

Gestão de Rejeitos na Mineração: Evolução das Boas Práticas no Brasil e no Mundo

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

IBRAM 40 ANOS - ABRIL/2017

**Paulo Cella
Diretor**

- **TÓPICOS**

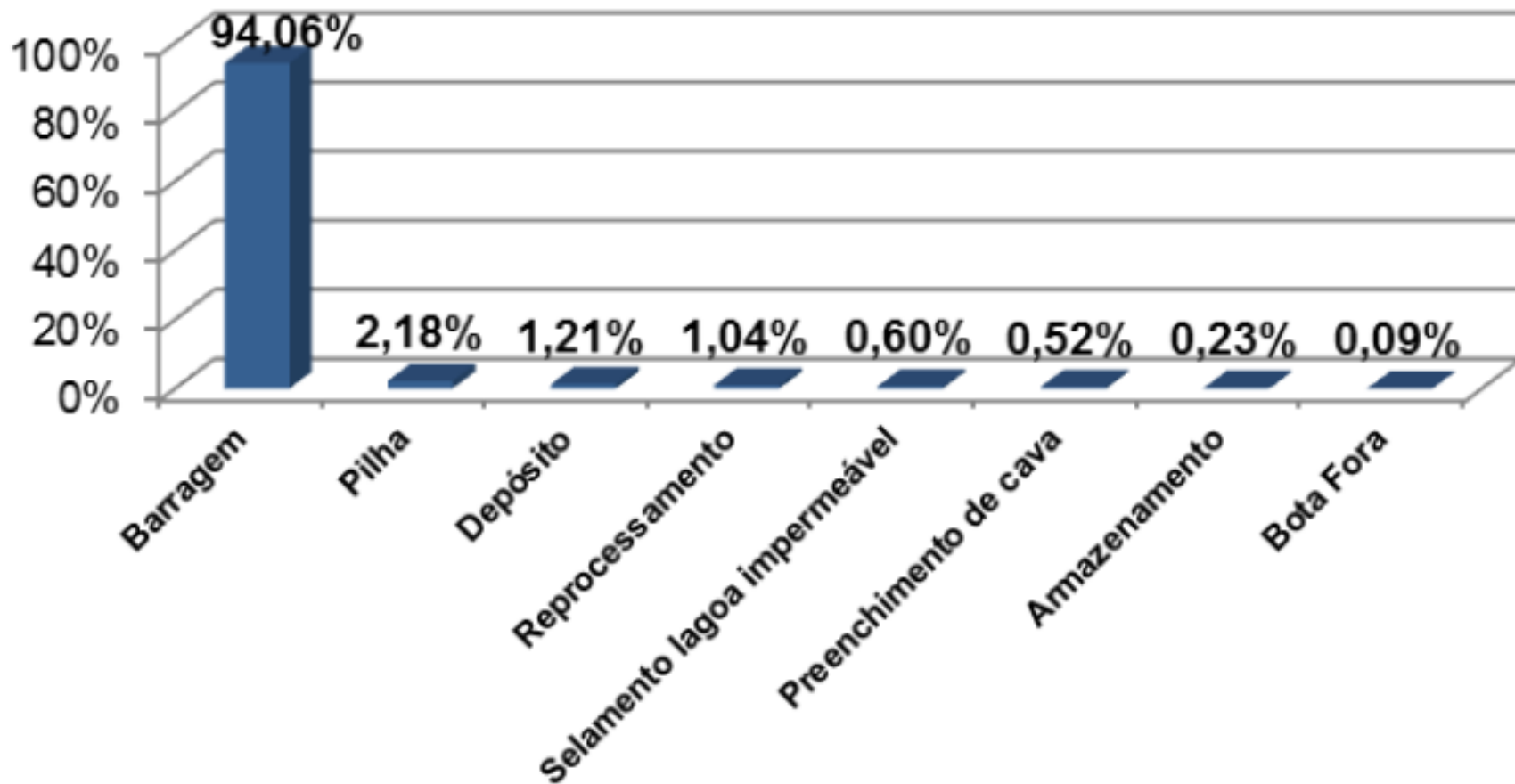
- ✓ *Características Típicas que envolvem a disposição de rejeitos no Brasil*
- ✓ *Tendências para disposição de rejeitos*
- ✓ *Sistema de Gestão de Barragens de Rejeitos: requisitos para aprimoramento*

PRODUÇÃO DE REJEITOS POR BEM MINERAL

Substância	Quantidade total de resíduos (1.000 t)		Contribuição % média de cada minério no total de resíduos	
	1996-2005	2010-2030	1996-2005	2010-2030
Ferro	765.977	4.721.301	35,08	↑ 41,38
Ouro	295.295	1.111.320	13,82	9,74 ↓
Titânio	276.224	1.018.668	12,55	8,93
Fosfato/Rocha Fosfática	244.456	1.128.198	11,33	9,89
Estanho	149.369	357.952	6,79	3,14
Zircônio	116.236	490.183	5,39	4,30
Calcário	89.398	341.045	4,29	2,99
Alumínio (Bauxita)	69.783	493.925	3,16	4,33
Cobre	53.498	819.636	2,25	↑ 7,18
Nióbio	35.690	119.372	1,53	1,05
Níquel	35.076	637.380	1,61	↑ 5,59
Caulim	24.346	90.729	1,09	0,80
Manganês	12.064	36.071	0,54	0,32
Zinco	12.562	44.097	0,57	0,39
Total	2.179.975	11.409.877	100,00	100,00

Fonte: Dados da pesquisa. Elaboração: IPEA/DIRUR.

Destinação dos Rejeitos de Mineração (FEAM, 2013)



Definem condições de contorno dos projetos de rejeitos no Brasil

✓ Clima: equatorial na região norte e dominante úmido no sul, com precipitações, respectivamente, 1,8-3m/ano, em 6 meses, e 1,5-2m/ano, em 3 meses: sempre intensas e concentradas

→ Manejo de água e controle de extravasão rigoroso

- alumínio : disposição em células de secagem

- ferro : controle do comprimento da praia



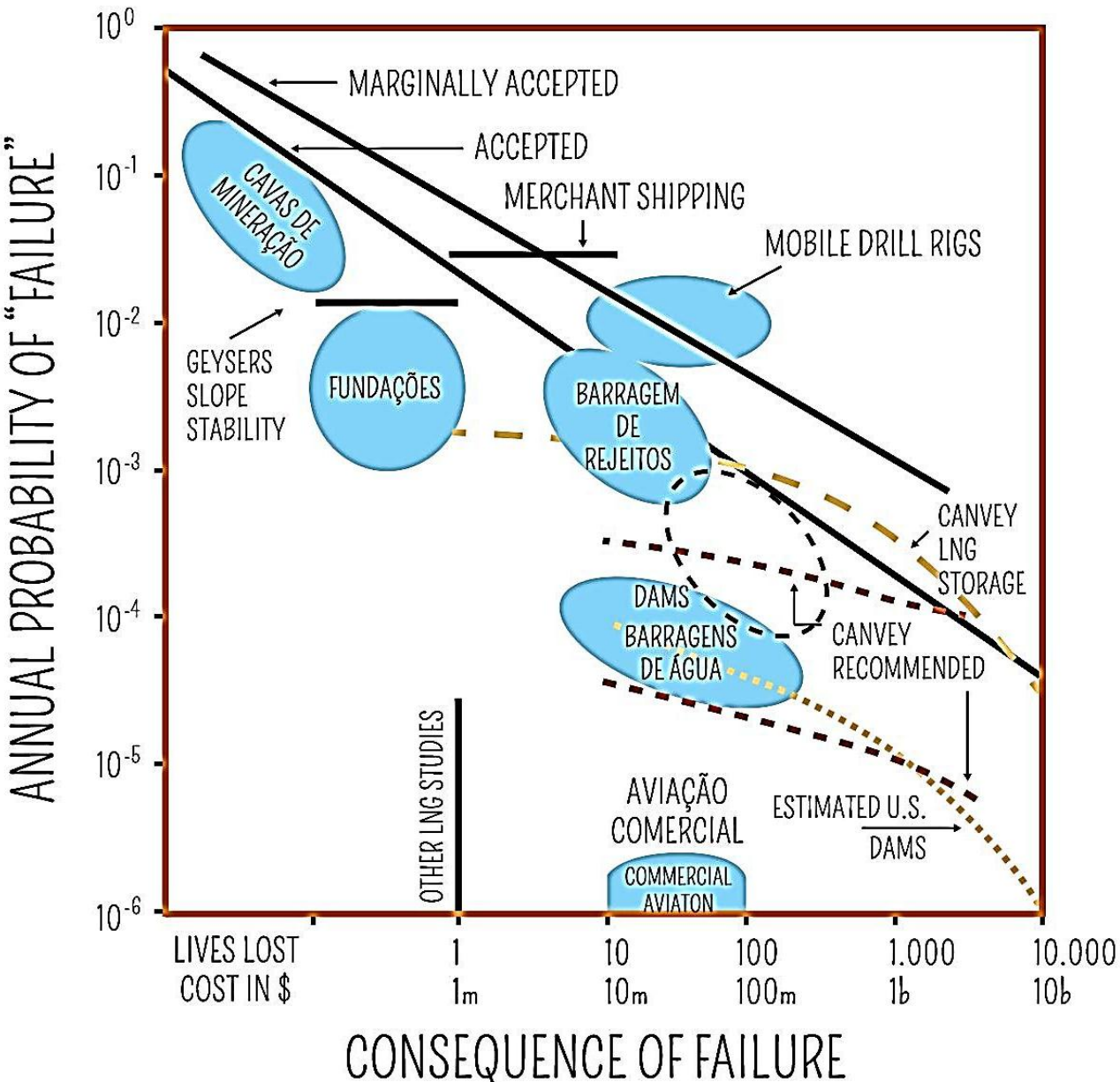
✓ Solos saprolíticos e coluviais espessos: grande variabilidade nos parâmetros: solos contráteis (alta $w_{natural}$ e LL) e colapsíveis naturais ou estágios incipientes de laterização

Definem condições de contorno dos projetos de rejeitos no Brasil

- ✓ Fisiografia: vales profundos e encaixados com taxas anualizadas de 30m, no fundo do vale da barragem de partida
 - Rejeito subadensado pode prejudicar sistema de drenagem da barragem devido a recalques diferenciais

- ✓ Sismicidade intra-placa:
 - Correlação rara do abalo sísmico com a fonte
 - Atenuação na crosta distensiva: Magnitude x PGA mais pronunciada que nas zonas tectônicas
 - USSD (ICOLD), 2014: M 6 a 9: ruína somente de barragens com fundação em terreno arenoso ou maciços de areias e siltes insuficientemente compactados e aterros hidráulicos: 1,5%
 - Preocupa menos que a liquefação estática

RISCOS DIVERSOS DE ENGENHARIA



Barragens: causas principais

- **Liquefação estática (fundação/praias).**
- **Liquefação dinâmica caiu 14% de antes de 2000 p/ nenhum caso após.**
- **Chuvas intensas: erosões no extravasor e no pé da estrutura, overtopping**
- **Problemas construtivos, operacionais, manutenção**
- **Infiltrações na barragem ou falhas na drenagem**

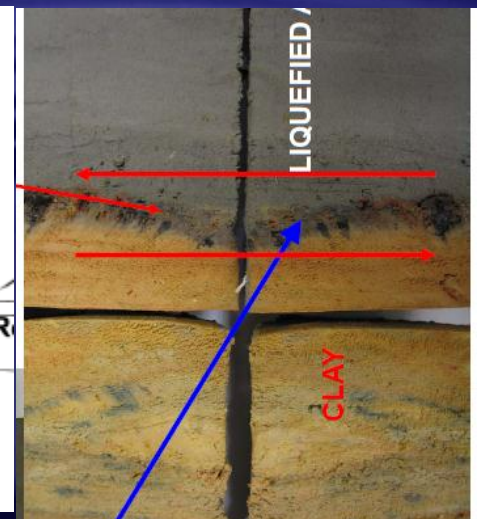
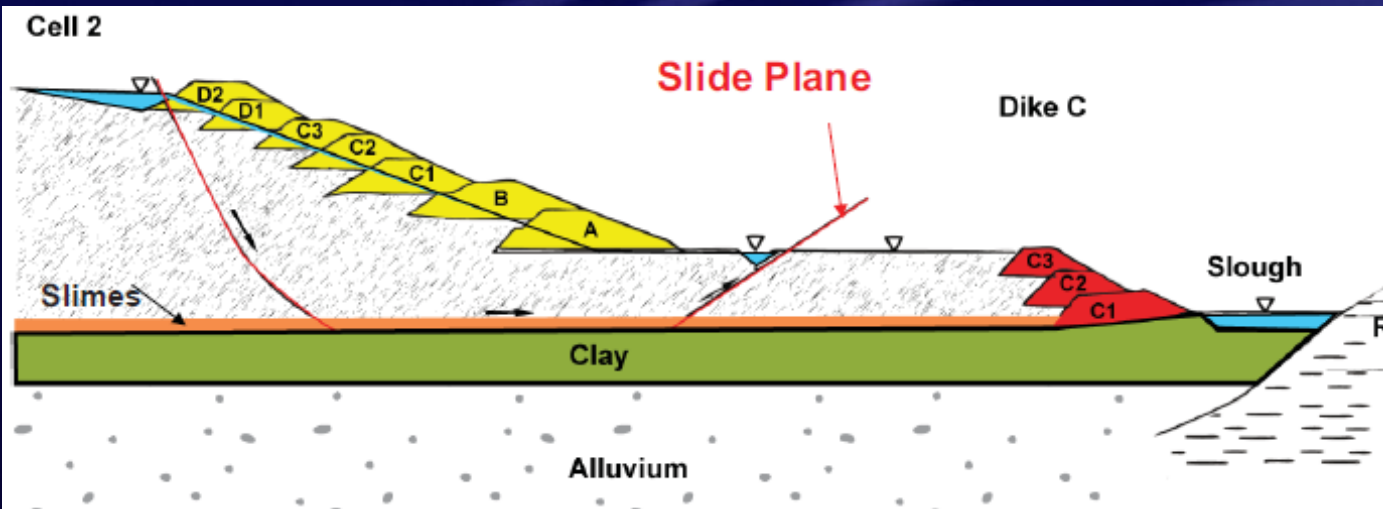
GATILHOS → *Mecanismos de ruína mais frequentes*

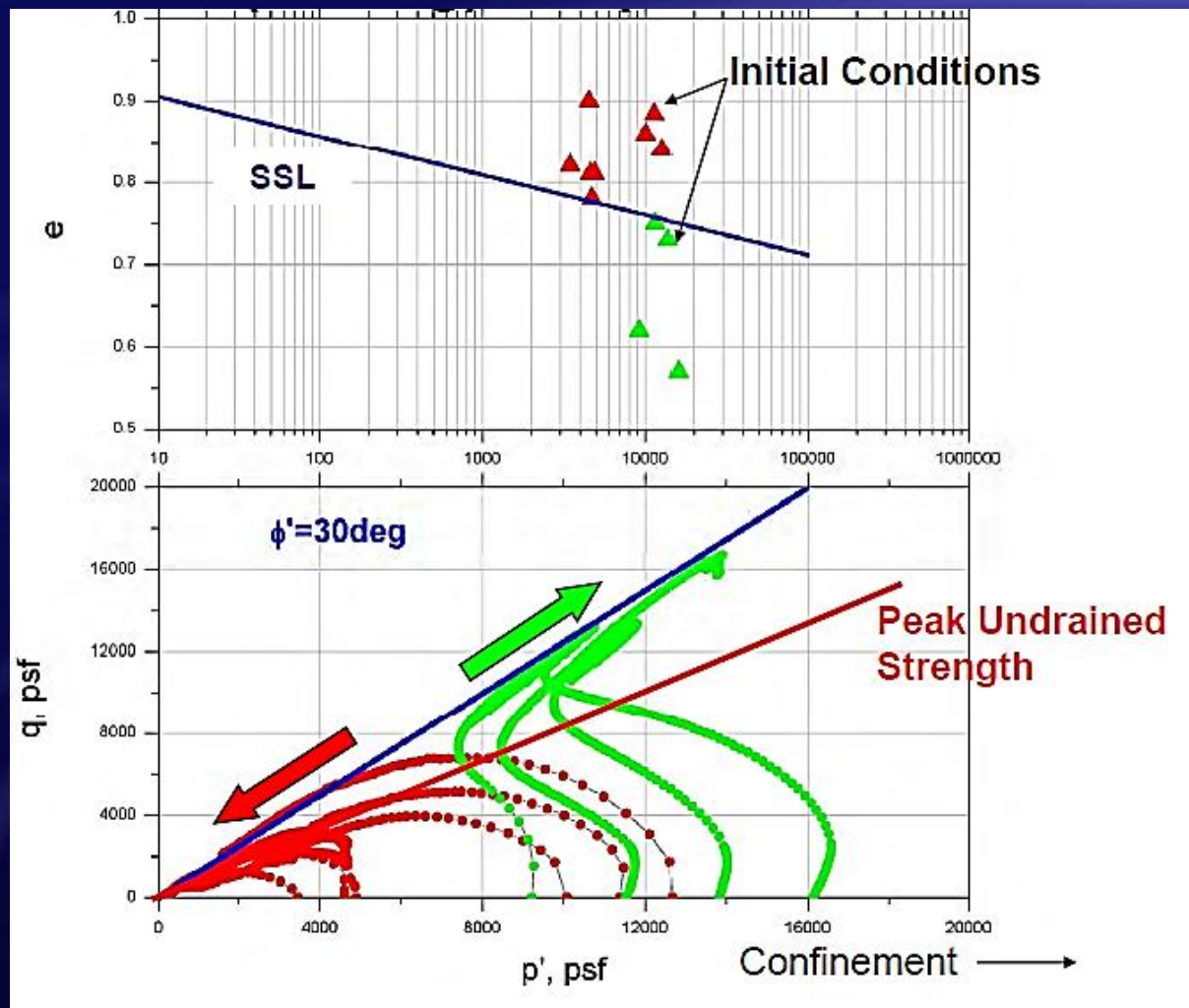
- ✓ *Aumento da freática e das poropressões (falha da drenagem e segregação deficiente, percolação concentrada na estrutura)*
- ✓ *Taxa de deposição rápida*
- ✓ *Tensões excessivas na cunha adjacente ao talude jusante nas vizinhanças da linha de colapso (Sladen, 1985)*
- ✓ *Erosão do pé da barragem: extravasor, overtopping, offset*
- ✓ *Deformação localizada da fundação com propagação não-drenada da superfície e empuxo na barragem por liquefação dos rejeitos* →
- ✓ *Deformação lateral excessiva em camadas de lama*

IMPORTANTE !

- ✓ *Definir um determinado gatilho da liquefação estática não esclarece o valor da resistência liquefeita, que pode ser diferente de nula ou quase nula.*
- ✓ *Na prática, a fronteira entre a resistência não-drenada e a mobilização da resistência residual no estado limite (CS) terá efeito dominante no Fator de Segurança de projeto. ➡*
- ✓ *As normas definem os FS mínimos: em cada projeto o FS deve refletir as consequências associadas com a ruptura. Então é de suma importância determinar a resistência pós-liquefeita, quando existe a possibilidade de qualquer gatilho.*

RUPTURA NÃO-DRENADA NA FUNDAÇÃO

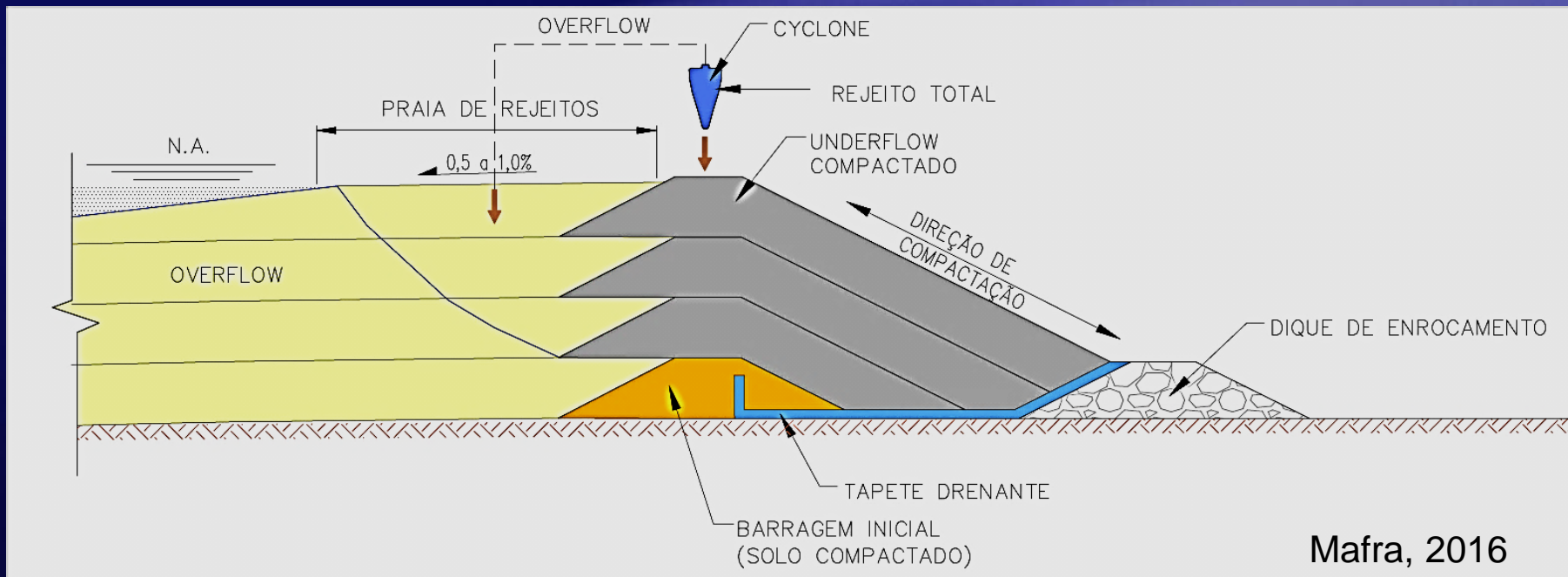




SOLUÇÕES MAIS SEGURAS ENVOLVEM:

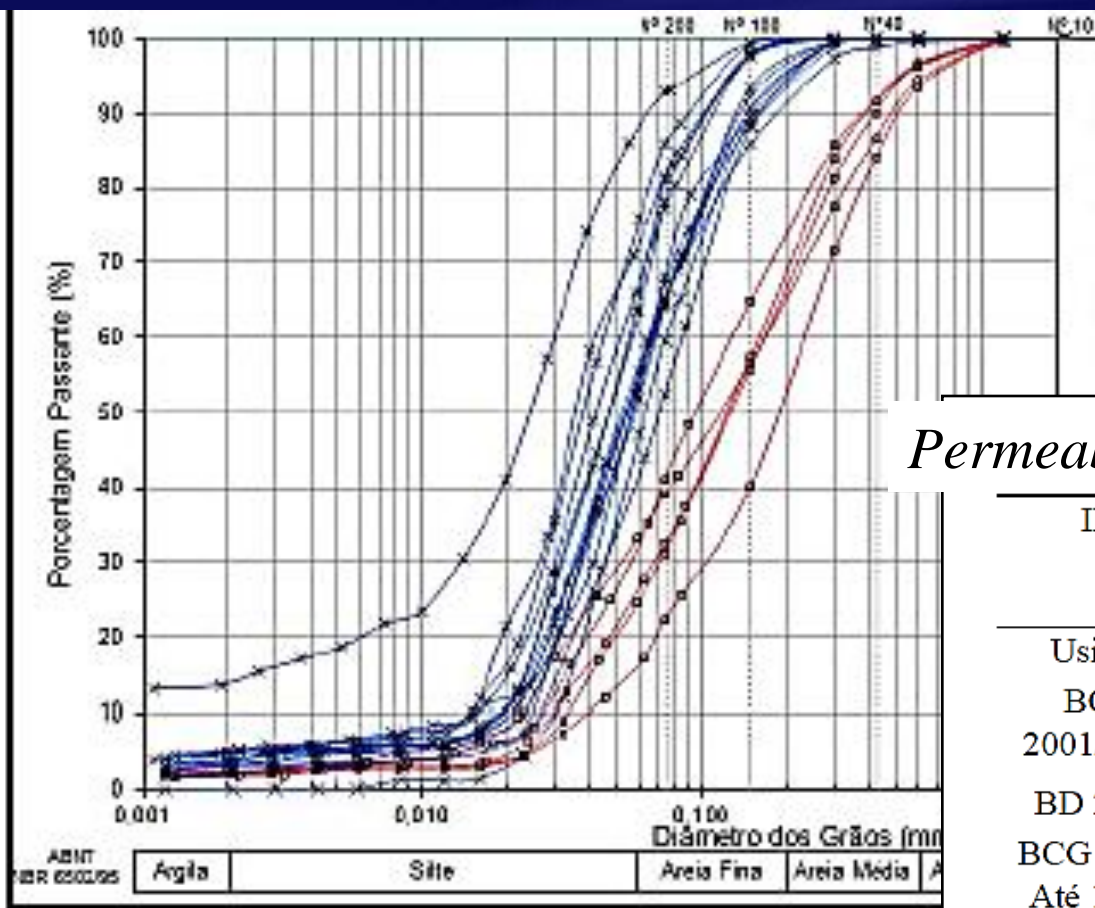
- ✓ *Redução da água da polpa de rejeitos por beneficiamento secundário: Espessador profundo, Ciclonagem. Teor de água é inferior ao da polpa convencional, mas ainda alto com %sólidos: 65-75%. Permite compactação em rampa s/controla de umidade.*
- ✓ *Filtragem ($w = 10-15\%$ em rejeito de ferro a $25-27\%$ em rejeitos muito finos $< \#400$), neste caso requer disposição seletiva p/ secagem na praça. Permite compactação*
- ✓ *Rejeitos hidráulicos em cava fechada (lamas: volume baixo)*
- ✓ *Empilhamento drenado: rejeito mais grosseiro ou delgadas em taxa controlada com secagem*

*Seção típica de barragem com rejeito ciclonado a jusante:
Ainda poucas, no Brasil: Campo Grande, Doutor (Vale), Yamana.*



BARRAGEM COM REJEITO CICLONADO E SEGREGAÇÃO DE REJEITO FLOTADO

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 x 10 ⁻⁴
BCG 2001/2011	36,0	0,036	71	1,57 x 10 ⁻³
BD 2011	39,0	0,035	70	7,18 x 10 ⁻⁴
BCG 2013 Até 100m	32,0	0,032	74	1,03 x 10 ⁻³
BCG 2013 >100m	69,0	0,020	40	4,53 x 10 ⁻⁴

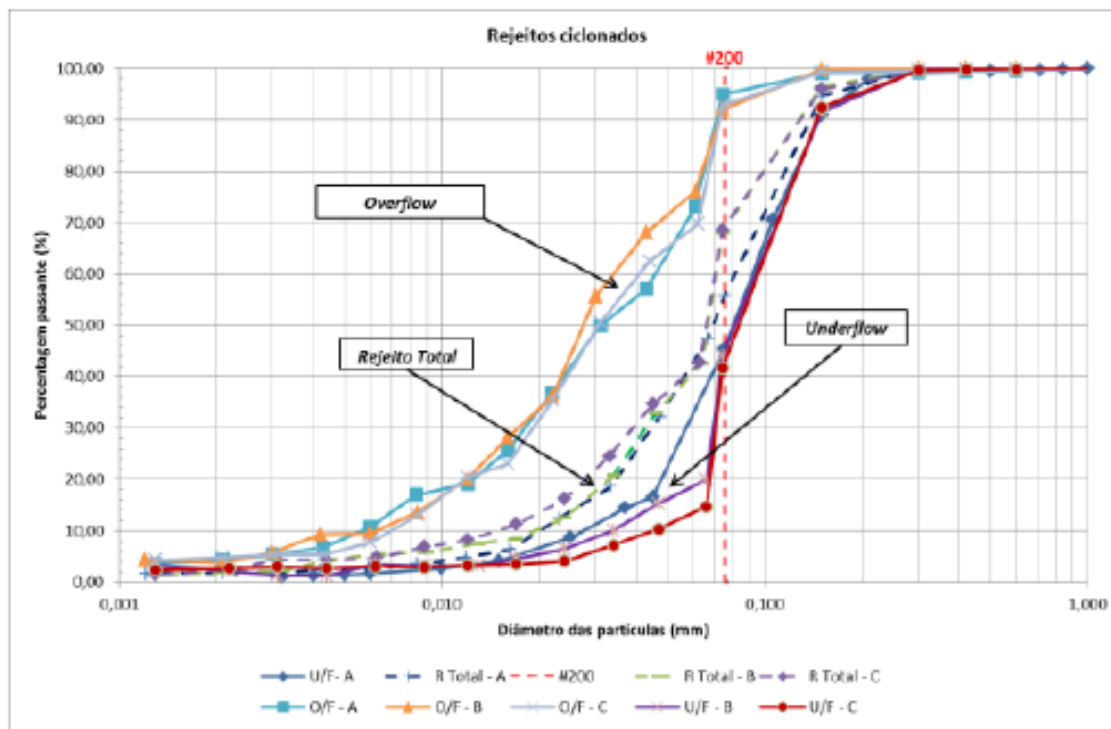
Testes de Ciclonagem: resultados preliminares



CLIENTE SAMARCO - CONCENTRADOR 2 - GERAL
APLICAÇÃO REJEITO ARENOSO
 MAXIMIZAR RECUPERAÇÃO PARA UF
MODELO E QUANT. DE CICLONES KREBS 1 x Bateria
ORIFÍCIOS: INLET VORTEX F
 8.4 pol² 2.50
PESO ESPECÍFICO: SÓLIDOS 2.85 1

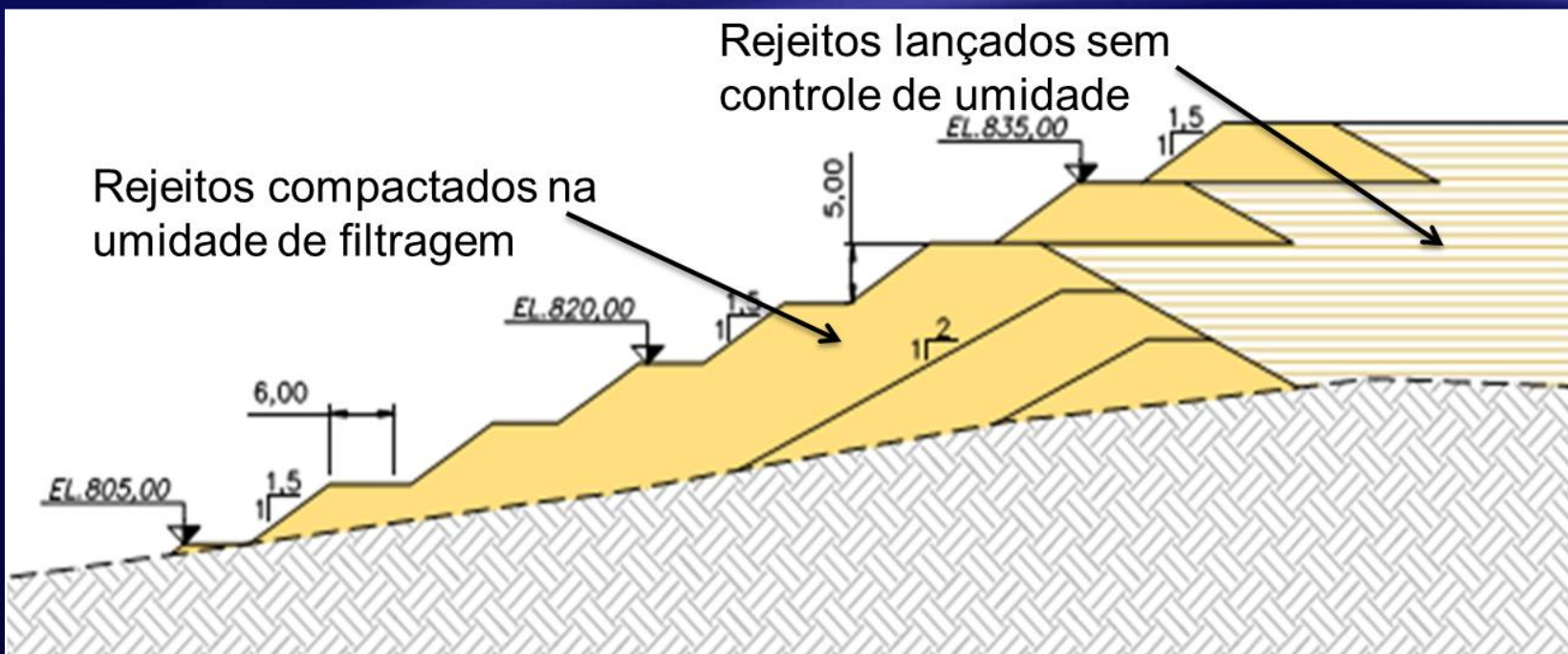
ALIMENTAÇÃO

VAZÃO DE SÓLIDOS (t/h)	764.0	764.0	100.0
VAZÃO DE LÍQUIDO (t/h)	861.5	861.5	100.0
VAZÃO DE POLPA (t/h)	1625.5	957.9	667.7
% SÓLIDOS (peso)	47.0	27.5	75.0
DENSIDADE - POLPA (g/cm ³)	1.44	1.22	1.95
% SÓLIDOS (volume)	23.1	11.7	51.3
VAZÃO DE POLPA (USGPM)	4975	3466	1509
VAZÃO DE POLPA (m ³ /h)	1130	787	343
Vazão de polpa por hc (m ³ /h)	67		
BY-PASS (H ₂ O)	19.4		
		% CARGA CIRCULANTE	



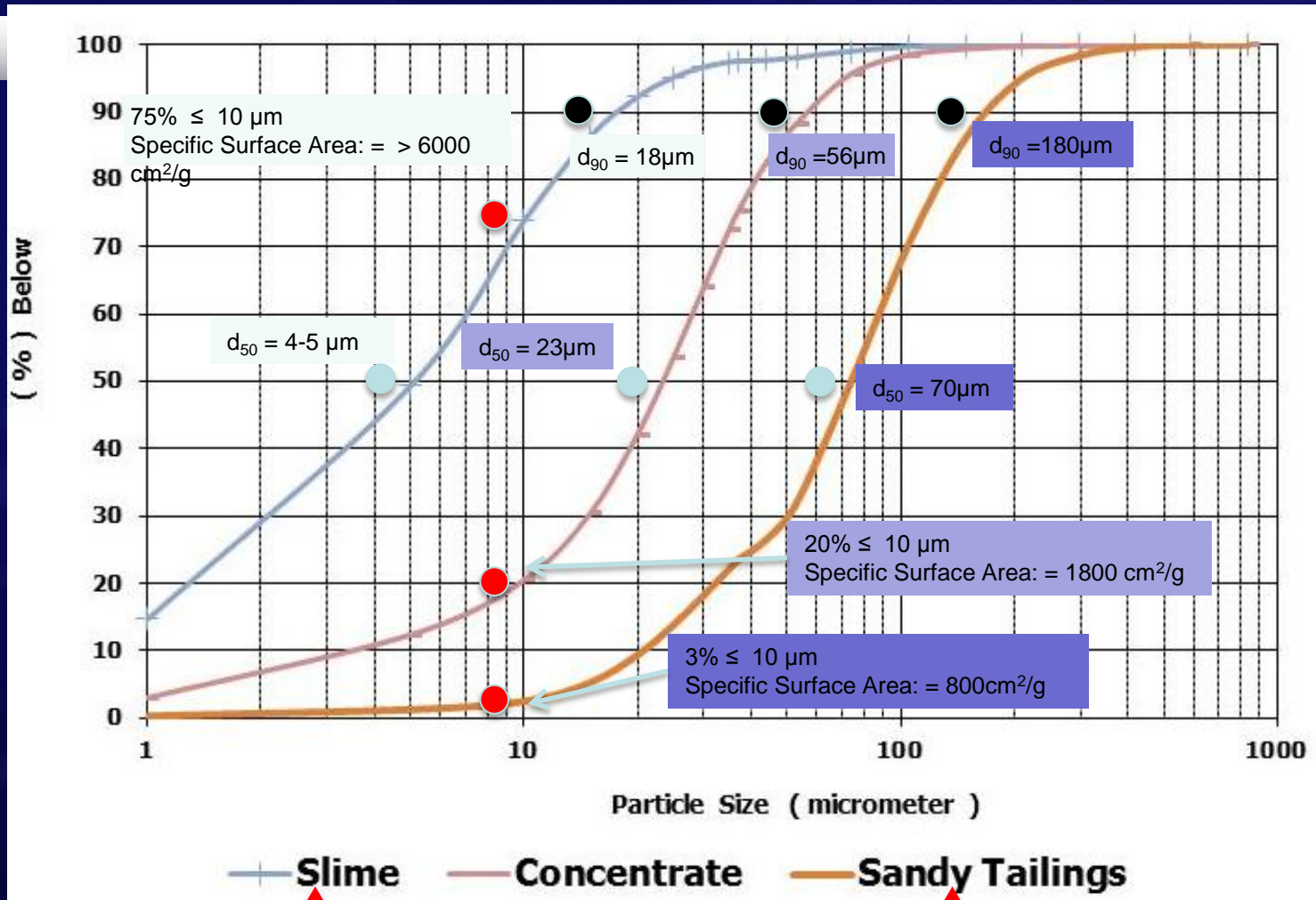
75% sólidos
D10: 0,025 – 0,05 mm
%Finos: ainda alta no teste

Rejeitos < #400, filtrados a $w = 27\%$, disposição seletiva compactado na época seca e lançado em área selecionada para secagem no regime de chuvas – Opção A



REJEITOS PARA FILTRAGEM E ATERRO

EXPERIMENTAL- SAMARCO



Filter Press Tests at Germano

Productivity = 60 dry kg/h/m² for 55 % solids (after double thickening) and 20% H₂O

Proposal: Vacuum Disc Filters to be operated at Germano

Productivity = 2,000 dry kg/h/m² for 50-55% solids (after thickening) and 13% H₂O

Vacuum Disc Filters being operated at Ponta Ubu

Productivity = 640 dry kg/h/m² for 70-72% solids (after thickening) and 10.0 – 10.5 H₂O

Espalhamento do material na 1ª camada de 0,60m

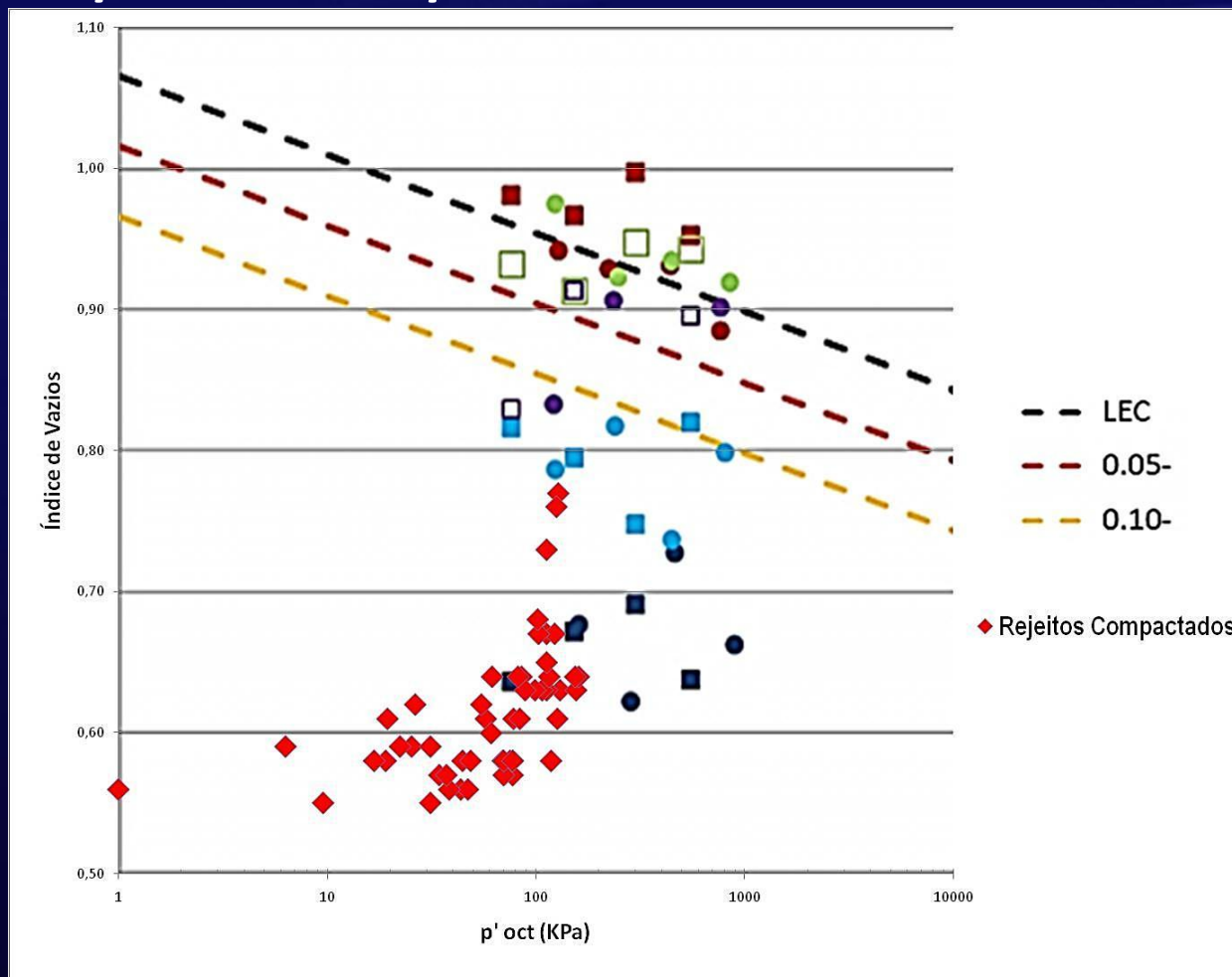


Aterro controlado



ATERRO PROVISÓRIO: $H = 12m$ BARRAGEM N. SANTARÉM

- *Aterro de rejeito arenoso de flotação, emprestado de um depósito e compactado com rolo liso vibratório, camada 0,40m*



Parâmetro de estado

e $x \log P$

O índice de vazios é o inicial na camada de compactação

ATERRO EXPERIMENTAL LAMA VERMELHA FILTRADA

3 Pistas: camadas 0,30 – 0,40 – 0,50m

Umidade de filtragem: + 2% ; 4% ; 6% acima

4 – 6 – 8 – 10 passadas do trator D4 → D6



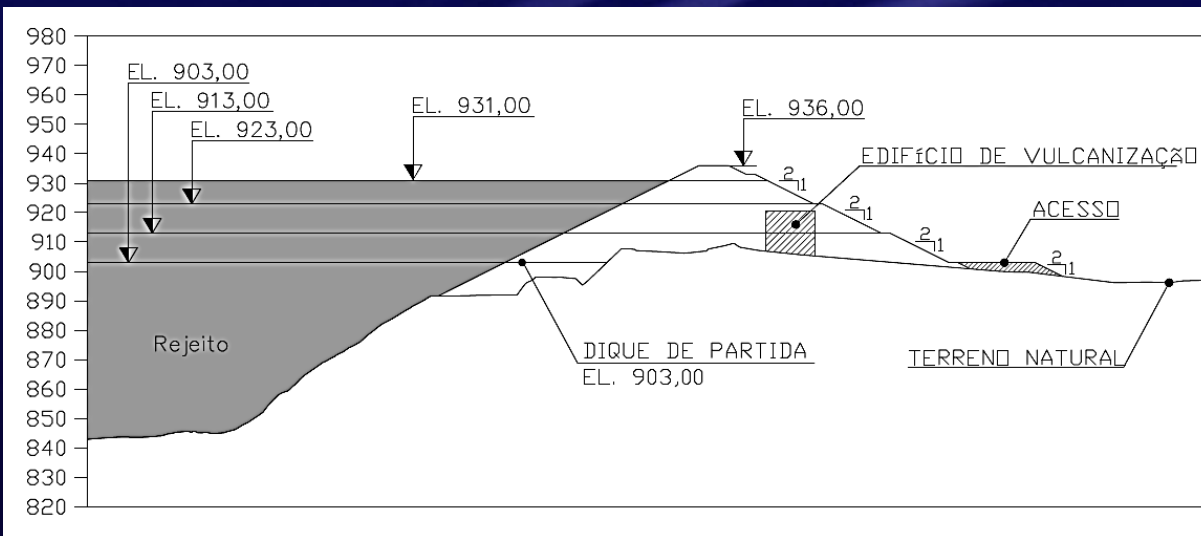
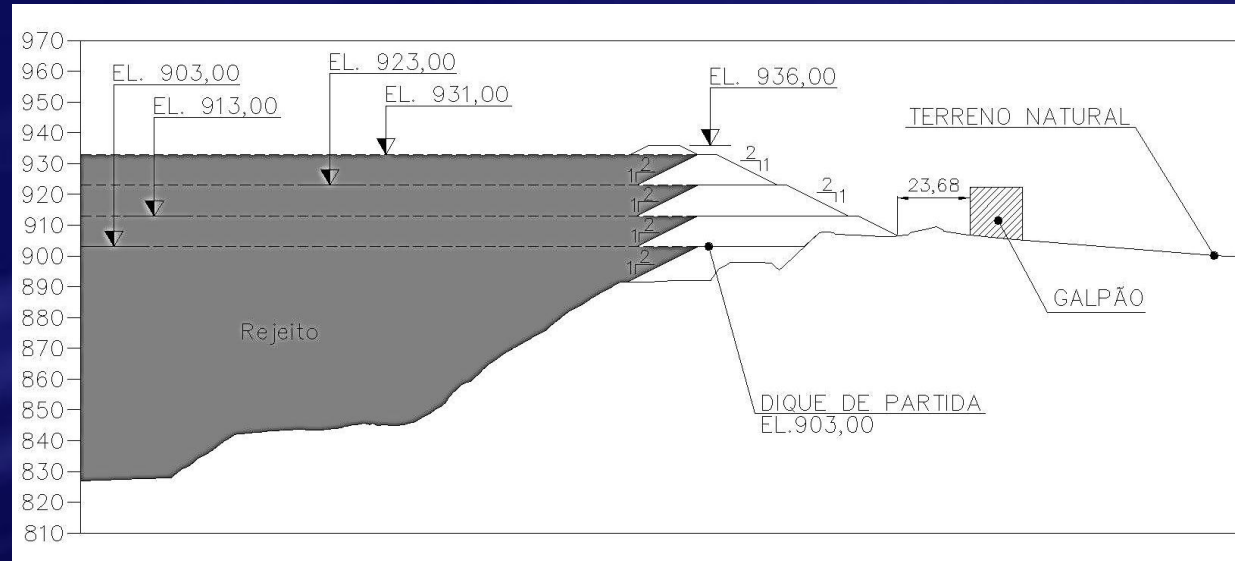
GC: 85 – 100% PN

Até 4% acima da w filtragem

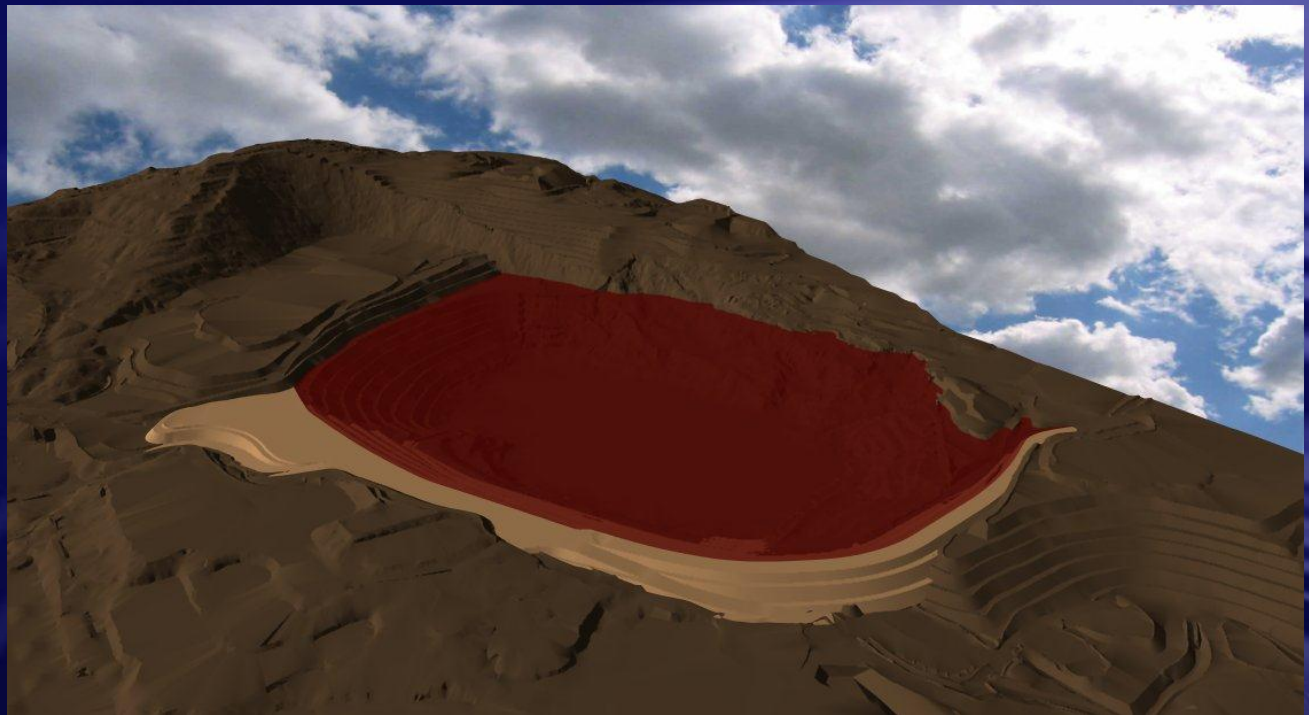
Ensaio triaxiais $-6 < w < +4$: típica $c' = 10$ kPa e $\phi' = 36$

Manoela Neves, 2017

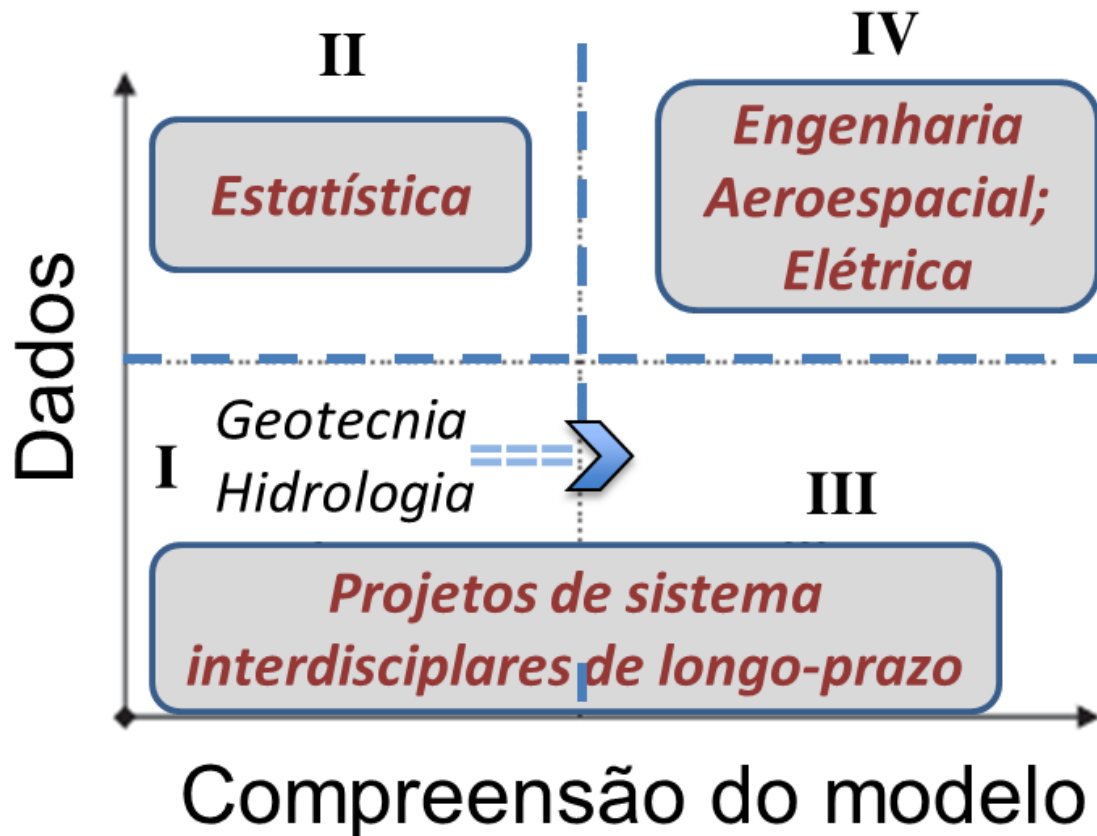
LINHA DE CENTRO



PARA JUSANTE



DOMÍNIO DO PROBLEMA A GERENCIAR




CICLOS DO SISTEMA DE GESTÃO



REQUISITOS PARA UMA BOA GESTÃO DE SISTEMAS DE REJEITOS

- *Riscos devem ser mitigados desde a fase conceitual do projeto até a engenharia detalhada e durante a construção*
- *A concepção da ESTRUTURA DE CONTENÇÃO deve ser feita em total sintonia com o plano de geração de rejeitos e definida em função do impacto que uma MUDANÇA traria à segurança do projeto.*
- *Implantação de um SISTEMA DE INFORMAÇÕES (dados e fatos) abrangendo o meio físico, a construção e a operação, essencial para as avaliações internas e independentes, FMEA. 'Imune' a mudanças nas equipes ao longo do tempo.*

REQUISITOS PARA UMA BOA GESTÃO DE SISTEMAS DE REJEITOS

- *O sistema FMEA deve capturar adequadamente a atribuição de pesos a práticas operacionais.*
- *O Monitoramento É CHAVE na gestão dos riscos. O ferramental tecnológico disponível hoje é bastante avançado, mas..... a interpretação deve ser suportada por modelos geotécnicos e de percolação confiáveis.* 
- *Dada às características da maioria dos rejeitos e a dificuldade em obter registros deposicionais confiáveis, se for para dimensionar a estrutura para a resistência pós-liquefeita que pode ser praticamente nula, será mais racional e econômico adotar métodos mais seguros de disposição*

“a well intentioned corporation employing apparently well-qualified consultants is not adequate insurance against serious incidents”
(Morgenstern, 1998)

A observação de Terzaghi evidencia atitude de quase reverência a comportamento de meios naturais e sugere que a observação de campo e o aprendizado de casos históricos são peças fundamentais de uma boa gestão de risco

Terzaghi noted, “*nature has no contract with mathematics – she has even less of an obligation to laboratory test procedures and results*”. The authors have encountered too

important conclusion; that is that there have been no unexplained failure events. If one

There are no unknown loading causes, no mysterious soil mechanics, no "substantially different material behaviour" and definitely no



Confiança

+

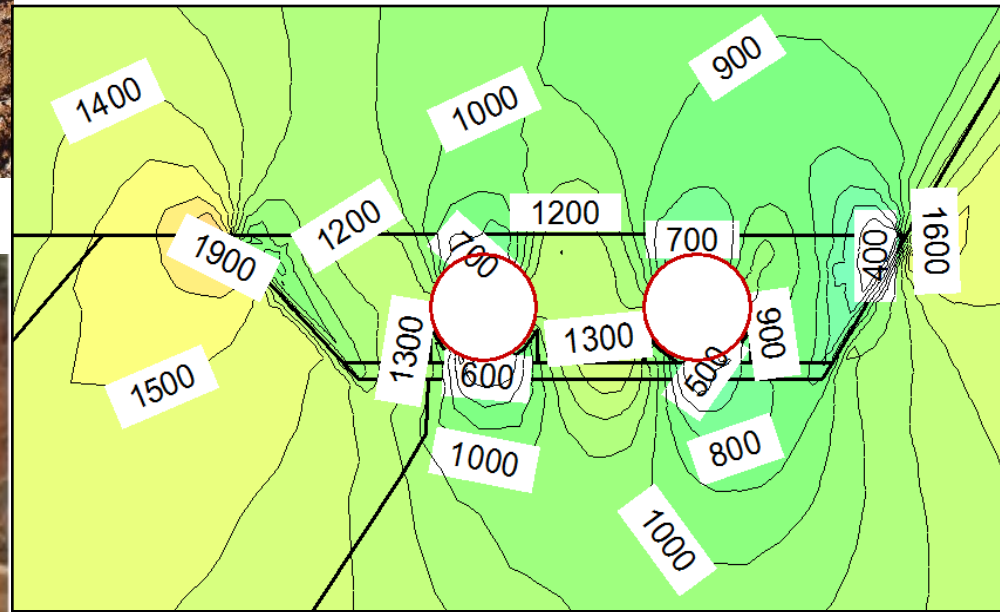
Cautela

QUESTÕES ?

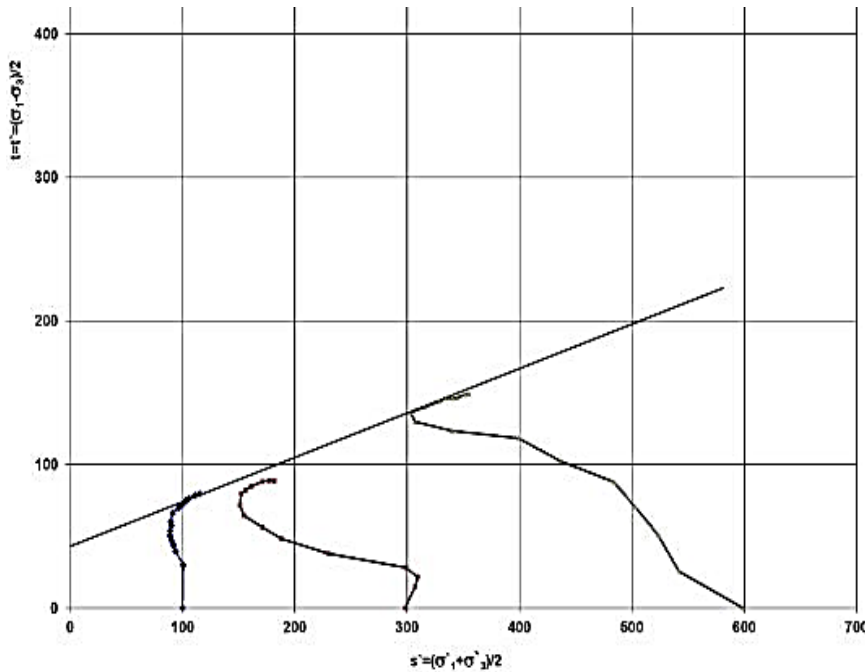
Extravasores de Células de Secagem: rejeito de alumínio



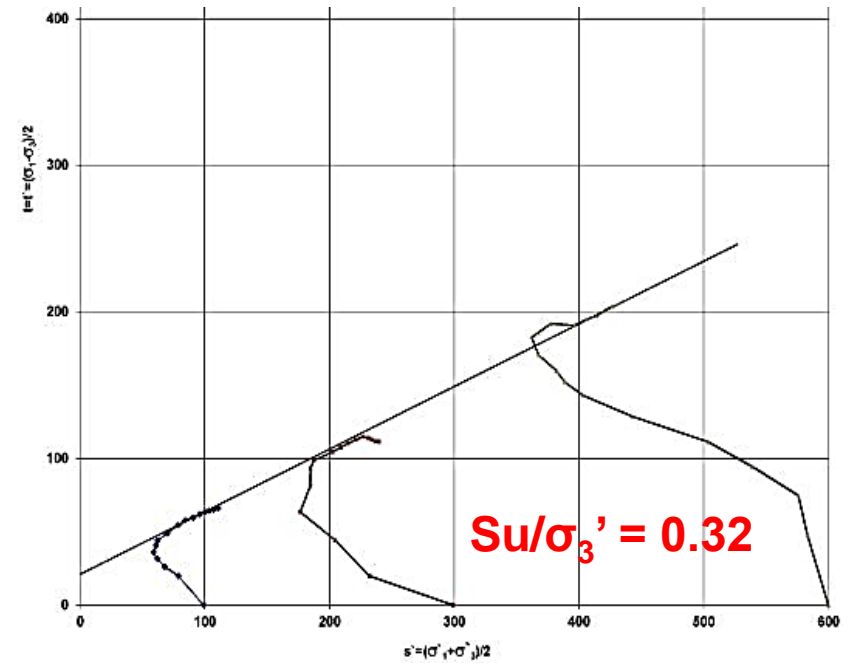
EXTRAVASOR TUBOS FLEXÍVEIS



Ensaio Triaxiais Não Drenados



LL = 66%, PL = 44%, PI =
22%
MH
 $W_n = 42.7\%$



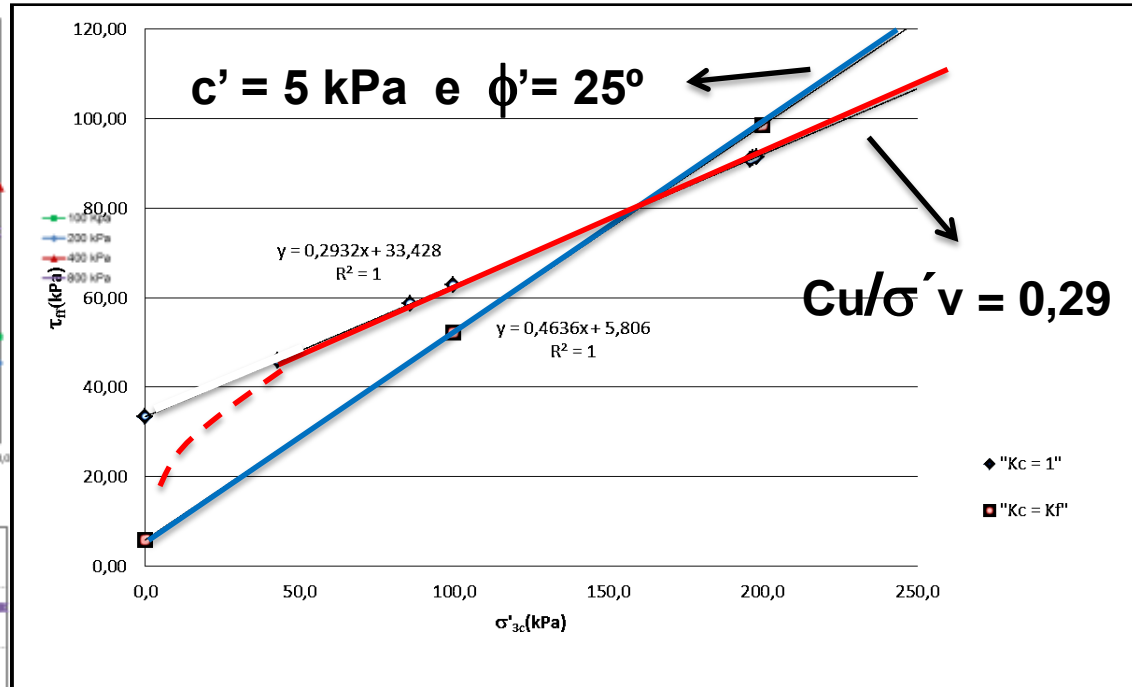
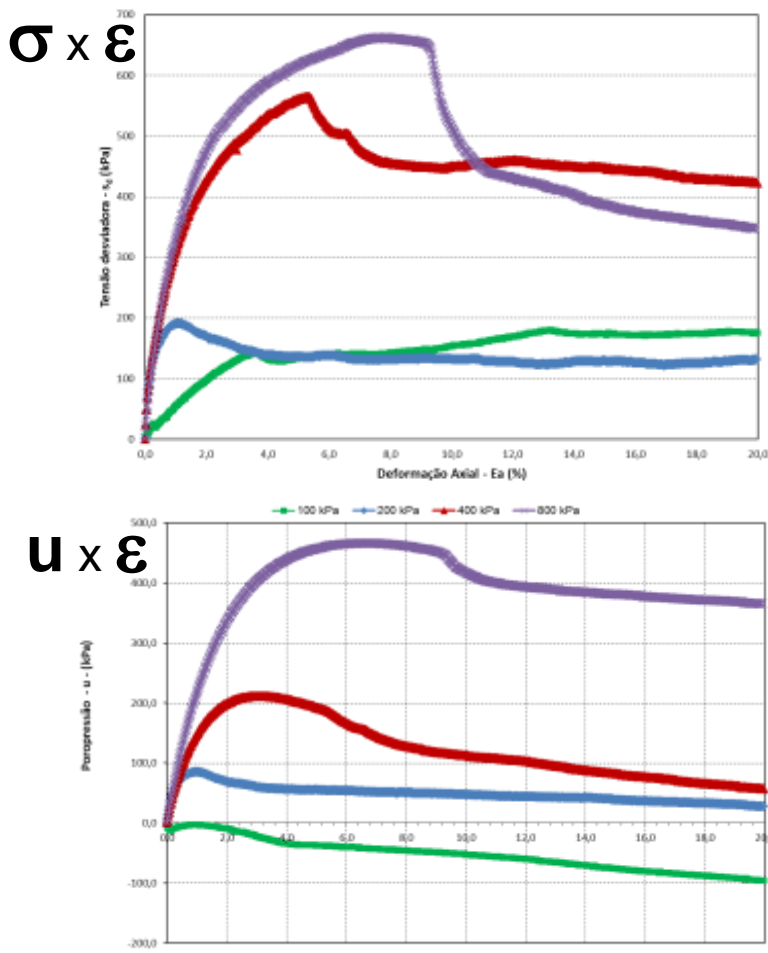
LL = 81%, PL = 47%, PI =
34%
MH
 $W_n = 46.8\%$

Teores de água elevados indicam potencial p/ solo de estrutura colapsível

RESISTENCIA NÃO-DRENADA

$$\sigma_{\text{adens}} \times (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{max}}$$

Solo Saprolítico: frágil e parcialmente contrátil umidade natural > 40% e LL > 50-80%



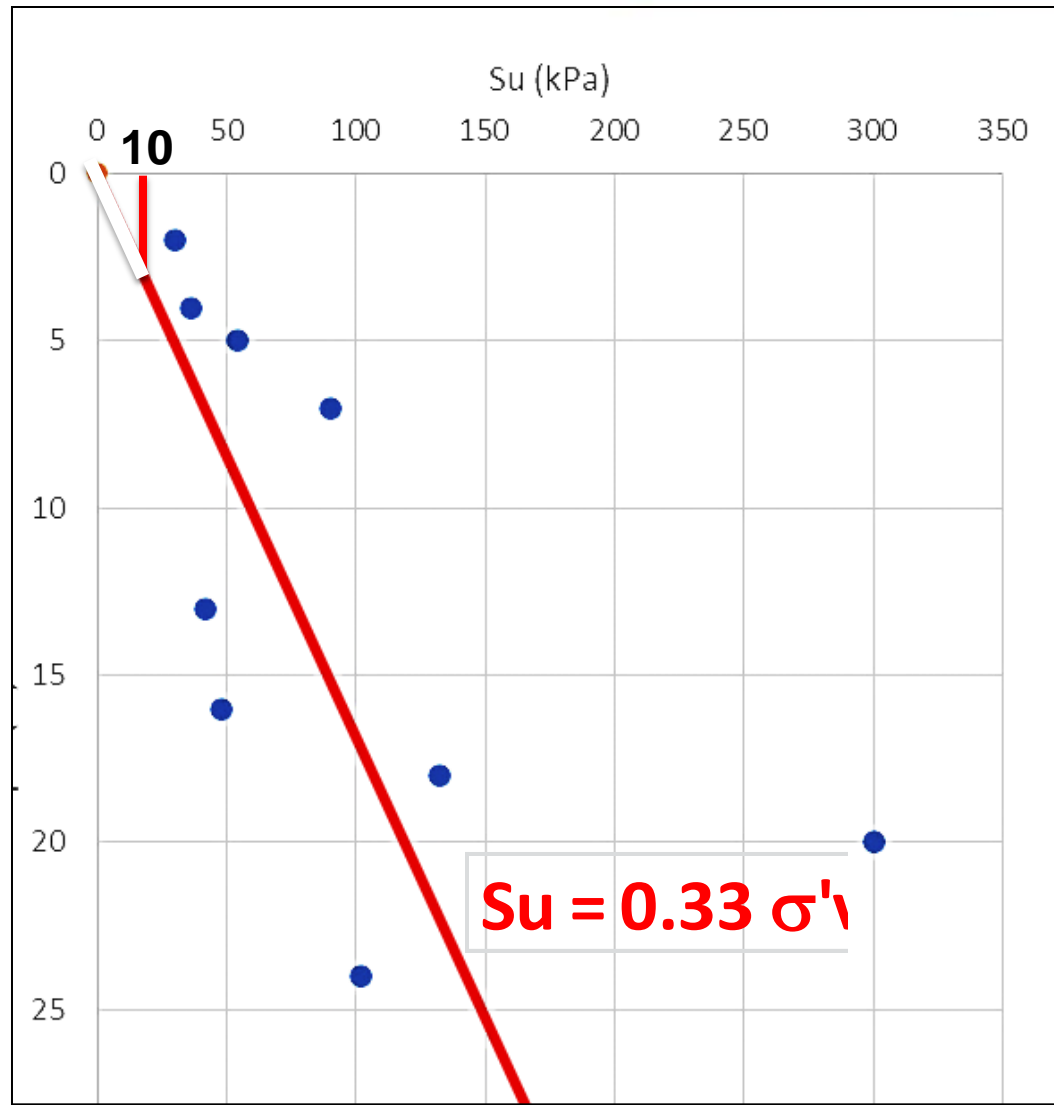
Obtida por:

Cu mínima (ND) $\sim 10 \text{ kPa}$ ($Su \times SPT$)

ou

Retroanálise de rupturas rasas

RAZÃO $S_u/\sigma'_v = f(SPT)$



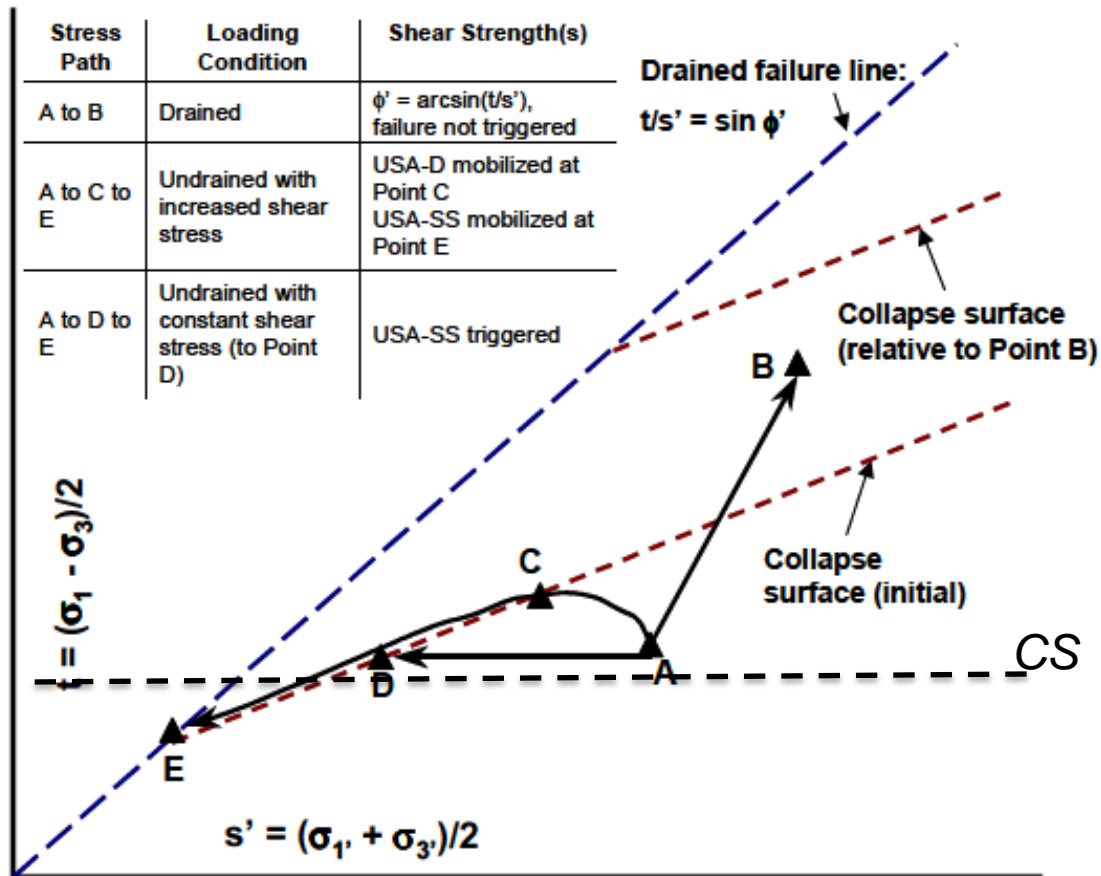
$$S_u \sim 6 N_{SPT}$$



Resistência Efetiva: A - B

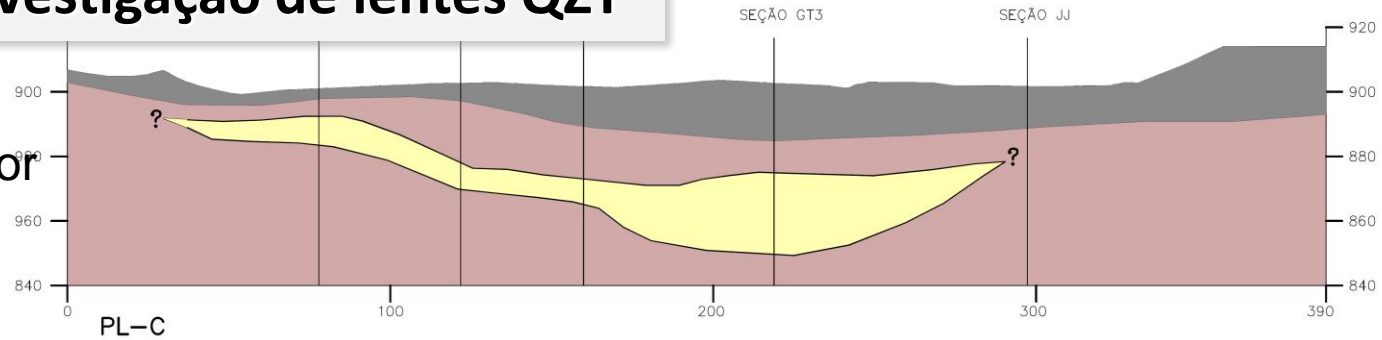
Resistência Não-Drenada: A - C ou A - C - E

Resistência Pós-liquefeita: A - D - E

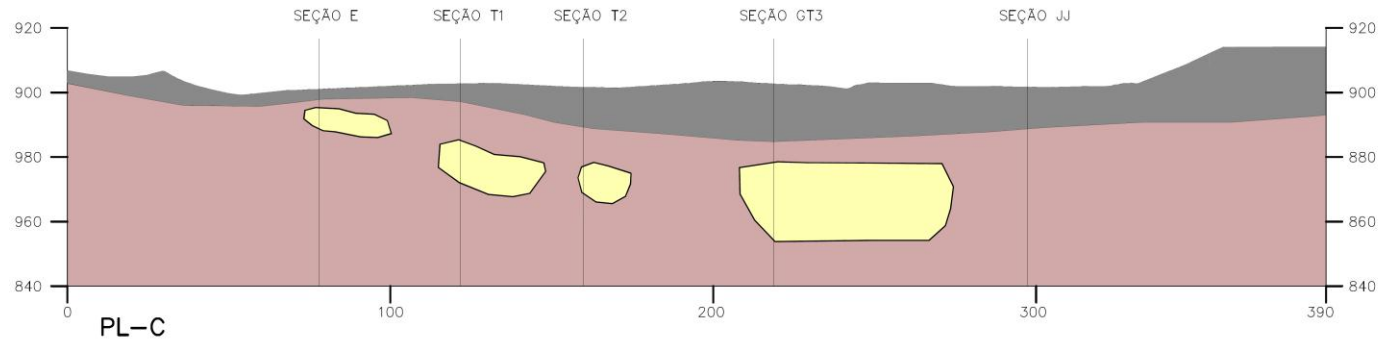


Interpretação dos resultados da geofísica: investigação de lentes QZT

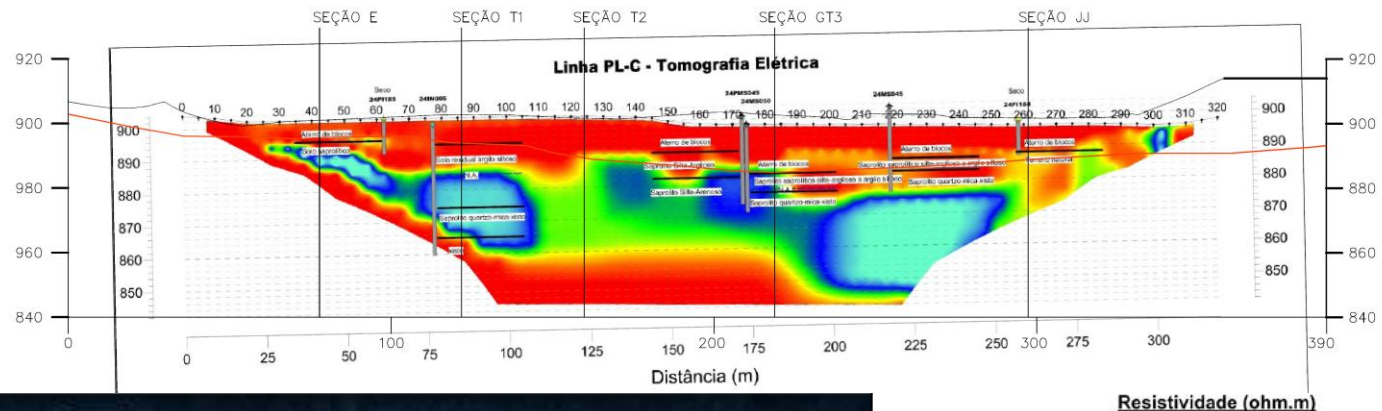
Contorno geral da zona de maior condutividade elétrica



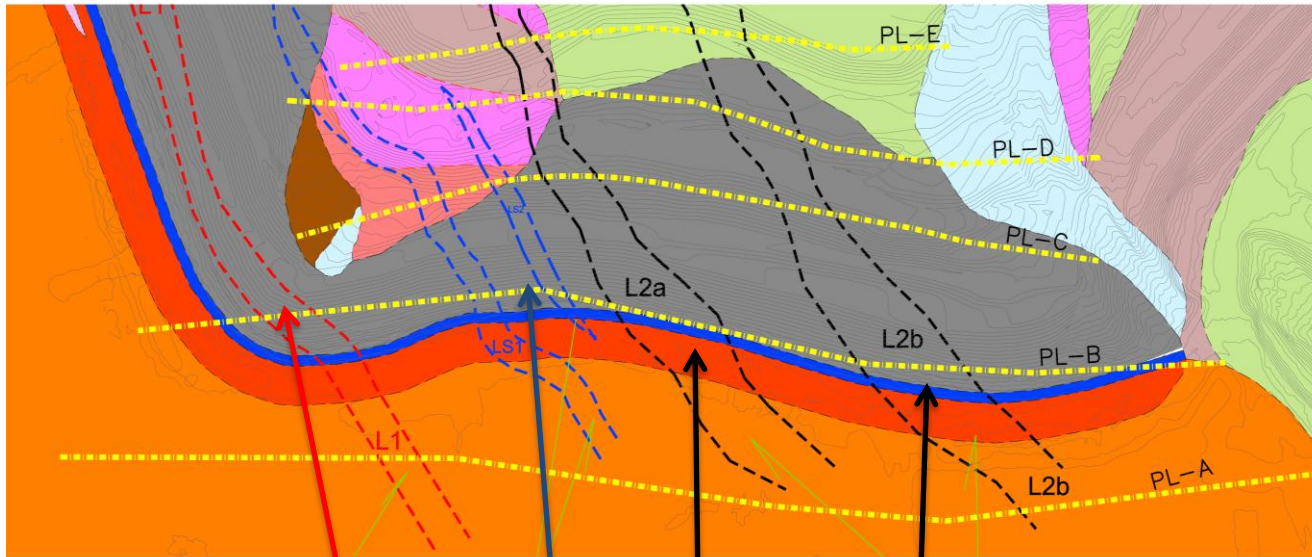
Núcleos com maior condutividade elétrica



Geofísica eletro-resistividade



Interpretação da continuidade das lentes de QZT com base na geofísica



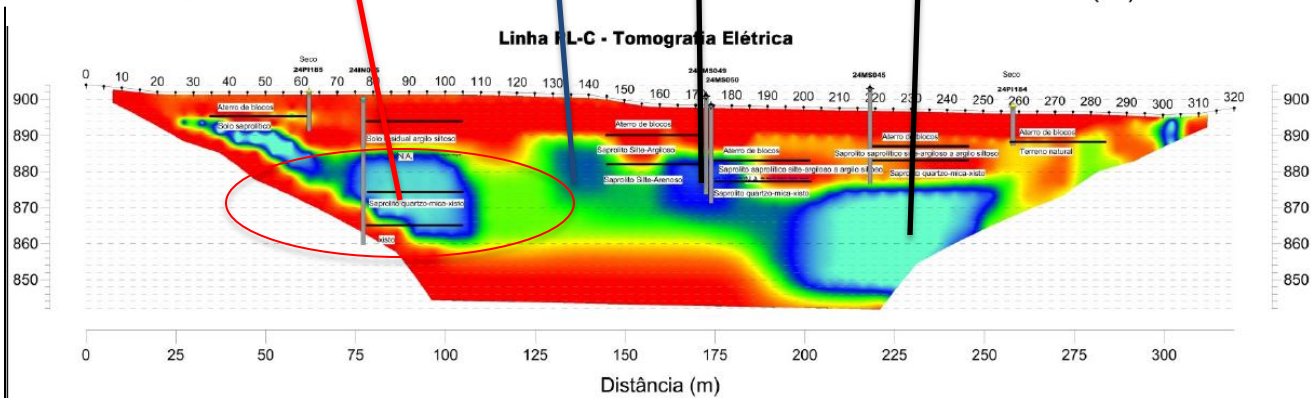
LEGENDA

- REJEITO
- SILTE ARGILOSO
- ATERRO
- SOLO REFORÇADO
- MACIÇO DO DIQUE
- LAMA JUSTANTE - PÓS RUPTURA
- SOLO ARGILOSO ESTEIRADO
- COLÚVIO
- SOLO RESIDUAL DE FILITO/XISTO
- SOLO SAPROLÍTICO DE FILITO/XISTO
- SAPROLITO DE FILITO/XISTO

LENTE PRINCIPAL (L1)

LENTE SECUNDARIAS (LS)

LENTE PRINCIPAL (L2)



Linha PLC



