CONTRIBUIÇÃO AO DOMINIO DO CONHECIMENTO SOBRE OS MECANISMOS DE RUPTURA DE BARRAGENS DE TERRA PARA CONTENÇÃO DE REJEITOS COM ALTEAMENTO A MONTANTE.

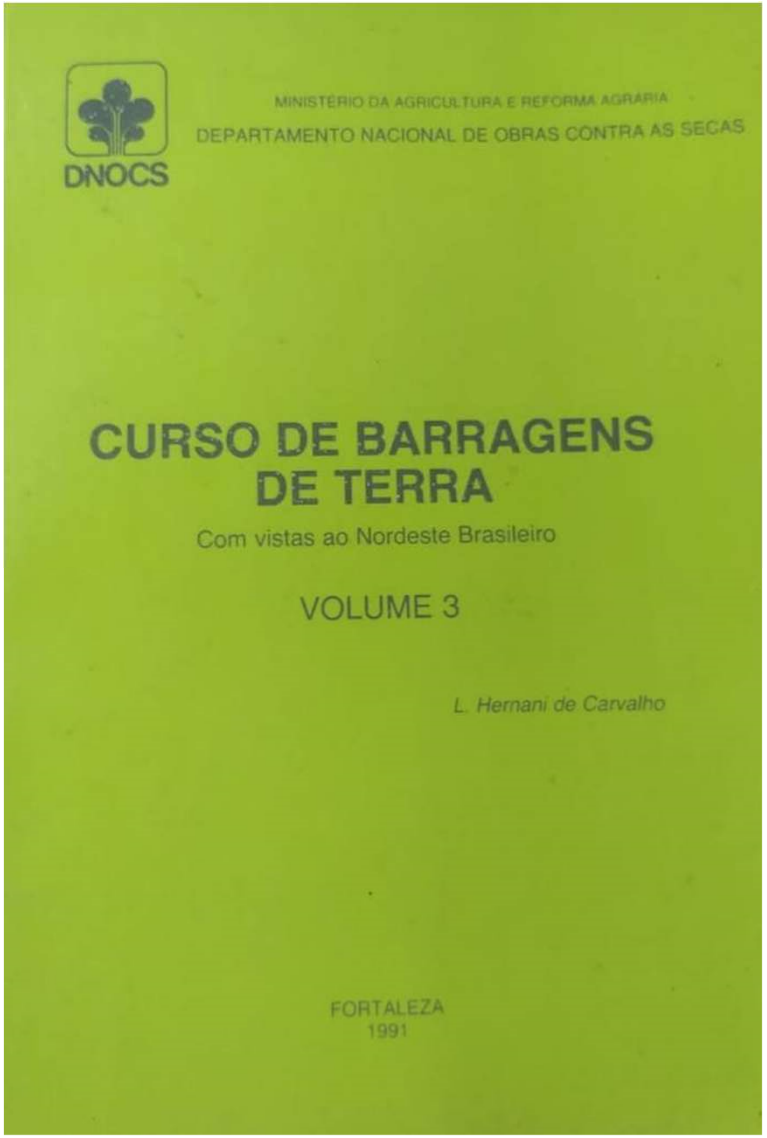
Autor: Eng.º civil José Manoel Teixeira
Crea – MG: 13458/d
Crea – RJ: 19755100281
Março de 2019

Bibliografia: Curso de barragens da terra – com visitas ao Nordeste brasileiro

Ministério da Agricultura e Reforma Agrária

Departamento Nacional de Obras Contra As Secas

Autor: L. Hermani de Carvalho



Métodos adotados no estudo de estabilidade

Método das superfícies deslizantes:

- A análise da estabilidade dos maciços se faz a partir da pressuposição da existência de uma superfície de deslizamento.
- Ao longo da superfície estudam-se várias tensões envolvidas no processo, bem como do solo e suas consequências.

Método das tensões:

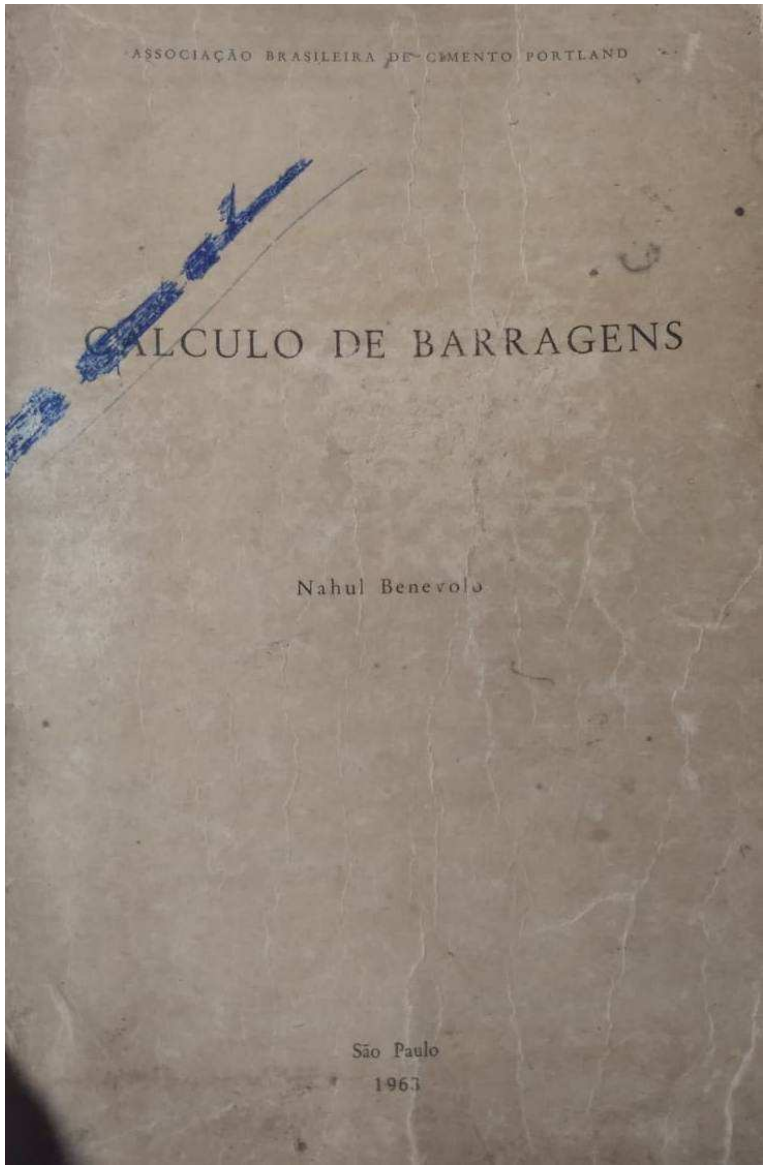
- Baseado no estudo das tensões unitárias.
- Emprega teorias da elasticidade e da plasticidade.

Geralmente é adotado no estudo de barragens de terra

Bibliografia: Cálculo de barragens

Associação Brasileira de Cimento Portland

Autor: Nahul Benevolo



Barragens de peso

Condições de estabilidade:

As barragens de peso devem satisfazer às seguintes condições:

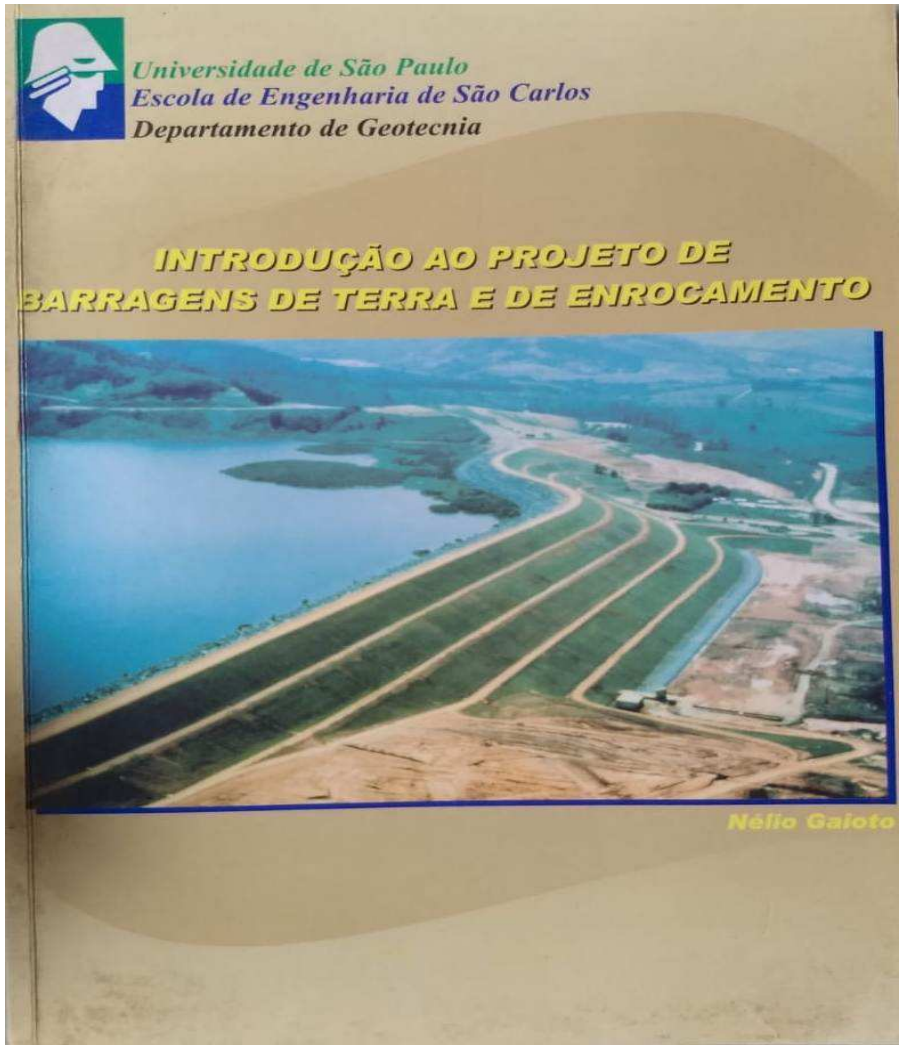
a) A tensão calculada não deve ultrapassar, em qualquer ponto, a tensão admissível;
b) Apresentar a necessária segurança contra tombamento;
c) Apresentar a necessária segurança contra escorregamento;

Em relação a primeira condição, é exigida ausência de tensões de tração devidas ao peso próprio e pressão da água.

Bibliografia: Introdução ao projeto de barragens de terra e enrocamento

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Autor: Nélio Gaioto



Análises de tensões e deformações

Atualmente, já se pode utilizar uma metodologia quantitativa; para análise do problema de fissuramento, em vista do grande desenvolvimento de estudos relacionados a:

- Reologia dos materiais, isto é, seu comportamento tensão-deformação-tempo;

- Cálculo estrutural do conjunto constituído pela barragem e sua fundação, através do método dos elementos finitos;

Bibliografia: Introdução ao estudo de barragens de terra

Ministério do Exército
DEP – DPET

IME
Curso de Fortificação e Construção

MINISTERIO DO EXÉRCITO
DEP — DPET

IME

CURSO DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇAO

Introdução ao Estudo de Barragens de Terra

Volume 2

Trabalho Especial de Fim de Curso

1977

Volume II

Capítulo 5

Análise de Estabilidade

5.5 – Método Sueco

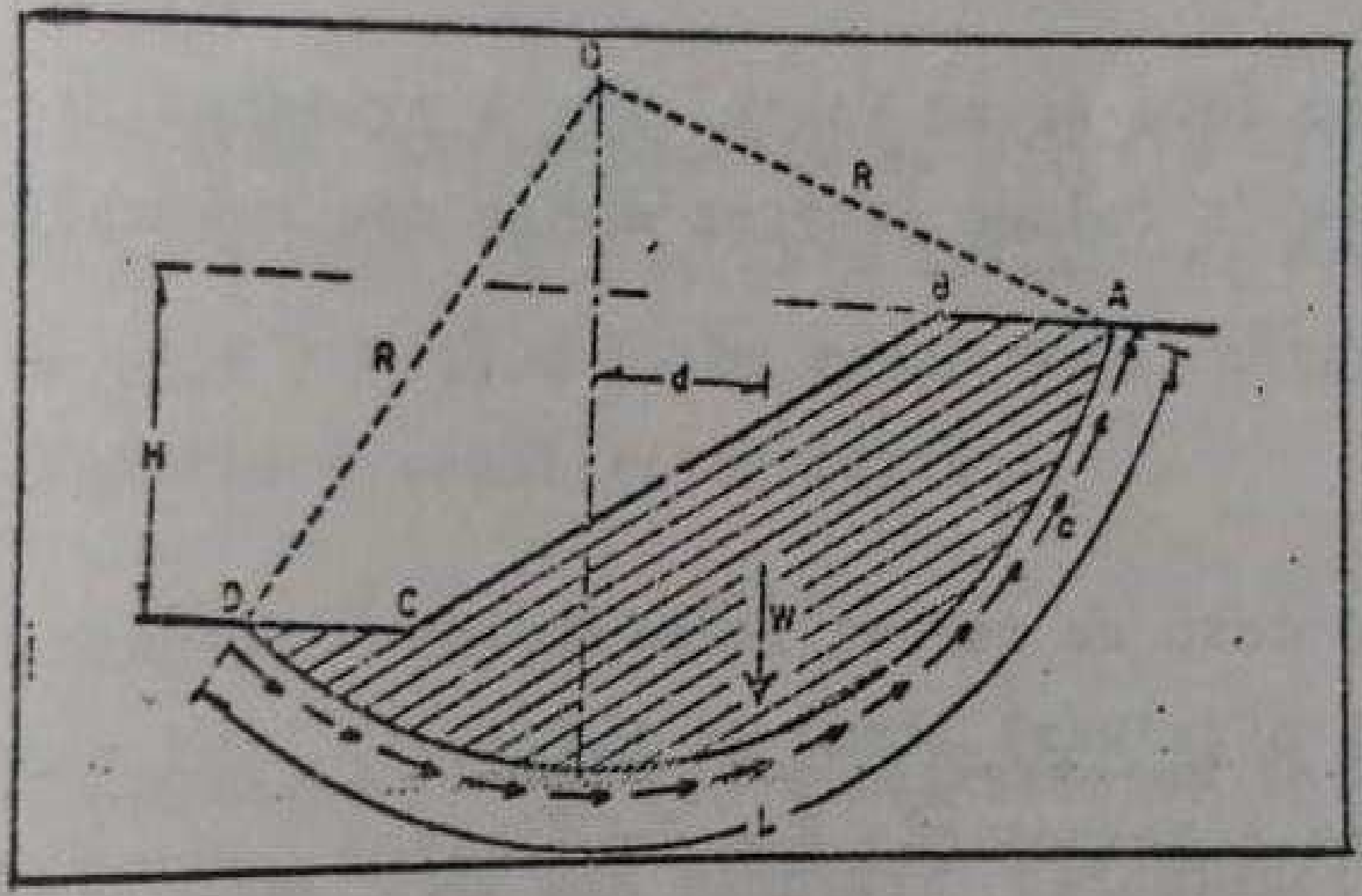
5.6 – Método Fellenius

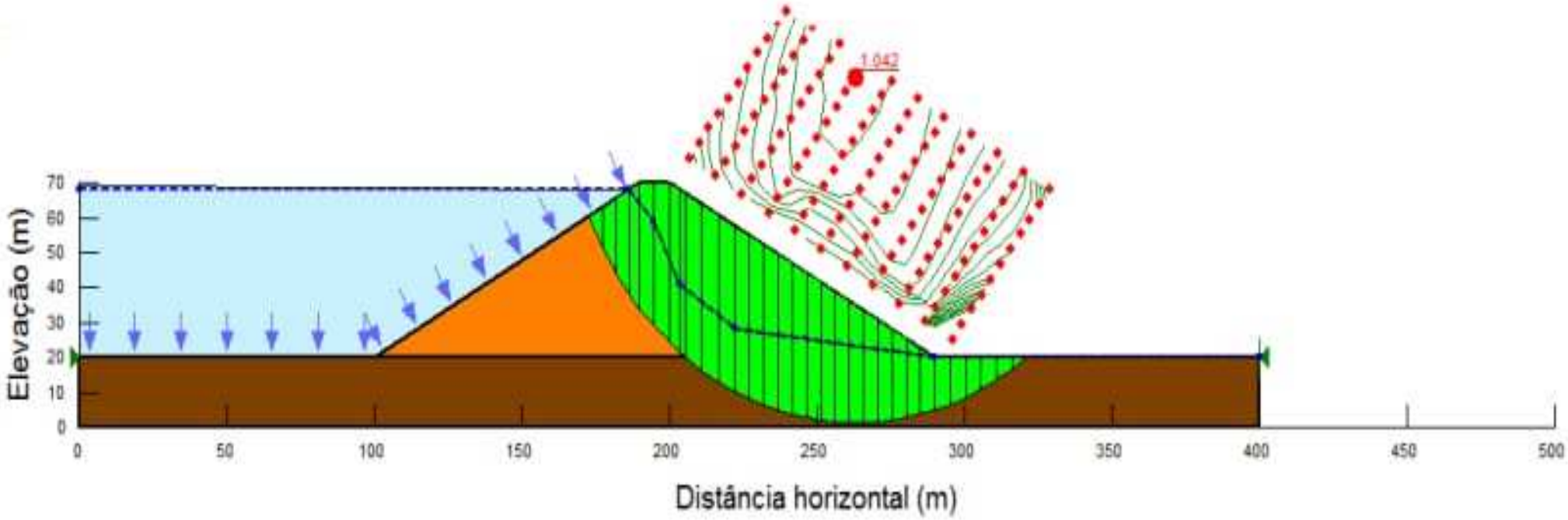
5.7 – Método Taylor

5.8 – Método Bishop

5.9 – Método de Bishop Morgenstern

5.10 – Método de Morgenstern


O
R
R
d
A
d
H
D
C
W
L


1.042
Elevação (m)
70
60
50
40
30
20
10
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
Distância horizontal (m)

Caminho para se determinar a estabilidade de uma barragem sem alteamento

Sobre o Maciço atuam basicamente três esforços a saber:

1º) O peso próprio do Maciço que denominarei de Pm

2º) O Empuxo produzido pela coluna d'água que denominarei de Ea

Empuxo d'água = força que a água exerce sobre a barragem

3º) O empuxo produzido pelo rejeito depositado que denominarei de Er

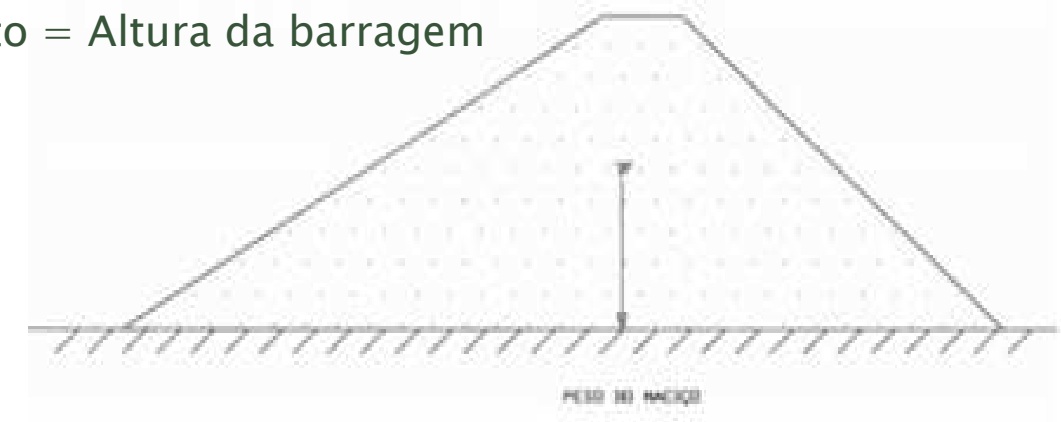
Empuxo do rejeito = força que o rejeito exerce sobre a barragem

Para simplificação dos cálculos:

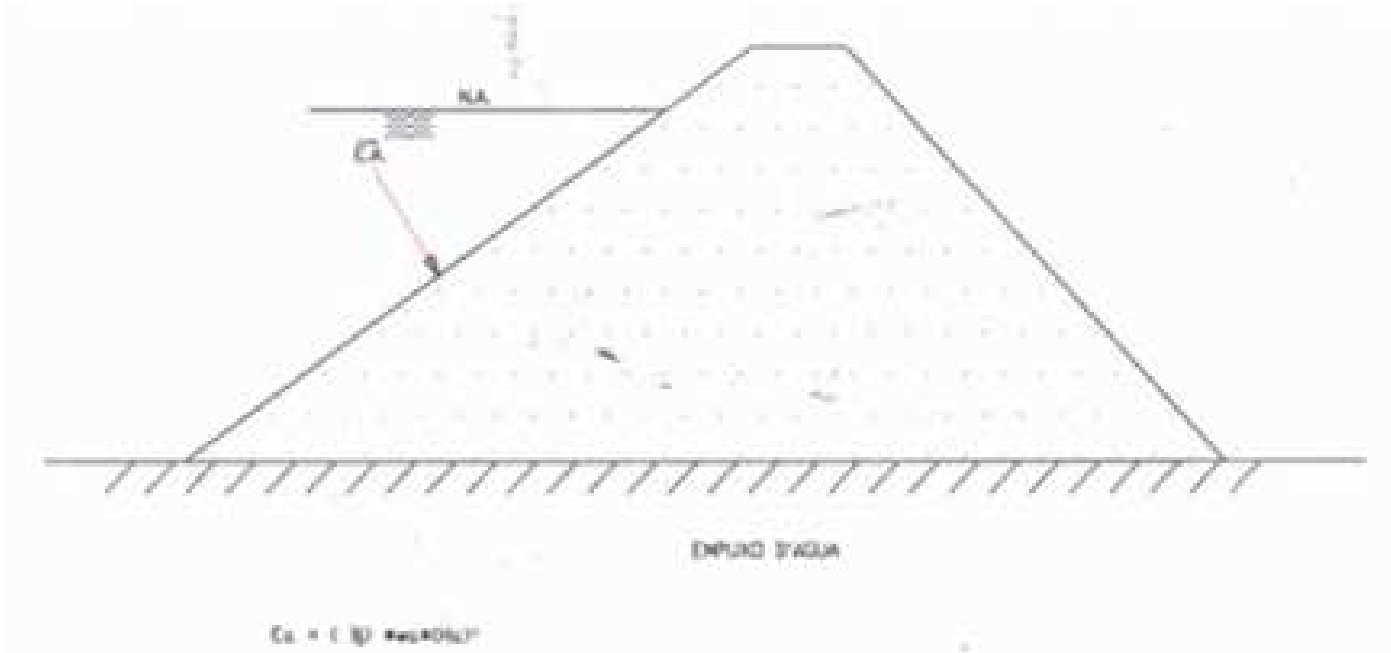
Altura da coluna d'água = Altura da coluna de rejeito = Altura da barragem

Passos:

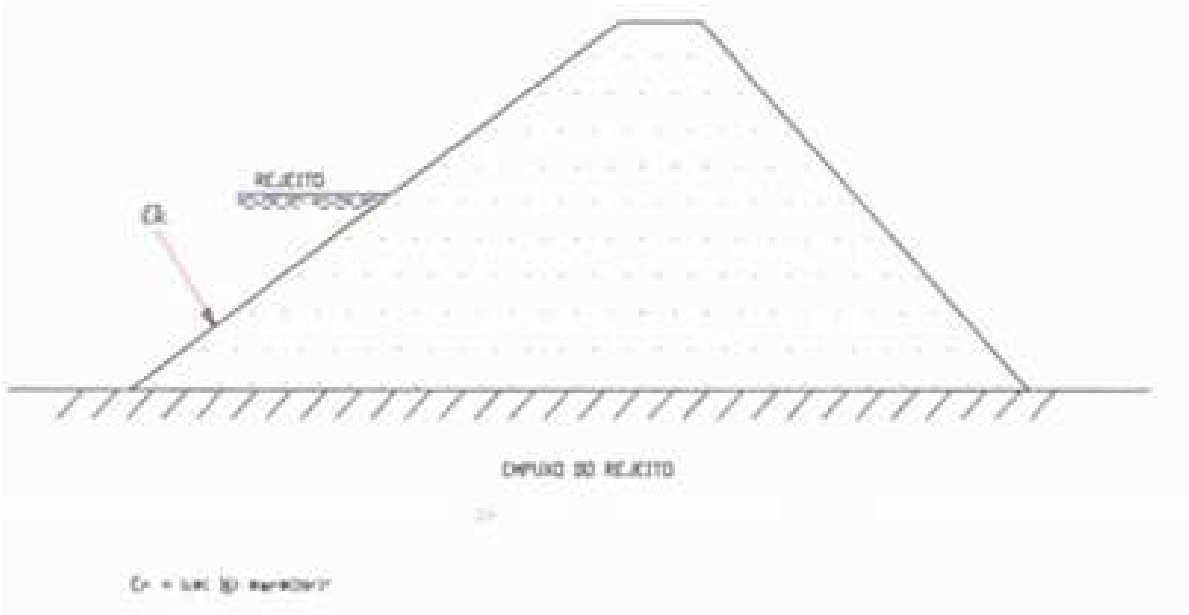
- Determinar o peso do Maciço (por metro linear)
- Determinar o centro de gravidade do maciço



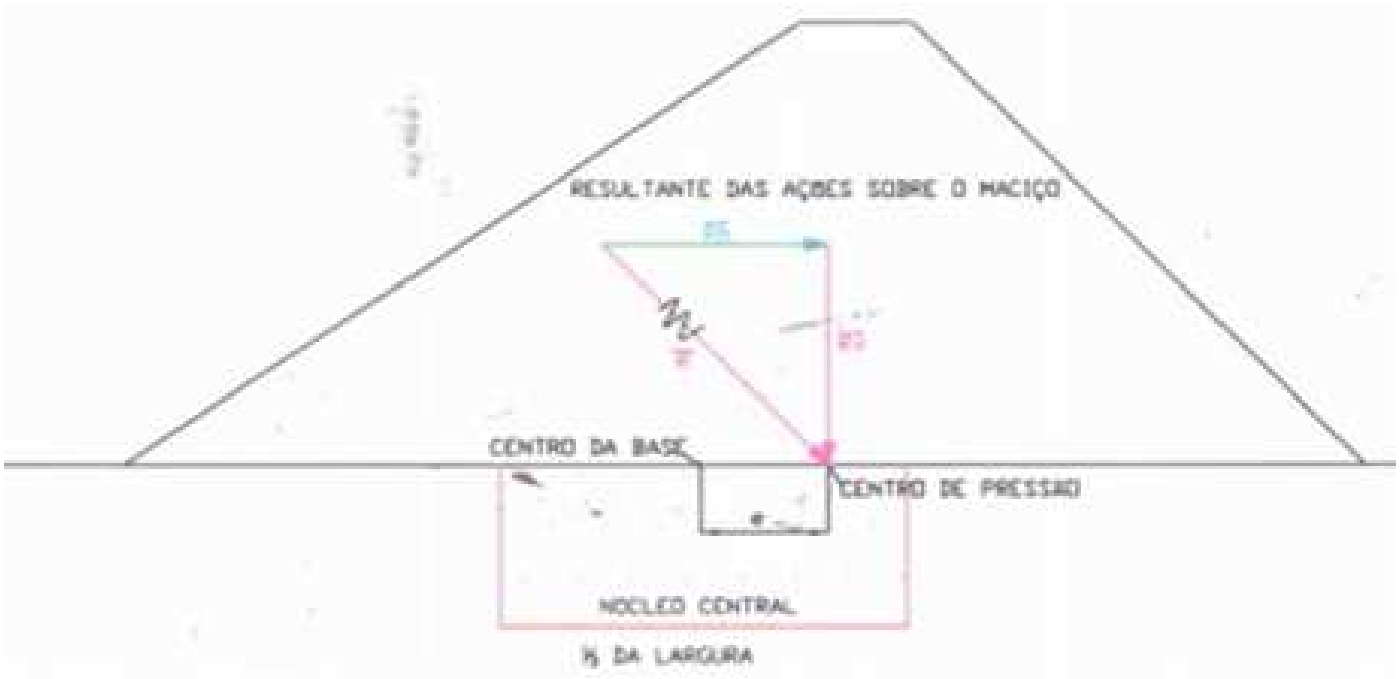
- Determinar o valor do empuxo d'água (Área do diagrama triangular de pressão);
- Determinar o ponto de aplicação do empuxo d'água no talude de montante (1/3 da altura);



- Determinar o peso específico do rejeito na condição de submerso;
- Determinar o valor do empuxo devido ao rejeito (Área do diagrama triangular de pressão);
- Determinar o ponto de aplicação do empuxo devido ao rejeito no talude de montante (1/3 da altura);



- Determinar a resultante vetorial destes esforços e o ponto onde a mesma corta a base do Maciço (centro de pressão);



Duas situações são possíveis de ocorrer:

1ª) O centro de pressão está dentro do núcleo central (1/3 da largura da base);

(Só há tensões de compressão na base do maciço)

(A barragem tem estabilidade ao tombamento)

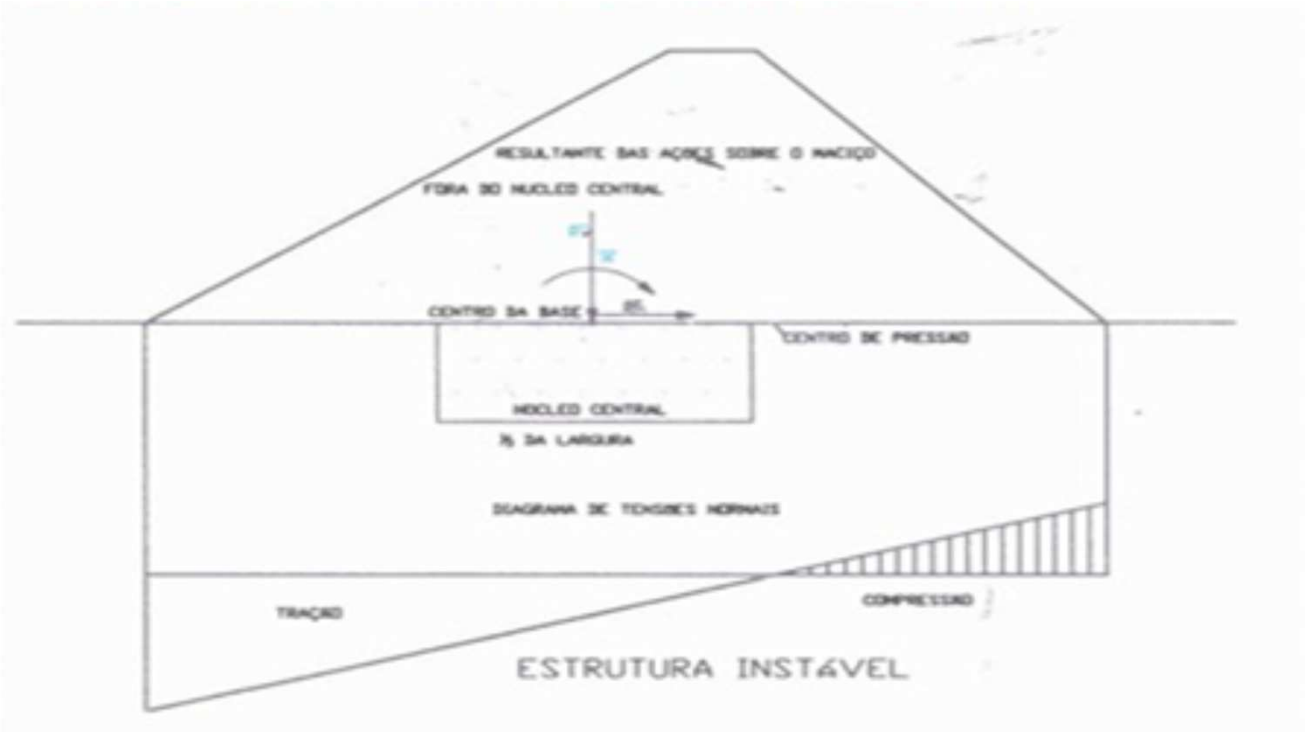
Deverá ser verificada a segurança ao escorregamento (Devido Componente Horizontal)

2ª) O centro de pressão não está dentro do núcleo central

(Há tensões de tração e compressão na base do maciço)

O solo não resiste a tensões de tração

(A barragem não tem estabilidade ao tombamento)



Quando não há coincidência entre as alturas das colunas d'água e de rejeito dever-se-ão de se fazer as correções devidas.

Caminho para se Determinar a Estabilidade de uma Barragem com Alteamento

Para o caso de Alteamento a Montante observamos:

1º) Somente o Dique de partida se apoia no solo onde em princípio são conhecidas as condições de resistência do mesmo. (Tensões de Compressão, atrito e Cisalhamento).

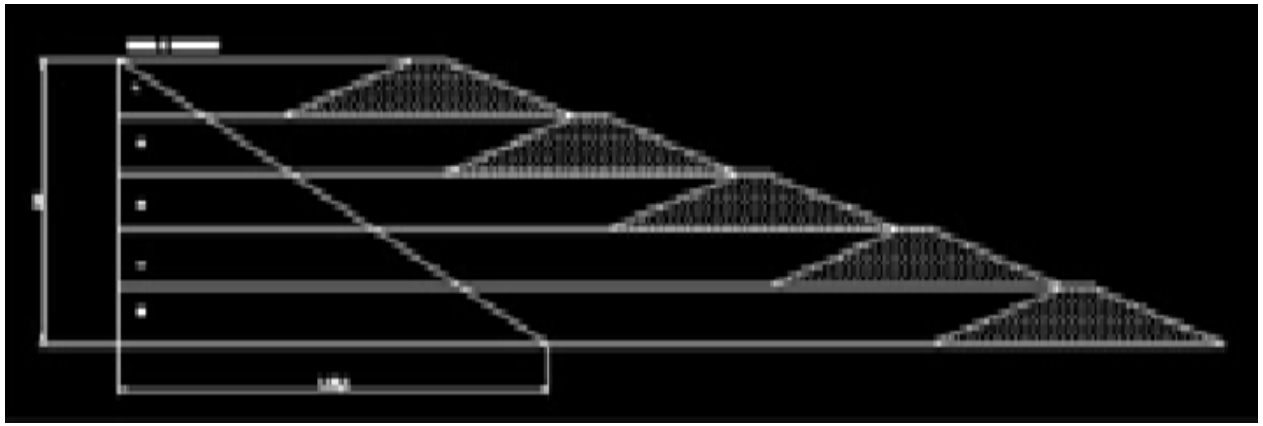
2º) O rejeito suporte dos alteamentos seguintes não têm coesão e está imerso em água, portanto lubrificado.

3º) Os Esforços atuantes variam com o quadrado da altura.

Considerando:

- Altura da coluna d'água = altura da coluna de rejeito = altura da barragem, vem:
- O Diagrama Linear de Pressões poderá ser decomposto em trapézios e triângulo sobre cada Dique componente do alteamento teremos diagramas trapezoidais ou triangular.
- A soma das áreas dessas figuras dará o valor do Empuxo Total e a posição do centro de gravidade.
- O ponto onde este esforço irá atuar.
- Somando-se vetorialmente o empuxo e o peso do maciço caímos na análise anterior já explicada.
- Para uma barragem hipotética com alteamento de cinco vezes de altura original o esforço atuante sobre toda a estrutura será 25(vinte e cinco vezes) o esforço original.

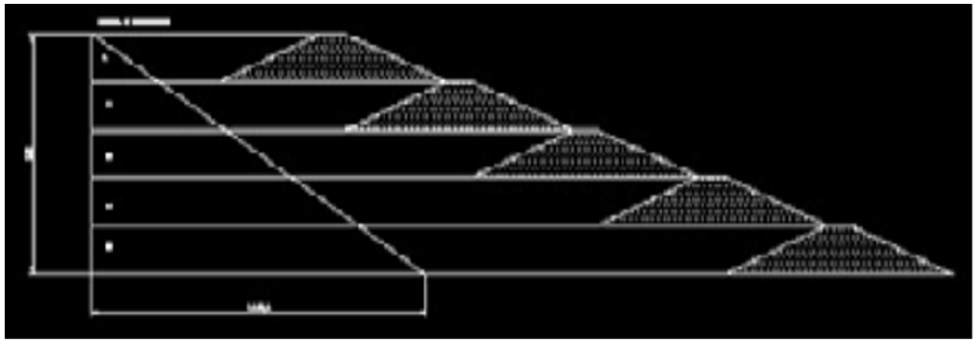
Análise de um Barramento Hipotético com:
Altura do Dique de Partida = 18m
Altura Final do Barramento = 90m
Densidade do Rejeito seco = 1,68t/m³
Densidade do rejeito submerso = 0,88t/m³
Coeficiente de Atrito = 0,1(Valor Baixo)
Pressão no fundo do barramento = (1+0,88*0,7)*90 = 145,4t/m³
Esforço Total devido aos empuxos = (1/2)*(145,4)*90 = 6543t/m
Seção do Maciço: Trapézio
Base Maior = 100m, Base Menor = 10m e Altura = 18m
Área do Trapézio = 990m², Densidade do Material usado = 1,8t/m³
Peso do Maciço da Barragem = 990*1,8 = 1782t
Áreas que compõem o Diagrama de Pressão
Área 1 (Triângulo) = 261,7
Área 2 (Trapézio) = 785,2
Área 3 (Trapézio) = 1308,6
Área 4 (Trapézio) = 1832,0
Área 5 (Trapézio) = 2355,5
Área Total (Triangulo) = 6543



Determinação da Altura do Centro de Gravidade do Trapézio 4

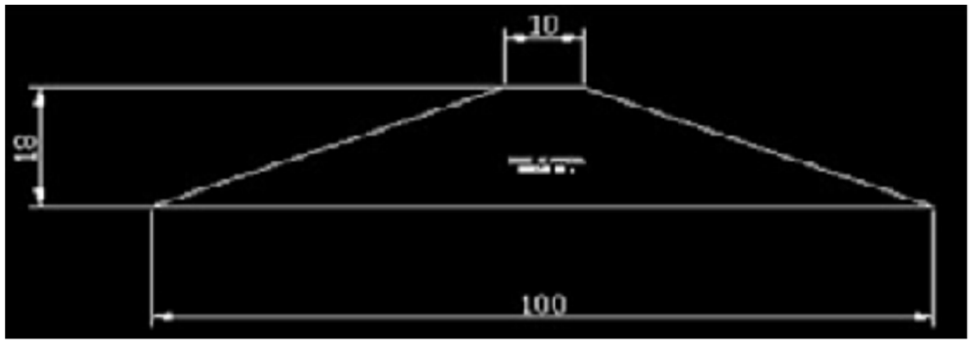
O segundo de Baixo para cima

Lado Maior	116,3
Lado Menor	87,2
Altura	18
Altura do C.G. (m)	8,571007371



Determinação da Altura do Centro de Gravidade do Dique

Lado Maior	100
Lado Menor	10
Altura	18
Altura do C.G. (m)	6,545454545



A participação do esforço total sobre os Diques são:

Dique de Partida = 36% 0,360003057

1° Dique do Alteamento (Área) = 28% 0,279993887

Soma Vetorial dos Esforços no 1° Dique de Alteamento

Neste caso a Resultante está dentro do Núcleo de Alteamento

Módulo da Resultante encontrado pela soma vetorial (t) 3600

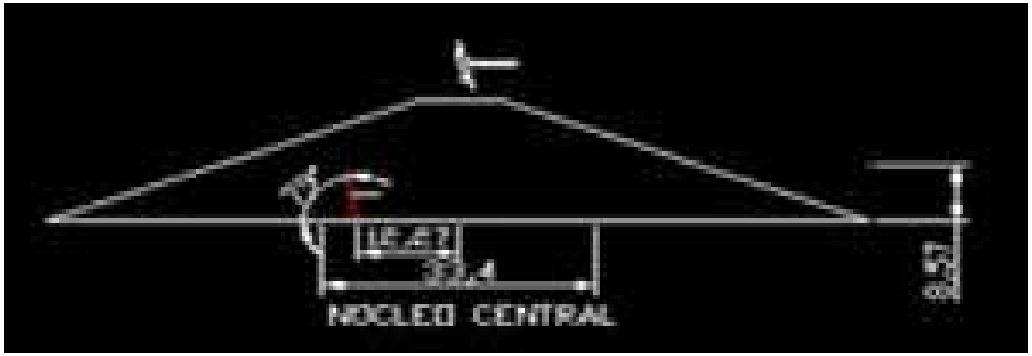
Ângulo Encontrado (°) 79

Seno de 79° 0,9816

Cosseno de 79° 0,1908

Componente Vertical (t)/m 3533,76

Componente Horizontal (t)/m 686,88



Tensão de Compressão no solo por ação da Componente Horizontal

c^1 = $6M/bh^2$ (kgf/cm²) 0,269756509

Tensão de Compressão no solo por ação da Componente Vertical

Componente V/bl (A.M.R., pág. 212) 3,53376

Componente (1+6*e/l)(A.M.R., pág. 212) 1,7362

c^2 = Tensão Normal de Compressão (kgf/cm²) – **c** = 5,26 5,26996

Tensão Normal de Compressão Resultante (kgf/cm²) – c = 5,539716509

Valor extremamente alto mesmo para um solo normal

Referência de valores usuais de tensões normais admissíveis no solo

Classe – Descrição	Tensões Admissíveis KgF/cm²
1– Rocha sã, maciça, sem laminação ou sinal de decomposição	10,00
2– Rochas laminadas, com pequenas fissuras, estratificadas	5,00
3– Rochas alteradas ou em decomposição	3,33
4– Solos granulares concrecionados conglomerados	3,33
5– Solos pedregulhosos compactos a muito compactos	2,00
6– Solos pedregulhosos fofos	1,00
7– Areias muito compactas	1,67
8– Areias compactas	1,33
9– Areias medinamente compactas	0,67
10– Argilas duras	1,00
11– Argilas rijas	0,67
12– Argilas médias	0,33
13– Siltes duros (muito compactos)	1,00
14– Slites rijos (compactos)	0,67
15– Slites médios (medinamente compactos)	0,33

Força de Atrito Resistente (t) Estimada	353,376
Força Horizontal Atuante (t)	686,88

O Barramento Escorrega.

Informações necessárias à elaboração deste relatório

Relatório de sondagem do solo local de assentamentos das bases do barramento

Características geomecânicas do rejeito

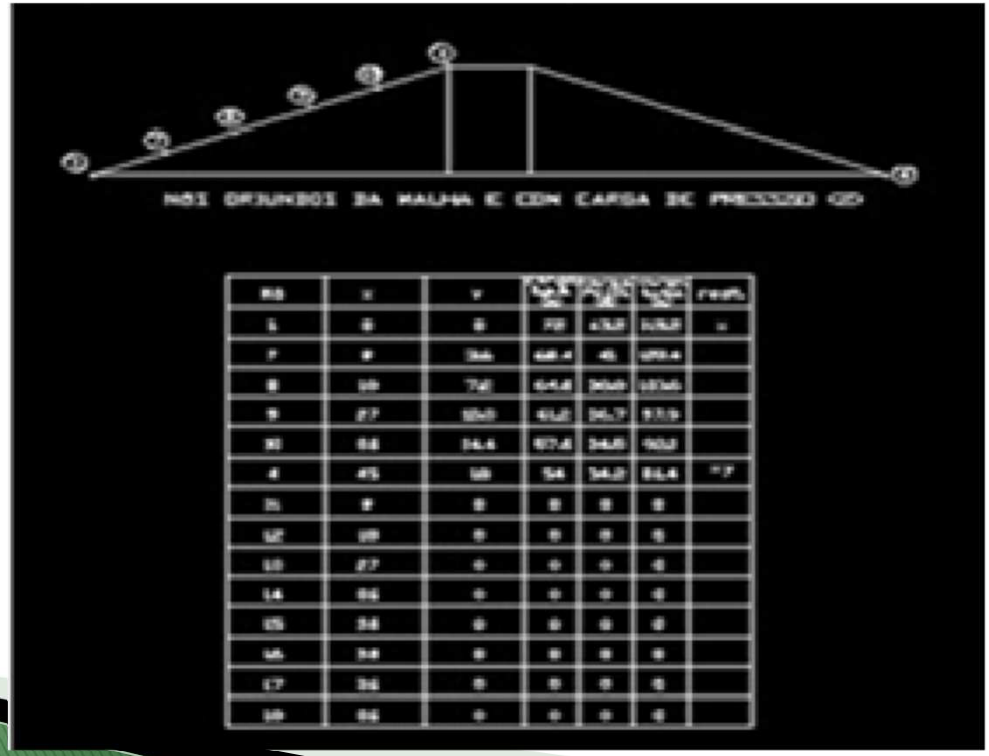
Projeto geométrico do barramento

Altura da coluna d'água

Altura da coluna de rejeito

Poderá ser também usado o método dos elementos finitos

Ângulo do empuxo com a horizontal (º)	68
Seno 68º	0,9271
Cosseno 68º	0,3746
Determinação das cargas nodais para carregar o SAP	
Empuxo sobre este módulo (t)	1832

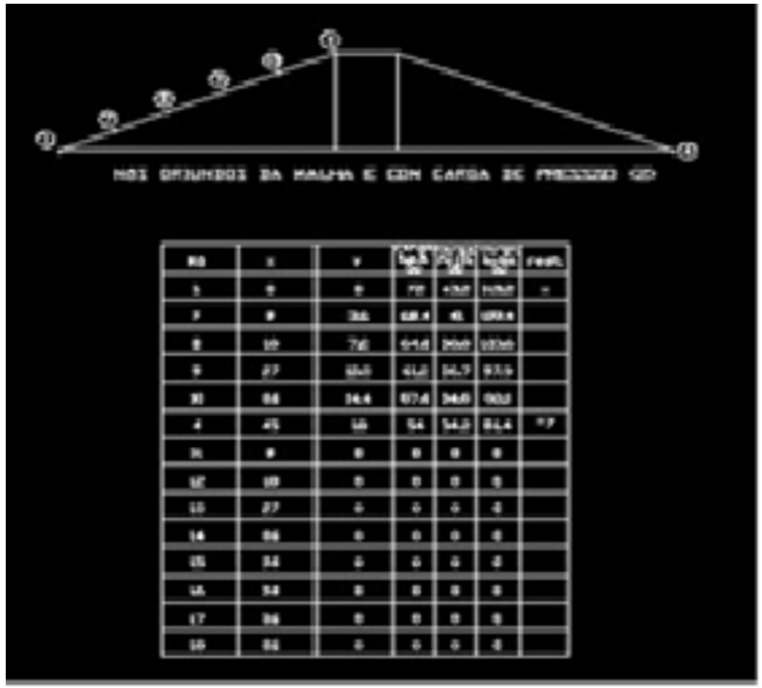


Nó 1 = Nó 4

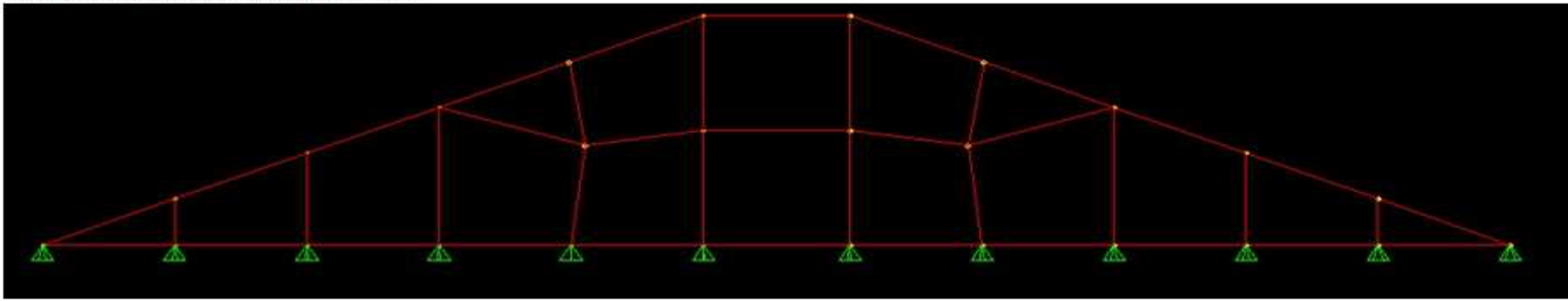
Componente Horizontal do Empuxo (t)	686,2672
Componente Vertical do Empuxo (t)	1698,4472
Componente Horizontal (t)	68,62672
Componente Vertical (t)	169,84472

Nó 7 = Nó 8 = Nó 9 = Nó 10

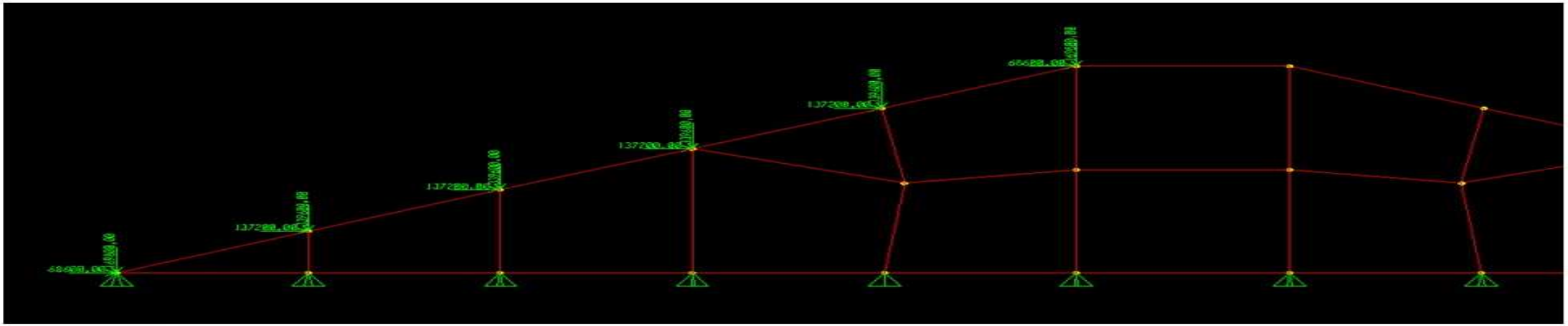
Componente horizontal (t)	137,25344
Componente vertical (t)	339,68944



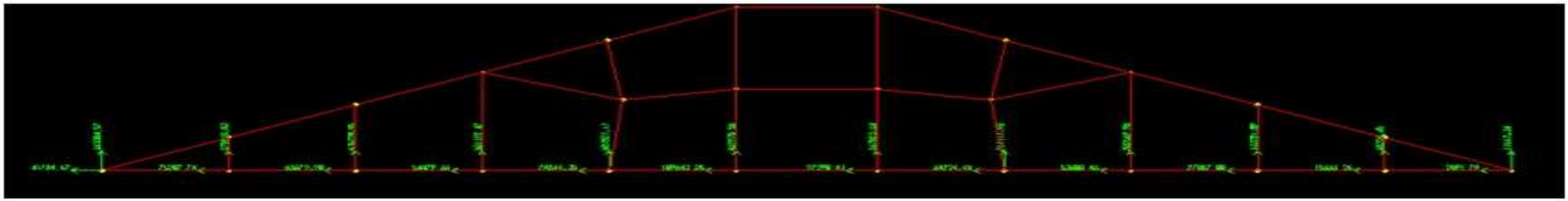
Análise Pelo Metodo dos Elementos Finitos



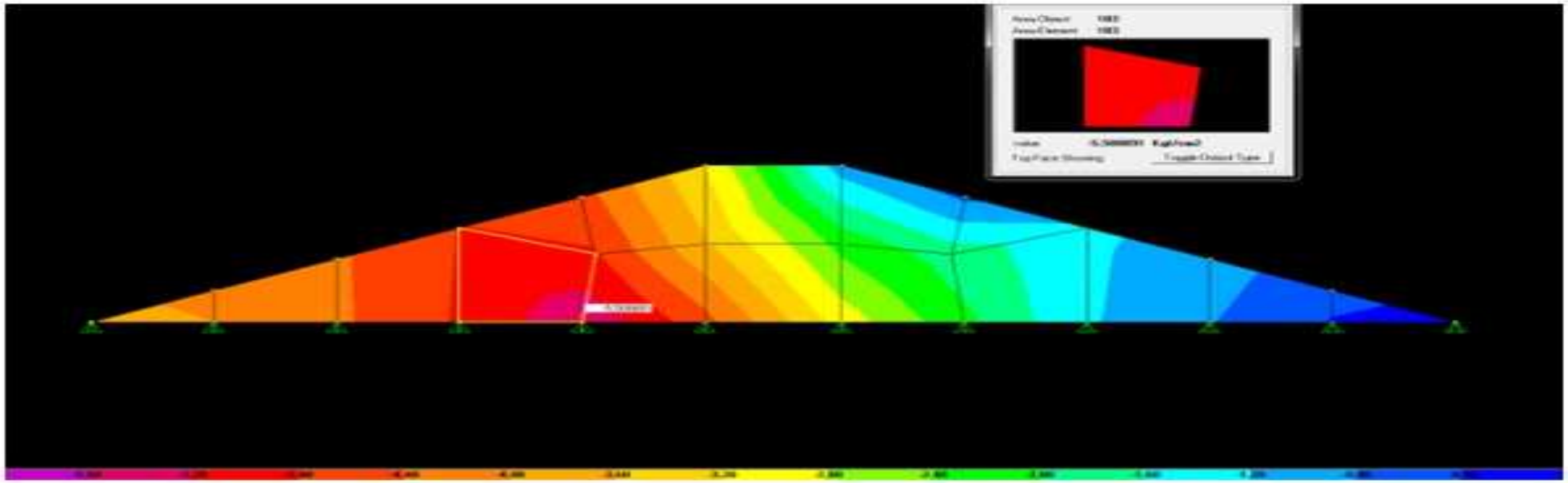
Malha Gerada



Carregamentos Nodais



Reações de Apôio



Tensão em um elemento na Base.

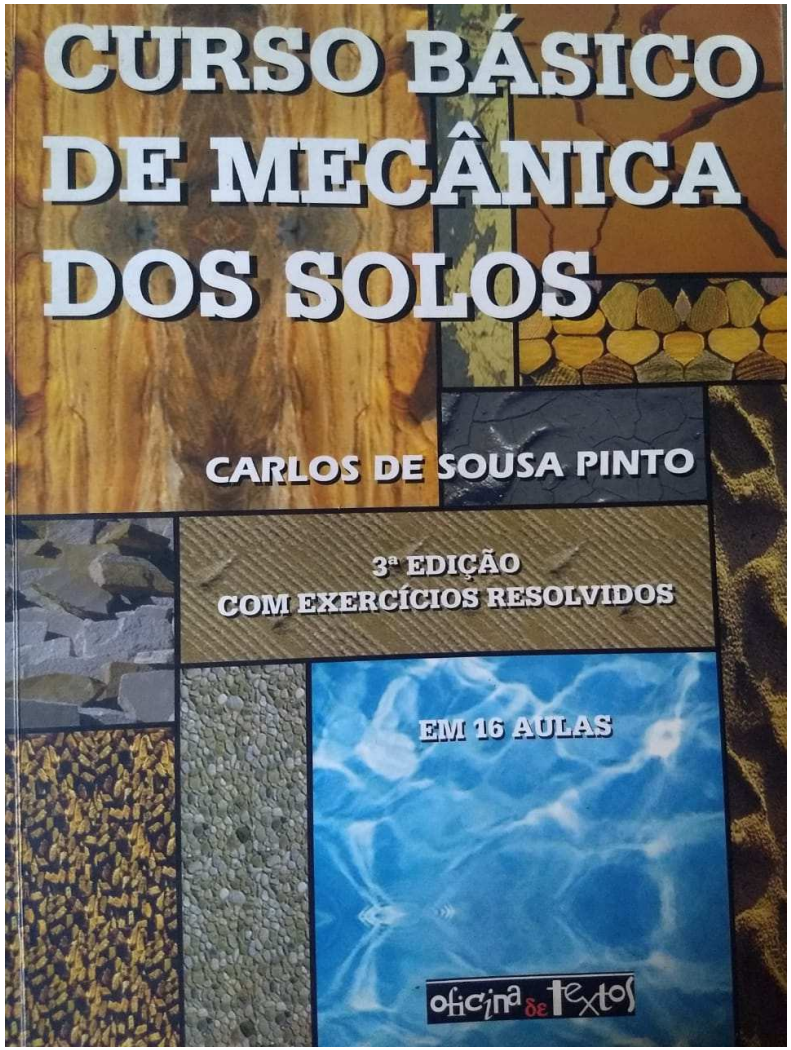
Conhecida as Tensões em um ponto, poderemos determinar as tensões principais e a partir daí atravez de Criterios de Ruptura verificar o desmoronamento do Maciço.
Com estas informações é possível entender a causa da Ruptura que se deu por ESCORREGAMENTO DO 1º DIQUE DO ALTEAMENTO (PODE SER VISUALIZADO NAS IMAGENS FRONTAIS DO ROMPIMENTO) E NÃO POR LIQUEFAÇÃO (NÃO HOUVE DESMONTE SEGUNDO A VERTICAL).

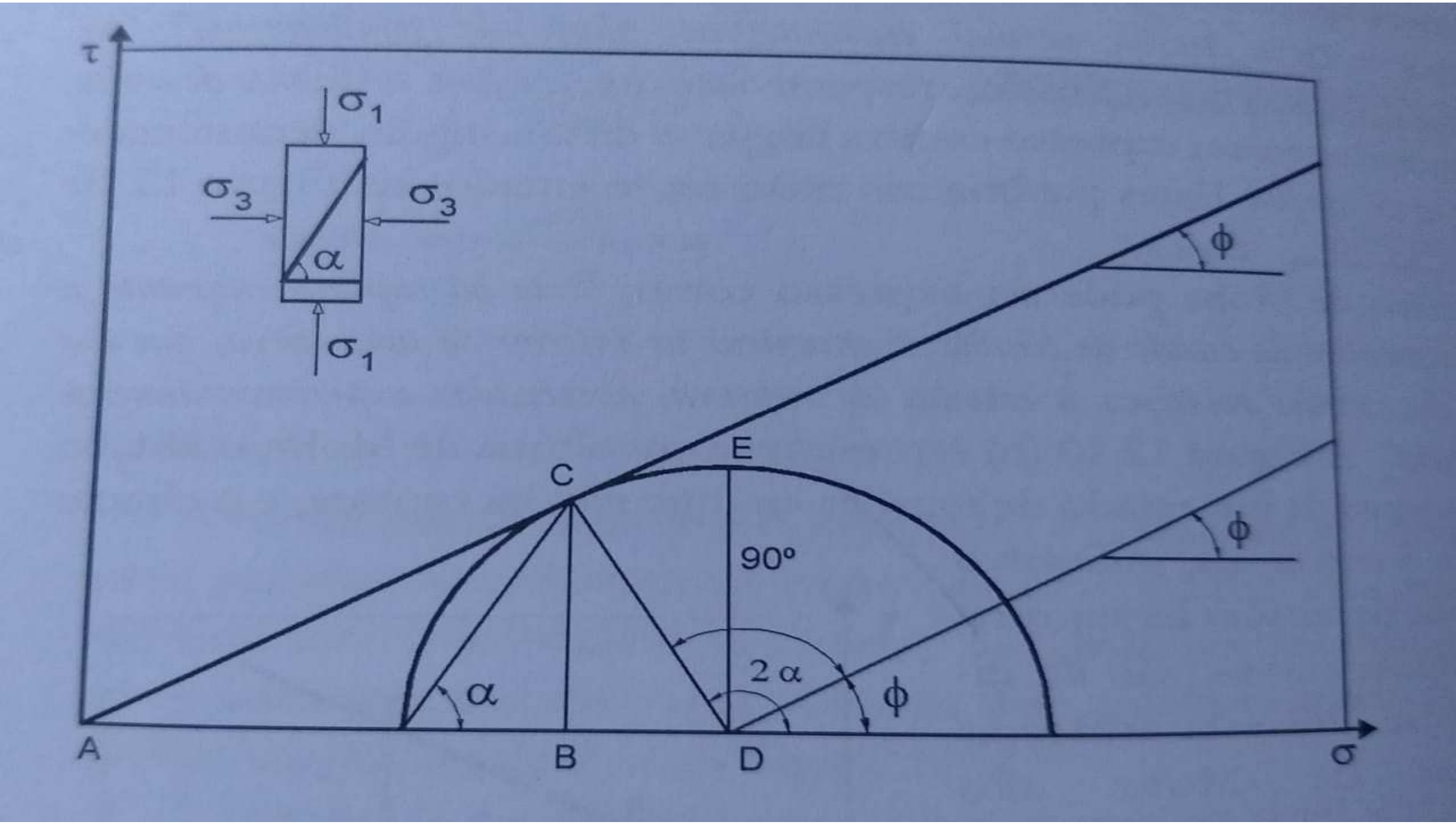
Engº José Manoel Teixeira
Crea MG 13458/D
Data: 18/3/2019

Bibliografia: Curso básico de mecânica dos solos

Autor: Carlos de Sousa Pinto

3ª edição com exercícios resolvidos




τ
σ1
σ3
σ3
α
σ1
ϕ
E
C
90°
ϕ
2 α
α
ϕ
A
B
D
σ

Conclusões

1) O atestado de estabilidade deveria vir acompanhado de uma memória de cálculo e conferido por outro profissional;

2) A inspeção *in loco* só visualiza escorregamento de talude;

3) As fissuras advindas do tombamento do maciço ocorrem na base da barragem e a Montante;

4) O escorregamento do maciço, uma vez iniciado, encontra menos resistência porque o atrito cinético é menor do que o atrito estático;

5) O processo completo de análise da estabilidade do barramento compreende:

5.1) Verificação do escorregamento dos taludes que compõe o maciço;

5.2) Verificação da segurança ao tombamento do maciço;

5.3) Verificação da segurança ao escorregamento do maciço;

5.4) Verificação da resistência à ruptura do maciço;

5.5) *Piping* e liquefação;