

Risco e Segurança de Barragens de Rejeitos

Marcus Pacheco

*Professor Titular
Faculdade de Engenharia/UERJ*

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Tópicos abordados

- **Conceitos fundamentais de Análise de Risco**
- **Liquefação Estática e Dinâmica**
- **Efeito de terremotos (ainda que de baixa magnitude). Análise sísmica.**

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



RISCO

$$R = \text{Probabilidade } (p_r) \times \text{Consequência } (N)$$

A “probabilidade” refere-se à ocorrência de um evento adverso.

A “consequência” refere-se às perdas decorrentes do evento adverso (vidas humanas, custos de reparação, indenizações, danos ambientais, etc).

Quando referido a vidas humanas, o risco é denominado “*Risco Social*” (conceito desenvolvido na indústria química).

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Risco Social

- No caso de obras geotécnicas, dependendo do critério, a “probabilidade” refere-se:

i- à frequência F histórica (anual) de ocorrência de eventos ou

ii- à probabilidade de ruptura p da estrutura, estimada por métodos probabilísticos.

- A “consequência” é dada por estimativas da mortalidade esperada N.

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Estimativa de mortalidade (N) em caso de ruptura de uma obra de engenharia

$$N = E_r \times V$$

- E_r = elementos em risco (número total de pessoas expostas ao risco).
- V = vulnerabilidade total ($0 \leq V \leq 1$).
- $V = V_s \times V_t$
- V_s = vulnerabilidade espacial
- V_t = vulnerabilidade temporal.

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Risco ($R = p_r \times N$)

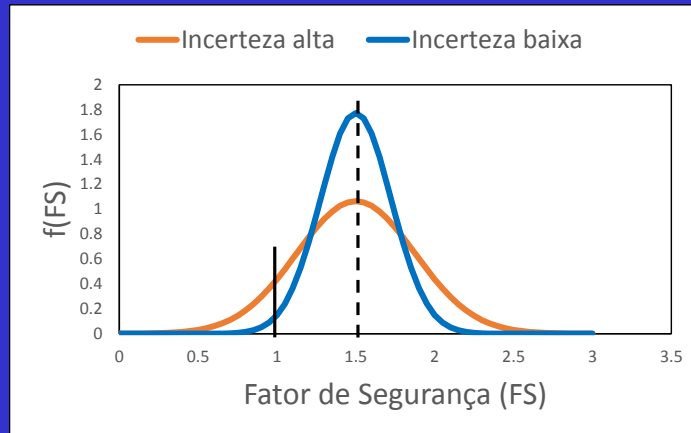
- $R = p_r \times E_r \times V_s \times V_t$
- $p_r \rightarrow$ boa engenharia
- $E_r \times V_s \times V_t \rightarrow$ gerenciamento do risco

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Variação do fator de segurança e da probabilidade de ruptura em função da incerteza

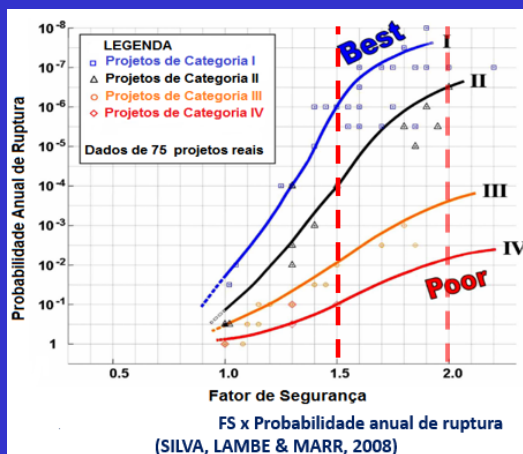


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Variação do fator de segurança e da probabilidade de ruptura em função da qualidade do projeto/obra



“Um fator de segurança alto não necessariamente implica em baixos riscos, porque seus efeitos podem ser negados pela presença de grandes incertezas envolvidas no projeto”
(KULHAWY & PHOON, 1996)

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Maiores rupturas de barragens de rejeitos com mortes, *World International Service on Energy (WISE)*.

	ANO	LOCAL	MORTES
1	1966	Mir Mine, Bulgária	488
2	2019	Brumadinho, Brasil	308
3	2008	Taoshi, China	277
4	1985	Stava, Itália	269
5	1965	El Cobre Dam, Chile	~200
6	1966	Aberfan, Reino Unido	144
7	1972	Buffalo Creek, Estados Unidos	125
8	1970	Mufilira, Zâmbia	89
9	2000	Guangxi, China	28
10	1988	Jinduicheng, China	20
11	2015	Mariana, Brasil	~19
12	1986	Huangmeishan, China	19
13	1994	Merriespruit, África do Sul	17
14	2006	Shangluo, China	17
15	1974	Bakofeng, África do Sul	12
16	1995	Placer, Filipinas	12
17	2010	Kolontár, Hungria	10
18	2018	Chihuahua, México	7
19	1986	Itabirito, Brasil	7
20	1993	Marsa, Peru	6
21	2001	Nova Lima, Brasil	5

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco

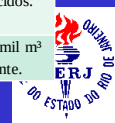


Brasil: 7 rupturas em 33 anos → uma a cada 4,7 anos
Frequência anual média = $7/33$ ($F = 2,1 \times 10^{-1}$)

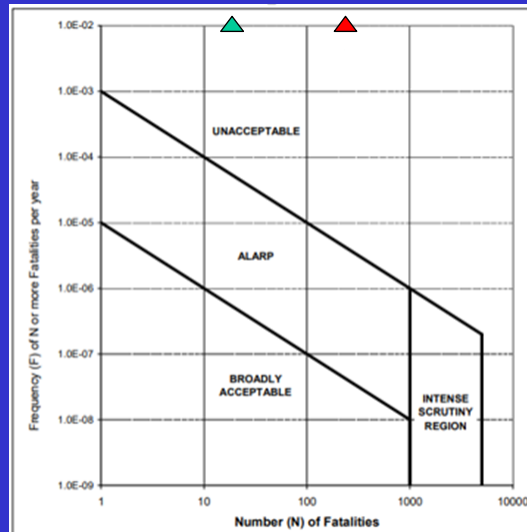
ANO	LOCAL	IMPACTOS
2019	Brumadinho, Minas Gerais	Cerca de 300 fatalidades, entre mortos e desaparecidos. Cerca de 12 milhões de m³ de rejeitos lançados ao meio ambiente.
2015	Mariana, Minas Gerais	19 mortos e 2 desaparecidos. 62 milhões de m³ de rejeitos lançados ao meio ambiente.
2014	Itabirito, Minas Gerais	Dois mortos e um desaparecido.
2007	Miraí, Minas Gerais	4000 moradores das cidades de Miraí e Muriaé desabrigados. Cerca de 2 milhões de m³ lançados ao meio ambiente.
2003	Indústria de papel, Cataguases	Cerca de 900 mil m³ lançados ao meio ambiente.
2001	Rio Verde, Nova Lima, Minas Gerais	Dois mortos e 3 desaparecidos.
1986	Fernandinho, Rio Acima, Minas Gerais	Sete mortos. Cerca de 100 mil m³ lançados ao meio ambiente.

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Aceitabilidade do Risco (Critério do Departamento de Planejamento de Hong Kong)

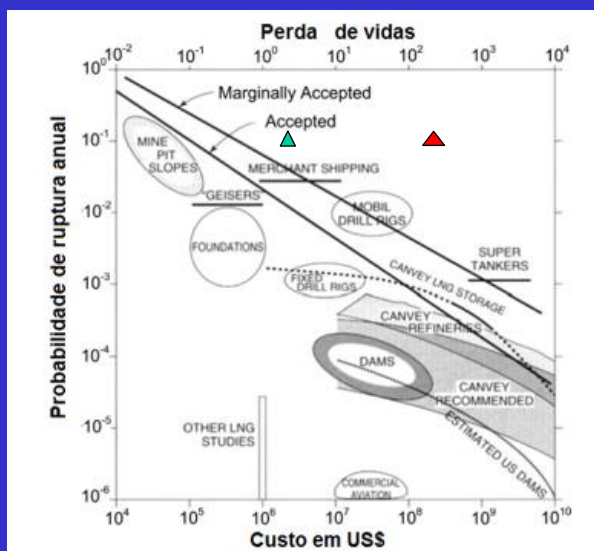


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Critério de Baecher (1982)

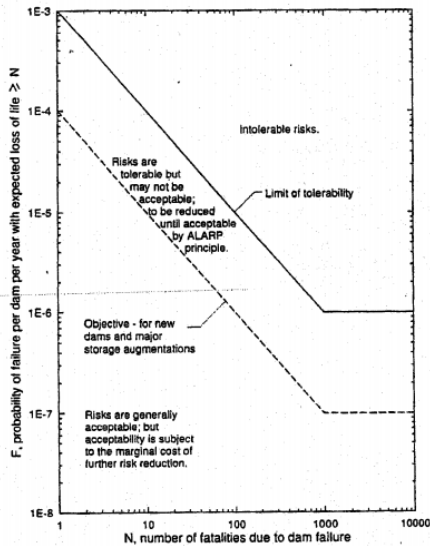


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



(b) ANCOLD Amended Interim Societal Risk Criteria (ANCOLD 1998) (Subject to Further Revision)



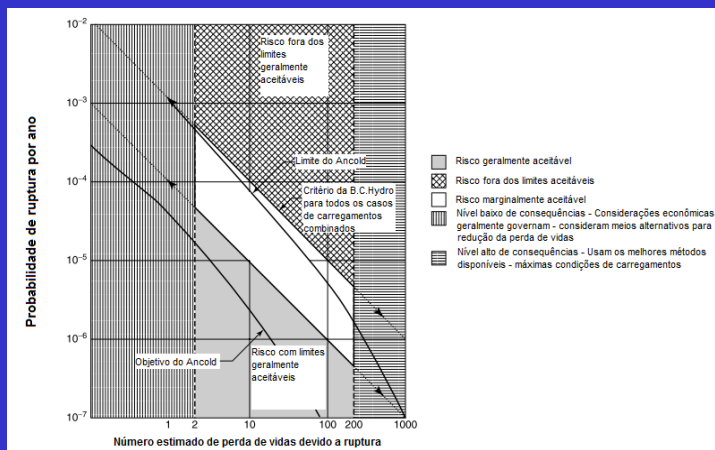
Important note : Where fatalities are expected, as part of a risk-based decision at a specific dam, consultation with the affected public is required as part of the final decision process.



4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco

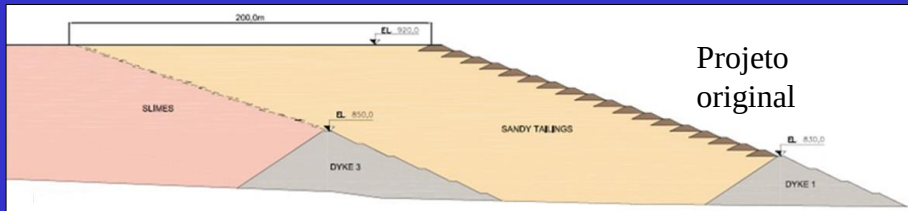
US Bureau of Reclamation



4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco

Barragem do Fundão: sequência de eventos
impeditiva de um gerenciamento de risco confiável
(Morgenstern et al., 2016)

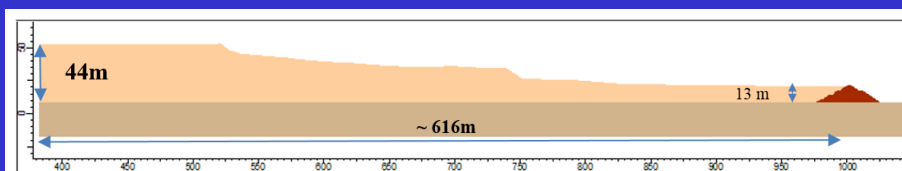


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Estudo de caso – $FS=1,48$
Probabilidade de ruptura $p_r=1,9 \times 10^{-7}$



4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Drenagem interna inoperante do dique de partida (Morgenstern et al., 2016)

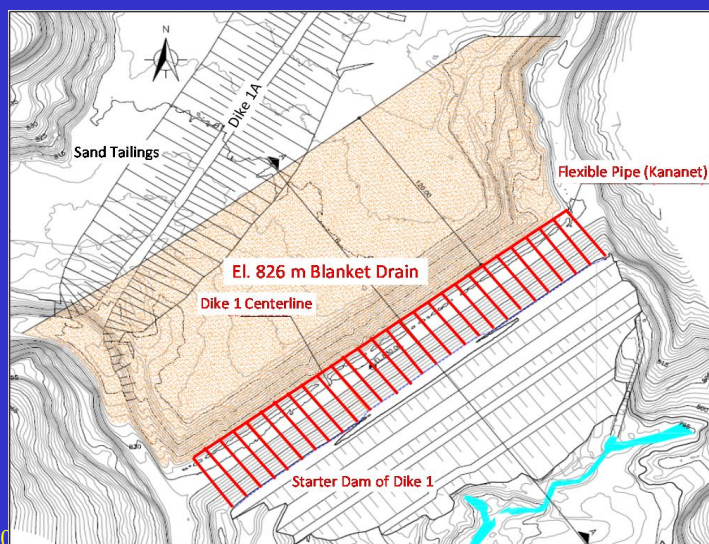


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



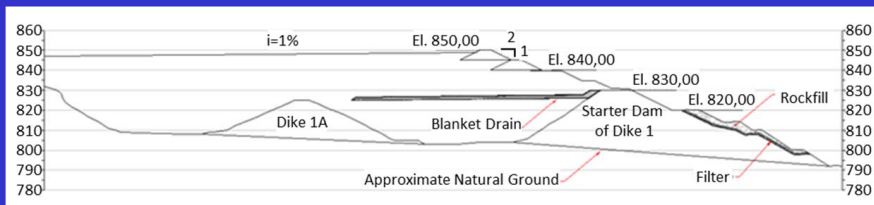
Implementação de drenagem complementar (Elevação 826) – Morgenstern et al., 2016



4/1/2019



Drenagem complementar El. 826 (Morgenstern et al., 2016)

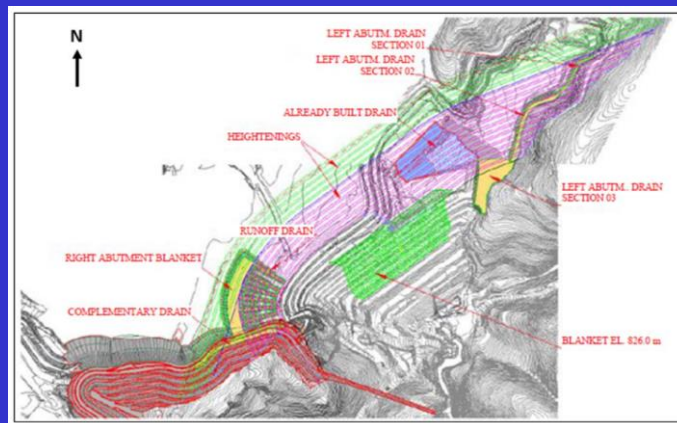


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Recuo do eixo da barragem (Morgenstern et al., 2016)



4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Surgências na ombreira esquerda e ruptura do talude na região do recuo (Morgenstern et al., 2016)

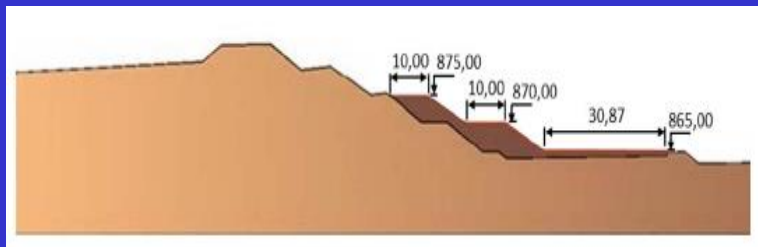


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Reforço do talude instável (Morgenstern et al., 2016)



4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Sismo 90 minutos antes da ruptura (Atkinson, 2016)

Local time	Moment Magnitude M_w	Distance from Fundão	Identification
1:01:49PM	2.1	2.6 km	mine blast
1:06:06PM	2.3	2.6 km	mine blast
2:12:15PM	2.2	< 2 km	earthquake (foreshock)
2:13:51PM	2.6	< 2 km	earthquake (main shock)
2:16:03PM	1.8	< 2 km	earthquake (aftershock)
3:45PM			Dam failure

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



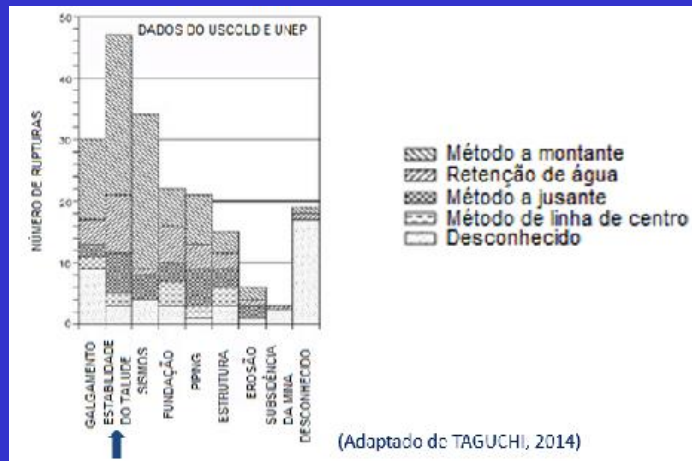
Carece de qualquer sentido
prático desenvolver estudos de
gestão de risco sem que se
garanta a imprescindível
qualidade da respectiva obra de
engenharia !!

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Acidentes em barragens de rejeitos



4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Liquefação

- Perda súbita da resistência ao cisalhamento não drenada por acentuado acréscimo de poro pressão.
- Solos susceptíveis à liquefação: siltes e areias finas fofas saturadas, com índice de vazios superior ao índice de vazios crítico (comportamento contrátil, *strain softening*).

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Tipos de Liquefação

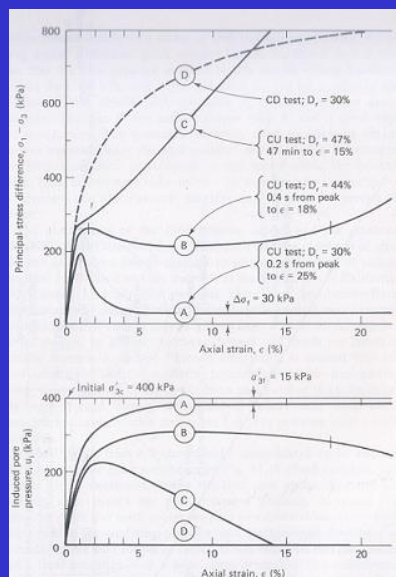
- Liquefação estática $\rightarrow$ a resistência máxima (de pico) é excedida, com súbita geração de poro pressão. É necessário um gatilho para deflagrá-la.
- Liquefação dinâmica $\rightarrow$ a poro pressão é gerada cumulativamente, em carregamentos cíclicos (terremotos, estruturas offshore)

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



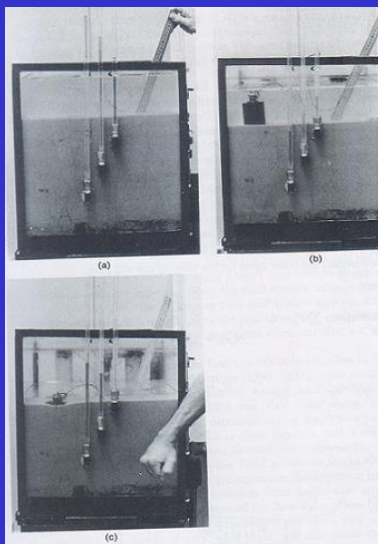
Liquefação estática (Castro, 1969)



4/1/2019



Impactos e liquefação estática (Holtz and Kovacs, 1981)

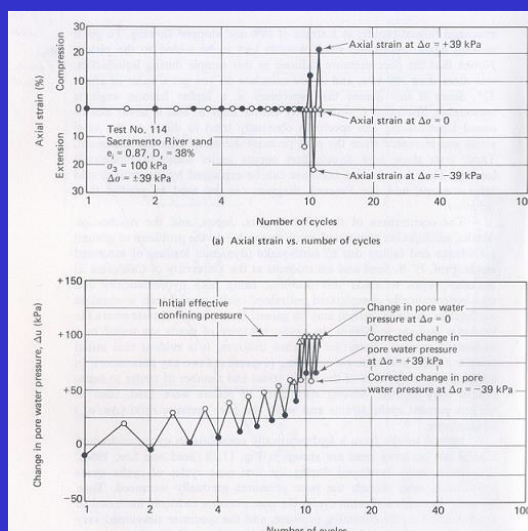


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Liquefação dinâmica (Seed and Lee, 1969)

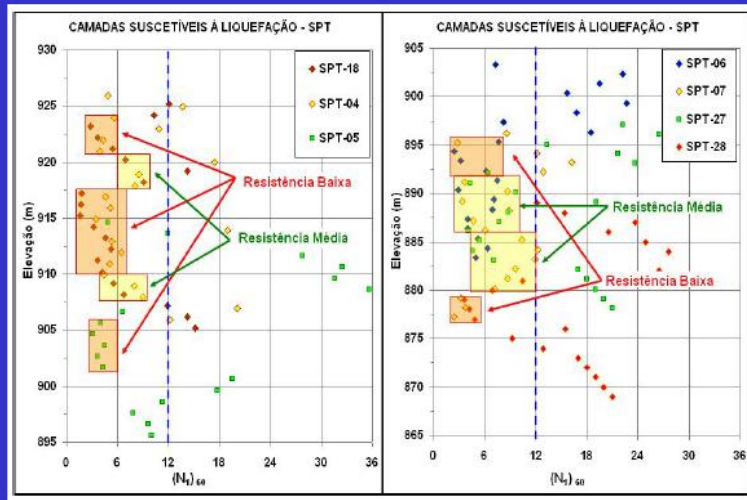


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Potencial de liquefação estática Barragem 1 da Mina do Córrego do Feijão, Brumadinho, com base no SPT, Método de Olson (2001).
Tese M.Sc. Washington Pirete da Silva (2010) - UFOP

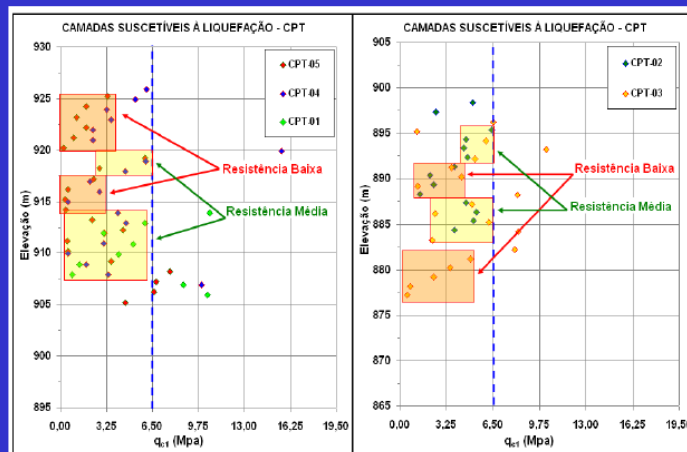


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Potencial de liquefação estática Barragem 1 da Mina do Córrego do Feijão, Brumadinho, com base no CPT, Método de Olson (2001).
Tese M.Sc. Washington Pirete da Silva (2010) - UFOP

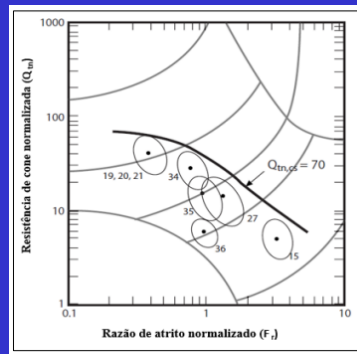
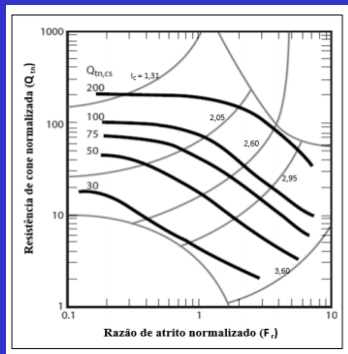


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Estimativa do potencial de liquefação estática (Robertson, 2010)

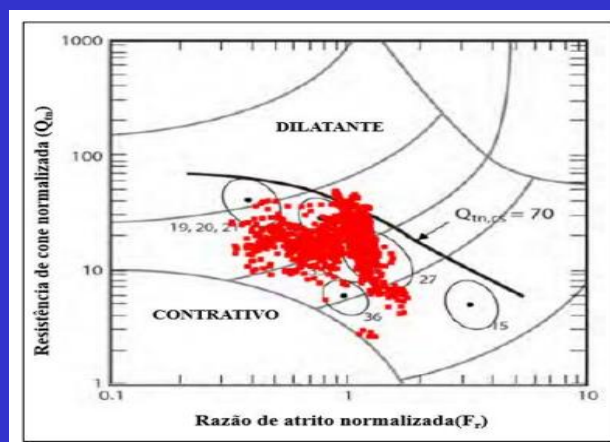


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Susceptibilidade à liquefação estática em Mariana (Critério de Robertson, 2010)

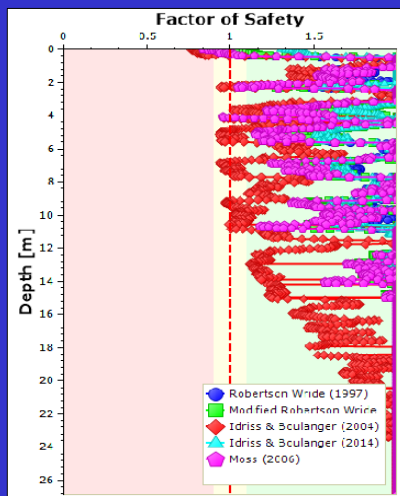


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Variação do fator de segurança à liquefação dinâmica em rejeito arenoso ($a=0,1g$)

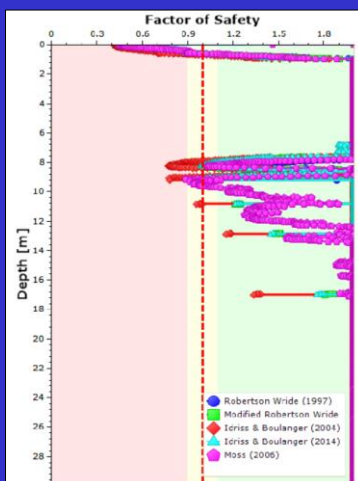


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Variação do fator de segurança à liquefação dinâmica numa lama de rejeitos ($a=0,1g$)

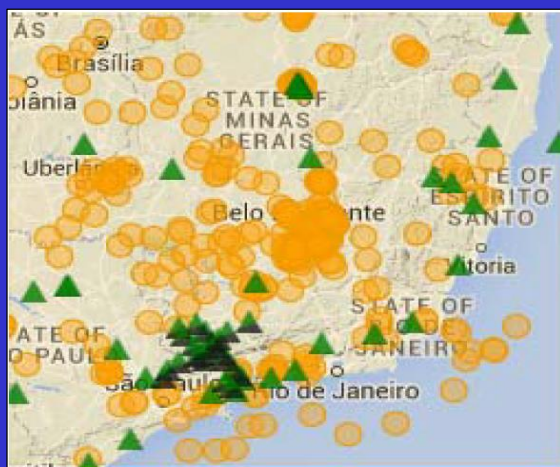


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



*Eventos sísmicos na Região Leste do Brasil
janeiro/2010 a abril/2016 (RSBR), apud Atkinson (2016).*



4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



*Eventos sísmicos em 2015 num raio de 10 km ao redor da
Baragem do Fundão (Atkinson, 2015)*

Date	Time(UT)	Lat.	Lon.	m_b, ML	M	type	Event#
2/4/2015	23:22:35	-20.06	-43.42	3.6	2.6	EQ	
2/26/2015	16:11:13	-20.35	-43.57	3.5	2.1	blast?	
2/28/2015	16:36:16	-19.56	-43.32	3.5	2.5	blast?	
4/7/2015	15:56:11	-20.01	-43.38	3.7	2.2	blast?	
4/23/2015	18:19:03	-20.15	-43.63	3.5	2.3	blast?	
5/4/2015	16:05:53	-20.23	-43.58	3.7	2.2	blast?	
5/15/2015	16:01:41	-20.13	-43.46	3.5	2.2	blast?	
6/26/2015	16:08:16	-20.2	-43.49	3.6	2.2	blast?	
7/7/2015	16:02:50	-19.59	-43.29	3.6	2.5	blast?	
10/3/2015	18:44:13	-19.57	-43.39	3.5	2.5	blast?	
10/31/2015	5:02:06	-20.03	-42.61	3.2	2.1	EQ	
11/5/2015	15:01:49	-20.08	-43.28	3.3	2.1	blast	1
11/5/2015	15:06:06	-20.21	-43.58	3.5	2.3	blast	2
11/5/2015	16:12:15	-20.21	-43.47	2.3	2.2	EQ	3
11/5/2015	16:13:52	-20.21	-43.47	2.6	2.5	EQ	4
11/5/2015	16:16:03	-20.21	-43.47	1.4	1.8	EQ	4x
11/5/2015	17:59:28	-20.21	-43.47	2.2	2	EQ	6
11/10/2015	6:17:02	-20.21	-43.47	1.3	1.7	EQ	7
11/10/2015	7:45:58	-20.21	-43.47	1.7	1.8	EQ	8
11/18/2015	23:42:51	-20.21	-43.47	1.9	2	EQ	9
11/18/2015	23:43:10	-20.21	-43.47	0.8	~1	EQ	9x
12/9/2015	15:03:41	-20.15	-43.58	3.2	2.1	blast	10
5/2/2016	9:12:21	-19.957	-41.108	3.16	3.2	EQ	101
5/2/2016	15:12:54	-20.213	-43.219	2.23	2.2	blast	108

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



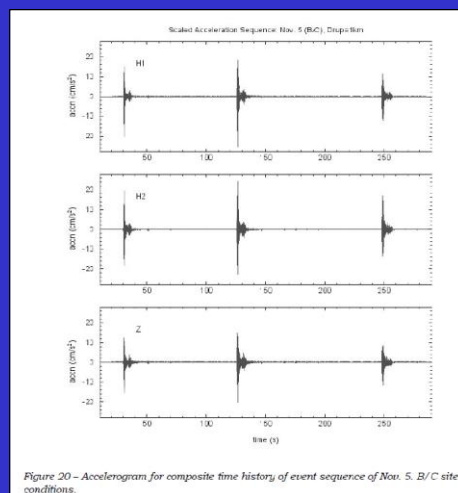
O terremoto de Mariana ocorreu 90 minutos antes do colapso da barragem. Causou trincas nas instalações da Samarco e fez cair ao chão um computador desktop.

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



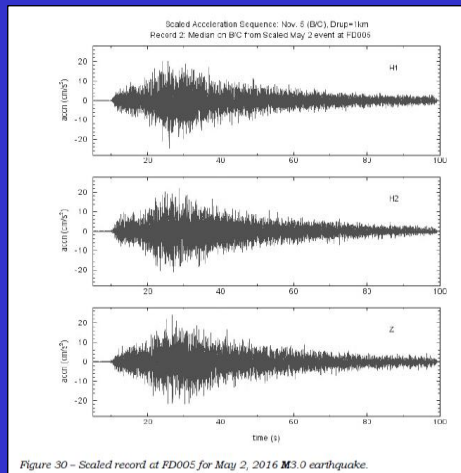
Acelerogramas, Barragem do Fundão, Hipótese A, M2.6 (Atkinson, 2015)



4/1/2019



Acelerogramas, Barragem do Fundão, Hipótese B, M2.6 (Atkinson, 2015)

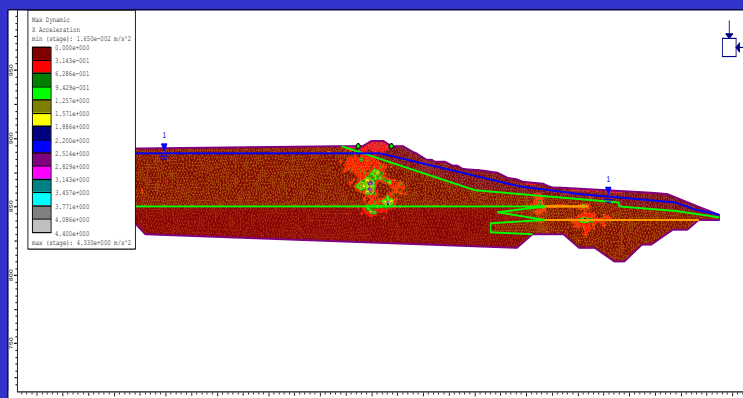


4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Análise sísmica de uma barragem após deconvolução dos acelerogramas



4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Conclusões

- Análises de risco de barragens são imprescindíveis, porém inócuas em presença de obras de engenharia de baixa qualidade. Antes da análise de risco, é imperioso conceber obras seguras, sem prazos de construção irrealistas, baseados tão somente em preceitos de lucratividade.

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Conclusões

- A maioria das barragens de rejeito têm a instabilidade iniciada por rupturas clássicas, que são seguidas por liquefação estática, com grande mobilidade (grande distâncias percorridas pelos rejeitos) e elevado poder destrutivo (perdas de vida, ambientais e materiais), cujo risco deve ser mitigado a partir de criterioso gerenciamento de risco.

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Conclusões

- Eventos sísmicos, mesmo que de pequena magnitude, não devem ser negligenciados não apenas nas barragens de rejeitos, mas em qualquer obra de engenharia. É imperioso que a comunidade geotécnica se especialize em dinâmica geotécnica e análises sísmicas!!!

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco



Obrigado

4/1/2019

Prof. Marcus Pacheco

