

# Seminário Técnico Internacional sobre Barragens de Rejeitos e o Futuro da Mineração em Minas Gerais

International Technical Seminar Tailings Dams and the Future of Mining in Minas Gerais State

COORDINATION



**IBRAM**  
INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO  
Brazilian Mining Association  
Closes Mines in Brazil

SUPPORT



GOVERNO  
DO ESTADO DE  
MINAS GERAIS



BARRAGENS DE REJEITO:  
PROJETO, CONSTRUÇÃO E  
OPERAÇÃO  
17/04/2019

BARRAGENS SÃO ESTRUTURAS DESTINADA A RETENÇÃO DE ALGUM MATERIAL E SÃO E JÁ FORAM CONSTRUIDAS DESDE HÁ MUITOS ANOS COM OS MAIS DIVERSOS MATERIAS.

QUANDO SE TRATAM DE BARRAGENS DE TERRA, OU ENROCAMENTOS PARA CONTENÇÃO DE ÁGUA, APLICAM-SE OS CONHECIMENTOS DA MECÂNICA DOS SOLOS E DOS ENROCAMENTOS E NA ANÁLISE DAS SUAS FUNDAÇÕES A GEOLOGIA DE ENGENHARIA.

OS MESMOS CONCEITOS PODEM E DEVEM SER APLICADOS QUANDO SE TRATAM DE BARRAGENS DE RETENÇÃO DE REJEITOS.

UM TIPO ALGO CURIOSOS DE BARRAGEM É A DESTINADA A RETENÇÃO DE BLOCOS DE ROCHA, COMO É O CASO DA B-5. FOTO.



FIGURA 1 – Vista de Jusante da Barragem B-5 com função de barragem redutora, deixando passar a água

AS DIFERENÇAS PRINCIPAIS ENTRE AS DUAS BARRAGENS SÃO:

AS BARRAGENS PARA RETENÇÃO DE ÁGUA, NA GRANDE MAIORIA DOS CASOS SÃO CONSTRUIDAS DE UMA VEZ ATÉ SUA MÁXIMA ALTURA.

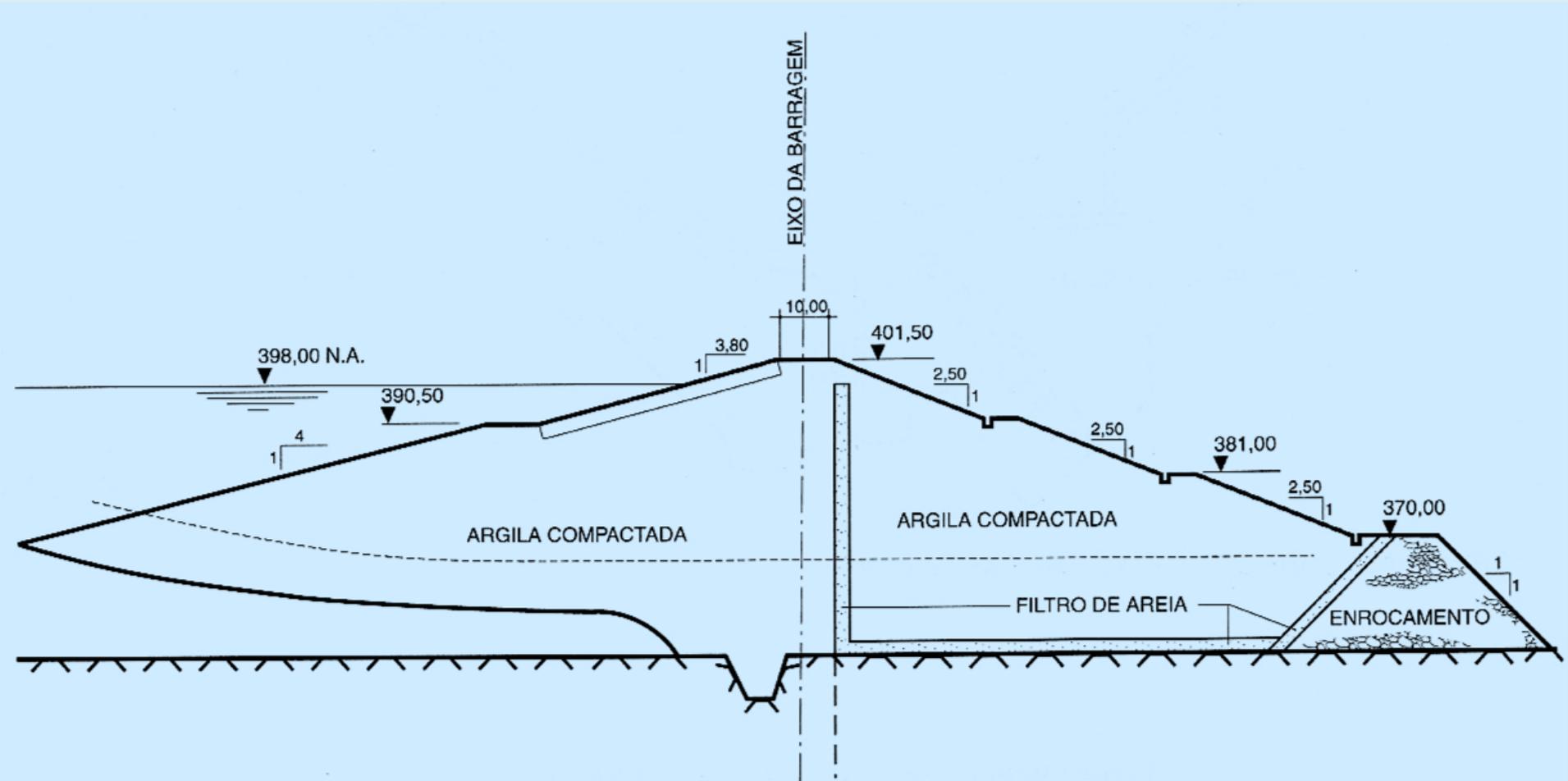
TIPOS DE BARRAGENS:

BARRAGEM DE TERRA – EX.: BAR. TERZAGHI

BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM NÚCLEO DE SOLO – Ex.:  
BARRAGEM ARROJADO LISBOA.

BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO –  
EX.: SATURNINO DE BRITO E BARRAGEM BARRA GRANDE.

BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM NÚCLEO DE ASFALTO –  
EX.: BARRAGEM



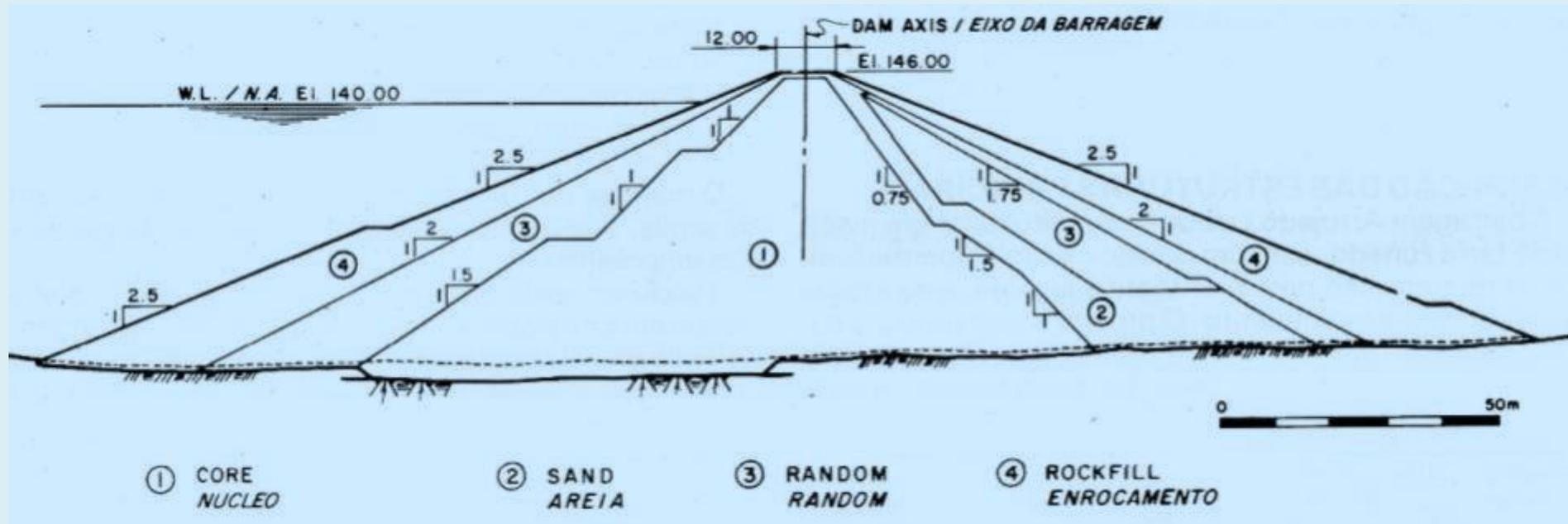
1947-1948 – Barragem do Vigário (Terzaghi) (Sherard *et al.*, 1963)  
**Figura 9.9**

*Karl Terzaghi com  
Otelo Machado e  
Casemiro Munarski  
em sua primeira  
visita técnica no  
Paraná em 1947.  
Participaram ainda  
deste evento Milton  
Vargas e Samuel  
Chamecki*

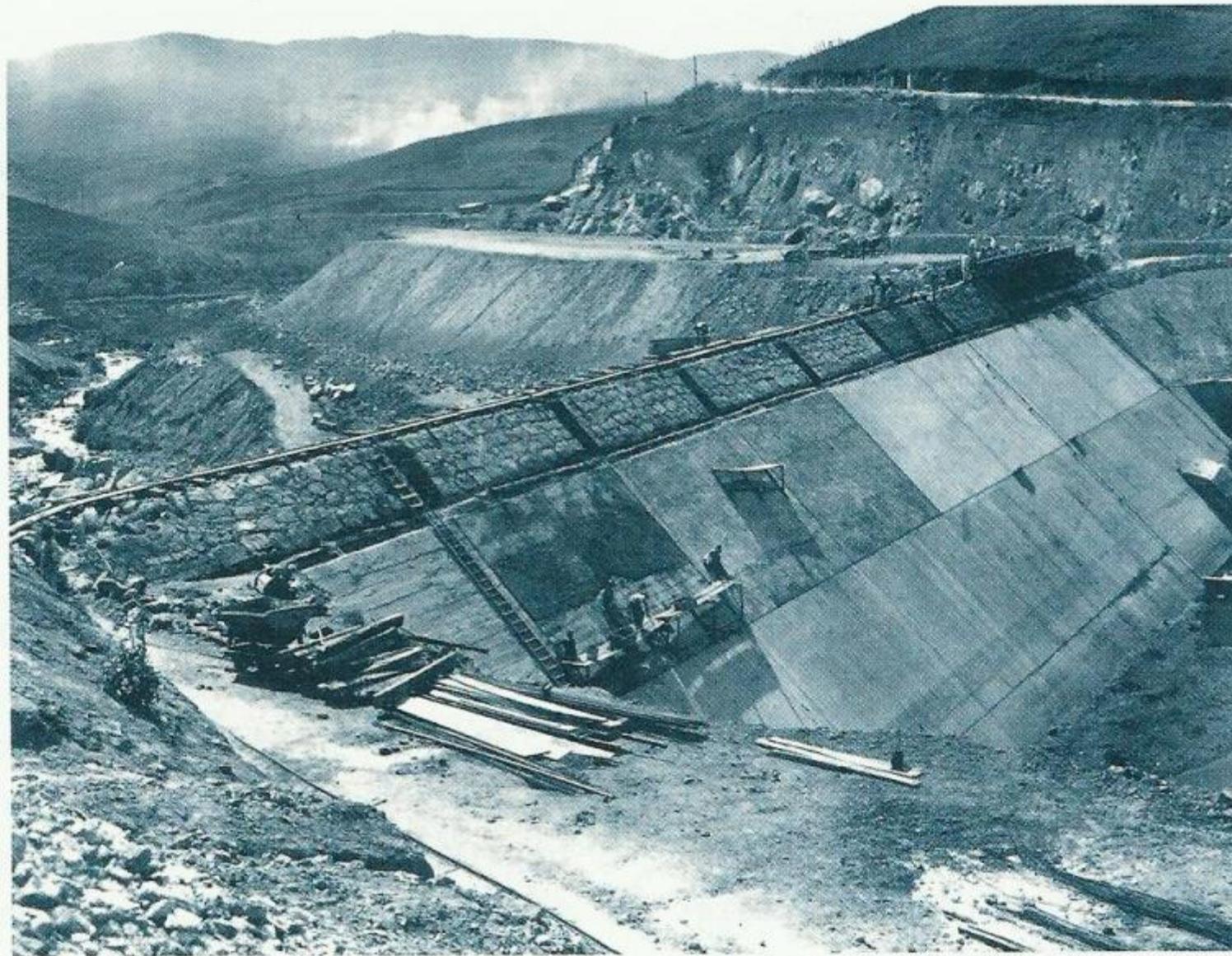
*Karl Terzaghi with  
Otelo Machado and  
Casemiro Munarski  
in his first technical  
visit to Paraná  
in 1947. Milton  
Vargas and Samuel  
Chamecki also took  
part in this event*



## Barragem de Arrojado Lisboa



Secção transversal no leito do rio



**FIG. 1.1** *Barragem Saturnino de Brito, 1933*

*Saturnino de Brito Dam, 1933 (Brazil). Courtesy of Eng. Cícero M. Moraes*



A espessura da laje foi determinada pela fórmula:

$$e = 0,30 + 0,002 H \text{ (m)},$$

para  $H$  até 100 m

$$e = 0,005 H \text{ (m)},$$

para  $H$  maior que 100 m

The slab width was determined with the formula

$$e = 0.30 + 0.002H \text{ (m)}$$

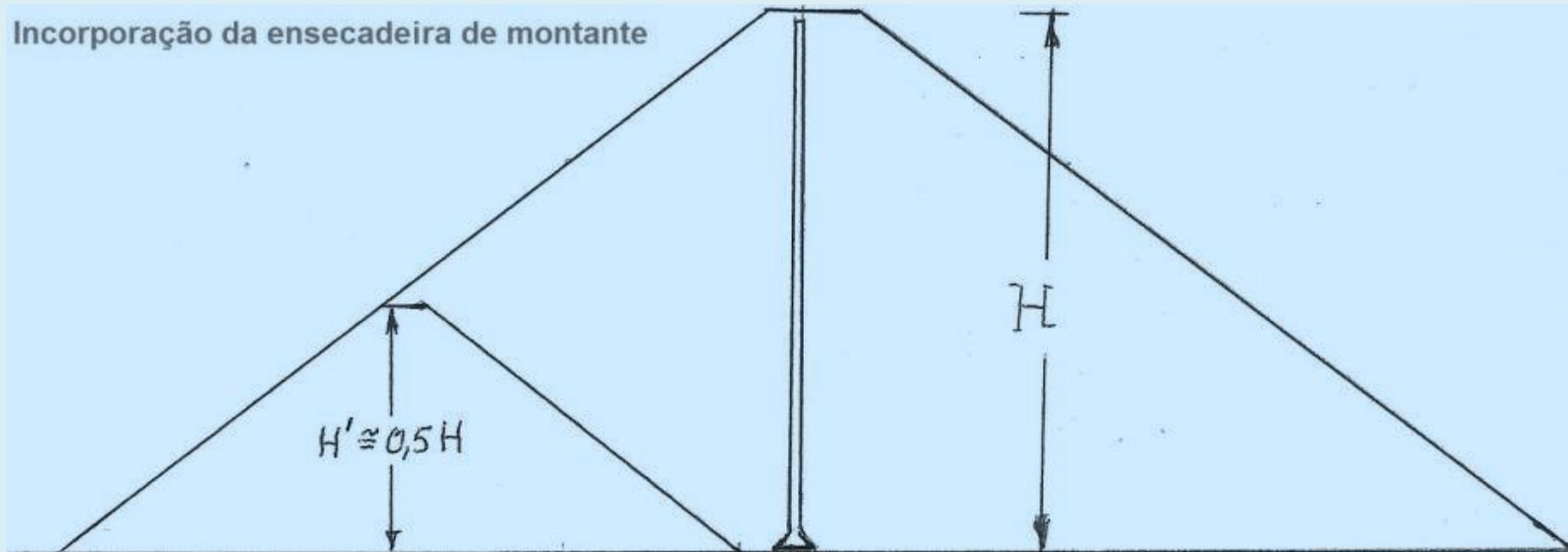
for  $H$  up to 100 m

$$e = 0.005H \text{ (m)}$$

for  $H \geq 100 \text{ m}$



**FIG. 3.50** Barragem de Barra Grande  
Barra Grande Dam



SEÇÃO TÍPICA DE UMA BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM NÚCLEO DE ASFALTO.  
NO BRASIL JÁ FORAM CONSTRUÍDAS DUAS DESSAS BARRAGENS COM COMPORTAMENTO  
MUITO SATISFATÓRIO.



Transição fina

Transição grossa

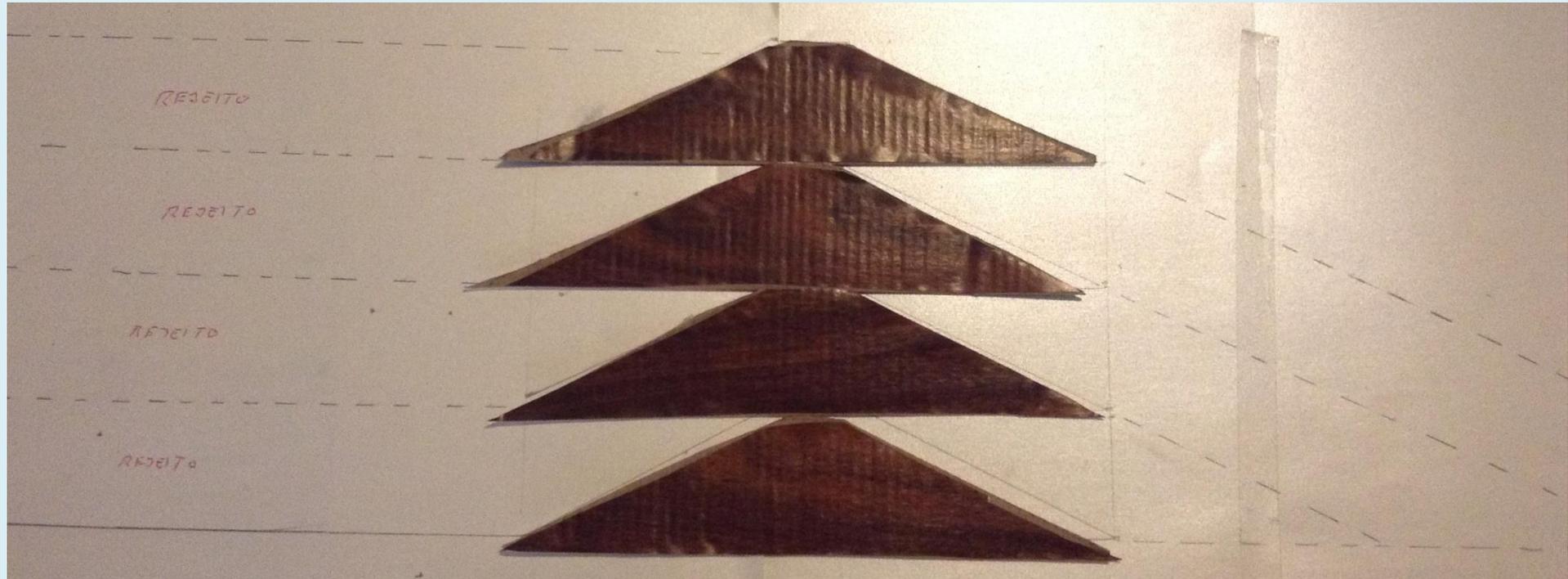
Enrocamento fino



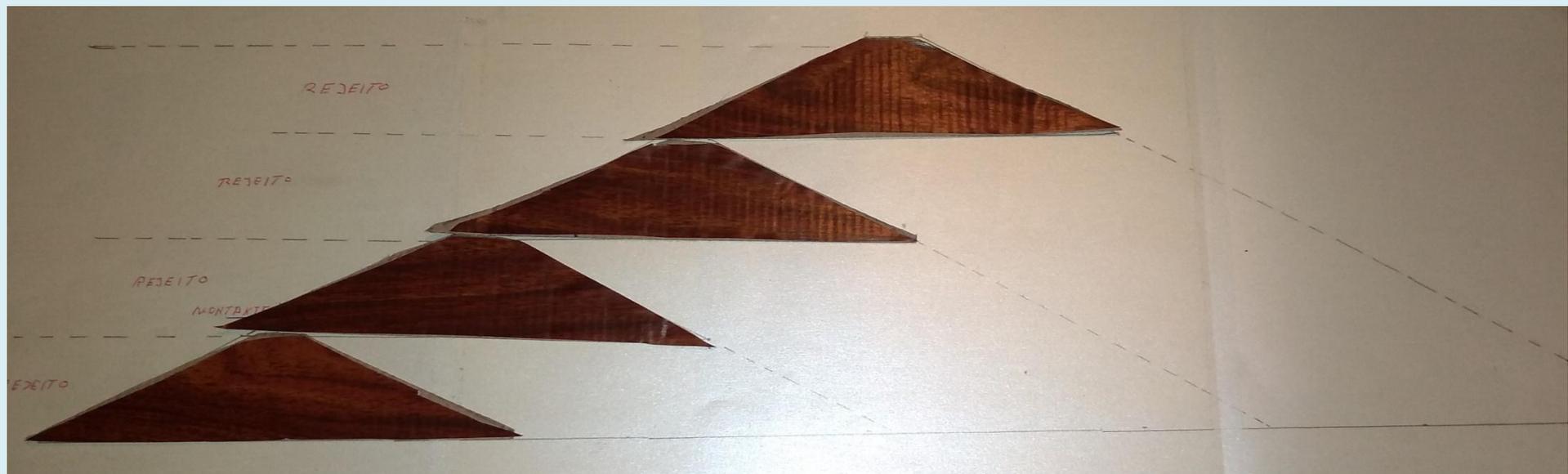
AS BARRAGENS PARA CONTENÇÃO DE REJEITOS SÃO CONSTRUIDAS POR ETAPAS À PROPORÇÃO QUE A MINERAÇÃO PROGRIDE. HÁ 3 TIPOS BÁSICOS DESTAS BARRAGENS EM RELAÇÃO AOS ALTEAMENTOS.



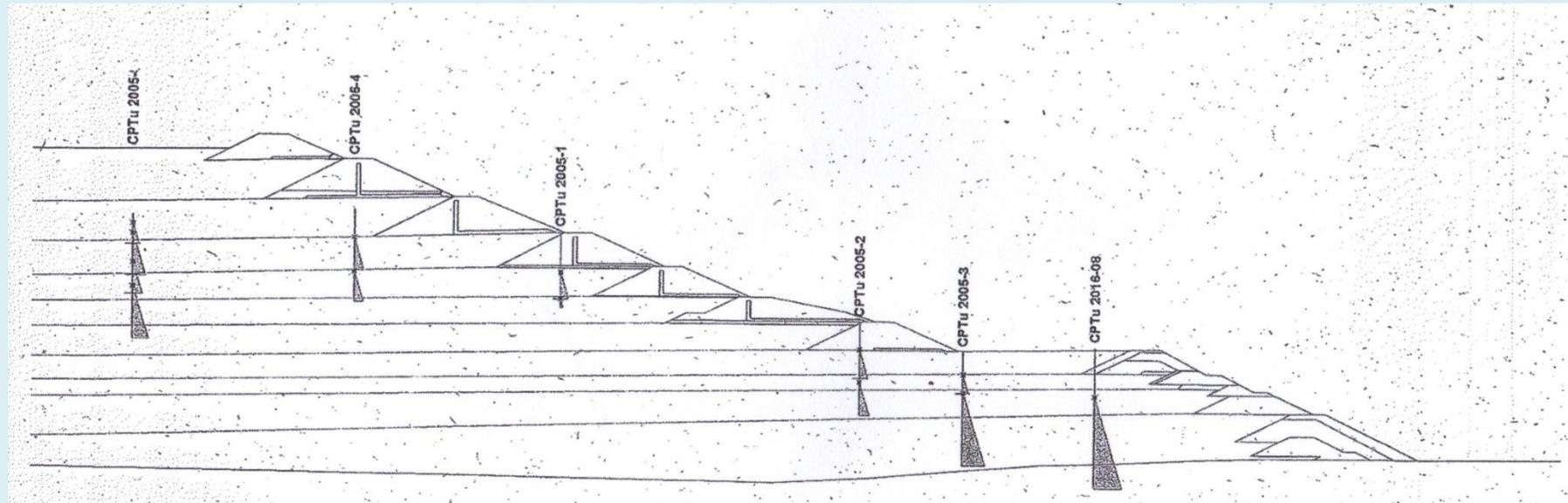
ALTEAMENTO PARA MONTANTE



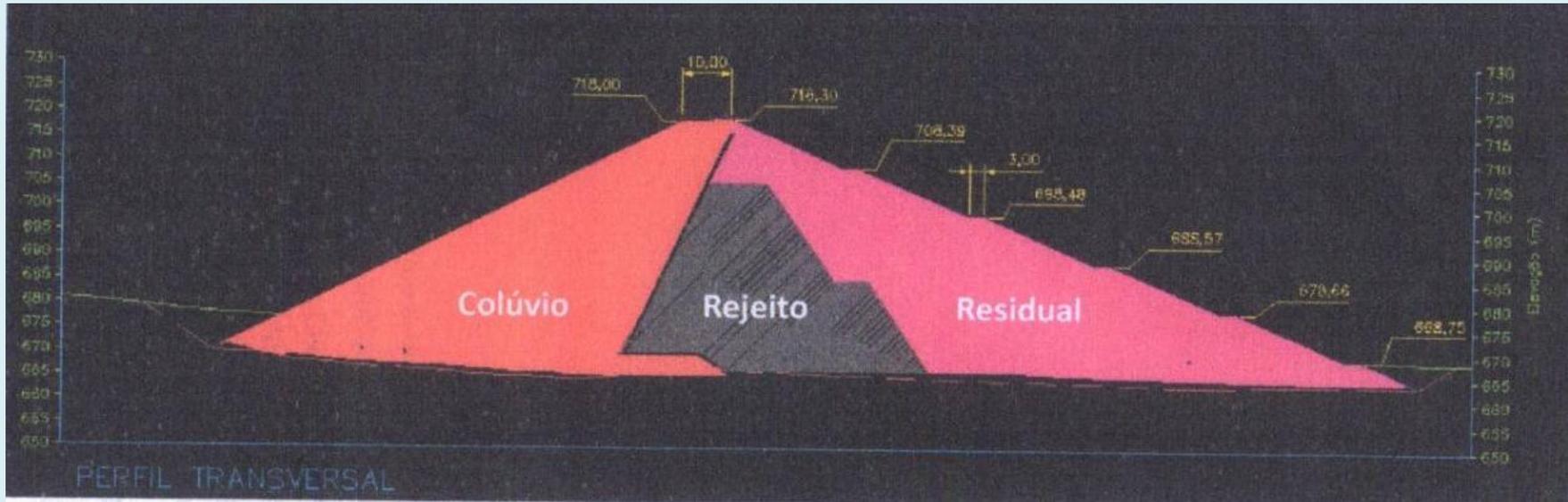
ALTEAMENTO PELA LINHA DE CENTRO



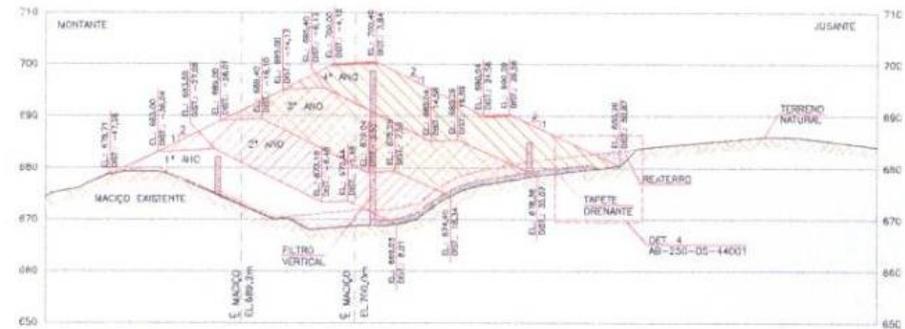
ALTEAMENTO PARA JUSANTE



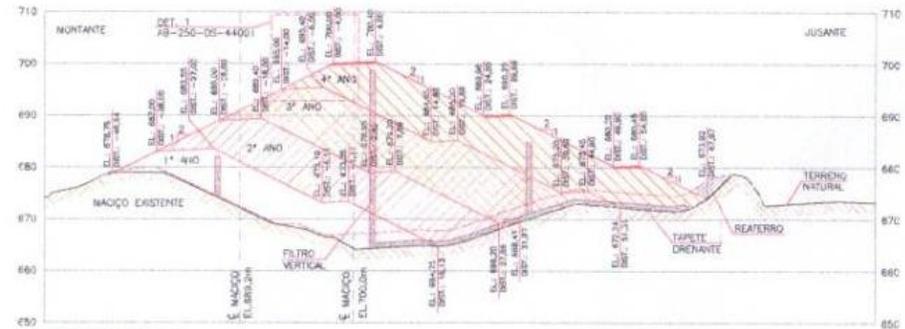
ALTEAMENTO PARA MONTANTE DE UMA BARRAGEM DE REJEITO



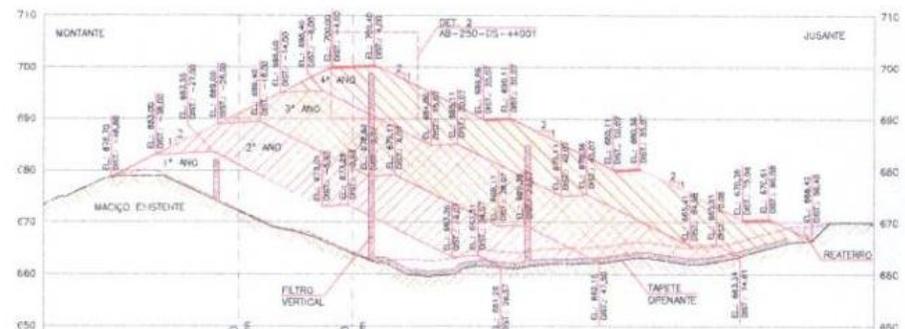
DIQUE DE PARTIDA DE UMA BARRAGEM DE REJEITO ALTEADA PARA JUSANTE



SEÇÃO ESTACA 20+6.00  
ESCALA: 1:500



SEÇÃO ESTACA 21+0.00  
ESCALA: 1:500



SEÇÃO ESTACA 22+0.00  
ESCALA: 1:500

3 SEÇÕES DE ALTEAMENTO DE UMA BARRAGEM DE REJEITO PARA JUSANTE

SEGURANÇA DAS BARRAGENS DE ÁGUA E DE  
REJEITO  
ACIDENTES

A SEGURANÇA DAS BARRAGENS DE ÁGUA, DEPENDE DA RESISTENCIA DOS MATERIAS USADOS NA CONSTRUÇÃO, E PRINCIPALMENTE DO CONTROLE EFETIVO DA ÁGUA QUE PERCOLA,OU PASSA PELOS MATERIAIS DA BARRAGEM E DE SUA FUNDAÇÃO E OMBREIRAS.

O MESMO PRINCÍPIO DE CONTROLE DE FLUXO DEVE SER OBEDECIDO NAS BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITO.

A FALTA DESSE CONTROLE TEM RESULTADO EM ACIDENTES E RUPTURAS DE AMBOS OS TIPOS DE BARRAGEM, COMO SE VERÁ A SEGUIR.

# CONTROLE DO FLUXO

A.CASAGRANDE 1936.

DIVIDA UMA BARRAGEM AO “MEIO” E DO LADO DE MONTANTE FAÇA TUDO PARA IMPEDIR QUE A ÁGUA PASSE NÃO SÓ PELA BARRAGEM, MAS TAMBÉM PELA SUA FUNDAÇÃO – VEDAÇÃO.

MAS APARTIR DO “MEIO” CRIE TODAS AS CONDIÇÕES PARA A ÁGUA SAIR, MAS SEMPRE SOB CONTROLE, OU SEJA POR ONDE VOCÊ QUEIRA – DRENAGEM.

AS VEDAÇÕES CONSTITUEM O SISTEMA DE VEDAÇÃO E RECORRE A MATERIAIS POUCO PERMEÁVEIS TAIS COMO SOLO COMPACTADO, CONCRETO, ASFALTO.

AS DRENAGENS RECORREM A MATERIAIS POROSOS COMO AS AREIAS, BRITAS, PEDREGULHO, BLOCOS DE ROCHA E CONSTITUEM O SISTEMA DE DRENAGEM.

# FEIÇÕES CRÍTICAS

TANTO EM RELAÇÃO À VEDAÇÃO COMO EM  
RELAÇÃO À DRENAGEM HÁ DUAS FEIÇÕES  
CRÍTICAS: AS INTERFACES ENTRE DOIS  
MATERIAIS, E AS FRATURAS.

INTERFACES: SOLO – FUNDAÇÃO, SOLO –  
CONCRETO, SOLO-OMBREIRA, SOLO- AREIA,  
CASCALHO-BRITA, ENROCAMENTO.

FRATURAS : TRINCAS QUE VENHAM A OCORRER NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E FRATURAS PRÉ EXISTENTES OU INDUZIDAS DAS ROCHAS DA FUNDAÇÃO.

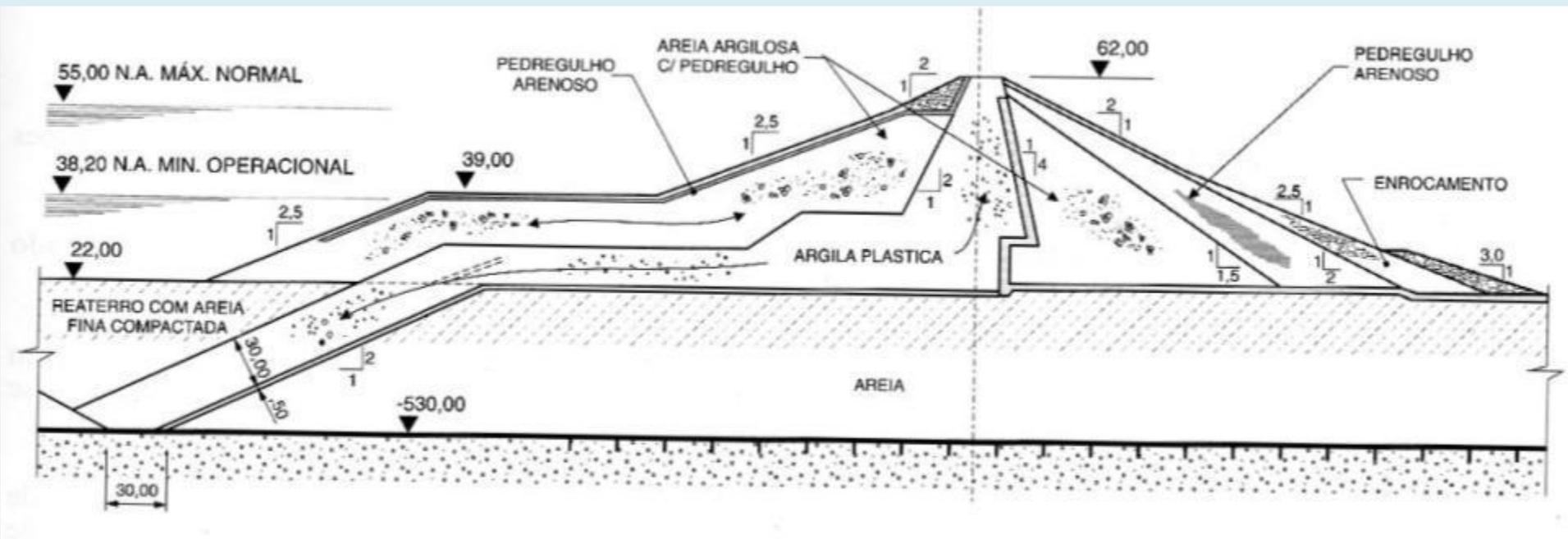
EM BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM NÚCLEO AS TRINCAS PODEM OCORRER DEVIDO A DIFERENÇA DE COMPRESSIBILIDADE ENTRE OS MATERIAIS DO NÚCLEO, TRANSIÇÕES E ENROCAMENTOS.

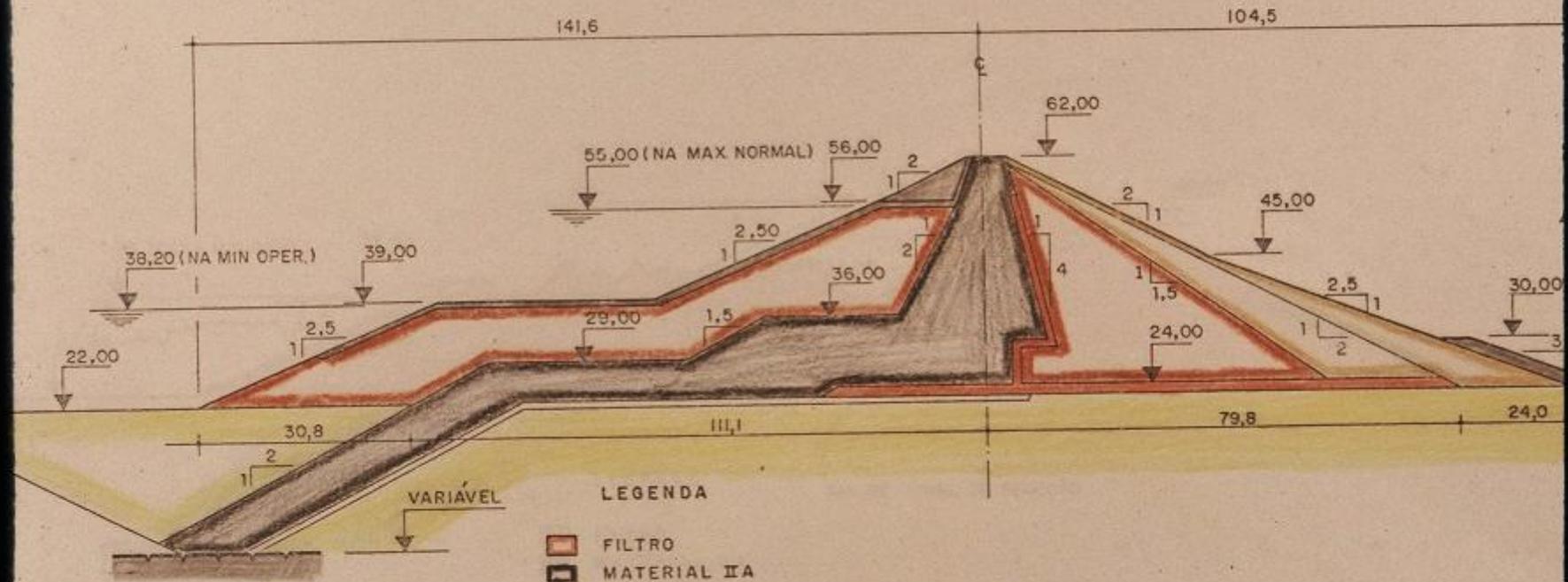
MECANISMOS OBSERVADOS NOS ACIDENTES  
COM BARRAGENS DE RETENÇÃO DE ÁGUA E  
RETENÇÃO DE REJEITOS.

DEFICIENCIA DA RESISTENCIA AO CISALHAMENTO  
DO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO OU DA  
FUNDAÇÃO.

EXEMPLO:

BARRAGEM QUE ROMPEU DURANTE A  
CONSTRUÇÃO POR DEFICIENCIA DE RESISTENCIA  
DOS MATERIAIS.

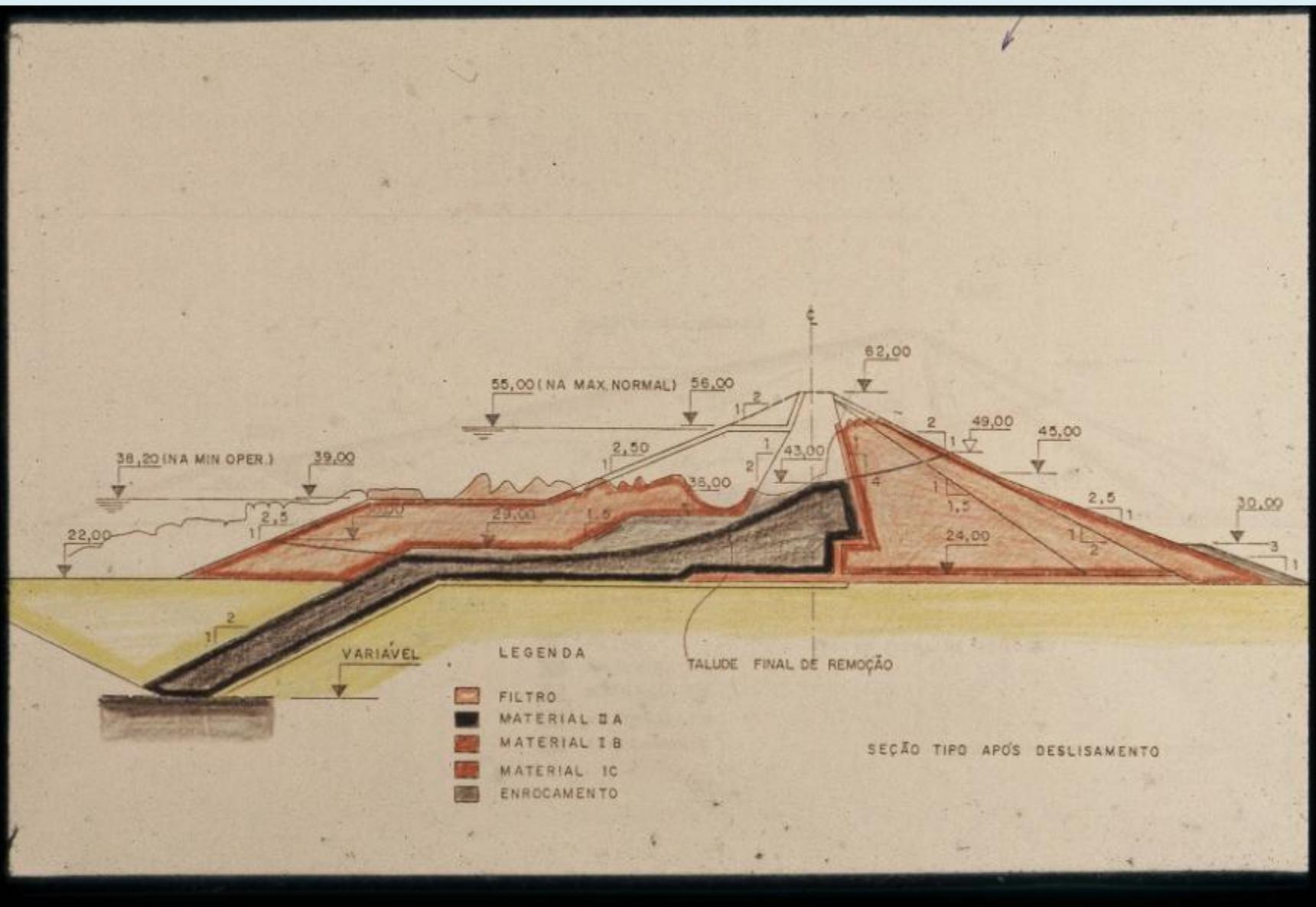




LEGENDA

- FILTRO
- MATERIAL IA
- MATERIAL IB
- MATERIAL IC
- ENROCAMENTO

SEÇÃO TIPO ALTERADA CONFORME APROVADA  
E EM CONSTRUÇÃO



RUPTURA DA BARRAGEM DE DEVIDO AO FLUXO DA ÁGUA PELO ENROCAMENTO.

O TALUDE DE JUSANTE DE UMA BARRAGEM DE ENROCAMENTO CONSTITUIDO POR BLOCOS DE ROCHA SE ASSEMELHA A UMA PILHA DE LARANJAS.

SE O FLUXO DE ÁGUA FOR CAPAZ DE DESLOCAR A PRIMEIRA PEDRA, É COMO TIRAR UMA LARANJA DO PÉ DA PILHA. VEM TUDO ABAIXO.



O FLUXO DA ÁGUA POR UMA INTERFACE SEJA COM A PRÓPRIA OMBREIRA OU COM UMA ESTRUTURA DE CONCRETO PODE CAUSAR ABERTURA DE UMA BRECHA E CONSEQUENTEMENTE A RUPTURA DA BARRAGEM.



## BARRAGEM - VERTEDOURO





05/01/2008 – Vazamento de água com finos junto ao muro no local onde o gabião foi removido.

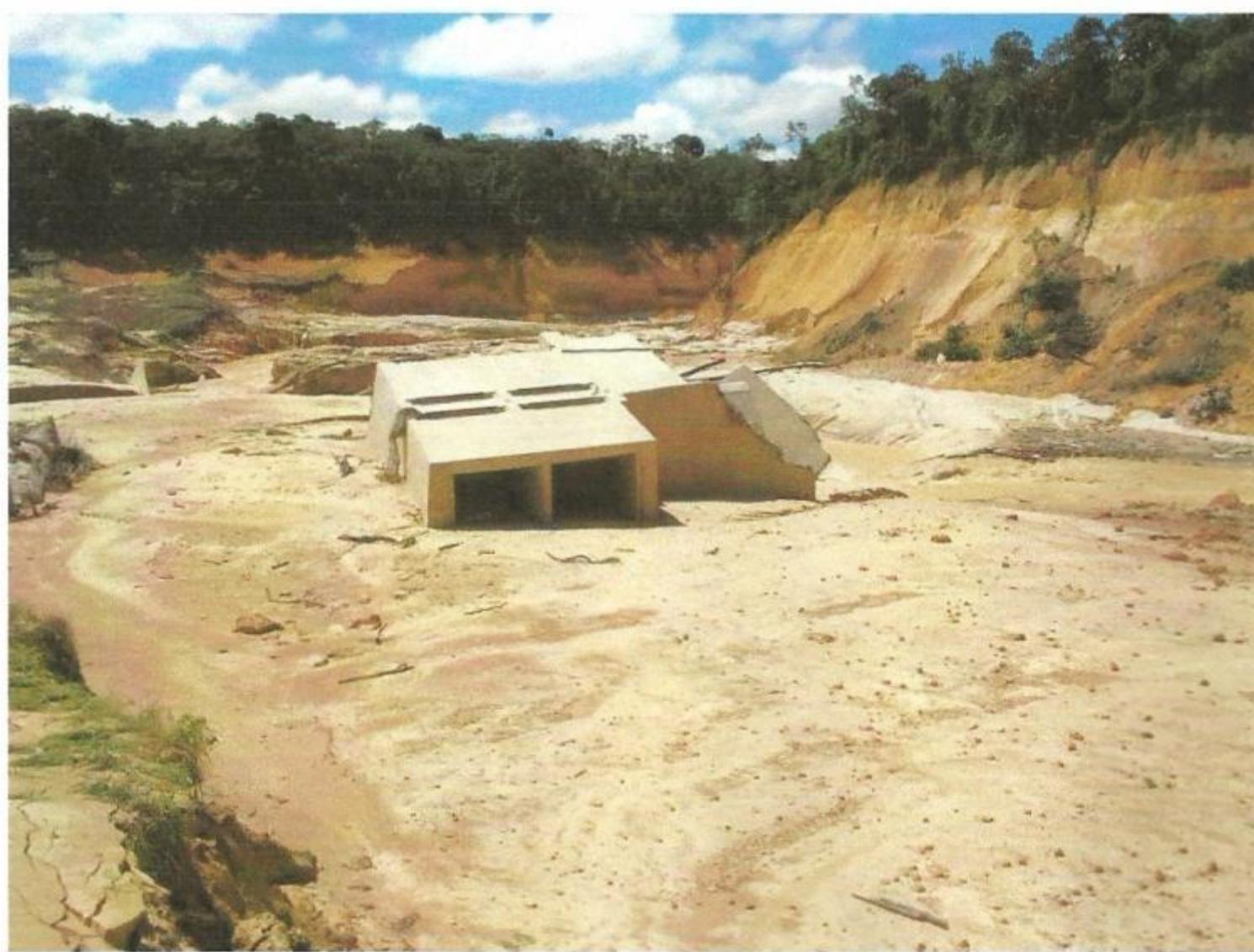


05/01/2008 – Detalhe da surgência de água com finos

## BARRAGEM – LIQUEFAÇÃO FUNDAÇÃO -FORMAÇÃO DA BRECHA



## BARRAGEM – ESCOMBROS DO VERTEDOR E TOMADA DE ÁGUA



# FLUXO PELA FUNDAÇÃO E PELAS OMBREIRAS

## FLUXO PELA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM



# FLUXO PELA OMBREIRA



# FLUXO PELA OMBREIRA



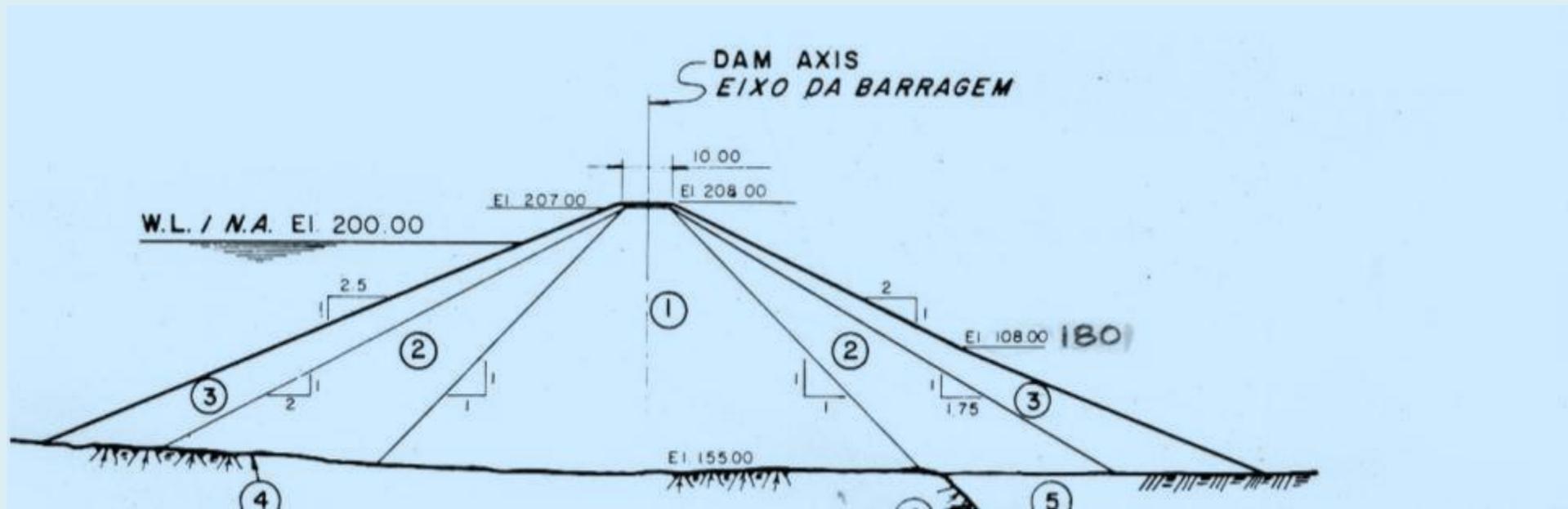
# GALGAMENTO

NO CASO DE UMA CHEIA EXCEPCIONAL SE A VAZÃO EXCEDER A CAPACIDADE DE ESCOAMENTO DO VERTEDOR PODE OCORRER O GALGAMENTO DA BARRAGEM.

E NA MAIORIA DOS CASOS A BARRAGEM ROMPE PORQUE SUBMETIDA A UMA SOLICITAÇÃO PARA QUAL NÃO FOI PROJETADA.



**Barragem de Orós**



**Fig. 3 – Seção transversal à barragem**

**Barragem Orós – junho 1959 – março 1960**

**Em 26 março – transbordou**

**11/01/1961 – inaugurada pelo Jucelino**



**Vista da Barragem de Orós durante o galgamento**



BARRAGEM ARNEIROZ II

OS ACIDENTES NAS BARRAGENS DE REJEITO PODEM SER DA MESMA NATUREZA DOS ACIDENTES QUE OCORREM EM BARRAGENS DE RETENÇÃO DE ÁGUA.

MAS A UM FATO NOVO – A LIQUEFAÇÃO.

NAS BARRAGENS DE RETENÇÃO DE REJEITOS, O MATERIAL RETIDO ( QUE PODE SER UMA AREIA FINA MISTURADA COM ÁGUA, NO CASO DA MINERAÇÃO DE FERRO), O CONTROLE DO FLUXO DA ÁGUA PELA BARRAGEM E PELAS FUNDAÇÕES TAMBÉM É FUNDAMENTAL, MAS EXISTE UM FATOR NOVO QUE SE REFERE AO QUE SE DOMINOU LIQUEFAÇÃO, OU SEJA, UMA MUDANÇA DE ESTADO DO REJEITO.

O REJEITO É LANÇADO COM ÁGUA, VAI FORMANDO UMA PRAIA COM ~ 1% DE INCLINAÇÃO PARA MONTANTE, E PASSA AO ESTADO SOLIDO.

FENÔMENO QUE PODE OCORRER NOS MATERIAIS QUANDO AS SUAS PARTÍCULAS SÓLIDAS PERDEM O CONTATO ENTRE SI.

E QUANDO AS PARTÍCULAS SÓLIDAS PERDEM O CONTATO, A RESISTÊNCIAS AO CISALHAMENTO CAI A ZERO, E O MATERIAL FLUE.

DE QUE MATERIAIS ESTAMOS FALANDO?

BASICAMENTE DE MATERIAIS SATURADOS OU SEJAM MATERIAIS COMPOSTOS DE GRÃOS E/OU PARTÍCULAS SÓLIDAS CUJOS ESPAÇOS ENTRE ESTES GRÃOS OU PARTÍCULAS, CHAMADOS VAZIOS, ESTÃO PREENCHIDOS COM UM LIQUIDO.

CONDIÇÕES QUE FACILITAM A OCORRÊNCIA  
DA LIQUEFAÇÃO:

BAIXA DENSIDADE DO MATERIAL, OU SEJA, AS  
PARTÍCULAS OU GRÃOS DO MATERIAL SÃO  
BASTANTE DISPERSOS E COM CONTATOS  
REDUZIDOS.

ENSAIOS DE LIQUEFAÇÃO PROCEDIDOS EM  
AREIAS QUE OCORRERAM NA FUNDAÇÃO DE  
BARRAGENS MOSTRARAM QUE A  
LIQUEFAÇÃO OCORREU SEMPRE NAS AREIAS  
CUJA COMPACIDADE RELATIVA ERA INFERIOR  
A .....

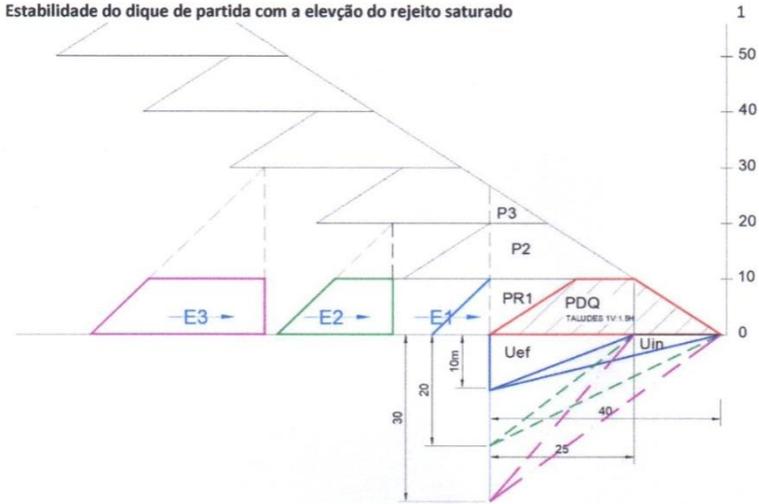
A SEGUNDA CAUSA QUE PROVOCA A LIQUEFAÇÃO TEM SIDO ATRIBUIDA A OCORRÊNCIA DE UMA ALTERAÇÃO NAS CONDIÇÕES DAS TENSÕES HORIZONTAIS , CAUSADA POR UM SISMO, POR UMA DETONAÇÃO DE PEDREIRA PRÓXIMA, OU ATÉ PELA VIBRAÇÃO DOS TRILHOS COM A PASSAGEM DE UM TREM DE REJEITO.

A PREVISÃO DE QUANDO ESTA LIQUEFAÇÃO POSSA OCORRER É PRATICAMENTE IMPOSSÍVEL, MAS QUANDO OCORRE O DESASTRE SE ESPALHA PARA JUSANTE.

ALGUNS MECANISMOS RELATIVOS AO INÍCIO DA RUPTURA PODEM SER ATRIBUIDOS AO DESLOCAMENTO DO DIQUE DE PARTIDA PARA JUSANTE DEVIDO AO EMPUXO DO REJEITO LIQUEFEITO – VER FIGURA.

OUTRO MECANISMO POSSÍVEL SERIA DA OCORRENCIA DE UM PIPING NA INTERFACE ENTRE A CRISTA DO DIQUE DE PARTIDA E DO PRIMEIRO ALTEAMENTO, PORQUE O GRADIENTE DE FLUXO NESSA INTERFACE PODE ALCANÇAR VALORES EM MUITO SUPERIORES A UNIDADE.

Estabilidade do dique de partida com a elevação do rejeito saturado



Ângulo de atrito fundação/Dique de partida 30  $\tan(\phi)$  0,58  
 $\gamma$  aterro  $t/m^3$  2  
 Diques iguais com alturas de 10 m e largura de na base de 40 m

**Peso do Dique de Partida**

PDQ

Área  $m^2$  250  
 PDQ t 500

**Peso rejeito sobre o talude do dique de partida (10m de altura)**

PR1

$\gamma$  rejeito  $t/m^3$  2,4 (rejeito de ferro)  
 Área  $m^2$  75  
 PR1 t 180  
 PP Total t 680 para os primeiros 10m com alteamento para jusante

**Peso de parte do 2º dique sobre o dique de partida (20m de altura)**

P2

$\gamma$  aterro  $t/m^3$  2  
 Área  $m^2$  175  
 P2 t 350  
 PP total t 1030

**Peso parcial contrinuinte do 3º Dique (30 m de altura)**

P3

2

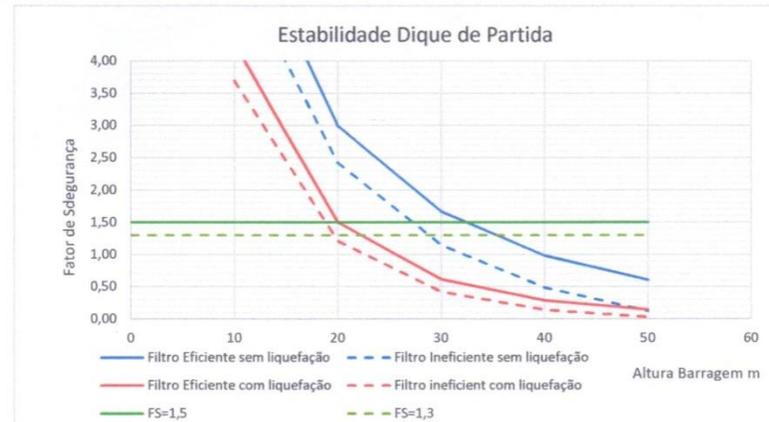
$\gamma$ aterro $t/m^3$	2
Área $m^2$	33
P3 t	67
PP total t	1097

**Caso 1 Estabilidade Dique de Partida sem liquefação ( água ) -  $\gamma=1 t/m^3$ ;  $\phi$  DQ/Fund=30º**

H (BT) m	Subpressão com filtro				Filtro			
	P t	Eficiente		Eágua t	Eficiente		Ineficiente	
		Ue t	Ui t		R t = (P-U) tan( $\phi$ )	FS		
10	680	125	200	50	320	277	6,41	5,54
20	1030	250	400	150	450	364	3,00	2,42
30	1097	375	600	250	417	287	1,67	1,15
40	1097	500	800	350	344	171	0,98	0,49
50	1097	625	1000	450	272	56	0,61	0,12

**Caso 2 Estabilidade Dique de Partida com liquefação ( água+rejeito ) -  $\gamma=1,5 t/m^3$ ;  $\phi$  DQ/Fund=30º**

H (BT) m	Subpressão com filtro				Filtro			
	P t	Eficiente		Eágua t	Eficiente		Ineficiente	
		Ue t	Ui t		R t = (P-U) tan( $\phi$ )	FS		
10	680	125	200	75	320	277	4,27	3,70
20	1030	250	400	300	450	364	1,50	1,21
30	1097	375	600	675	417	287	0,62	0,42
40	1097	500	800	1200	344	171	0,29	0,14
50	1097	625	1000	1875	272	56	0,15	0,03



**Surgem questões:**

- 1) Barragens com alteamento para montante podem ser seguras até 20m de altura?
- 2) Barragens com alteamento para montante com altura até 35 m podem ser seguras se não liquefazem?
- 3) Que condicionantes "mantem estáveis" barragens acima de 35 m com alteamento por montante?

NAS COLUNAS DO FATOR DE SEGURANÇA QUE RELACIONA O EMPUXO ATUANTE (DA ÁGUA OU DO REJEITO) OBSERVA-SE QUE NO CASO DE FILTRO EFICIENTE EMPUXO SÓ DE ÁGUA QUE A CONDIÇÃO DE INSTABILIDADE OCORRE PARA O QUARTO CARREGAMENTO, OU SEJA, PARA  $H=40\text{m}$ . SE OCORRER A LIQUEFAÇÃO O FATOR DE SEGURANÇA CAI BRUSCAMENTE PARA 0,29 E A BARRAGEM ROMPE.

A FOTO SEGUINTE E O VIDEO MOSTRAM O INICIO DAS RUPTURAS QUE OCORRERAM EM BARRAGENS DE REJEITO.



**Figura 2-6**      **Efeitos da erosão interna no talude de jusante do Dique 1**

# Seminário Técnico Internacional sobre Barragens de Rejeitos e o Futuro da Mineração em Minas Gerais

International Technical Seminar Tailings Dams and the Future of Mining in Minas Gerais State

COORDINATION



**IBRAM**  
INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO  
Brazilian Mining Association  
Closes Mines in Brazil

SUPPORT



GOVERNO  
DO ESTADO DE  
MINAS GERAIS

