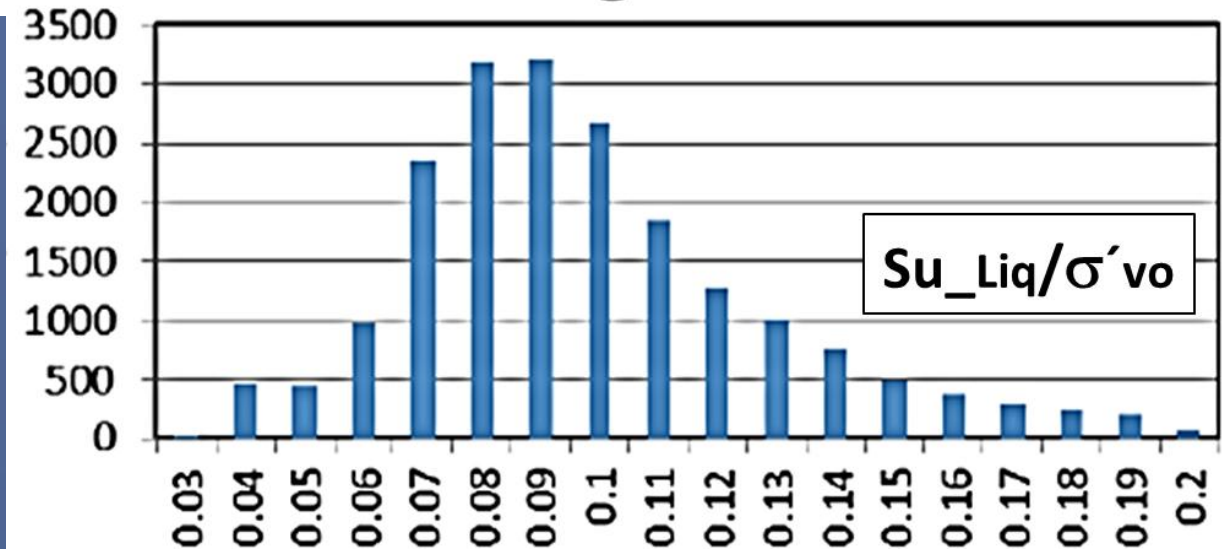


AUMENTAR A CONFIABILIDADE

MÉTODO DE ANÁLISE
Histograma

DISPOSIÇÃO HIDRÁULICA DE AREIA:
TANQUE 72 X 72 m : 32 CPTu's

Variabilidade do depósito
Cor clara: camadas fracas
Cor escura: camadas fortes



COROLÁRIO 3:

A escolha do percentil de resistência liquefeita depende do modo de ruptura e possivelmente da natureza da solicitação

Liquefação dinâmica com superfície 'em degraus' sugere adoção de menor percentil (10-15%) → M.E.F.

Análise por Equilíbrio Limite ao longo de superfícies côncavas sugere adoção de percentis superiores (25 a 33%)

AUMENTAR A CONFIABILIDADE

MÉTODO DE ANÁLISE

Pista Experimental Com Rejeito Arenoso Filtrado Samarco (2017)



REJEITOS NA ESTRUTURA DE CONTENÇÃO

FILTRADOS: Empilhamento com compactação : vários aterros experimentais em execução (Ferro, Ouro, Alumínio)

CICLONADOS: Barragem convencional com segregação a montante e cicloneados a jusante

EMPILHAMENTO DRENADO

LAMA EM CAVAS

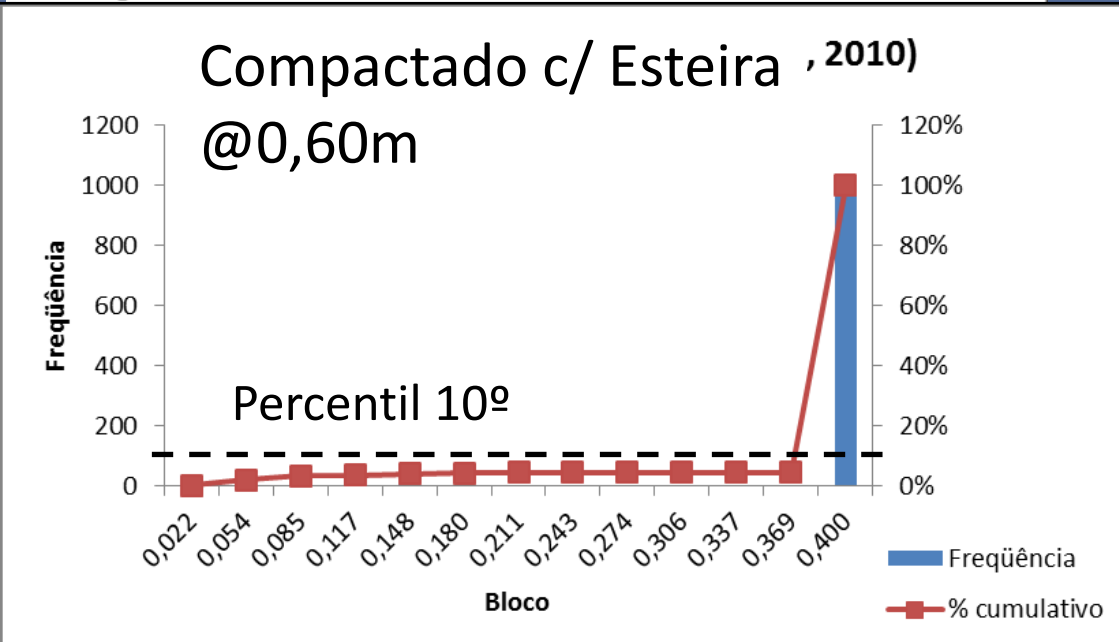
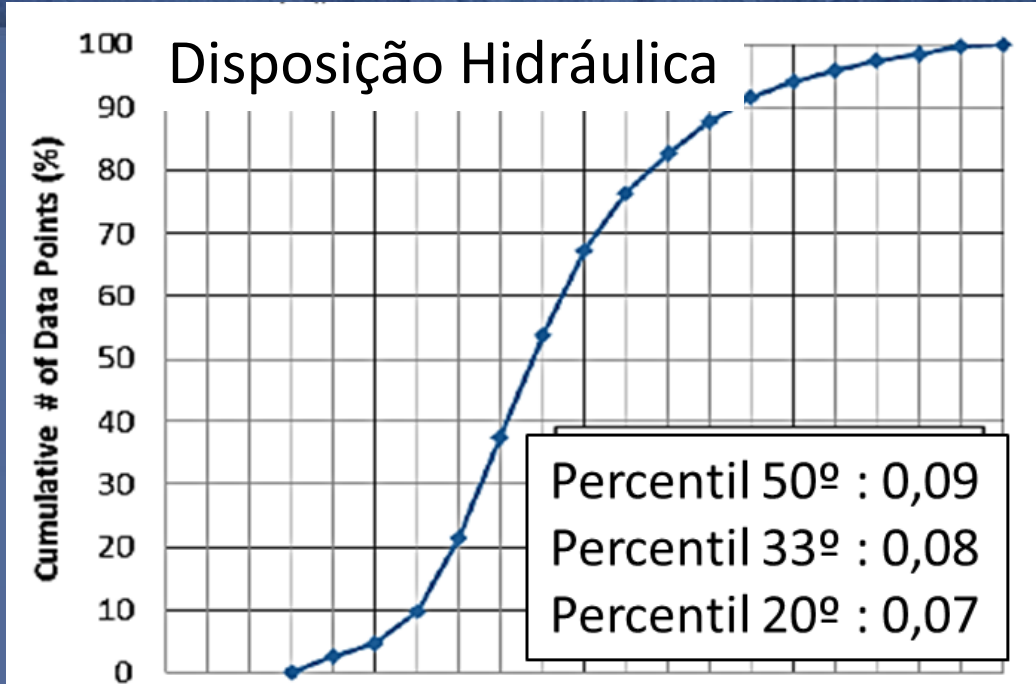
TENDÊNCIAS DE PROJETO

REJEITO HIDRÁULICO X COMPACTADO

REJEITO ARENOSO (SAMARCO, 2016)

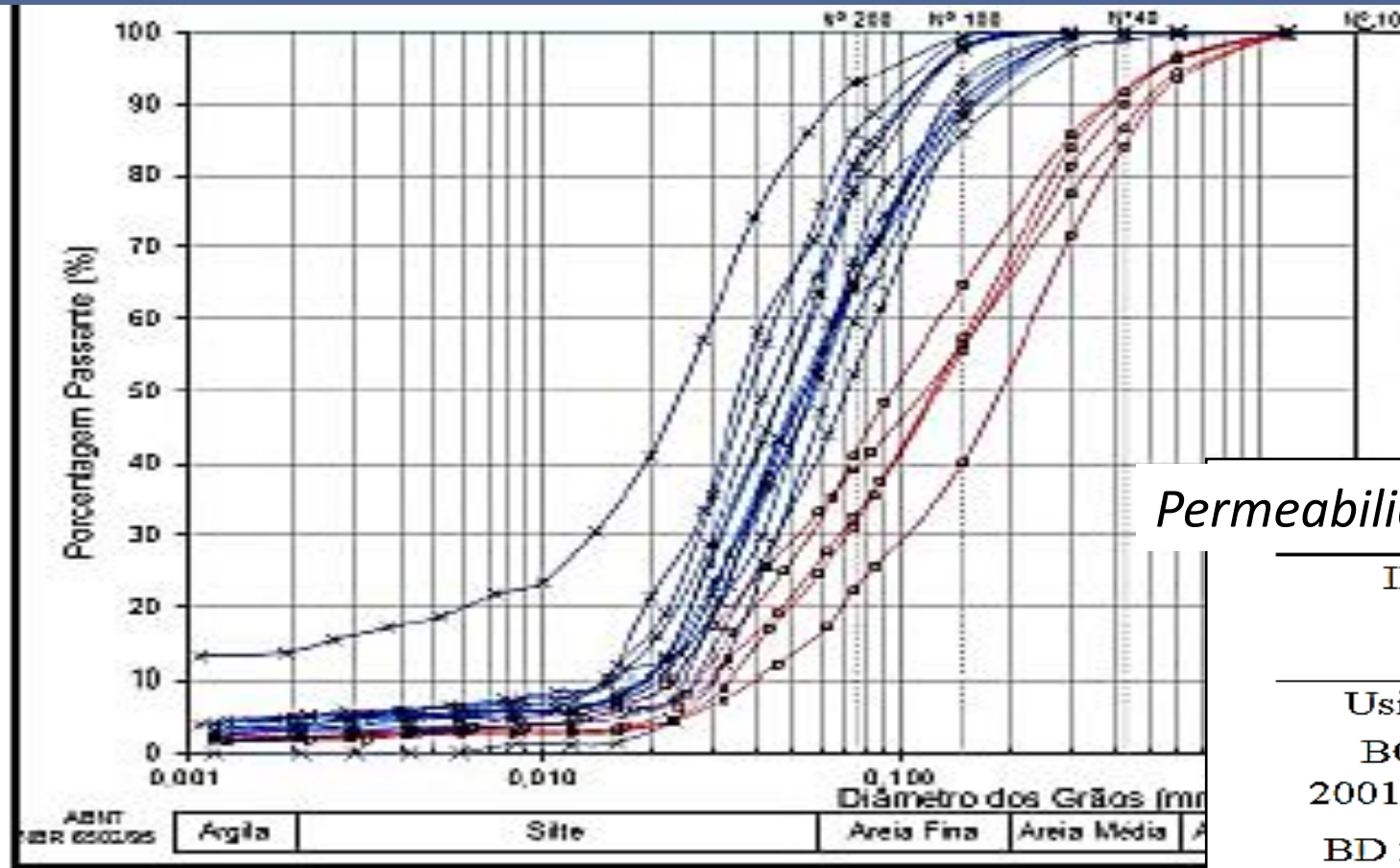
DISPOSIÇÃO HIDRÁULICA VERSUS
COMPACTADO COM ESTEIRA

PERCENTIS DA RESISTÊNCIA
NÃO-DRENADA LIQUEFEITA



REJEITO Fe CICLONADO

Curvas granulométricas tomadas até 100m e a partir de 100m da crista

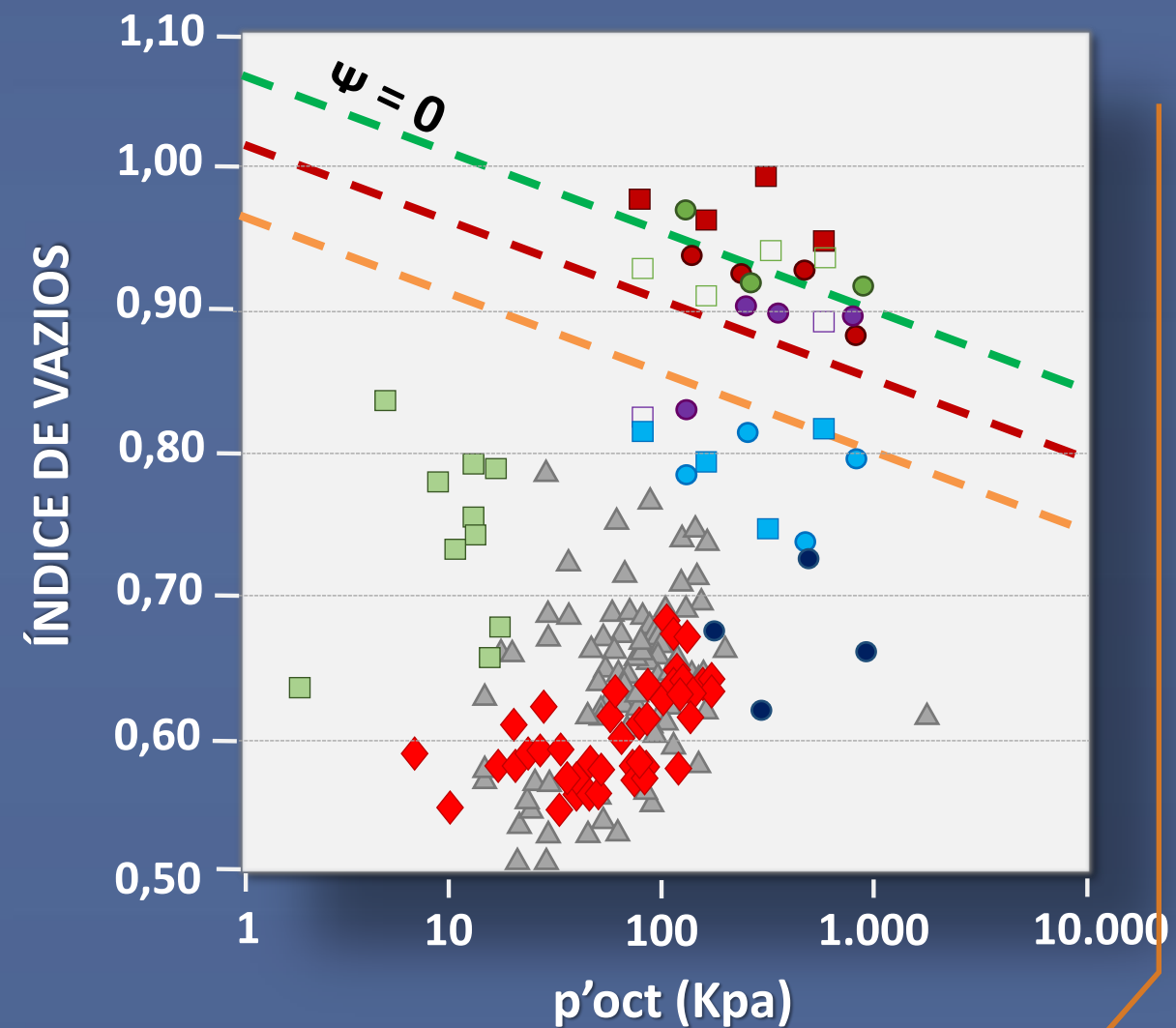


Segregação hidráulica nas praias com alteamento p/ montante das Barragens de Campo Grande e Doutor, Vale (Pirete et al, 2014)

Permeabilidade dos rejeitos CR:90-95%

ID	#200 (%)	D ₁₀ (mm)	Areia (%)	k (cm/s)
Usinas	61,0	0,021	53	$1,88 \times 10^{-4}$
BCG 2001/2011	36,0	0,036	71	$1,57 \times 10^{-3}$
BD 2011	39,0	0,035	70	$7,18 \times 10^{-4}$
BCG 2013 Até 100m	32,0	0,032	74	$1,03 \times 10^{-3}$
BCG 2013 >100m	69,0	0,020	40	$4,53 \times 10^{-4}$

TENDÊNCIAS DE PROJETO



COMPARATIVO NO DIAGRAMA DO ESTADO CRÍTICO DE REJEITOS DE FERRO COM DIFERENTES COMPACTAÇÕES E NA CONDIÇÃO DE PRAIA

CONCLUSÕES

FORAM MAIS DE 40 ANOS DE PESQUISAS NO EXTEERIOR PARA ATINGIR O CONHECIMENTO E CAPACITAÇÕES ATUAIS A RESPEITO DA LIQUEFAÇÃO. MAS O BRASIL TEM CONDIÇÕES DE TESTAR SEUS REJEITOS COM BASE NOS MODELOS CONSOLIDADOS. O CONHECIMENTO ATUAL DA LIQUEFAÇÃO É SATISFATÓRIO

O COMPROMISSO DA PORTARIA DO DNPM COM SEGURANÇA É MUITO LOUVÁVEL, MAS O PRAZO PARA UM ESTUDO APROFUNDADO DE LIQUEFAÇÃO É INSUFICIENTE PARA EXECUÇÃO DAS INVESTIGAÇÕES E AVALIAÇÕES → A DECLARAÇÃO DE ESTABILIDADE FICA 'ESPREMIDA'

MINERADORES DEVEM PROMOVER A ORGANIZAÇÃO DE BANCO DE DADOS ABRANGENTES COM TERMINOLOGIA PADRONIZADA PARA MELHOR APROVEITAMENTO DAS ANÁLISES INDEPENDENTES. REALIZAR MONITORAMENTO COMPATÍVEL COM O PROBLEMA.

“NATURE HAS NO CONTRACT WITH MATHEMATICS – SHE HAS EVEN LESS OF AN OBLIGATION TO LABORATORY TEST PROCEDURES AND RESULTS” -

KARL TERZAGHI