Rupturas de barragens de rejeitos e relações com a gestão de segurança de barragens

Rafaela Baldí Fernandes

O livro

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 19

2
GENERALIDADES 25
2.1 Projeto de barragens 26
2.2 Barragens de concreto 30
2.3 Barragens de rejeito 30
2.4 Barragens de aterro 31
2.5 Rejeitos arenosos e argilosos 31
2.6 Processos de espessamento e filtragem 33
2.7 Legislação 35

3
GERENCIAMENTO DE RISCO E FALHA 37
3.1 Análise de Risco 45
3.1.1. Conceitos de risco aplicados a estabilidade de barragens 56
3.1.2. Árvore de Eventos aplicada a inspeções de barragens 60
3.2 Análise de Falha 68
3.2.1. Análise FMEA aplicada a Inspeções de barragens 71
3.3 Estudos de Dam Break 76
3.3.1 Galgamento 78
3.3.2 Erosão interna e *Piping* 91
3.3.3. Falhas estruturais 94
3.3.3.1 Liquefação e extrusão lateral 97

4
RUPTURAS DE BARRAGENS 107
4.1 Barragem de South Fork, em 1889 115
4.2 Barragem de Saint Francis, em 1928 117
4.3 Barragem da Pampulha, em 1954 138
4.4 Barragem de Malpasset, em 1959 143
4.5 Barragem de Orós, em 1960 145
4.6 Barragem de Vajont, em 1963 150
4.7 Barragem de Baldwin Hills, em 1963 156
4.8 Barragem Van Norman, em 1971 165
4.9 Barragem 3 da Pitson Coal, em 1972 172
4.10 Barragem de Machhu I, em 1974 179
4.11 Barragem de Banqiao, em 1975 181
4.12 Barragem de Teton, em 1976 186
4.13 Barragem Euclides da Cunha, em 1977 196
4.14 Barragem de Merriespruit, em 1994 199
4.15 Barragem de Marinduque, em 1996 212
4.16 Barragem Los Frailes, 1998 216
4.17 Barragem da Mineração Rio Verde, em 2001 221
4.18 Barragem de Cataguases, em 2003 224
4.19 Barragem Big Bay Lake, em 2004 226
4.20 Barragem de Camará, em 2004 230
4.21 Sistema Federal de Diques, 2005 234
4.22 Barragem de São Francisco – Mirai, 2007 242
4.23 Barragem de Apertadinho, em 2008 246
4.24 Barragem de Algodões I, em 2009 248
4.25 Reservatório 10 de Ajka, em 2010 254
4.26 Barragem de Mount Polley, em 2014 261
4.27 Barragem B1 da Herculano Mineração, em 2014 268
4.28 Barragem de Fundão, em 2015 272
4.29 Barragem de Oroville, em 2017 289
4.30 Barragem da Usina Cana Libra 292
4.31 Barragem de Brumadinho, em 2019 293
4.32 Barragem do Quati, em 2019 301
4.33 Barragem de Toddbrook, em 2019 305
4.34 Barragem TB01, em 2019 314
4.35 Barragem Sciba, em 2019 318
4.36 Barragem do Amorim, em 2019 321
4.37 Barragem de Sardoba, em 2020 321
4.38 Barragens de Edenville, em 2020 325
4.39 Barragens da Fazenda Água Santa, em 2020 329
4.40 Barragens Guilherme Pontes, em 2020 321

5
ESTATÍSTICAS DAS FALHAS EM BARRAGENS 333

6
BARRAGENS NO BRASIL 357
6.1 Barragens em Minas Gerais 368

7
IMPACTOS ECONÔMICOS DA QUEDA DA EXTRAÇÃO MINERAL EM MG 369

8
DESCOMISSIONAMENTO E DESCARACTERIZAÇÃO 377
8.1 Estabilidade física 379
8.2 Estabilidade hidrológico-hidráulica 380
8.3 Opções para descaracterização 384

9
CONSIDERAÇÕES FINAIS 389

REFERÊNCIAS 393

Programação

- Contextualização
- Modos de Falha
- Liquefação
- Cases de rupturas por liquefação (2 em barragens de água e 4 em barragens de rejeito)
- Gestão de Risco em Barragens

OBS: Para uso dos dados desta apresentação, por gentileza, entre em contato com a autora

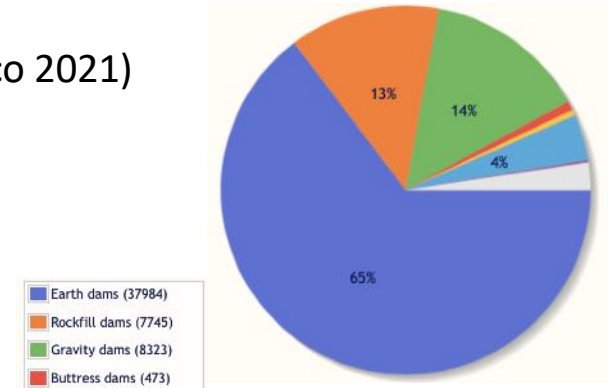
Contextualização

- Quantas barragens temos?

  - ❖ International Rivers: Em 2019: Cerca de 57.000 grandes barragens (mais de 15m altura e 3.000.000m^3)
    - ❖ 5% são rejeitos: 2.850
    - ❖ China tem 23.000 e USA tem 9.200

  - ❖ ICOLD: Total é de 58.875, dos países membros (Dados de Março 2021)
    - ❖ China tem 41%
    - ❖ USA tem 16%
    - ❖ India e Japão, com 8 e 5%
    - ❖ Brasil tem 2% ---- 1.365
      - ❖ Em quinto lugar, dos 98 países membros do ICOLD

    - ❖ 65% em solo
    - ❖ 14% em concreto gravidade



Contextualização

- Quantas barragens temos?

❖ Tipos de Barragens no Brasil – CBDB, 2020 (água)

Grandes Barragens			
A	Altura ≥ 15m (Operação)	831	
B	Altura < 15m (Proj/Const)	44	
	Total	**875**	60,8%
C	Vol Reserv. ≥ 3 Mm^3 (Operação)	588	
D	Vol Reserv. < 3 Mm^3 (Proj/Const)	43	
	Total	**631**	43,9%
	A + C	504	Sendo: 70 CE, 68 MG, 66 SP
	A + D	33	
	Total	**537**	

❖ ANM – Fev, 2021 (rejeitos)

TOTAL	877 barragens	100,0%
Não Inseridas na PNSB	**441 barragens**	**50,3%**

Inseridas na PNSB			436 barragens		49,7%
Dano Potencial Associado			Categoria de Risco		
Alto	**Médio**	**Baixo**	**Alto**	**Médio**	**Baixo**
255	147	34	51	59	326
58,5%	33,7%	7,8%	11,7%	13,5%	74,8%

Estado	Em operacão	Construção/Pro-jeto/Abandono	TOTAL	
Alagoas	30		30	
Alto Paraná	2		2	
Amapá	2	3	5	
Amazonas	3	1	4	
Bahia	86	1	87	6,1%
Ceará	129		129	9,0%
Distrito Federal	4		4	
Espírito Santo	22		22	
Goiás	31	10	41	
Maranhão	5		5	
Mato Grosso	64	9	73	
Mato Grosso do Sul	19	5	24	
Minas Gerais	199	8	207	14,4%
Pará	5	6	11	
Paraíba	70		70	
Paraná	61	5	66	
Pernambuco	82	1	83	
Piauí	27		27	
Rio de Janeiro	46	4	50	
Rio Grande do Norte	62		62	
Rio Grande do Sul	94	3	97	6,7%
Rondônia	23	3	26	
Roraima	3	2	5	
Santa Catarina	90	10	100	7,0%
São Paulo	146	1	147	10,2%
Sergipe	15		15	
Tocantins	21	2	23	
Sem dados	22	1	23	
Total	**1363**	**75**	**1438**	**53,3%**

BARRAGENS POR ESTADO			
Estado	**Inseridas na PNSB**	**Não Inseridas na PNSB**	**TOTAL**
MG	212	149	361
PA	70	36	106
BA	14	61	75
MT	54	65	119
Outras	86	130	216
Total de barragens	436	441	877
Em MG	49%	34%	41%

Contextualização

- Quantas barragens temos?

❖ ANEEL – Dez, 2019 (água para energia)

TOTAL	910 barragens 100%
Não Inseridas na PNSB	201 barragens 22,1%

Inseridas na PNSB			709 barragens 77,90%		
Dano Potencial Associado			Categoria de Risco		
Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo
553	70	86	0	28	681
78%	9,9%	12,1%	0,0%	3,9%	96,1%

UF	Nº de Barragens	
AL	2	
AP	8	
AM	6	
BA	27	
DF	1	
ES	21	
GO	48	
MA	1	
MT	92	10%
MS	19	
MG	161	18%
PA	54	
PR	54	
PE	4	
PI	1	
RJ	45	
RS	88	10%
RO	30	
SC	95	10%
SP	123	14%
SE	7	
TO	23	
TOTAL	910	

❖ ANA – Dez, 2019 (água)

	Inseridas na PNSB			123 barragens			80,5%
	Dano Potencial Associado			Categoria de Risco			
Não Classificado	Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo	Não Classificado
19	38	56	10	96	18	8	1
15,4%	31%	45,5%	8,1%	78,0%	14,6%	6,5%	0,8%

Não Inseridas na PNSB	82 barragens	17,1%

TOTAL	205 barragens

Contextualização

- Quantas barragens temos?

  ❖ FEAM – 2018
  (água e rejeitos)

	Destilaria Álcool	Indústria	Mineração	TOTAL	
Classe I	67	15	101	**183**	26%
Classe II	98	42	163	**303**	44%
Classe III	5	35	165	**205**	30%
TOTAL	**170**	**92**	**429**	**691**	
	25%	13%	62%		

Mineração (que atendem dados PNSB)
4
62
66
15% do Total de Mineração

Modos de Falha

- Qual a estatística das falhas?

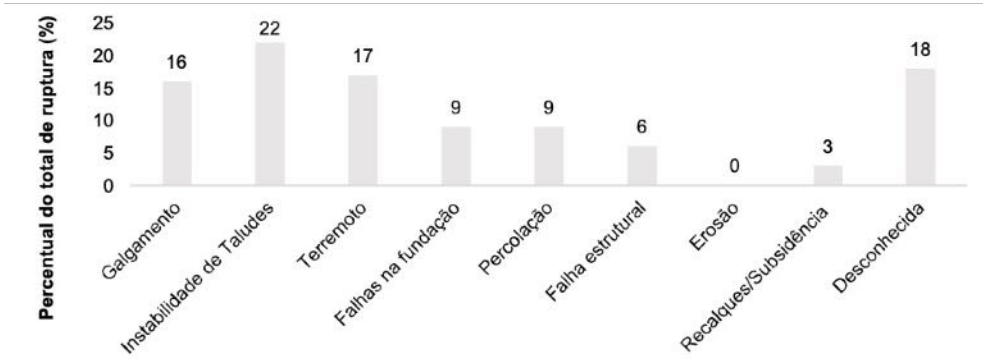
  - ICOLD: 2 a 5 falhas de grande magnitude por ano em barragens de rejeito
  - Azam, diz que a taxa de ruptura é de 1,2% (entre 2000 e 2010 – sendo 18.401 falhas) para rejeitos
  - Robertson sinaliza que o risco potencial de ruptura se eleva por um fator de 20 a cada 1/3 de século
  - Cenderelli – Base de rupturas de 1831 à 1965 (água e rejeito)
    - Taxa em barragens de solo é de 1 ruptura a cada 36 barragens (concreto-1:59)

Tipo de material do maciço	Número de barragens construídas	Número de rupturas	Taxa de Ruptura	Probabilidade
Solo	4551	121	2,66%	2/75
Enrocamento	285	13	4,56%	1/22
Total	**4836**	**134**	**2,77%**	1/36
Concreto - Arco	566	7	1,24%	1/81
Concreto - Gravidade	2271	40	1,76%	1/53
Concreto - Contrafortes	373	7	1,88%	1/57
Total	**3210**	**54**	**1,68%**	1/59
Total Geral	**8046**	**188**	**2,34%**	1/43

Modos de Falha

- Qual a estatística das falhas?

  ❖ Blight, para rejeitos:



  ❖ E então?
  - ✓ Muitas informações desencontradas
  - ✓ Erros de conceito na compilação dos dados (Ex: piping x erosão interna / Liquefação e fenômeno)
  - ✓ Base de dados reduzida

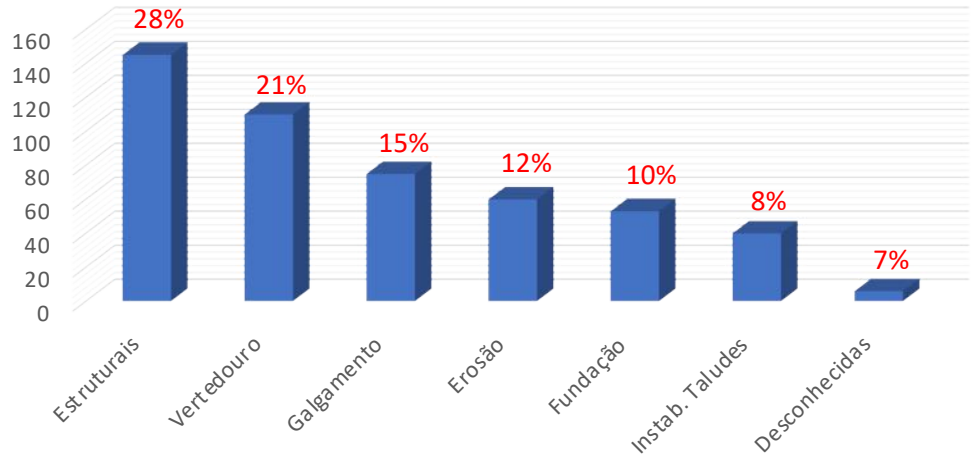
  - ✓ E começa o garimpo!

Modos de Falha – ICOLD/USCOLD

- 1964/1973 – ICOLD – Avaliação de 349 rupturas e incidentes em barragens de água nos USA
- 1994 – ICOLD – Avaliação de 185 casos de barragens de rejeito + 36 casos do USCOLD = 221

❖ Total: 570 casos de problemas em barragens de água (61%) e rejeito (39%) - Divulgado em 2001

- ✓ Falhas: rupturas e incidentes
- ✓ Nem todos os casos foram avaliados
- ✓ 75% das falhas foram em barragens de aterro para acumulação de água
- ✓ 24% rupturas, 42% incidentes em reparos e 34% fatalidades



Modos de Falha – ICOLD/USCOLD

- Para as barragens de rejeito (211 casos avaliados)

  - ✓ Dados a partir de 1960 – 60% das falhas entre 1975 e 2000
  - ✓ 53% das falhas em estruturas com menos de 20m de altura
  - ✓ Construção mais antiga é por montante – África do Sul, 1900
    - ✓ Método usado BEM antes de se ter técnicas bem desenvolvidas e Teorias Mec. Solos (Terzaghi 1925 seguido de Peck e outros)
    - ✓ 41% das falhas em barragens de rejeito são decorrentes desse método (64% rupturas, 34% incidentes e 2% lençol freático)

Montante	86	41%
Retenção de água	36	17%
Jusante	30	14%
Linha de Centro	14	7%
Desconhecido	45	21%
TOTAL	**211**	100%

Ponto de atenção

Para Montante:		
64%	34%	2%
Ruptura	**Incidente**	**Lençol Freático**
55	29	2
19	10	7
8	17	5
2	10	2
35	8	2
119	**74**	**18**
56%	35%	9%

Modos de Falha – ICOLD/USCOLD

- Para as barragens de rejeito (211 casos avaliados, menos 9 que não tinham dados suficientes)
  - ✓ Falhas: Instabilidade de taludes, Terremotos e Galgamento com maior percentual de incidência

	Montante	Retenção água	Jusante	Linha de Centro	Desconhecido	TOTAL	
Galgamento	13	3	2	2	10	**30**	15%
Instabilidade de taludes	26	9	7	2	4	**48**	24%
Terremotos	25	1	5	0	3	**34**	17%
Fundação	5	6	3	*4*	5	**23**	11%
Infiltração	7	4	6	3	1	**22**	11%
Estruturais	3	3	3	4	3	**16**	8%
Erosão	2	2	2	0	1	**7**	3%
Subsidência de mina	1	0	0	0	2	**3**	1%
Desconhecidos	1	1	0	0	17	**18**	9%
TOTAL	**83**	**29**	**28**	**15**	**46**	**201**	
	41%	14%	14%	7%	23%		

** 9 casos sem serem avaliados*

Ponto de atenção

Em 2001
Sinais de que liquefação não é Modo de Falha

Modos de Falha – CSP2

- Center for Science in Public Participation – Localizado em Montana

  - ❖ 289 Rupturas e Incidentes em barragens de rejeito de 1900 até agosto de 2017
    - ✓ 63% falhas de engenharia ou instalações, que não são muito graves ou graves, sem perda de vidas
    - ✓ 32% muito graves ou graves, com perda de vidas
    - ✓ Salto em 1960, que tem reduzido, MAS muito graves ainda são elevadas

Rupturas/Incidentes - Barragens (até agosto de 2016)						
	Rupturas muito graves de barragens de rejeito	Rupturas graves de barragens de rejeito	Outras rupturas de barragens de rejeito	Outros incidentes relacionados a rejeito	Demais rupturas não relacionadas a rejeitos ou desconhecida	TOTAL
	Perda múltipla de vidas (~ 20) e/ou liberação de descarga total ≥ 1.000.000 m^3 e/ou deslocamento de material em mais de 20 km ou mais	Perda múltipla de vidas e/ou liberação de descarga total ≥ 100.000 m^3 e/ou deslocamento de material em mais de 20 km ou mais	Falhas de engenharia/instalações que não sejam classificadas como Muito Graves ou Graves, sem perda de vidas	Rupturas que não foram classificadas como 1, e ou 3	Incidentes não-rejeitos: águas subterrâneas, rochas residuais, etc.	
	1	2	3	4	5	
2010-19	6	6	14	2	1	29
2000-09	10	8	10	1	0	29
1990-99	9	12	24	1	0	46
1980-89	5	9	38	4	1	57
1970-79	5	8	40	0	3	56
1960-69	5	3	41	0	3	52
1950-59	0	0	7	0	0	7
1940-49	1	1	5	0	0	7
1930-39	1	0	2	0	0	3
1920-29	1	0	0	0	0	1
1910-19	0	1	1	0	0	2
1900-09	-	-	-	-	-	0
	43	**48**	**182**	**8**	**8**	**289**
	14,9%	16,6%	63,0%	2,8%	2,8%	

Modos de Falha – CSP2

- ✓ Em relação a 2014, número de falhas cresceu 8%

- ✓ 32% das falhas foram em barragens por montante
- ✓ 42% não se tem informação

- ✓ Em termos de tipo de resíduo, 72% refere-se a:
  Cobre: 22% do total de falhas Ouro: 17% Fósforo: 10% Carvão: 8% Chumbo: 7%
  Ferro (6%) --- 16 rupturas e incidentes Alumínio: 2%

Tipo de Ruptura	*Tipo de alteamento / função*									TOTAL
	Montante	Montante e Linha de Centro	Jusante	Jusante e Montante	Linha de Centro	Gravidade	Retenção de Água	Outros	Não informadas	
1	13		2	1	1		3		23	43
2	14		3			1	2	1	27	48
3	62	1	21		10		21	2	65	182
4			2		1		1		4	8
5	2						2		4	8
	91	***1***	***28***	***1***	***12***	***1***	***29***	***3***	***123***	***289***
	31,5%	0,3%	9,7%	0,3%	4,2%	0,3%	10,0%	1,0%	42,6%	

Ponto de atenção

Modos de Falha – CSP2

	Rupturas/Incidentes por país						
	1	2	3	4	5		
África	3	1	7	1		12	4,2%
Armênia			1			1	0,3%
Austrália			8	1		9	3,1%
Bélgica					1	1	0,3%
Bolívia		1				1	0,3%
Brasil	3	4	2			9	3,1%
Bulgária	1	3				4	1,4%
Canadá	2	4	15	1	4	26	9,0%
Chile	2	3	30			35	12,1%
China	8	4	4	1		17	5,9%
Espanha		2	2			4	1,4%
Filipinas	6	4	7			17	5,9%
Finlândia		1				1	0,3%
França			2			2	0,7%
Guiana	1					1	0,3%
Hungria	1		1			2	0,7%
Itália	1					1	0,3%
Iuguslávia		1				1	0,3%
Japão		1	4			5	1,7%
Macedônia		1				1	0,3%
México	2		2			4	1,4%
Nova Zelândia			1			1	0,3%
Pensilvania			1			1	0,3%
Peru		2	3			5	1,7%
Portugal			1			1	0,3%
Reino Unido			16		1	17	5,9%
Romênia	2		1			3	1,0%
Rússia	2	1				3	1,0%
Sibéria			1			1	0,3%
Suécia	1					1	0,3%
USA	8	14	70	4	2	98	33,9%
Indefinido		1	3			4	1,4%
Total	43	48	182	8	8	289	

		Ranking das Rupturas/Incidentes					TOTAL
		1	2	3	4	5	
1º	USA	8	14	70	4	2	98
2º	Chile	2	3	30			35
3º	China	8	4	4	1		17
	Filipinas	6	4	7			17
	Reino Unido			16		1	17
4º	África	3	1	7	1		12
5º	Brasil	3	4	2			9
	Austrália			8	1		9
6º	Peru		2	3			5
	Japão		1	4			5
7º	México	2		2			4
	Bulgária	1	3				4
	Espanha		2	2			4
	Indefinido		1	3			4
							240

83,0%

- ✓ China e USA lideram o ranking de rupturas muito graves
- ✓ USA e Chile lideram o ranking de rupturas e incidentes
- ✓ Brasil está em quinto lugar em falhas, juntamente com Austrália
  - ✓ No levantamento até 2014 era o sétimo, com 8 falhas
- ✓ 83% das falhas são em 14 países (temos 189 países)

Modos de Falha – CSP2

✓ No Brasil: ainda muitas lacunas em branco

TIPO DE RUPTURA	MINA/PROJETO - LOCALIZAÇÃO	MINERAL	TIPO DE BARRAGEM	ALTURA DA BARRAGEM (metros)	VOLUME ARMAZENADO (metros cúbicos)	NUMERO DO INCIDENTE NO ICOLD	DATA DO INCIDENTE	DANO (metros cúbicos)	MORTES	FONTE DE DADOS	NOTAS
1	Fundao-Santarem (Germano), Minas Gerais, Brazil (Samarco = Vale & BHP)	Fe	US	90	55.000.000	-	5/Nov/15	32.000.000	19	The Australian, 16Nov15, 9Jan16; Sydney Morning Herald, 14Nov15; Do the right Thing, Samarco, December 15, 2015; www.mining.com, 8Jan16	The Fundão dam breached and its tailings impacted the nearby Santarém dam and caused a partial erosion of its right shoulder. The Selinha dike, one of the side walls of the Germano dam, was also damaged. 19 people killed, including 14 working on the dams at the time. Waste discharge reached the Atlantic Ocean.
2	Herculano Iron Mine, Itabirite, Minas Gerais, Brazil	Fe				-	10/Sep/14		3	WISE	A large amount of waste was released on top of vehicles and workers. A truck driver, a bulldozer with operator and a Fiat Uno with the driver were all buried. "Tailings dam failure kills three workers," Mining.com, September 12, 2014.
1	Mineracao Rio Pomba Cataguases, Mirai, Minas Gerais, Brazil, Mineração (Industrias Quimicas Cataguases)	Al				-	10/Jan/07	2.000.000		WISE	The mud flow left about 4000 residents of the cities of Miraí and Muriaé in the Zona da Mata homeless. Crops and pastures were destroyed and the water supply was compromised in cities in the states of Minas Gerais and Rio de Janeiro.
2	Mineracao Rio Pomba Cataguases, Mirai, Minas Gerais, Brazil, Mineração (Industrias Quimicas Cataguases)	Al				-	Mar/06	400.000		Brazil Magazine	In March 2006, a leaking (sic) let 400 million liters (400,000 m3) of muddy water escape making its way to Rio de Janeiro. "Brazilian Rains Kill Dozens and Broken Dam Leaves, Thousands Without Shelter ," José Wilson Miranda , Brazzil Magazine, 11 January 2007 The mud flow left about 4000 residents of the cities of Miraí and Muriaé in the Zona da Mata homeless. Crops and pastures were destroyed and the water supply was compromised in cities in the states of Minas Gerais and Rio de Janeiro; company was cited for a TSF infraction in 2006
1	Mineracao Rio Pomba Cataguases, Mirai, Minas Gerais, Brazil, Mineração (Industrias Quimicas Cataguases)	Al				-	2003	1.200.000		Brazil Magazine	1.2 billion liters (1.2 million m3) of toxic water was poured out into the Pomba and Paraíba do Sul rivers. "Brazilian Rains Kill Dozens and Broken Dam Leaves, Thousands Without Shelter ," José Wilson Miranda , Brazzil Magazine, 11 January 2007
2	Sebastião das Águas Claras, Nova Lima district, Minas Gerais, Brazil	Fe				-	22/Jun/01		2	WISE	2 killed, 3 missing. Tailings 8 km downstream the Córrego Taquaras stream, mud affected an area of 30 hectares
3	Minera Sera Grande: Crixas, Goias, Brazil	Au	DS then US	41	2.25Mt	214	Feb/94	None		ICOLD	
3	Pico de Sao Luis, Gerais, Brazil	Fe		20		192	2/Oct/86			ICOLD	
2	Itabirito, Minas Gerais, Brazil	Fe	Gravity	30		189	May/86	100,000t	7	ICOLD, WISE, Rico	Itaminos Comercio de Minerios. Dam wall burst.

Modos de Falha – CSP2

Modos de Falha		Tipos de Ruptura 1	2	3	4	5	TOTAL		
Desconhecidos ou Sem informação	Barragens Ativas	14	15	16			45	56	19,4%
	Barragens Inativas	1	1	4			6		
	Rejeitos Inativos			4			4		
	Rejeitos Ativos						0		
	Lençol Freático				1		1		
Galgamento	Barragens Ativas	3	4	22			29	48	16,6%
	Barragens Inativas	2	1	12			15		
	Rejeitos Inativos			3			3		
	Rejeitos Ativos			1			1		
Instabilidade de Talude (Falha Estática)	Barragens Ativas	6	4	18			28	45	15,6%
	Barragens Inativas		2				2		
	Rejeitos Inativos			15			15		
	Rejeitos Ativos						0		
Terremoto (Instabilidade Sísmica)	Barragens Ativas	2	4	16			22	42	14,5%
	Barragens Inativas		1	4			5		
	Rejeitos Inativos			5			5		
	Rejeitos Ativos			10			10		
Erosão Interna e Piping (Maciço e Fundação)	Barragens Ativas	2	3	11			16	25	8,7%
	Barragens Inativas			1			1		
	Rejeitos Inativos		1	7			8		
	Rejeitos Ativos						0		
Falha estrutural de fundação	Barragens Ativas	4	1	8			13	23	8,0%
	Barragens Inativas		1	1			2		
	Rejeitos Inativos						0		
	Rejeitos Ativos			8			8		
Estrutural	Barragens Ativas	3	5	6			14	20	6,9%
	Barragens Inativas	2					2		
	Rejeitos Inativos		1	1	1		3		
	Rejeitos Ativos						0		
	Lençol Freático					1	1		
Erosão Externa	Barragens Ativas	2	2	3			7	11	3,8%
	Barragens Inativas						0		
	Rejeitos Inativos			3			3		
	Rejeitos Ativos			1			1		
Subsidência	Barragens Ativas	1					1	1	0,3%
	Barragens Inativas						0		
	Rejeitos Inativos						0		
	Rejeitos Ativos						0		
Lençol Freático			2		6	7	15		5,2%
Falha generalizada em Barragem Ativa		1					1		0,3%
Sem informação				2			2		0,7%
		43	48	182	8	8	289		
		14,9%	16,6%	63,0%	2,8%	2,8%			

- ✓ Desconhecidas – 19%
- ✓ Galgamento – 17%
- ✓ Instabilidade física – 16%
- ✓ Terremoto – 14%

Em 2016
Sinais de que liquefação não é Modo de Falha

Modos de Falha – CSP2

Material do Aterro	*Tipos de Ruptura e Incidentes*					TOTAL	
	1	2	3	4	5		
Rejeitos	7	10	43		2	62	21,5%
Solo		5	37	1	2	45	15,6%
Rejeitos arenosos ciclonados	4	2	7	1		14	4,8%
Resíduos Mina	3	1	7	1		12	4,2%
Enrocamento	2		4			6	2,1%
Outros	1	2	2			5	1,7%
Rejeitos/Solo			2			2	0,7%
Solo/Enrocamento			1	1		2	0,7%
Solo/Resíduos Mina	1					1	0,3%
Não identificado	25	28	79	4	4	140	48,4%
	43	***48***	***182***	***8***	***8***	***289***	
	14,9%	16,6%	63,0%	2,8%	2,8%		

- ✓ Barragens com maciço em solo e/ou rejeitos – 37%
  - ✓ Rejeitos: 22%

Modos de Falha – WMTF

- World Mining Tailings Failure – David Chambers é um dos membros

  ❖ 355 Rupturas e Incidentes em barragens de rejeito até dezembro de 2018

  - ✓ Base classificatória é diferenciada --- Em ago2017 CSP2 tinha 289 e WMTF tinha 341 ((52 de diferença))
  - ✓ Erros no somatório: resumo apresenta 247 falhas
    - ✓ CSP2: Para tipo 1, 2, 3 e 4 total é de 281
    - ✓ Se usaram CSP2 como base de dados, como reduz de 281 para 247, em mais de um ano?

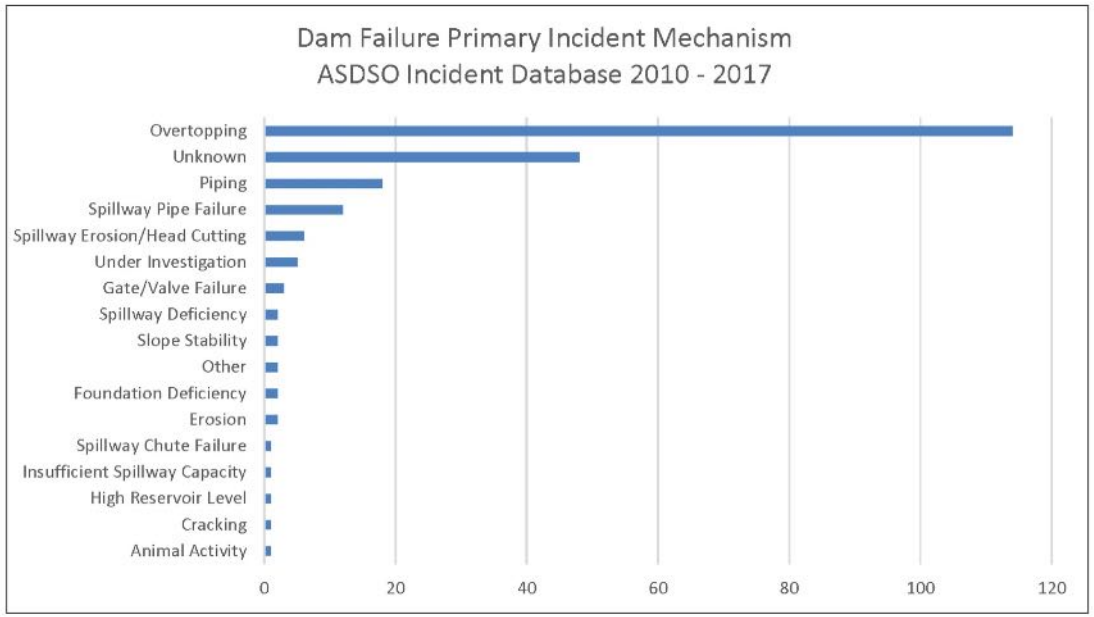
  - ✓ Considerando dados novos: Ago2017 a dez2018 tem-se 15 novas falhas
    - ✓ Inclusão de Barcarena em fevereiro de 2018 (bauxita – galgamento sem ruptura)
    - ✓ Eleva galgamento, mas ainda é o maior percentual de falhas
    - ✓ Muda-se o ranking e Brasil está no sétimo, com 10 falhas (se mantém com Brumadinho)

Em 2018 Sinais de que liquefação não é Modo de Falha

Modos de Falha – ASDSO

- Association of Dam Safety Officials

  - ❖ Base de dados entre 2010 e 2017 de, aproximadamente, 280 falhas (água e rejeitos)
    - ✓ USA tem maior número de falhas no ranking
    - ✓ Galgamento: 60%
    - ✓ Janeiro 2005 a Junho 2013: 173 rupturas (maior parte galgamento) e 587 incidentes



Em 2018 Sinais de que liquefação não é Modo de Falha

Fonte: AASDSO, 2018

Modos de Falha – Zhang

- 900 falhas em barragens, principalmente nos USA
  - ❖ 593 em solo (65%)
    - ✓ 90% sem dados do tipo de estrutura
    - ✓ 10% avaliadas
      - ✓ 38 em solo homogêneo + 12 com face de enrocamento + 9 com núcleo zonado
    - ✓ 96 estruturas até 5 anos / 62 entre 10 e 20 anos / 50 entre 20 e 40 anos / 6 com mais de 150 anos
    - ✓ 301 com altura até 15m / 135 de altura entre 15 e 30m
  - ❖ Galgamento: 37%
  - ❖ Piping: 34%
  - ❖ Deslizamentos: 11%

Em 2007
Sinais de
que
liquefação
não é Modo
de Falha

Modos de Falha – Rafaela

- 154 rupturas de barragens, sendo 86% de rejeitos

  - ❖ Estruturais: 60% (geralmente falha de projeto e construção)
  - ❖ Galgamento ---- erosão interna e piping : cerca de 19%
  - ❖ Diversas: unitários por fenômenos isolados não é representativo

Liquefação
Sendo considerada como fenômeno percursor de um modo de falha

MODO DE FALHA		Estudo Simplificado (Rejeito)	Estudo Completo		Total		
			Água	Rejeito			
Galgamento		20	11	1	32	20,8%	
Estruturais	Terremoto (liquefação dinâmica)	12	1		13	8,4%	61,7%
	Liquefação estática	9	1	5	15	9,7%	
	Fundação	8	2	2	12	7,8%	
	Subsidência	2			2	1,3%	
	Instabilidade de taludes	3			3	1,9%	
	Deslizamentos e erosões	6	1	1	8	5,2%	
	Diversas	37	4	1	42	27,3%	
Erosão interna e piping		22	5	1	28	18,2%	
Sem dados			1	3	4	2,6%	
TOTAL		119	26	14	159		
			40				
		74,8%	16,9%	9,1%			
			26,0%				

Modos de Falha - Conclusão

- Base de dados ainda é muito reduzida – Medo de mostrar dados!

- Principais problemas que disparam Modos de Falha (Rejeitos)

  - ✓ Alteração das taxas de disposição de rejeitos ao longo dos anos
  - ✓ Propriedades dos rejeitos e variabilidade parâmetros ao longo do adensamento
  - ✓ Influência de aditivos nas propriedades floculantes e espessantes
  - ✓ Resistência da fundação, na barragem e nas ombreiras
  - ✓ Influência de carregamentos sísmicos
  - ✓ Taxas de precipitação e evaporação
  - ✓ Taxas de infiltração e percolação, no maciço e fundação

- Principais problemas que disparam Modos de Falha (Água)

  - ✓ Condições climáticas
  - ✓ Eventos pluviométricos extremos
  - ✓ Dimensionamento de vertedouros
  - ✓ Terremotos
  - ✓ Fundação

Liquefação

- Está longe de ser uma novidade!

- Estática e Dinâmica

- Quando carga é aplicada, tendência é diminuir vazio para compensar a deformação até se ter máxima resistência dos grãos
  - ✓ Se Partículas densamente dispostas (areia densa e argilas compactas)
    - ✓ Primeiro se afastam para se mover durante cisalhamento --- Aumenta volume --- Solos Dilatantes

  - ✓ Se partículas soltas (areias fofas ou argilas moles ou dispostos hidraulicamente)
    - ✓ Se agrupam, massa de solo comprime --- Diminui volume --- Solos contrácteis

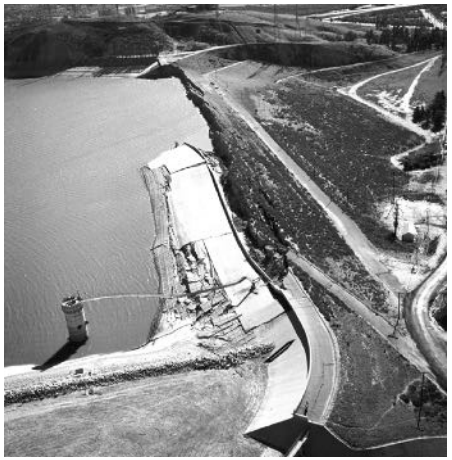
    - ✓ Solos contrácteis saturados, água inibe o movimento das partículas em conjunto – surge poropressão
      - ✓ Reduz a resistência (pois água é incompressível)
        - ✓ Se não drenado --- poropressão acelera surgimento de cisalhantes

Liquefação estática: solos contrácteis, confinados, saturados e carregados!

Cases de Liquefação

❖ Van Norman, ruptura em 1971

- Los Angeles – parte do aqueduto – “ruptura” em 9 de fevereiro (sem galgamento)
- Projeto de 1912 - Altura de 43m e 633m de comprimento
- Solo (núcleo argiloso e espaldares de areia), sendo a parte arenosa compactada hidraulicamente. Ainda: revestimento de concreto e, reforço aos pés de jusante em solo
- Rompeu durante o terremoto Sylmar, em 71 (Magnitide 6,6 – escala Richter de 2 à 10)
  - Haviam reduzido o NA em 3m
  - Aceleração na barragem de 0,6g
  - Tremor deslocou o talude de montante para a OE, deslizando para o reservatório e reduzindo a borda livre
  - Bombearam o reservatório para evitar galgamento
  - Liquefação dinâmica
- 12milhões de m^3 foram bombeados e galgamento evitado
- Sem vítimas fatais
- Reconstruída entre 1976 e 1978 para ser bacia de jusante de uma nova barragem construída à montante
- Em 1994 outro terremoto atingiu a área e novamente rompeu Van Norman

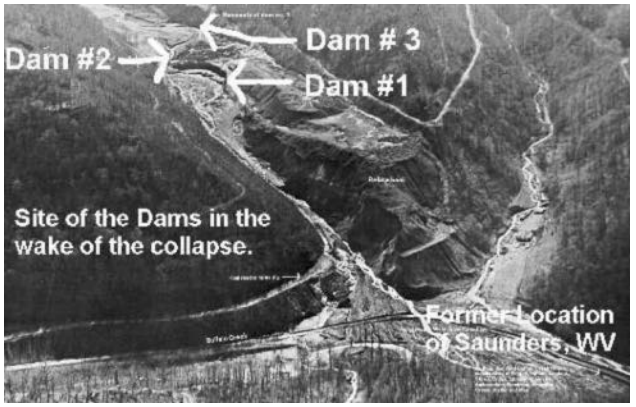


Fonte das Fotos: Seed

Cases de Liquefação

❖ Barragem 3 da Pitson Coal, ruptura em 1972

- Inundação de Buffalo Creek - Virgínia (USA) – 26 de fevereiro
- Construída em 1968 com rejeitos granulares - inspecionada e, quatro dias depois, rompeu
- 20m de altura e 137m de largura
- Rompimento - Falhas tecnológicas
  - Fundação era lodo dos resíduos, cerca de 12 a 30m de espessura
  - Maciço sem compactação, baixo peso específico (precisava ser confinado)
  - Problemas nas demais barragens, inclusive ruptura da Baragem 2
  - Sucessivos alteamentos por montante, sem critério
  - Cheio “extravasores” tulipas, tubos sem nenhum critério de projeto
  - Fundação: sedimentos de lodo de carvão
  - Falha no talude de jusante, solo ”tentou” reestabelecer equilíbrio reduzindo vazios, mas ampliou U e ocorreu liquefação estática
- 500 milhões de litros resíduos líquidos de carvão, com ondas de 9m
- 125 vítimas, 1.121 feridos e 4.000 desabrigados
- Empresa classificou o episódio como “um Ato de Deus”



Fonte das Fotos:
Techlio

Cases de Liquefação

❖ Merriespruit, ruptura em 1994

Fonte das Fotos: Tailings.info

- África do Sul (estado livre da Virgínia) – 22 de fevereiro
- Ruptura da parede norte da Barragem 4A, construída em 1970-78
- Barragem de Ouro – Baias com alteamento diário
  - Altura de 31m
  - Sem controle executivo constante (dia = baias // noite = pasta no reservatório)
  - Lançamento de material para adensamento natural
  - Início – baixa densidade, dificuldade de drenar e muitas fissuras na parede – Reforço
  - 1993: grande fissura e borda livre era de 1,0m (segundo eles, aceitável) – Fechou 4A
  - Reduziu parede divisória entre 4A e 4B – ocupação ao mesmo tempo
  - Chuva 50mm em 30min, borda livre reduzida para 30cm – Galgamento
  - Galgamento lavou a parede dos rejeitos, expondo-os. Como estavam pouco adensados, liquefizeram estaticamente
- Volume propagado: 600.000m^3, em 4km
- 17 vítimas fatais, (maioria há 300m barragem, onde onda de 2,5m de altura)
- Criação do Código de Práticas para Depósitos de Resíduos de Minas na África

Cases de Liquefação

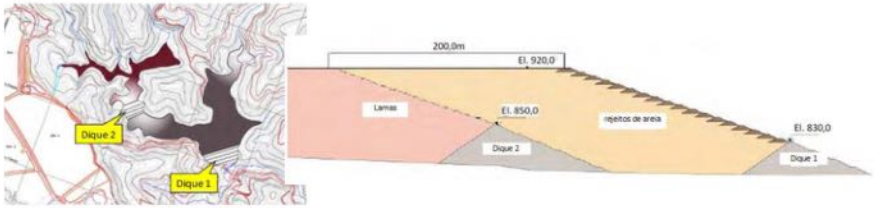
❖ Big Bay Lake, ruptura em 2004

Fonte das Fotos:
Dam Safety
Division of
Mississipi

- Mississipi – 12 de março
- Construída em 1991, altura de 21m – Acumulação de água
- Estrutura
  - Fundação com materiais siltosos, altamente erodíveis
  - 11 da manhã: surgência no pé da barragem de 1,3cm de diâmetro
  - 12 da manhã: diâmetro de 45cm e jorrando água em quase 1m de altura
  - 12:25: Ruptura da barragem
  - Surgência na fundação através da região do desemboque do vertedouro tulipa
  - Material saturado, confinado, altas pressões e erodível: Liquefação localizada
- Volume propagado: 4.200m^3/s
- Sem vítimas fatais
- Área recuperada e lago está na maior Comunidade privativa do Mississipi

Cases de Liquefação

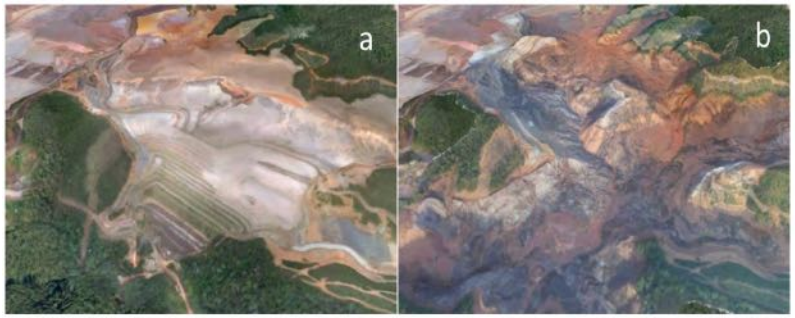
❖ Fundão, ruptura em 2015



- Ruptura em 5 de novembro – Minério de ferro
- Projeto era ter um Dique 1 para areias ficarem próximo barragem e lamas ao fundo, com comprimento de praia de 200m
  - Tapete drenate foi alterado e zona saturada ficou mais próxima Dique: surgências
  - 2012 comprimento de praia era de 60m
  - 2012 o alteamento foi apoiado sobre lama não adensada e na porção arenosa
  - 2014 o tapete drenante estava em sua capacidade máxima
  - Lamas comprimidas, sem drenar, com camada arenosa na parte mais baixa
  - Problemas em uma galeria que saturou ainda mais a região
  - Liquefação estática

Fonte das Fotos: Comitê de Especialistas

- 32 milhões de m^3 , afetando mais de 230 municípios
- 19 vítimas fatais, 400 famílias desabrigadas



Fonte das Fotos: Comitê de Especialistas

Cases de Liquefação

❖ Brumadinho, ruptura em 2019

- Ruptura em 25 de janeiro – Barragem B1 - Minério de ferro
- Altura de 87m
- 37 anos de operação com 10 alteamentos – Dique inicial não tinha tapete drenante e alteamentos posteriores só tinha em regiões de surgência
    - Recuo no terceiro alteamento moveu estrutura para cima do reservatório
    - Sem comprimento de praia adequado
- Fevereiro de 2017 – piezômetros em alerta
- Maio 2018 – pico de leitura piezométrica
- Junho 2018 e Dezembro de 2018 – leituras anômalas no radar
- Julho 2018: registros de carreamento de sólidos na saída do dreno DHP15, que já havia sido
- Setembro 2018: “lençóis empoleirados” no reservatório, o que justificou a recomendação de DHPs pela Auditoria – só contado nesse documento
- Setembro de 2018: Analises não drenadas com FS de 1,09
    - Parâmetros de 1983 + 3 sondagens em 1998
    - No nono alteamento, após 2003, verificou-se susceptibilidade de rupturas não drenadas e projetista recomendou novos ensaios – Não feitos

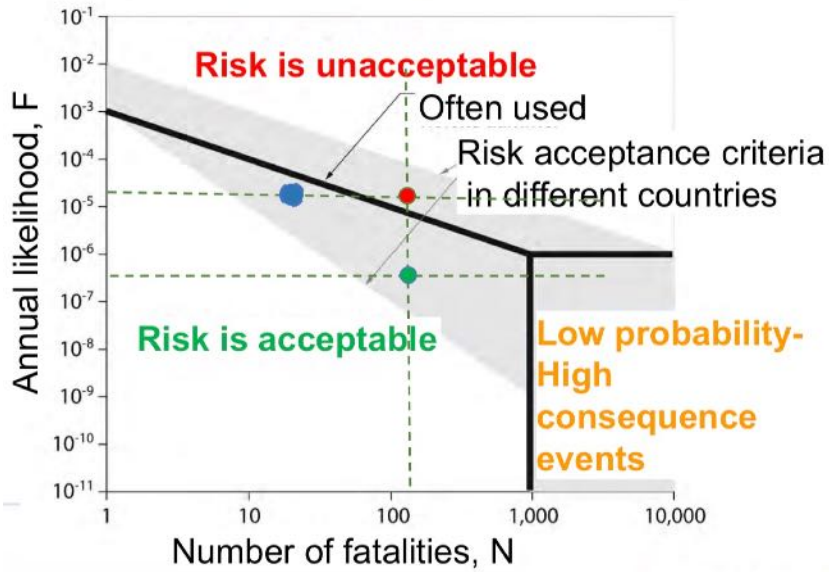
Cases de Liquefação

❖ Brumadinho, ruptura em 2019

- Setembro 2018 auditor mencionou evitar sismos e tráfego de veículos pesados, mas não em quanto de distância
- Setembro 2018 – marcos com deslocamento de 1m tidos como normais
- 10 de janeiro – piezômetros em emergência
    - PZ17C com leituras acima da cota do topo – Jorrando água, mas tido como normais
- ANM – "vídeo nos faz concluir que foi liquefação"
- Liquefação estática (creep) – Painel de Especialistas
    - Amostras acumulando deformação específica sob carga constante
    - Saturados, pesados, contrácteis, confinados e não drenados!

Fonte das Fotos: Painel de Especialistas

- Mais de 270 vítimas fatais
- Volume propagado: 9,7 milhões de m^3 (75% do reservatório)
- Acordo 4 fev 2021 – R$ 37 Bilhões

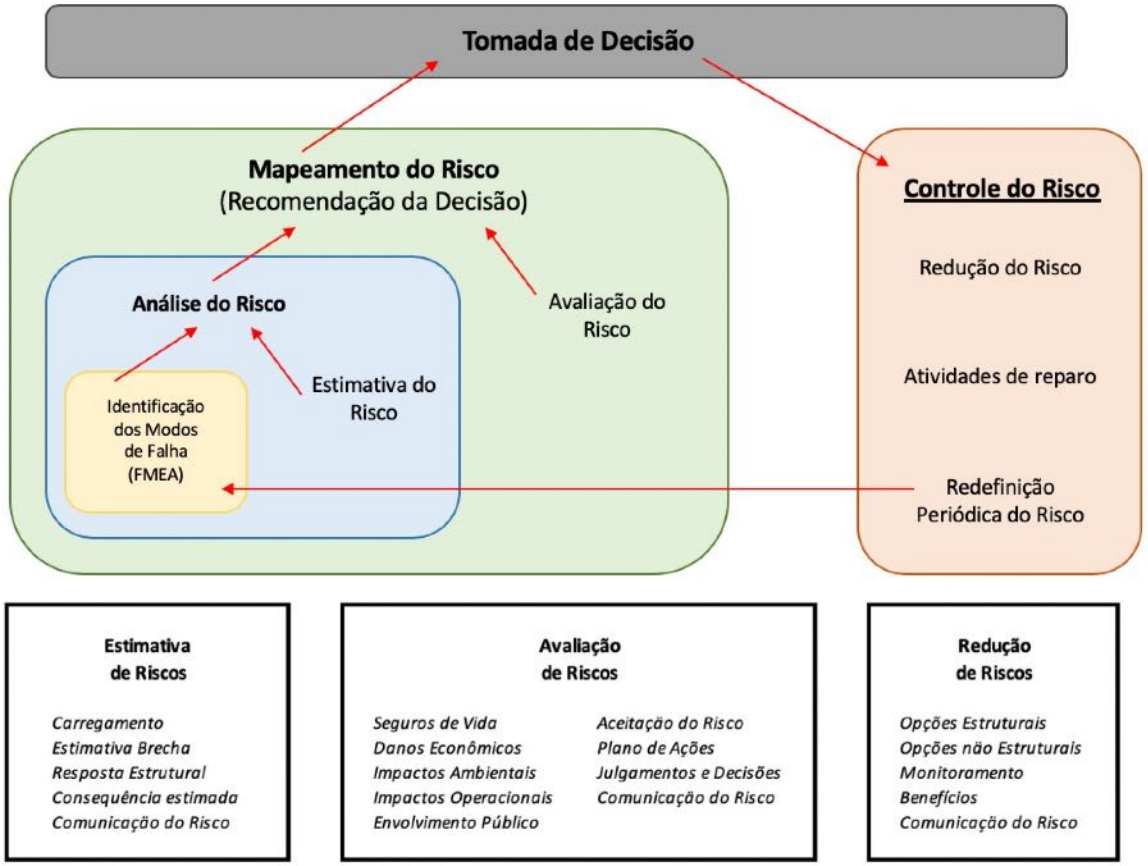


Fonte: Lacasse, 2019

❖ Metodologia de Análise

- ✓ Diagrama F-N é uma diretriz teórica para estimativa do número de fatalidades (N) em relação as probabilidades de falha de estruturas similares (F), em termos de probabilidade de ocorrência e consequências
- ✓ Critérios de aceitação de risco são diferentes em cada país e em cada empresa
- ✓ Há baixa probabilidade de falha com um grande número de fatalidades, o que não significa que é inexistente
- ✓ Risco de uma barragem romper nunca é zero e, estar vivo durante uma falha depende das condições de ocupação do vale de jusante e relações populacionais do quantitativo de homens, mulheres, crianças, idosos, deficientes, dentre outros
- ✓ Taxa de mortalidade da população, nas mais diversas causas, é elevada nos primeiros anos de vida (cerca de 1%), reduzindo entre os 5 e 15 anos para 10^{-4} e, retomando para 1% e até 10% entre os 20 e 80 anos

Gestão de Risco em Barragens



Gestão de Risco em Barragens – Método Baldi*

❖ Ficha de Inspeção

Modelo de Ficha disponível em "Manual para a elaboração de Plano de Ação Emergencial de Barragens Rafaela Baldi, 2017

**Método publicado no Livro*

Ficha de Inspeção de Segurança Regular da Barragem	Documento de referência:

Barragem: XXXXX

PARTICIPANTES DA INSPEÇÃO

Vistoriado por: _____ Cargo: _____

Vistoriado por: _____ Cargo: _____

Vistoriado por: _____ Cargo: _____

Vistoriado por: _____ Cargo: _____ DATA: _/_/___

Cota Atual do nível de água:

CRISTA DO MACIÇO	SITUAÇÃO								MAGNITUDE				NP
Erosões	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Rachaduras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Falha/furos no revestimento PEAD	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Afundamentos e buracos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Área de entorno/fixação da lona com presença de vegetação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Árvores e arbustos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Drenos de segurança com presença de água	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Ameaças de transbordamento da barragem	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Disposição do rejeito não uniforme ao longo da crista	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
A crista da barragem esta com forração em más condições	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Canaletas quebradas ou obstruídas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Canaletas necessitando limpeza (assoreada)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais.	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Sinais de movimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Régua danificada ou faltando	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Funcionamento anormal do sistema de evaporação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Más condições das estruturas de bombeamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Presença de animais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Falta ou deficiência de placas de aviso	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Falta ou deficiência de cercas de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Observações:													

❖ Lista de Anomalias

CÓDIGO	LOCALIZAÇÃO/ANOMALIA	SITUAÇÃO	MAGNITUDE (M)	NÍVEL DE PERIGO (NP)
A.1	INFRAESTRUTURA OPERACIONAL	Falta de documentação sobre barragem	M	1
A.8		Falta ou deficiência nas placas de aviso	P	0
B.1.1	TALUDE DE MONTANTE	Erosões	M	1
B.1.2		Escorregamentos	M	1
B.1.4		Rip-rap incompleto, destruído ou deslocado	M	1
B.1.6		Árvores e arbustos	P	1
B.1.9		Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	P	1
B.1.10		Sinais de movimento	M	1
B.2.4	COROAMENTO	Falha no revestimento	P	0
B.2.5		Afundamentos e buracos	P	1
B.2.6		Árvores e arbustos	M	1
B.2.9		Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	P	1
B.2.12		Ameaça de transbordamento da barragem	G	1
B.3.5	TALUDE DE JUSANTE	Falha na proteção vegetal	P	1
B.3.7		Árvores e arbustos	M	1
B.3.11		Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	P	1

❖ Probabilidade e Modos de Falha

MAGNITUDE (M)	NÍVEL DE PERIGO (NP)	CÓDIGO	PROBABILIDADE (PA)	MODO DE FALHA (MF)
I	0	D.3	0,10	Gestão
P	0	A.8	0,30	Gestão
P	0	B.2.4	0,30	Problemas Estruturais
P	1	B.1.6	0,40	Problemas Estruturais
P	1	B.1.9	0,40	Problemas Estruturais
P	1	B.2.5	0,40	Problemas Estruturais
P	1	B.2.9	0,40	Problemas Estruturais
P	1	B.3.5	0,40	Problemas Estruturais
P	1	B.3.11	0,40	Problemas Estruturais
P	1	C.1.2	0,40	Galgamento
P	1	C.2.3	0,40	Galgamento
P	1	C.3.3	0,40	Problemas Estruturais
P	1	C.3.9	0,40	Problemas Estruturais
P	1	C.4.5	0,40	Problemas Estruturais
P	1	C.4.6	0,40	Problemas Estruturais
M	1	A.1	0,65	Problemas Estruturais
M	1	B.1.1	0,65	Piping

❖ Árvore de eventos

REGIÃO DA BARRAGEM		ANOMALIA		MODO DE FALHA (MF)	PROBABILIDADE DA INSPEÇÃO (PI)												RISCO PROBABILÍSTICO (RP)
					EVENTO 1	PROBABILIDADE PI1	EVENTO 2	PROBABILIDADE PI2	EVENTO 3	PROBABILIDADE PI3	EVENTO 4	PROBABILIDADE PI4	EVENTO 5	PROBABILIDADE PI5	EVENTO 6	PROBABILIDADE PI6	
Barragem	Talude de Montante	Erosões	Probabilidade da anomalia (PA)														
(B)	(B.1)	(B.1.1)	0,65														
				Piping	Ocorrem erosões superficiais ou na proteção vegetal 0,1	0,065	Sulcos erosivos isolados 0,6	0,039	Desenvolvimento progressivo das erosões 0,8	0,0312	Presença de água 0,1	0,00312	Carreamento de sedimentos 0,1	0,000312	Instabilidade Global 0,5	0,000156	0,000156
															Instabilidade Local 0,5		0,000156
													Sem carreamento de sedimentos 0,9				0,002808
											Sem presença de água 0,9						0,02808
									Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2								0,0078
							Sulcos erosivos múltiplos 0,4	0,026	Desenvolvimento progressivo das erosões 0,8	0,0208	Presença de água 0,1	0,00208	Carreamento de sedimentos 0,1	0,000208	Instabilidade Global 0,5	0,000104	0,000104
															Instabilidade Local 0,5		0,000104
													Sem carreamento de sedimentos 0,9				0,001872
											Sem presença de água 0,9						0,01872
									Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2								0,0052
															Instabilidade Global	0,001404	0,001404

❖ Descritivo probabilístico

	RP	CÓDIGO	DESCRITIVO PROBABILÍSTICO DA ANOMALIA (DPR)
1	0,25272	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos isolados em profundidade, ou abaixo da proteção
2	0,16848	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos múltiplos em profundidade, ou abaixo da proteção, gerando estabilidade local
3	0,0702	B.1.1	Erosões no talude de montante em sulcos erosivos isolados em profundidade, ou abaixo da proteção
4	0,0468	B.1.1	Erosões no talude de montante em sulcos erosivos múltiplos em profundidade, ou abaixo da proteção
5	0,02808	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos isolados superficiais, ou na proteção
6	0,025272	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água e carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos isolados em profundidade, ou abaixo da proteção
7	0,01872	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos múltiplos superficiais, ou na proteção
8	0,016848	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água e carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos múltiplos em profundidade, ou abaixo da proteção
9	0,0078	B.1.1	Erosões no talude de montante em sulcos erosivos isolados superficiais, ou na proteção
10	0,0052	B.1.1	Erosões no talude de montante em sulcos erosivos múltiplos superficiais, ou na proteção

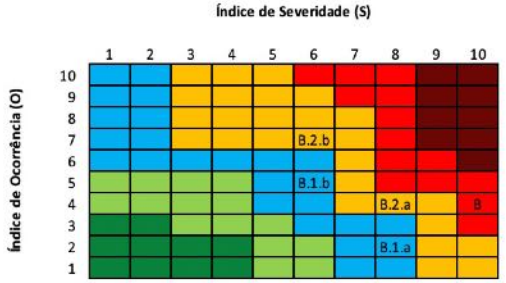
❖ Análise de Falha - FMEA

Índice de Ocorrência (O)	Probabilidade de Ocorrência (eventos por ano)
1	Improvável (≤0,01%)
2	Remota (>0,01 e≤0,1%)
3	Insignificante (>0,1 e≤1%)
4	Ocasional (>1 e≤10%)
5	Frequente (>10 e≤25%)
6	Alto (>25 e≤40%)
7	Elevado (>40 e≤60%)
8	Esperado (>60 e≤80%)
9	Provável (>80 e≤90%)
10	Muito Provável (>90 e≤100%)

Índice de Detecção (D)	Probabilidade de Detecção
1	Muito provável
2	Elevada
3	Alta
4	Moderadamente Alta
5	Ocasional
6	Baixa
7	Muito baixa
8	Remota
9	Muito Remota
10	Improvável

Índice de Severidade (S)	Danos e Impactos
1	Sem danos
2	Danos isolados de pequena magnitude
3	Danos individuais reversíveis a curto prazo
4	Danos individuais reversíveis a longo prazo
5	Danos individuais de grande magnitude
6	Danos coletivos reversíveis a curto prazo
7	Danos coletivos reversíveis a longo prazo
8	Danos coletivos de grande magnitude
9	Danos individuais irreversíveis
10	Danos coletivos irreversíveis

❖ Análise de Falha - FMEA



ESTRUTURA		FUNÇÃO	FALHA	EFEITO FINAL	(S)	CAUSA	(O)	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	(D)	RPN
B. Barragem		a.Conter rejeitos	Insuficiente capacidade de conter rejeitos	Instabilidade Global da Barragem	10	Inadequação do projeto e/ou construção e/ou manutenção	4	Adequação de projeto	Prevenção	3	120
								Inspeção Visual e Instrumentação	Detecção		
	B.1 Talude de Montante	a.Reter rejeitos	Instabilidade devido a movimentos de massa	Redução do volume do maciço e perda de massa, com consequente redução da estanqueidade do sistema e Instabilidade Global	8	Alteração físico-química dos sólidos e/ou deficiente ligação entre as camadas de compactação	2	Adequação de projeto	Prevenção	1	16
								Inspeção Visual e Instrumentação	Detecção		
		b.Prover estabilidade mecânica	Deformação excessiva	Redução do FS em função de erosão superficial, com Instabilidade Local	6	Deficiente ligação entre as camadas de compactação	5	Adequação de projeto	Prevenção	2	60
								Inspeção Visual e Instrumentação	Detecção		
	B.2										

Gestão de Risco em Barragens

- O que avaliar (pontos mais importantes)
  - ✓ Condições detalhadas da fundação
  - ✓ Altura máxima e inclinação
  - ✓ Taxa de deposição e propriedades físico-químicas dos rejeitos
  - ✓ Previsão adequada da infiltração
  - ✓ Influências sísmicas
  - ✓ Controle Hidrológico, principalmente para evitar galgamento e elevação da freática

- O que monitorar
  - ✓ Treinamento de equipe – equipe precisa ser técnica e entender de Geotecnia
  - ✓ Estreira relação com projetista e consultores e, com a academia
  - ✓ Planejamento ciclos de disposição
  - ✓ Controle praia de rejeitos
  - ✓ Geometria da barragem
  - ✓ Planejamento de manutenções
  - ✓ Rotinas de inspeção, controle de instrumentação, análises de estabilidade (não é saber usar programa)
  - ✓ Gestão de Risco e Falha - Urgente: abandonar esses F.S. pré determinados
  - ✓ PAE e Planos de Contingência
  - ✓ Lições aprendidas

Rupturas de barragens de rejeitos e relações com a gestão de segurança de barragens

OBRIGADA!

Rafaela Baldí Fernandes
(31) 98477-8791
rafaela@institutobrasil.org