

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

José Eduardo Beltrão Winiawer

**CORTINAS DE GABIÕES TIPO SACO DE GRANDE RAIO:
VERIFICAÇÃO DA RUPTURA DA ESTRUTURA PELO
MÉTODO CINEMÁTICO DA ANÁLISE LIMITE**

Porto Alegre
dezembro 2009

JOSÉ EDUARDO BELTRÃO WINIAWER

**CORTINAS DE GABIÕES TIPO SACO DE GRANDE RAIOS:
VERIFICAÇÃO DA RUPTURA DA ESTRUTURA PELO
MÉTODO CINEMÁTICO DA ANÁLISE LIMITE**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Samir Maghous, Dr.

Porto Alegre
dezembro 2009

JOSÉ EDUARDO BELTRÃO WINIAWER

**CORTINAS DE GABIÕES TIPO SACO DE GRANDE RAIOS:
VERIFICAÇÃO DA RUPTURA DA ESTRUTURA PELO
MÉTODO CINEMÁTICO DA ANÁLISE LIMITE**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2009

Samir Maghous
Dr. pela École Nationale des Ponts e Chaussées
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Samir Maghous (UFRGS)
Dr. pela École Nationale des Ponts e Chaussées

Prof. João Ricardo Masuero (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho a meus pais e a minha tia Vera que sempre me apoiaram e a todos os meus irmãos sejam eles irmãos, primos ou amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Samir Maghous, orientador deste trabalho, pela atenção, paciência e apoio despendido e pela nobre vontade de transmitir seus valiosos conhecimentos, adquiridos com a prática e estudo da Engenharia, para aqueles que estão começando nesta nobre profissão.

Agradeço aos demais professores pelo que me ensinaram. Graças aos esforços dos bons professores é que aprendemos a ser engenheiros.

Agradeço aos meus amigos e colegas por tudo que tornou o período de graduação tão especial mas, principalmente os meus grandes amigos: Gustavo, Pedro, Miguel, Guilherme e ao meu primo Leandro que me ajudaram muito neste período da minha vida que é a graduação.

Agradeço à minha família pelo apoio e carinho incondicional, sem o qual não seria quem sou.

Você vê coisas e diz: por quê?
Eu sonho coisas que nunca existiram e digo: Por que não?

George Bernard Shaw

RESUMO

WINIAWER, J. E. B. **Cortinas de Gabiões Tipo Saco de Grande Raio:** verificação da ruptura da estrutura pelo método da análise limite. 75 pg. 2009. Projeto de Pesquisa do Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

Este trabalho apresenta os procedimentos necessários para a verificação de cortinas de gabiões tipo saco de grande raio pela teoria da análise limite pelo método cinemático. Parte-se da revisão bibliográfica que aborda a teoria da análise limite tridimensional com abordagem em mecanismos de ruptura e a caracterização dos critérios de resistência apropriados aos materiais que constituem os gabiões e os solos. Com esse embasamento teórico são concebidos mecanismos de ruptura adequados à ruptura de gabiões baseados na experiência prévia vista na literatura. Com os mecanismos são descritos os passos necessários para a verificação de uma cortina de gabiões pela teoria da análise limite e é calculado o fator de confiança, que resultou para o mecanismo B3 1,106 e para o mecanismo B4 1,146 mostrando que os mecanismos são adequados pois seu valor é muito próximo de um e que o mecanismo B3 é mais adequado que o mecanismo B4.

Palavras-chave: análise limite; calculo a ruptura; gabiões; geotecnia; estruturas; mecanismos de ruptura; cargas limites; projeto; dimensionamento.

ABSTRACT

WINIAWER, J. E. B. **Cortinas de Gabiões Tipo Saco de Grande Raio:** verificação da ruptura da estrutura pelo método da análise Limite. 75 pg. 2009. Projeto de Pesquisa do Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

Curtains gabions Type Bag Large Radius: verification of rupture of the structure by the limit analysis method

This paper presents the procedures for the verification curtains gabion type bag large radius in the theory of limit analysis by the kinematic method. From the literature review that discusses the theory of limit analysis approach with three-dimensional failure mechanisms and characterization of the resistance criteria appropriate to the materials of which the gabions. With this theoretical framework is designed failure mechanisms appropriate to the rupture of gabions and soil based on previous experience seen in the literature. With the mechanisms described are the steps required to verify a curtain of gabions by the theory of limit analysis is are calculated by the confidence factor, That resulted in the 1.106 engine B3 and B4 for the mechanism 1.146 showing that the mechanisms are adequate for its value is very close to one and that the system B3 is the most appropriate mechanism B4.

Keywords: limit analysis; yield design; gabions, geotechnical, structures, failure mechanisms, load limits, project, design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa.....	17
Figura 2: demonstra as características dos três tipos principais de gabiões.....	20
Figura 3: domínio das cargas suportáveis.....	24
Figura 4: geométrica dos parâmetros de carregamento.....	27
Figura 5: superfície de ruptura Σ	27
Figura 6: critério de Von Mises.....	30
Figura 7: critério de Mohr-Coulomb.....	32
Figura 8: material de Coulomb sem coesão.....	35
Figura 9: sistema parcialmente poroso.....	36
Figura 10: interface entre gabiões.....	38
Figura 11: sistema estrutural.....	40
Figura 12: mecanismo N° 1.....	40
Figura 13: volumes dos blocos em função do nível d'água.....	43
Figura 14: volume elementar.....	44
Figura 15: mecanismo N°2.....	46
Figura 16: mecanismo N°3.....	49
Figura 17: configuração portuária.....	50
Figura 18: células principais e de contorno.....	51
Figura 19: ponto de encontro entre células principais e de contorno.....	51
Figura 20: zona de movimento nas células de encaixe.....	52
Figura 21: configuração de tabique.....	62
Figura 22: movimento do talude exterior.....	63
Figura 23: hodografo dos blocos 1 e 2 do talude exterior.....	64
Figura 24: mecanismo de deslizamento da cortina.....	67
Figura 25: Porto Triunfo.....	69
Figura 26: croqui da estrutura de contenção de Porto Triunfo.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: propriedades dos materiais.....	69
Quadro 2: sobrecargas no topo da cortina.....	70
Quadro 3: pesos específicos.....	70
Quadro 4: alturas.....	70
Quadro 5: ângulos	70

LISTA DE SIMBOLOS

φ : ângulo de atrito do solo

γ : peso específico do solo

z : profundidade

h : altura da estrutura de contenção

$\rho \cdot \vec{g}$: representação das forças de volume

\vec{T} : forças de superfícies atuando em parte do contorno $\delta\Omega$

\vec{n} : vetor unitário normal a parte do contorno $\delta\Omega$

$\underline{\underline{\sigma}}$: tensor de tensões num ponto qualquer

Q^+ : carregamento limite

\underline{V} : vetor taxa de deslocamento

\underline{d} : matriz da taxa de deformação

F_c : fator de confiança

k : resistência ao cisalhamento do material

H : resistência a tração isotrópica do material tipo

T_0 : resistência a tração da malha do gabião

u : poro-pressão

γ^- : peso específico do solo úmido

γ^+ : peso específico do solo seco

h_w : alturas de água

h_s : alturas de água dentro do gabião

p_s : pressão distribuída na superfície aplicada no topo do gabião

δ_{rz} : ângulo de atrito entre o gabião e o substrato

Q_v : força concentrada vertical aplicada no topo do gabião

Q_h : força concentrada horizontal aplicada no topo do gabião

\underline{U} : velocidade de algum dos blocos

\underline{s} : tensor desviador do tensor de tensões

θ : ângulo formado entre os centros das células de contorno, principais e a intersecção delas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 MÉTODO DE PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	15
2.2 PRESSUPOSTOS.....	15
2.3 DELIMITAÇÃO E LIMITAÇÕES.....	15
2.4 DELINEAMENTO.....	16
3 TÉCNICAS DE REFORÇO POR GABIÕES EM GEOTECNIA	18
3.1 GABIÕES: DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	18
3.2 TIPOS DE GABIÕES.....	19
3.3 VALORES DOS FATORES DE SEGURANÇA SEGUNDO O EUROCODE.....	21
4 TEORIA DA ANÁLISE LIMITE	22
4.1 ABORDAGEM SIMPLIFICADA DA RESISTÊNCIA.....	22
4.2 CARGA SUPORTÁVEL NO SENTIDO DA ANÁLISE LIMITE.....	23
4.3 TEOREMA ESTÁTICO.....	23
4.4 TEOREMA DOS TRABALHOS VIRTUAIS.....	24
4.5 TEOREMA CINEMÁTICO.....	25
4.6 MECANISMOS DE RUPTURA.....	28
4.7 FATOR DE CONFIANÇA.....	28
4.8 CRITÉRIOS USUAIS.....	29
4.8.1 Critério de Von Mises	29
4.8.2 Critério de Mohr-Coulomb	31
5 APLICAÇÃO DA ANÁLISE LIMITE PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE GABIÕES	34
5.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	34
5.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS.....	34
5.2.1 Função π do Material de Coulomb sem Coesão	35
5.2.2 Extensão do Teorema cinemático em Meio Poroso Saturado	36
5.2.3 Capacidades de Resistência dos Materiais	37
5.3 ESTABILIDADE DE UM GABIÃO ISOLADO EM MEIO SATURADO.....	39
5.3.1 Mecanismo N°1	40
5.3.1.1 Aplicação do Teorema Cinemático	42
5.3.1.1.1 Trabalho Resistente Máximo	42
5.3.1.1.2 Trabalho das Forças Exteriores e dos Esforços Intersticiais.....	43

5.3.2 Mecanismo N°2	46
5.3.2.1 Aplicação do Teorema Cinemático.....	47
5.3.2.1.1 Trabalho Resistente Máximo	47
5.3.2.1.2 Trabalho das Forças Exteriores e dos Esforços Intersticiais	47
5.3.3 Mecanismo N°3	48
5.4 ESTABILIDADE DE UMA CORTINA NA CONFIGURAÇÃO PORTUÁRIA	50
5.4.1 Generalização do Mecanismo N°1: Mecanismo Q1	51
5.4.1.1 Aplicação do Teorema Cinemático.....	53
5.4.1.1.1 Trabalho Resistente Máximo.....	53
5.4.1.1.2 Trabalho das Forças Externas.....	53
5.4.2 Generalização do Mecanismo N°2: Mecanismo Q2	55
5.4.2.1 Aplicação do Teorema Cinemático.....	56
5.4.2.1.1 Trabalho Resistente Máximo.....	56
5.4.2.1.2 Trabalho das Forças Externas.....	56
5.4.3 Generalização do Mecanismo N°2: Mecanismo Q3	58
5.4.3.1 Trabalho Resistente Máximo.....	58
5.4.3.2 Trabalho das Forças Externas.....	58
5.4.4 Generalização do Mecanismo N°3: Mecanismo Q4	60
5.5 ESTABILIDADE DE UMA CORTINA NA CONFIGURAÇÃO DE TABIQUE ..	61
5.5.1 Generalização dos mecanismos Q3 e Q4: Mecanismo B3 e B4	62
5.5.1.1 Aplicação do Teorema Cinemático.....	64
5.5.1.1.1 Trabalho Resistente Máximo.....	64
5.5.1.1.2 Trabalho das Forças Externas.....	64
5.5.2 Estabilidade de uma Cortina ao Deslizamento: Mecanismo B5	67
5.6 APLICAÇÃO	68
6 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Ao efetuarem-se cortes em taludes, regularizar leitos de rios ou fazer escavações torna-se necessário a estabilização do terreno, utilizando técnicas de reforço de solos, tais como muros de gravidade, muros atirantados, muros de flexão, cortinas, *crib walls*, *jet grouting*, solo grampeado, terra armada, solo-cimento e adições de fibras e geotêxteis. No entanto estas estruturas de reforços devem ser dimensionadas e esse trabalho versa sobre a aplicação da teoria da análise limite pelo método cinemático a um tipo específico de reforço em solos, as cortinas de gabiões quando dimensionadas no estado limite ultimo, levando em consideração interação entre a cortina e o solo e diferenças do nível d'água, uma vez que o reforço de solos por cortinas de gabiões são usualmente utilizados em portos, canais, tabiques e regularização de leitos de rios. Esse trabalho visa descrever uma maneira diferente de dimensionar cortinas de Gabiões, o método baseado na teoria da análise limite tridimensional pelo método cinemático, ou seja, baseado em mecanismos de ruptura. Esse trabalho justifica-se, pois apresenta outra maneira de dimensionar estruturas de contenção que não pelo método tradicionalmente empregado no Brasil.

O trabalho será dividido em seis capítulos. Sendo o primeiro a introdução. O segundo o método de pesquisa. O terceiro descreve as técnicas de reforço em solos que é dividido em uma introdução contendo a necessidade e finalidade dos sistemas de reforço, após é descrito um sistema particular que são as cortinas de gabiões e os fatores de minoração e majoração da norma europeia. O quarto capítulo se subdivide em seis partes, a primeira introduz a análise limite como um método de análise privilegiado para engenheiros, a segunda versa sobre a definição das cargas suportáveis no sentido da análise limite, a terceira trata do teorema estático, a quarta descreve o teorema cinemático e as funções π de modo generalizado, na quinta parte é apresentado à noção de mecanismos de ruptura e por fim são apresentados dois critérios de resistência usuais e as funções π associadas. O quinto capítulo é a aplicação da análise limite na verificação da estabilidade de sistemas de gabiões, este se subdivide em sete partes: na primeira há a descrição do problema, na segunda trata dos modelos geométrico e mecânico, na terceira é implementado o método cinemático, na quarta é descrito os mecanismos de ruptura adotados, na quinta é apresentado os resultados, na sexta os mesmos são analisados e comentados e na parte final são apresentadas as conclusões encontradas.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA E OBJETIVOS DO TRABALHO

A questão de pesquisa deste trabalho pode ser colocada desta forma: como se verifica as cortinas de gabiões do tipo saco de grande raio pela teoria da análise limite?

O objetivo principal deste trabalho é a implementação do método cinemático da análise limite para avaliar a estabilidade de cortinas de gabiões.

E para alcançar esta meta é necessário descrever a teoria da análise limite sendo este o objetivo secundário deste trabalho.

2.2 PRESSUPOSTOS

Para este trabalho os pressupostos advêm de características da análise limite ou de simplificações do modelo e são os seguintes:

- a) os materiais que constituem o solo, que preenchem cada gabião e o metal que forma a tela dos gabiões, são do tipo elásto-plástico com patamar de escoamento para a teoria da análise limite, o que é um modelo adequado havendo grandes deformações antes da ruptura destes materiais. Além disso, serão considerados isotrópicos os materiais que compõem o material de enchimento dos gabiões, o solo e o metal das telas;
- b) durante os cálculos dos mecanismos de ruptura, o substrato é considerado como possuindo resistência infinita;
- c) mecanismos de ruptura simples levam a cargas muito próximas à carga última e que por sua vez também é próximo de resultados de ensaios de laboratório.

2.3 DELIMITAÇÃO E LIMITAÇÕES

Este trabalho trata da aplicação da teoria da análise limite pelo método cinemático ao problema de verificação de cortinas de gabiões tipo saco, estruturas de contenção comumente utilizadas em obras portuárias e em regularização de leito de rios. A limitação deste trabalho é

o fato que neste trabalho para a teoria da análise limite será efetuado apenas a aplicação do método cinemático. Logo, só serão encontrados limites superiores das cargas limites.

2.4 DELINEAMENTO

O delineamento do trabalho abrangeu as seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica: nesta etapa do trabalho a pesquisa bibliográfica será focada na teoria da análise limite e na teoria de reforço de solos;
- b) elaboração do texto que descreve a teoria da análise limite e de reforço de solos: na etapa de elaboração do texto sobre a análise limite foi descrita a teoria para o caso tridimensional, tanto para o método estático como para o método cinemático, e para a teoria de reforço será descrito as necessidades e finalidades do reforço em solos e o sistema de cortinas de gabiões;
- c) concepções dos diversos mecanismos de ruptura para o problema considerando o solo como sem coesão;
- d) cálculos dos resultados do método da análise limite para os mecanismos propostos: nessa fase do trabalho se resolveu as equações da análise limite para os mecanismos propostos de maneira algébrica e após se substituiu os valores dos parâmetros do solo para que as cortinas possam ser verificadas;
- e) análise e processamento dos resultados: com todos os resultados encontrados, foi verificada a estabilidade dos sistemas estrutura-solos;
- f) conclusões finais: nesta etapa foram detalhados quais os passos necessários e será feita uma análise crítica do método de verificação baseado na teoria da análise limite.

Na figura 1 mostra-se o esquema do delineamento.

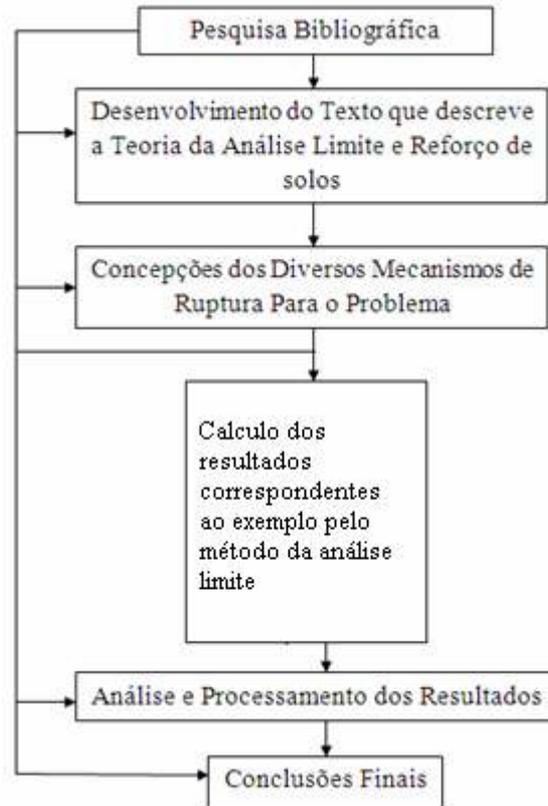


Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa

3 TÉCNICAS DE REFORÇO POR GABIÕES EM GEOTECNIA

Ao realizarem-se escavações e movimentações de terra, o solo é descomprimido, diminuindo assim suas tensões efetivas e por conseqüência desestabilizando o maciço de terra. Para evitar a ruptura é comum a utilização de técnicas de reforço, sejam elas estruturas de contenção ou a introdução de elementos de elevada resistência a tração ou compressão no maciço. Ao introduzir, por meio do reforço, uma estrutura de rigidez muito superior a do solo, estabiliza-se o terreno, como ocorre em estruturas de contenção e em alguns outros tipos de reforço como solo grampeado, terra armada, ou no aumento da rigidez do próprio terreno, como no caso de reforços por solo cimento.

O reforço do terreno por estruturas de contenção baseia-se na introdução ao sistema estrutural de um elemento de rigidez muito superior ao do solo que o comprimira e deste modo eleva a energia necessária para romper o talude. Esta estrutura, por sua vez, é submetida a carregamentos provenientes de deslocamentos impostos pelas movimentações do maciço de terra. Esta é uma pratica de reforço muito antiga, tendo seus primeiros registros entre 3200 a 2800 a.C., na região sul da Mesopotâmia, atual Iraque, em muros de contenção de alvenaria de argila contendo aterros construídos pelo povo sumério (Kinder ; Hilgemann, 1964). Já obras de contenção seguindo preceitos modernos só começaram a partir do século 18, fruto do trabalho de engenheiros franceses. Agora este trabalho descreve uma técnica específica de reforço de solo, o reforço por gabiões.

3.1 GABIÕES: DESCRIÇÃO DO SISTEMA

As estruturas de contenção por gabiões já são um sistema tradicional. Sua origem é italiana e foram empregadas pela primeira vez, em sua versão moderna, no final do século XIX. Desde então, sua utilização é crescente, e os campos de utilização são mais amplos a cada dia. No Brasil esta solução começou a ser utilizada no início dos anos 70 e hoje já existem muitas obras em todas as regiões do país. São constituídas por elementos metálicos confeccionados com telas de malha hexagonal de dupla torção, preenchidos com pedras ou solo. Essas estruturas são extremamente vantajosas, tanto do ponto de vista técnico como econômico,

uma vez que, são estruturas extremamente baratas se comparadas a outras soluções e também possuem características únicas que as distinguem das demais. As estruturas formadas por gabiões caracterizam-se por serem:

- a) monolíticas, graças ao fato de todos os elementos serem amarrados entre si;
- b) resistentes e duráveis, uma vez que a tela hexagonal de dupla torção é normatizada e deve respeitar critérios de resistência e durabilidade;
- c) armadas, assim resistem a solicitações de tração e cisalhamento;
- d) flexíveis, por serem formados por telas muito flexíveis as quais permitem acomodações do terreno não precisando de fundações profundas. Além disso, permite, na maioria dos casos, que a estrutura se deforme muito antes do colapso, permitindo a detecção antecipada do problema;
- e) permeáveis, um eficiente sistema de drenagem é indispensável para o bom desempenho e vida útil de estruturas de contenção. As contenções em gabiões, pelas características intrínsecas dos materiais que as compõem, são totalmente permeáveis e, portanto autodrenantes, aliviando por completo o empuxo hidrostático sobre a estrutura;

3.2 TIPOS DE GABIÕES

Os gabiões são elementos modulares, confeccionados a partir de telas metálicas em malha hexagonal de dupla torção que, preenchidos com material de granulometria adequada e costurados juntos, para que se comportem como estrutura monolítica, formam estruturas destinadas à soluções de problemas de estabilização de encosta de taludes, hidráulicos e de controle da erosão. Seus principais tipos são: gabião tipo caixa, gabião tipo saco e gabião tipo colchão Reno:

A figura 2 demonstra as características dos três tipos principais de gabiões.

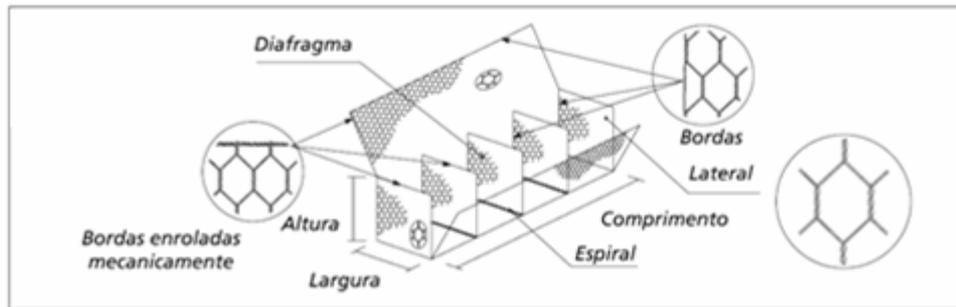
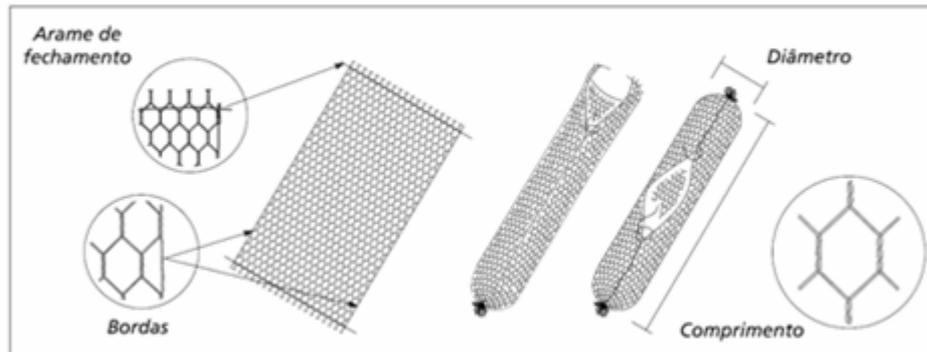
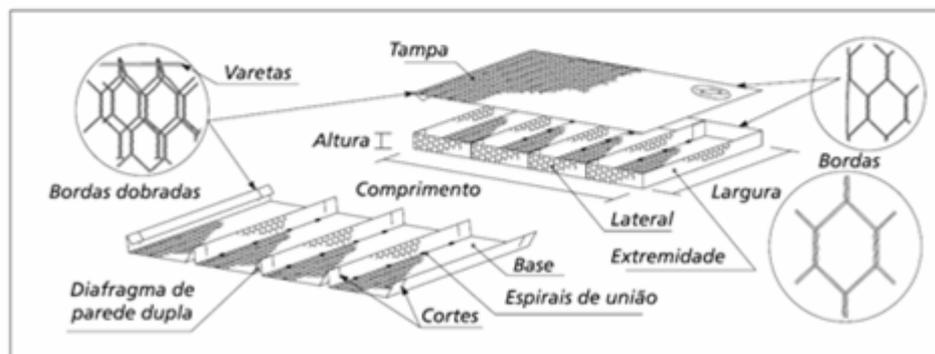
**Tipo Caixa****Tipo Saco****Tipo Colchão Reno**

Figura 2: demonstra as características dos três tipos principais de gabiões

Os gabiões atuam como estruturas de contenção de diferentes tipos. Dependendo do tipo de gabião, por exemplo, o gabião do tipo caixa forma estruturas de contenção do tipo muro de arrimo que estabiliza o empuxo de terra da encosta ou corte pelo atrito entre o solo e base, ou seja, é uma estrutura que os esforços resistentes são função do seu grande peso. Por outro lado os gabiões tipo saco quando posicionados na vertical e amarrados uns aos outros, tendo ou não células de concordância, funcionam como cortinas. Por ser uma tecnologia com muitas vantagens, os gabiões são muito utilizados.

3.3 VALORES DOS FATORES DE SEGURANÇA SEGUNDO O EUROCODE

No Eurocode 07 os fatores de segurança de Geotecnia são fatores de segurança parciais e seus valores são:

- a) os parâmetros do solo devem ser divididas por 1,25 para coesão e ângulo de atrito e por 1,4 para resistência não drenada e para resistência do solo não confinado para o caso de estruturas permanentes;
- b) as cargas permanentes devem ser multiplicadas por 1,35 se for contra a segurança já quando são a favor da segurança devem ser multiplicadas por 0,9 para o caso de estruturas permanentes;
- c) as cargas variáveis devem ser multiplicadas por 1,5 se for contra a segurança já quando são a favor da segurança devem ser desconsideradas para o caso de estruturas permanentes;
- d) os parâmetros do solo não devem ser majorados ou minorados para o caso de estruturas não permanentes;

4 TEORIA DA ANÁLISE LIMITE

A análise limite é um dos métodos de dimensionamento mais antigos tendo, seus estudos iniciados no período renascentista por Galileu em sua obra *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, de 1638, e, mais de um século depois, corroborada por Coulomb em seu ensaio *Essai sur une application des règles de Maximis et Minimis à quelques Problemes de Statique relatifs à l'Architecture*, de 1773. A teoria de análise limite baseia-se em comparar o carregamento da estrutura com sua resistência que é modelada por uma função de resistência típica do material o qual pode ser modelado pelo critério Tresca, Prandtl, Mohr-Coulomb, Von Mises, etc.

Outra característica da análise limite é que o material é considerado elásto-plástico com patamar de escoamento, sendo uma consideração razoável para materiais dúcteis: vigas e lajes em concreto armado, solos submetidos à compressão e solos reforçados. Desta forma, para materiais do tipo elástico-frágeis a resistência das estruturas é superestimada uma vez que para análise limite o comportamento da estruturas tende a ser melhor que o comportamento de seus elementos separados.

4.1 ABORDAGEM SIMPLIFICADA DA RESISTÊNCIA

Para um material dado, o nível de tensão admissível é limitado, esta limitação se comporta na prática como uma limitação sobre os esforços internos, tensão $\underline{\underline{\sigma}}$ para um meio contínuo 3D, ou seja, os materiais se comportam como um material elasto-plástico com patamar de escoamento.

4.2 CARGA SUPORTÁVEL NO SENTIDO DA ANÁLISE LIMITE

As cargas na análise limite são suportáveis, se houver uma distribuição de tensões $\underline{\underline{\sigma}}$ que equilibra as solicitações externas e respeite o critério de resistência G em qualquer ponto, ou seja, pertencem ao domínio das cargas suportáveis K se:

(equação 1)

$$\underline{\underline{\sigma}} \in G \Leftrightarrow f(\underline{\underline{\sigma}}) \leq 0$$

(equação 2)

$$\underline{\underline{Q}} \in K \Leftrightarrow \begin{cases} \text{equilíbrio com } (\rho, \vec{g}, \vec{T}) \\ \forall \underline{\underline{x}} f(\underline{\underline{\sigma}}(\underline{\underline{x}})) \leq 0 \end{cases}$$

(equação 3)

$$\underline{\underline{Q}} \in K \Leftrightarrow \begin{cases} \text{div} \underline{\underline{\sigma}} + \rho \cdot \vec{g} = 0(\Omega) \\ \underline{\underline{\sigma}} \cdot \vec{n} = \vec{T}(\text{em parte de } \delta\Omega) \end{cases}$$

Onde:

$\rho \cdot \vec{g}$ é representação das forças de volume;

\vec{T} é as forças de superfícies atuando em parte do contorno $\delta\Omega$;

\vec{n} é o vetor unitário normal a parte do contorno $\delta\Omega$;

Ω é a estrutura.

As propriedades do domínio G são:

a) $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{0}} \in G \Leftrightarrow f(\underline{\underline{0}}) \leq 0$

b) G é convexo, ou seja, $f(\underline{\underline{\sigma}})$ é uma função convexa

$$\begin{aligned} \text{se } \underline{\underline{\sigma}}_1 \in G \text{ e } \underline{\underline{\sigma}}_2 \in G &\Rightarrow \alpha \cdot \underline{\underline{\sigma}}_1 + (1 - \alpha) \cdot \underline{\underline{\sigma}}_2 \in G \forall \alpha \in [0,1] \\ \text{se } \begin{cases} f(\underline{\underline{\sigma}}_1) \leq 0 \\ f(\underline{\underline{\sigma}}_2) \leq 0 \end{cases} &\Rightarrow f(\alpha \cdot \underline{\underline{\sigma}}_1 + (1 - \alpha) \cdot \underline{\underline{\sigma}}_2) \leq 0 \end{aligned}$$

4.3 TEOREMA ESTÁTICO

O teorema estático determina que dada uma distribuição de tensão qualquer, que equilibre $\underline{\underline{Q}}$ em todos os pontos e respeita o critério de resistência G também em todos os pontos e as

condições de contorno, logo \underline{Q} é suportável e é menor ou igual que o carregamento limite \underline{Q}^+ , ou seja, \underline{Q} é um limite inferior de \underline{Q}^+ .

Considerando a definição de cargas suportáveis do domínio K e as propriedades de G , pode-se escolher tensores de tensão arbitrários quaisquer: se estes tensores equilibrarem o carregamento em todos os pontos do sólido e respeitarem o critério de resistência G e as condições de contorno, os carregamentos pertencem ao conjunto das cargas suportáveis e como K é um conjunto convexo pode-se determinar com isso um envelope K' de cargas suportáveis. Como demonstrado na figura 3.

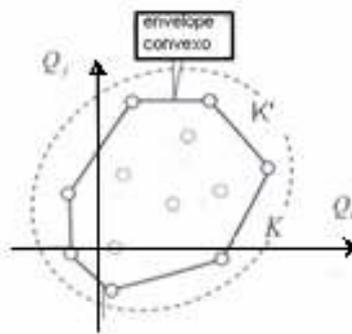


Figura 3: domínio das cargas suportáveis

4.4 TEOREMA DOS TRABALHOS VIRTUAIS

O teorema dos trabalhos virtuais expressa o equilíbrio de maneira dualizada entre o trabalho das forças externas e o trabalho das forças internas para qualquer movimento virtual e tem como sigla T.T.V.

(equação 4)

$$\forall \text{ movimento virtual } (\dot{V}) W_{\text{ext}} = W_{\text{int}}$$

(equação 5)

$$W_{\text{ext}} = \underline{Q} \cdot \underline{q}$$

(equação 6)

$$W_{\text{ext}} = \int_{\Omega} \rho \cdot \underline{\underline{g}} \cdot \underline{\underline{V}} \cdot dV + \int_{\delta\Omega} \underline{\underline{T}} \underline{\underline{V}} \cdot dA$$

(equação 7)

$$W_{\text{int}} = \int_{\Omega} \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{d}} \cdot dV$$

Onde:

$\underline{\underline{\sigma}}$ é o tensor de tensões simétrico de Cauchy no qual $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\sigma}}^T$ ($\underline{\underline{\sigma}} \in \mathbb{R}^6$);

$\underline{\underline{T}}$ é o vetor atuando sobre a área de normal $\underline{\underline{n}}$;

$\rho \cdot \underline{\underline{g}}$ é a representação das forças de volume;

$\underline{\underline{U}}$ é o vetor velocidade;

$\underline{\underline{d}}$ é a matriz da taxa de deformação.

4.5 TEOREMA CINEMÁTICO

Considere o teorema dos trabalhos virtuais e o vetor de velocidades virtuais $\underline{\underline{U}}$ diz-se que o critério de resistência é verificado em seus limites se:

(equação 8)

$$\underline{\underline{\sigma}} \text{ S.A. } \underline{\underline{Q}} \Leftrightarrow \forall \underline{\underline{U}} \text{ C.A. } \underline{\underline{Q}} \cdot \underline{\underline{d}}(\underline{\underline{U}}) = \int_{\Omega} \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{d}} \cdot dV$$

$\underline{\underline{d}}(\underline{\underline{U}})$ é o vetor dos parâmetros cinemáticos que surgem da dualidade dos parâmetros de carregamento $\underline{\underline{Q}}$ dos esforços de exteriores .

Considerando o T.T.V. e o critério de resistência G tem-se:

(equação 9)

$$\underline{Q} \in K \Leftrightarrow \begin{cases} \exists \underline{\underline{\sigma}}; \underline{\underline{\sigma}} \text{ S. A. } \underline{Q} \Leftrightarrow \forall \underline{U} \text{ C. A. } \underline{Q}, \underline{\underline{q}}(\underline{U}) = \int_{\Omega} \underline{\underline{\sigma}}; \underline{\underline{d}}. d\Omega \\ \underline{\underline{\sigma}}(\underline{x}) \in G(\underline{x}) \forall \underline{x} \in \Omega \end{cases}$$

E introduzindo a noção de função de suporte (*support functions*) do critério de resistência as expressões dependem do tipo de critério adotado e são as envoltórias dos hiperplanos

$$\underline{\underline{\sigma}}; \underline{\underline{d}} - \pi(\underline{\underline{d}}) = 0.$$

(equação 10)

$$\pi(\underline{\underline{d}}) = \max_{\underline{\underline{\sigma}}; \underline{\underline{d}}; \underline{\underline{\sigma}}(\underline{x}) \in G(\underline{x})}$$

(equação 11)

$$G = \bigcap_{\underline{\underline{d}}} \{ \underline{\underline{\sigma}}; \underline{\underline{d}} - \pi(\underline{\underline{d}}) \leq 0 \}$$

E com a idéia de função trabalho resistente máximo:

(equação 12)

$$W_{rm}(\underline{U}) = \int_{\Omega} \pi(\underline{\underline{d}}) dV$$

Substituindo (equação 16) em (equação 13) temos:

(equação 13)

$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \forall \underline{U} \underline{\underline{Q}}, \underline{\underline{q}}(\underline{U}) \leq W_{rm}(\underline{U})$$

Ou de maneira equivalente:

(equação 14)

$$\exists \underline{\dot{V}} \underline{Q} \cdot \underline{\dot{q}}(\underline{U}) \geq W_{rm}(\underline{U}) \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

E se adicionarmos o conceito de descontinuidades de velocidade o teorema cinemático fica:

(equação 15)

$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \forall \underline{U} \underline{Q} \cdot \underline{\dot{q}}(\underline{U}) \leq \int_{\hat{n}} \pi(\underline{\underline{d}}) dV + \int_{\Sigma} \pi(\underline{n}, [\underline{U}]) ds$$

(equação 16)

$$\exists \underline{\dot{V}} \underline{Q} \cdot \underline{\dot{q}}(\underline{U}) \geq \int_{\hat{n}} \pi(\underline{\underline{d}}) dV + \int_{\Sigma} \pi(\underline{n}, [\underline{U}]) ds \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

De modo que $[\underline{U}]$ é a descontinuidade de velocidades na travessia da superfície Σ de normal \underline{n} .

Na figura 4 é demonstrada a interpretação geométrica dos parâmetros de carregamento \underline{Q}

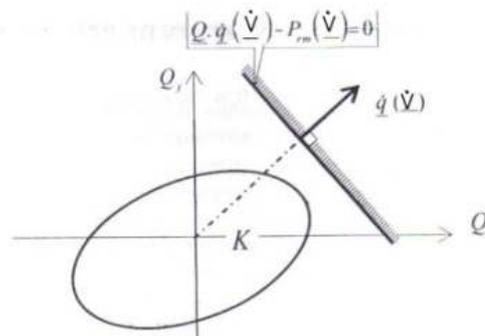


Figura 4: geométrica dos parâmetros de carregamento

Entretanto rupturas em sólidos tridimensionais acontecem em zonas de muito pequena espessura e para modelar essas rupturas deve-se introduzir o conceito de superfície de ruptura.

Considere a superfície de ruptura Σ como a da figura 5 e as funções de apoio:

(equação 17)

$$\begin{cases} \pi(\underline{\underline{x}}; \underline{\underline{d}}(\underline{\underline{x}})) = \max(\underline{\underline{\sigma}}(\underline{\underline{x}}); \underline{\underline{d}}(\underline{\underline{x}}) \mid \underline{\underline{\sigma}}(\underline{\underline{x}}) \in G(\underline{\underline{x}})) \\ \pi(\underline{\underline{x}}, \underline{\underline{n}}(\underline{\underline{x}}); [\underline{\underline{V}}(\underline{\underline{x}})]) = \max(\underline{\underline{n}}(\underline{\underline{x}}), \underline{\underline{\sigma}}(\underline{\underline{x}}), [\underline{\underline{V}}(\underline{\underline{x}})]) \mid \underline{\underline{\sigma}}(\underline{\underline{x}}) \in G(\underline{\underline{x}})) \end{cases}$$

E contribuição de Σ ao trabalho de resistência máximo W_{rm} é igual a:

(equação 18)

$$W_{rm} = \int_{\hat{\Omega}} \pi(\underline{\underline{d}}) \cdot dV + \int_{\Sigma} \pi(\underline{\underline{n}}, \underline{\underline{U}}) \cdot dA$$



Figura 5: superfície de ruptura Σ

4.6 MECANISMOS DE RUPTURA

Em meios contínuos é comum considerar mecanismos simples de ruptura, uma vez que com mecanismos simples encontram-se cargas de ruptura muito próximas das cargas limites. Um exemplo é os mecanismos de bloco onde uma parte do sólido move-se em relação à outra parte como um corpo rígido com uma velocidade $\underline{\underline{V}}$ desconsiderando deformações nos blocos.

Alem disso, é comum considerar essas superfícies de rupturas planas ou cônicas, ou seja, em corte a representação é feita por retas, assim sendo o T.T.V. simplifica-se a:

(equação 19)

$$\int_{\Omega} \rho \cdot \underline{g} \cdot \underline{U} \cdot dV + \int_{\partial\Omega} \underline{T} \cdot \underline{U} \cdot dA \leq \int_{\Sigma} \pi(\underline{n}, [\underline{U}]) \cdot dA$$

E o teorema cinemático muda para:

(equação 20)

$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \forall \underline{U} \underline{Q} \cdot \underline{\dot{q}}(\underline{U}) \leq \int_{\Sigma} \pi(\underline{n}, [\underline{U}]) \cdot dA$$

(equação 21)

$$\exists \underline{V} \underline{Q} \cdot \underline{\dot{q}}(\underline{U}) \geq \int_{\Sigma} \pi(\underline{n}, \underline{U}) \cdot dA \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

4.7 FATOR DE CONFIANÇA

Define-se fator de confiança como a razão entre o trabalho resistente máximo W_{rm} sobre o trabalho externo W_{ext} :

(equação 22)

$$F_c(\underline{V}) = \frac{W_{rm}(\Omega, \underline{U})}{W_{ext}(\underline{U})}$$

Em virtude do teorema o sistema Ω é instável desde que para um mecanismo qualquer com velocidade \underline{U} tal que $F_c(\underline{U}) < 1$.

4.8 CRITÉRIOS USUAIS

4.8.1 Critério de Von Mises

O critério de Von Mises se aplica a materiais dúcteis e isotrópicos como o aço e outros metais e é um domínio de resistência convexo definido por:

$$f(\underline{\underline{\sigma}}) \leq 0$$

(equação 23)

$$f(\underline{\underline{\sigma}}) = \frac{1}{2} \cdot \text{tr} \underline{\underline{s}}^2 - k^2 = \frac{1}{2} \cdot s_{ij} \cdot s_{ij} - k^2$$

(equação 24)

Onde:

k é uma constante do material e é a resistência ao cisalhamento do material tipo advindo de ensaios de laboratório;

$\underline{\underline{s}}$ é o tensor desviador do tensor $\underline{\underline{\sigma}}$

$\text{tr} \underline{\underline{s}}^2$ é o segundo invariante da matriz $\underline{\underline{s}}$.

$\forall p \in \mathbb{R} \quad f(\underline{\underline{\sigma}} + p \cdot \underline{\underline{I}}) = f(\underline{\underline{\sigma}})$ pois f depende apenas da parte desviadora do tensor assim sendo.

(equação 25)

$$f(\underline{\underline{\sigma}}) \leq 0 \Leftrightarrow f(\underline{\underline{\sigma}} + p \cdot \underline{\underline{I}}) \leq 0$$

(equação 26)

$$\underline{\underline{\sigma}} \in G \Leftrightarrow \underline{\underline{\sigma}} + p \cdot \underline{\underline{I}} \in G$$

Seção num plano desviador

(equação 27)

$$f(\underline{\sigma}) \leq 0 \Leftrightarrow \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \text{tr} \underline{\underline{s}}^2} - k \leq 0 \Leftrightarrow \sqrt{\text{tr} \underline{\underline{s}}^2} \leq k \cdot \sqrt{2} \Leftrightarrow \text{a seção é um círculo de raio } k$$

A representação do critério G é um cilindro de eixo a trissetriz Δ , como é representado na figura 6.

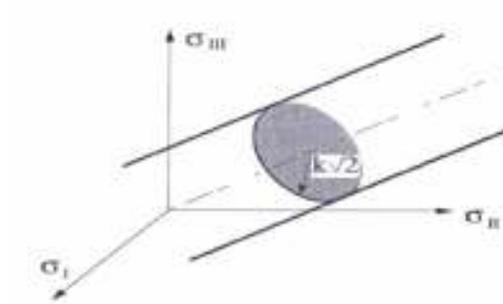


Figura 6: critério de Von Mises

E as funções $\pi(\cdot)$ de Von Mises para o meio contínuo são:

(equação 28)

$$\pi(\underline{\underline{d}}) = +\infty \quad \text{se } \text{tr}(\underline{\underline{d}}) \neq 0$$

(equação 29)

$$\pi(\underline{\underline{d}}) = k \cdot \sqrt{\text{tr}(\underline{\underline{d}})^2} \quad \text{se } \text{tr}(\underline{\underline{d}}) = 0$$

Assim sendo:

(equação 30)

$$\pi(\underline{\underline{d}}) = k \cdot \sqrt{\text{tr}(\underline{\underline{d}})^2} + \sup \{ p \cdot \text{tr}(\underline{\underline{d}}) \} \quad p \in \mathbb{R}$$

(equação 31)

$$\pi(\underline{n}, \underline{U}) = +\infty \quad \underline{U} \cdot \underline{n} \neq 0$$

(equação 32)

$$\pi(\underline{n}, \underline{U}) = k \cdot |\underline{U}| \quad \text{se } \underline{U} \cdot \underline{n} = 0$$

(equação 33)

$$\pi(\underline{n}, \underline{V}) = k \cdot |\underline{U}| + \max\{p \cdot \underline{U} \cdot \underline{n}\} \quad p \in \mathbb{R}$$

As equações 28 e 31 expressão simplesmente que os movimentos relevantes para o material deve ser sem variação do volume, $\underline{tr} \underline{d} = \underline{0}$ e que as descontinuidades são puramente tangenciais aos planos de descontinuidade de \underline{U} .

4.8.2 Critério de Mohr-Coulomb

O critério de Mohr-Coulomb se aplica a materiais como solos, concreto e interfaces com fricção, é um domínio de resistência convexo definido por:

(equação 34)

$$f(\underline{\sigma}) \leq 0$$

(equação 35)

$$\begin{aligned} f(\underline{\sigma}) &= \max\{(\sigma_1 - \sigma_1) \\ &\quad + ((\sigma_1 + \sigma_1) \cdot \sin \varphi - 2 \cdot c \cdot \cos \varphi)\} \\ &= \{I, II, III\} \end{aligned}$$

σ_i são as tensões principais, c a coesão do material e φ seu ângulo de atrito.

(equação 36)

$$f(\underline{\sigma}) = (\sigma_M - \sigma_m) + ((\sigma_M + \sigma_m) \cdot \sin \varphi - 2 \cdot c \cdot \cos \varphi)$$

A representação G é uma pirâmide de vértice $s \begin{matrix} H \\ H \\ H \end{matrix}$, com $H = c \cdot \cot \varphi$ limite em tração isotropa eixo a trissetriz Δ e seção transversal um hexágono irregular.

A seção num plano desviador é um hexágono irregular com trecho em tração σ_t e trecho em compressão σ_c que valem respectivamente.

(equação 37)

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot \sqrt{6} \cdot (c \cdot \cos \varphi + \sigma_0 \sin \varphi)}{3 + \sin \varphi}$$

(equação 38)

$$\sigma_c = \frac{-2 \cdot \sqrt{6} \cdot (c \cdot \cos \varphi + \sigma_0 \sin \varphi)}{3 - \sin \varphi}$$

A figura 7 mostra a representação do critério de Mohr-Coulomb.

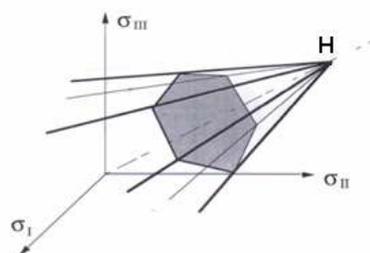


Figura 7: critério de Mohr-Coulomb

E as funções $\pi(\cdot)$ de Mohr-Coulomb para o meio contínuo são:

(equação 39)

$$\pi(\underline{\underline{d}}) = +\infty \quad \text{se } \text{tr}(\underline{\underline{d}}) < (|d_1| + |d_2| + |d_3|) \cdot \sin \varphi$$

(equação 40)

$$\pi(\underline{\underline{d}}) = H \cdot \text{tr}(\underline{\underline{d}}) \quad \text{se } \text{tr}(\underline{\underline{d}}) \geq (|d_1| + |d_2| + |d_3|) \cdot \sin \varphi$$

Assim sendo:

(equação 41)

$$\pi(\underline{\underline{d}}) = H \cdot \text{tr}(\underline{\underline{d}}) + \text{Max} \left(p \cdot \left((|d_1| + |d_2| + |d_3|) \cdot \sin \varphi - \text{tr}(\underline{\underline{d}}) \right) \right)$$

$$p \geq 0$$

$$).$$

$$).$$

$$).$$

Com

A desigualdade na equação 44 significa que os movimentos relevantes devem induzir dilatação do material, isto é, aumento dos volumes

(equação 42)

$$\pi(\underline{\underline{n}}, \underline{\underline{V}}) = +\infty \quad \underline{\underline{V}} \cdot \underline{\underline{n}} < |\underline{\underline{U}}| \cdot \sin \varphi$$

(equação 43)

$$\pi(\underline{n}, \underline{U}) = H \cdot \underline{U} \cdot \underline{n} \quad \text{se } \underline{U} \cdot \underline{n} \geq |\underline{U}| \cdot \sin \varphi$$

(equação 44)

$$\pi(\underline{n}, \underline{V}) = H \cdot \underline{U} \cdot \underline{n} + \max\{p \cdot (|\underline{U}| - \underline{U} \cdot \underline{n})\} \quad p \geq 0$$

A condição $\underline{U} \cdot \underline{n} \geq |\underline{U}| \cdot \sin \varphi$ traduz o fato que a descontinuidade de velocidade deve ser inclinada num ângulo superior a φ em relação ao plano da superfície de descontinuidade.

5 APLICAÇÃO DA ANÁLISE LIMITE PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE GABIÕES

5.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema abordado neste trabalho é o reforço de solos com cortinas de gabiões e começa pela análise da estabilidade de um gabião isolado. Para depois evoluir para um método geral de verificação. Os mecanismos propostos são analisados para duas configurações específicas. A configuração portuária e a configuração de tabique.

5.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

A resistência dos materiais é definida pela função π do critério do material adotado. Usualmente o solo é modelado pelo critério de resistência de Coulomb onde é dependente da coesão do solo e do ângulo de atrito do mesmo. Já o critério de resistência para os gabiões é modelado pela resistência à tração da malha dos mesmos, o que leva a equações do trabalho resistente máximo para o sistema gabião solo ser do tipo:

(equação 45)

$$W_{rm} = A \cdot c \cdot \cot\varphi + B \cdot T_0$$

(equação 46)

$$W_{rm} = T_0 \cdot \left[A \cdot \frac{c}{T_0} \cdot \cot\varphi + B \right]$$

Onde:

T_0 é a resistência a tração da malha do gabião;

c é a coesão do solo;

A e B são valores reais quaisquer onde A tem dimensão de volume e B tem dimensão de área.

Como $c \ll T_0$ a parcela que depende da coesão do solo tende a zero, ou seja, o trabalho resistente máximo é majoritariamente função da resistência a tração da malha do gabião. Com isso é possível fazer uma simplificação que consiste em desprezar a coesão do solo. Deste modo, considerando a função π como dependente unicamente do ângulo de atrito.

5.2.1 Função π do Material de Coulomb sem Coesão

A função $\pi(\underline{n}, [\underline{V}])$ definida pelo ângulo de atrito φ e por uma coesão nula. Por definição os vetores $[\underline{V}]$ e \underline{n} estão fixados e procura-se o máximo produto escalar $[\underline{V}] \cdot (\underline{\sigma} \cdot \underline{n})$, uma vez que $\underline{\sigma}$ descreve todo domínio definido por $f(\underline{\sigma}) \leq 0$. A extremidade do vetor $\underline{\sigma} \cdot \underline{n} = \underline{\sigma}_n \cdot \underline{n} + \underline{\tau}$ descreve um domínio como o do plano de Mohr (σ_n, τ) . Para o material $(\varphi, c = 0)$ a representação é como apresentado na figura 8.

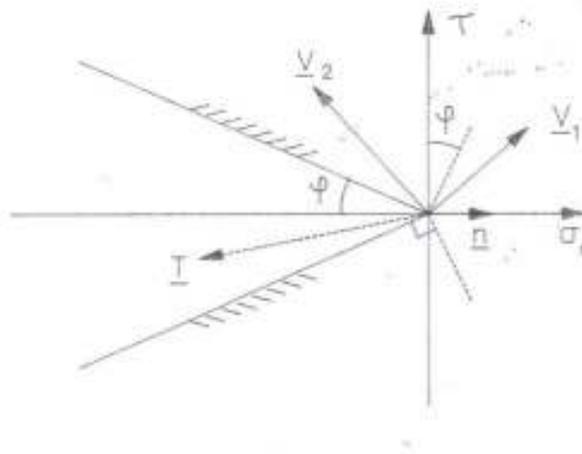


Figura 8: material de Coulomb sem coesão

Em resumo, a descontinuidade de velocidade deve permanecer dentro do plano de descontinuidades definido pela normal \underline{n} e dentro do cone de eixo \underline{n} e de ângulo $\frac{\pi}{2} - \varphi$. Caso contrário, o trabalho resistente máximo é infinito e a inequação não conduz a nenhum resultado.

(equação 47)

$$\pi(\underline{n}, [\underline{U}]) = +\infty \quad \text{se} \quad [\underline{U}] \cdot \underline{n} < [\underline{U}] \cdot \sin \varphi$$

(equação 48)

$$\pi(\underline{n}, [\underline{U}]) = 0 \quad \text{se} \quad [\underline{U}] \cdot \underline{n} \geq [\underline{U}] \cdot \sin \varphi$$

5.2.2 Extensão do Teorema cinemático em Meio Poroso Saturado

É possível estender o emprego da teoria da análise limite, notadamente para o teorema cinemático para sistemas materiais Ω , constituídos em parte ou totalmente por materiais porosos, desde que se trabalhe com o tensor de tensões efetivo $\underline{\underline{\sigma}}'$. Onde $\underline{\underline{\sigma}}'$ é definido por:

(equação 49)

$$\underline{\underline{\sigma}}' = \underline{\underline{\sigma}} + u \cdot \underline{\underline{I}}$$

Nota-se que Ω' a parte do sistema material Ω , constituída de material poroso, obedece a um critério dependente de tensões efetivas e Ω'' a outra parte de Ω como demonstrado na figura 9.

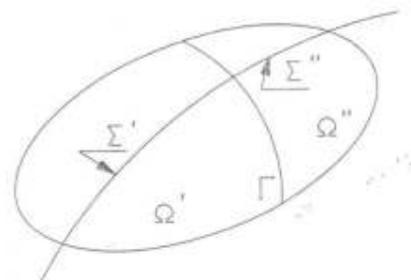


Figura 9: sistema parcialmente poroso

Supõe-se que o critério de resistência da interface $\Gamma = \Omega' \cap \Omega''$ se escreve como uma condição sobre o vetor $\underline{T}' = \underline{T} + u \cdot \underline{n}$.

Ressalta-se também que \underline{U}' e \underline{U}'' são os valores do vetor de velocidades respectivamente em Ω' e Ω'' . De um lado e do outro de Γ .

O teorema cinemático enunciado na equação 20 muda para:

$$\underline{\sigma} \text{ S.A. } \underline{Q} \Leftrightarrow \forall \underline{U} \text{ C.A. } W_{\text{ext}}(\underline{V}) + W_u(\underline{U}) \leq W_{\text{res}}(\Omega', \underline{V}') + W_{\text{res}}(\Omega'', \underline{V}'') \quad (\text{equação 50})$$

W_u é a função definida pela poro-pressão u e vale:

$$W_u = \int_{\Omega'} -\underline{U}' \cdot \text{grad } U \cdot d\Omega + \int_{\frac{\partial \Omega'}{\Gamma}} u \cdot \underline{n} \cdot \underline{U}' \cdot dA + \int_{\Gamma} \underline{U}'' \cdot u \cdot \underline{n} \cdot dA$$

(equação 51)

É interessante destacar que o sentido físico da última integral representa a quantidade:

(equação 52)

$$W_u^\Gamma = \int_{\Gamma} \underline{U}'' \cdot u \cdot \underline{n} \cdot dA$$

Em razão da função exercida pelo termo nos mecanismos imaginados, para estudar a estabilidade das diferentes configurações do sistema. Conforme a orientação de \underline{n} , $u \cdot \underline{n}$ é a pressão exercida sobre Ω'' no nível da interface Γ . Assim W_u^Γ é o trabalho desta pressão sobre a velocidade virtual de Ω'' .

A extensão do teorema cinemático permite a aplicação do método cinemático da análise limite para os gabiões parcial ou totalmente saturados.

5.2.3 Capacidades de Resistência dos Materiais

Primeiramente, deve-se lembrar que o substrato os mecanismos são considerados infinitamente rígidos com isso deve-se definir apenas a resistência para:

- a) o encaixe dos gabiões;
- b) e do talude interior;
- c) a interface da malha e do talude interior;
- d) a interface do talude com o substrato.

A capacidade do talude é descrita por um critério de Mohr-Coulomb sem coesão onde o ângulo de atrito é notado por φ .

As interfaces da estrutura são descritas por critérios de resistência de fronteira definidos em função do vetor \underline{T} e eventualmente \underline{T}' na interface. Assim, descrevendo a interação dos materiais na zona de fronteira. \underline{T} é decomposto em uma parte normal a interface, caracterizado pelo vetor normal \underline{n} a interface e outra perpendicular a normal \underline{n}

(equação 53)

$$\underline{T} = \sigma_n \underline{n} + \underline{t}$$

A interface da malha e do talude interior é considerada como lisa sem resistência a tração. E o critério $f_{\sigma/\tau}(\underline{T})$ toma a forma:

(equação 54)

$$f_{\sigma/\tau}(\underline{T}) = \max(\sigma_n, |\underline{t}|) \leq 0$$

O critério de interface entre o talude e o substrato é notado por $f_{\tau/\sigma}(\underline{T})$. E se considera uma interface apenas por atrito, cujo ângulo de atrito é $\delta_{\tau/\sigma}$ e o critério vale:

(equação 55)

$$f_{B/z}(T) = |\underline{\tau}| + \sigma_n \cdot \tan \delta_{tz} \leq 0$$

A resistência do encaixe entre os gabiões. É modelada como um cilindro de revolução sujeito a esforços membranares em um ponto de coordenadas cilíndricas (r, θ, z) $N_{\theta\theta}$, $N_{z\theta}$ e N_{zz} como mostra a figura 10.

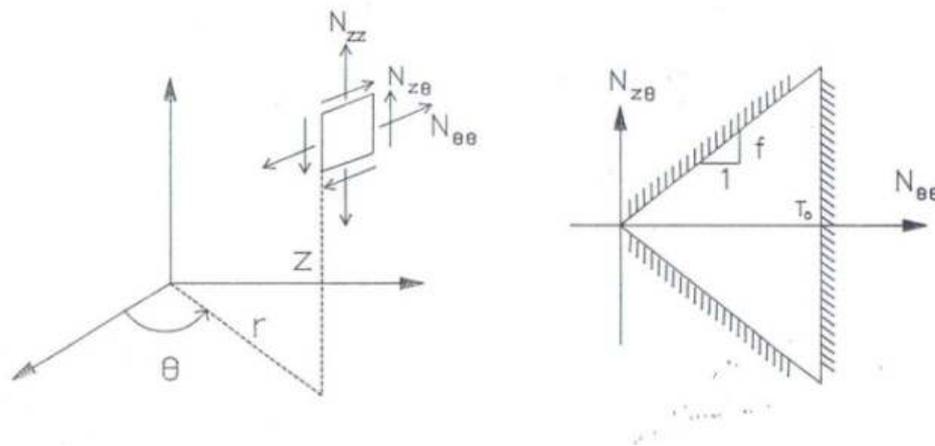


Figura 10: interface entre gabiões

Uma condição inicial escreve-se:

(equação 56)

$$0 \leq N_{\theta\theta} \leq T_0$$

Que expressa que a estrutura suporta apenas os esforços circunferenciais de tração (risco de instabilidade em compressão) estes últimos sendo limitados a um valor T_0 [KN/m] (que pode ser determinado experimentalmente, resistência ao arrancamento por unidade de comprimento).

Já a resistência ao movimento relativo paralelo a direção da interface pode ser descrita por um coeficiente de atrito f tal que:

(equação 57)

$$|N_{\theta z}| \leq f \cdot N_{ee}$$

E por fim, não são consideradas limitações sobre N_{zz} . Em resumo, o critério de resistência da interface entre os gabiões é definido pelas equações 56 e 57.

5.3 ESTABILIDADE DE UM GABIÃO ISOLADO EM MEIO SATURADO

O problema pode ser representado pelo diagrama da figura 11. E o carregamento é definido por:

- γ^- peso específico do solo úmido e por γ^+ peso específico do solo seco;
- alturas de água h_w e h_s ;
- uma pressão distribuída na superfície do gabião p_s ;
- uma força concentrada oblíqua decomposta em uma força vertical Q_v e uma força horizontal Q_h . Supõe-se que estas forças são transmitidas a cortina pelos dispositivos construtivos apropriados. Os pontos de aplicação destas forças são respectivamente uma distancia x_v do eixo vertical e a distancia do raio R ambos no topo do gabião.

A capacidade de resistência é definida por $\delta_{r,s}$, ϕ , f e T_Q .

A estabilidade do gabião isolado parcialmente saturado pode ser calculado pelos mecanismos de ruptura figuras 12, 15, 16. E é generalizado também para as configurações mais complexas apresentadas nas figuras 17 e 21.

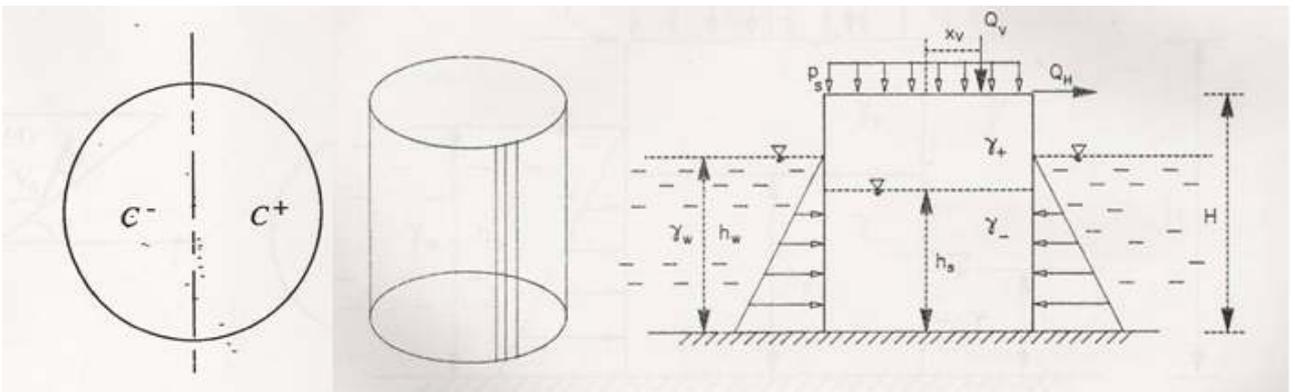


Figura 11: sistema estrutural

5.3.1 Mecanismo N°1

O mecanismo N°1 é formado por 4 blocos, que são definidos pelos ângulos α , β e pelo ponto O no eixo do talude interior e cota igual a $z = R \cdot \tan \alpha$ como demonstrado na figura 12.

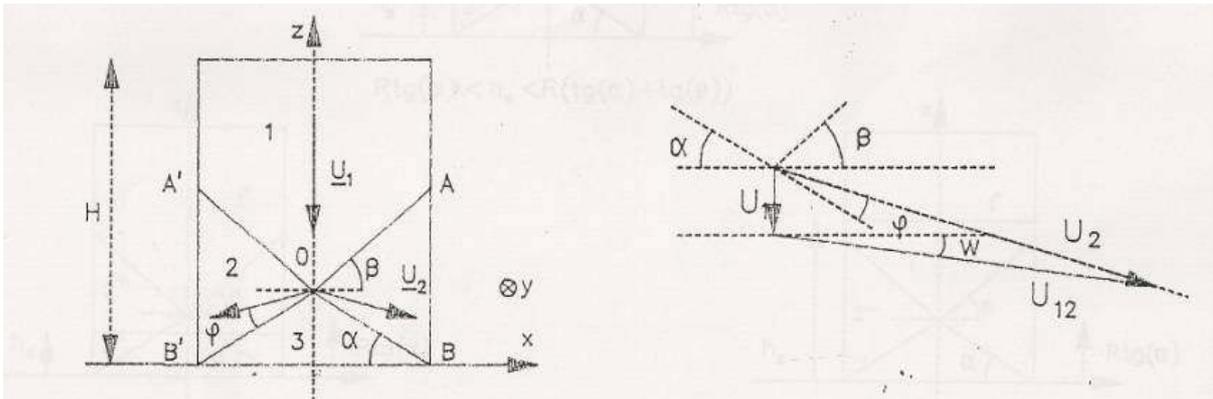


Figura 12: mecanismo N° 1

O plano OB e o plano OA contêm a direção Oy e formam respectivamente um ângulo α e β com a horizontal. O bloco n°1 é limitado inferiormente pelo plano OA e seu simétrico OA', o bloco n°2 e o bloco n°2', simétrico de 2 com plano de simetria $x = 0$ é limitado pelos planos OA e OB e 2' por OA' e OB' e o bloco n°3 é limitado superiormente pelos planos OB e OB'.

O bloco n°1 desloca-se com uma velocidade vertical $\underline{U}_1 = -U \cdot \underline{e}_z$, o bloco n°3 fica imóvel e o bloco n°2 desloca-se paralelamente ao plano $y = 0$ e necessitando-se determinar sua velocidade.

As condições de contorno e as descontinuidades de velocidades pertinentes a um material de Coulomb contribuem com uma parcela finita ao trabalho resistente máximo, e é detalhado a seguir no subitem Trabalho Resistente Máximo. Assim o ângulo $u = (\underline{OB}, \underline{U}_{32})$ entre o vetor \underline{OB} e a descontinuidade $\underline{U}_{32} = \underline{U}_2 - \underline{U}_3 = \underline{U}_2$ é análogo a condição $u \in [\varphi, \pi - \varphi]$ e é fixado como indicado a figura 12 com $u = \varphi$. Esta disposição corresponde a maximização do trabalho dos blocos n° 2 e 2', segundo a classe dos movimentos considerados. Da mesma,

forma o ângulo $\nu = (\underline{U}_{12}, \underline{OA})$ entre o vetor \underline{OA} e a descontinuidade de velocidade $\underline{U}_{12} = \underline{U}_2 - \underline{U}_1$ deve verificar a mesma condição $\nu \in [\varphi, \pi - \varphi]$. Com a notação da figura 12 é $w \geq \varphi - \beta$ e $w \leq \pi - \varphi - \beta$. A escolha do valor de w deve caracterizar a cinemática do maciço segundo o mecanismo $N^o 1$.

Em resumo, o mecanismo $N^o 1$ é definido pelos parâmetros angulares α , β e w , e respeitam as seguintes condições:

$$\alpha, \beta \geq 0; \tan \alpha + \tan \beta \leq \frac{H}{R}; w \in [\varphi - \beta, \pi - \varphi - \beta]. \quad (\text{equação 58})$$

Para essas escolhas de α , β e w a contribuição da estrutura de contenção em solo puramente granular para W_{rmi} é nula. Utilizando a geometria da figura 12, torna-se fácil calcular $U_2 = |\underline{U}_2|$ em função da velocidade U do bloco $n^o 1$:

$$U_2 = \frac{U}{\sin(\alpha - \varphi) - \tan(w) \cdot \cos(\alpha - \varphi)} \quad (\text{equação 59})$$

Falta ainda calcular o vetor velocidade da malha. Obedecendo ao critério de resistência adotado na interface entre a malha e o talude interno, a contribuição ao trabalho resistente é infinita se houver interpenetração ($[\underline{U}] \cdot \underline{n} < 0$), e é nula caso contrario. Considere os dois semi-cilindros C^+ e C^- constituídos junto à borda externa dos gabiões e situados respectivamente nos semi-espacos $x > 0$ e $x < 0$ de vetor deslocamento opostos e colineares a \underline{e}_x , com intensidade igual a projeção de \underline{U}_2 no plano horizontal:

(equação 60)

$$\underline{U}(C^-) = -|\underline{U}_2| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \underline{e}_x$$

Essa escolha conduz ao efeito de que se a descontinuidade de velocidade $\underline{U}(C^+) - \underline{U}_2$ for puramente tangencial e a contribuição $W_{rm}(R/P)$ da interface R/P ao W_{rm} for nula, o vetor velocidade no presente esquema possuirá duas descontinuidades que serão as geratrizes situadas no plano $x=0$ onde a intensidade é igual a:

(equação 61)

$$\underline{U}(C^+) - \underline{U}_2 = 2 \cdot |\underline{U}_2| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \underline{e}_x$$

5.3.1.1 Aplicação do Teorema Cinemático

A aplicação do teorema cinemático no mecanismo $N^\circ 1$ na forma enunciada em 4.12 torna necessário calcular o trabalho resistente máximo $W_{rm}(\Omega, \underline{U})$, o trabalho das forças externas W_{ext} e o termo $W_U(\underline{U})$ devido às pressões intersticiais.

5.3.1.1.1 Trabalho Resistente Máximo

A Função $W_{rm}(\Omega, \underline{U})$ é a soma de todas as contribuições do sistema Ω , e das interfaces. Como já foi visto a contribuição ao trabalho resistente máximo das interfaces $W_{rm}(R)$ e $W_{rm}(R/P)$ são nulos. A interface R/P não apresenta descontinuidade de velocidade e sua contribuição ao trabalho resistente máximo também é nulo. Por essas razões o trabalho resistente máximo resume-se a:

(equação 62)

$$W_{rm}(\Omega, \underline{U}) = W_{rm}(P, \underline{U}) = 4 \cdot H \cdot T_o \cdot |\underline{U}_2| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$$

5.3.1.1.2 Trabalho das Forças Exteriores e dos Esforços Intersticiais

O trabalho das solicitações exteriores é constituído pela pressão de água sobre a estrutura de contenção, as forças gravitacionais definidas por γ_+ e γ_- e pelas forças concentradas Q_v e Q_n e P_s distribuídas no topo do talude, além da Pressão hidrostática interno ao talude até a altura h_s .

A contribuição da pressão hidrostática atuando no exterior da estrutura vale:

(equação 63)

$$W_{hid} = -2 \cdot \gamma_w \cdot h_w^2 \cdot R \cdot |\underline{U}_2| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$$

E defini-se respectivamente por V_1 e V_2 os volumes dos blocos 1 e 2 em movimento no mecanismo que valem:

(equação 64)

$$V_1 = \pi \cdot R^3 \cdot \left[\frac{H}{R} - \tan \alpha \right] - \frac{4}{3} \cdot R^3 \cdot \tan \beta$$

Para calcular o trabalho das forças gravitacionais e da pressão intersticial é necessário avaliar as frações de V_1 e V_2 situados acima e abaixo do nível d'água. Notados respectivamente por V_1^+ , V_1^- , V_2^+ e V_2^- . Que serão avaliados pelos três casos demonstrados na figura 13.

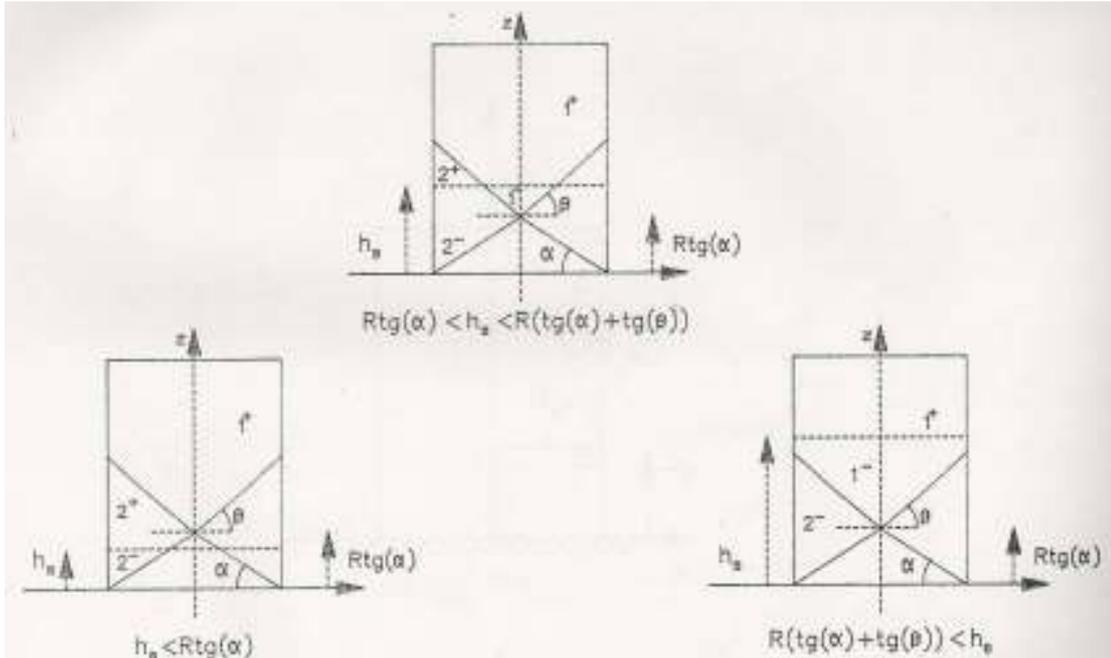


Figura 13: volumes dos blocos em função do nível d'água

Para calcular estes volumes deve-se definir a função $F(X, Y, W)$ que é baseado no volume elementar apresentado na figura 14.

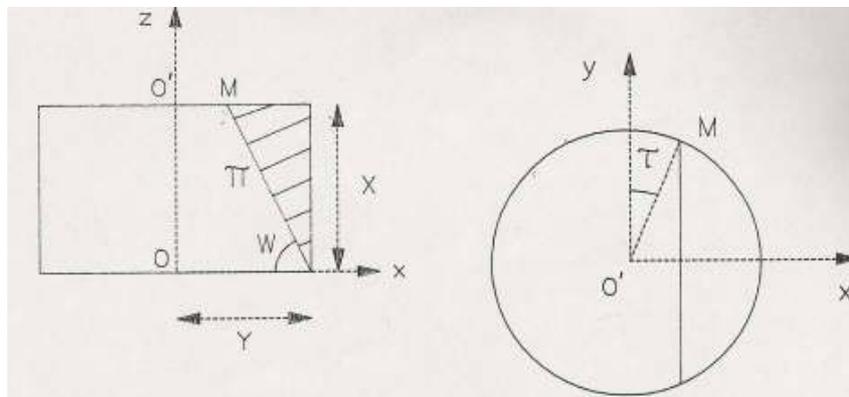


Figura 14: volume elementar

$F(X, Y, W)$ é definida a partir do volume elementar hachurado da figura 14, ocupando a fração do cilindro de altura X e raio Y situado acima do plano π tangente a circunferência inferior e formando um ângulo W com o plano horizontal. Define-se que π corta o disco superior. Que $\tan W > X/(2.R)$ e que MM' é o traço de π no disco superior. Denota-se

também, τ como o ângulo do vetor OM com a direção. Assim a expressão toma a forma de uma integral em coordenadas cilíndricas de equação:

(equação 65)

$$F(X, Y, W) = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} \int_{Y \frac{\sin \tau}{\cos \theta}}^Y \int_{z(\theta, \rho)}^X \rho \cdot dz \cdot d\rho \cdot d\theta$$

$$\sin \tau = 1 - \frac{X/Y}{\tan W}$$

$$z(\theta, \rho) = X - \tan W \cdot (\rho \cdot \cos \theta - R \cdot \sin \tau)$$

E fazendo as operações algébricas a equação resulta:

(equação 66)

$$F(X, Y, W) = 2 \cdot Y^3 \cdot \tan W \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \cos^3 \tau - \frac{1}{2} \cdot \sin \tau \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \tau - \sin \tau \cdot \cos \tau \right) \right]$$

Com isto torna-se possível avaliar os valores de para os três casos:

1º caso: $h_s < R \cdot \tan \alpha$

(equação 67)

$$V_1^- = 0; V_1^+ = V_1$$

$$V_2^- = F(h_s, R, \alpha); V_2^+ = V_2 - V_2^-$$

2º caso: $R \cdot \tan \alpha < h_s < R \cdot (\tan \alpha + \tan \beta)$

$$V_2^+ = F(R, (\tan \alpha + \tan \beta) - h_s, R, \beta); V_2^- = V_2 - V_2^+$$

$$V_1^+ = \pi \cdot R^2 \cdot (H - h_s) - 2 \cdot V_2^+; V_1^- = V_1 - V_1^+$$

3º caso: $h_s > R \cdot (\tan \alpha + \tan \beta)$

$$V_1^+ = \pi \cdot R^2 \cdot (H - h_s); V_1^- = V_1 - V_1^+$$

$$V_2^- = 0; V_2^+ = V_2$$

Deste modo, o trabalho $W_{ext}(\underline{U}) + W_u(\underline{U})$ é formado pelo trabalho das forças gravitacionais, da pressão hidrostática que atua sobre a face externa ao gabião que é a mesma que atua na face interna, da força distribuída p_s e da força concentrada vertical Q_v . A força concentrada horizontal Q_h não contribui, uma vez que não trabalha no movimento do bloco nº1. Utilizando a expressão de W_{hid} e os cálculos dos volumes V_1^+ e V_1^- o trabalho das solicitações externas fica:

(equação 68)

$$W_{\text{ext}}(\underline{U}) + W_{\text{a}}(\underline{U}) = (\gamma^+ \cdot V_1^+ + (\gamma^- - \gamma_w) \cdot V_1^-) \cdot U$$

$$+ 2 \cdot (\gamma^+ \cdot V_2^+ + (\gamma^- - \gamma_w) \cdot V_2^-) \cdot |U_2| \cdot \sin(\alpha - \varphi) +$$

$$2 \cdot \gamma_w (h_s^2 - h_w^2) \cdot R \cdot |U_2| \cos(\alpha - \varphi) +$$

$$(p_s \cdot \pi \cdot R^2 + Q_v) \cdot U$$

5.3.2 Mecanismo N°2

O mecanismo N°2 é formado por dois blocos dentro do talude interno. Eles são definidos pelo ângulo α e pela ordenada z_P do ponto P (ver figura 15).

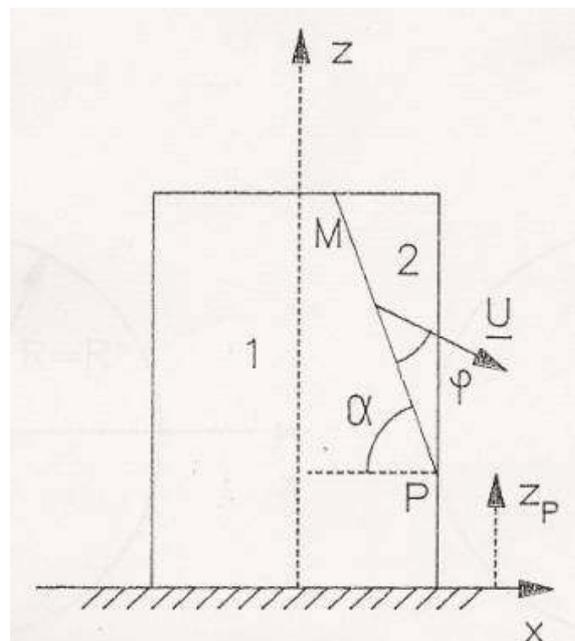


Figura 15: mecanismo N°2

O plano PM contém a direção Oy e forma um ângulo α com a horizontal. Este plano limita inferiormente o bloco nº2 e superiormente o bloco nº1. E intersepta a face superior do gabião.

De modo que $\alpha \in \left[\arctan\left(\frac{H-z_p}{2.R}\right), \frac{\pi}{2} \right]$.

O bloco nº1 permanece em repouso, enquanto o bloco nº2 possui uma velocidade de translação \underline{U} , o plano MP corresponde a uma superfície de descontinuidade de velocidades no talude interior. Por esta razão relaciona-se o cálculo da função π relativa ao critério de Mohr-Coulomb e relacionando com o que foi visto no mecanismo N°1 fixa-se o ângulo $(\underline{MP}, \underline{U})$ igual ao ângulo de atrito do solo.

É conveniente evidenciar, novamente, a interpenetração dos materiais ao nível de interface entre o talude interior e a malha, mais precisamente, notando x_M a abscissa do ponto M:

Se $x_M < 0$: o semi-cilindro situado no domínio $x < 0$ permanece imóvel. Nesta situação o domínio $x < 0$ é animado com uma velocidade de translação \underline{U}_p igual à projeção de U sobre o plano horizontal, de modo que $\underline{U}_p = |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \underline{e}_x$.

Se $x_M > 0$: define a cinemática do gabiões de modo a maximizar a contribuição dos trabalhos $W_{ext}(\underline{U}) + W_u(\underline{U})$ das pressões hidrostáticas internas e externas. De fato se distingue dois casos em função de h_s e h_w :

Se $h_s > h_w$: adota-se a cinemática anteriormente descrita.

Se $h_s < h_w$: somente a parte situada no domínio $x > x_M$ esta em movimento, e sua velocidade é $\underline{U}_p = |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \underline{e}_x$.

5.3.2.1 Aplicação do Teorema Cinemático

5.3.2.1.1 Trabalho Resistente Máximo

Como para o mecanismo N°1 a única contribuição ao trabalho resistente máximo provém das malhas dos gabiões. Pela cinemática construtiva o trabalho vale:

$$W_{rm}(\Omega, \underline{U}) = W_{rm}(P, \underline{U}) = 2 \cdot H \cdot T_o \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \quad (\text{equação 69})$$

5.3.2.1.2 Trabalho das Forças Exteriores e dos Esforços Intersticiais

Examinando, primeiramente, a contribuição das forças gravitacionais o volume do bloco n°2 é calculado a partir da função $F(X, Y, W)$ apresentada no mecanismo N°1 e vale:

$$V_2 = F(H - z_p, R, \alpha) \quad (\text{equação 70})$$

Como foi feito para o primeiro mecanismo é conveniente determinar as frações de V_2 acima e abaixo do nível d'água:

Caso 1: $h_s < z_p$

$$V_2^+ = V_2; V_2^- = 0 \quad (\text{equação 71})$$

Caso 2: $h_s > z_p$

$$V_2^- = F(h_s - z_p, R, \alpha); V_2^+ = V_2 - V_2^-$$

E R' é a semi-largura em projeção sobre o eixo Oy de parte em movimento. E vale:

se $h_s < h_w$ e $x_M > 0$: $R' = R \cdot \cos \tau$

se $h_s > h_w$ e $x_M < 0 : R' = R$

Com esta notação o trabalho das pressões hidrostáticas internas e externas conforme a cinemática definida por \underline{U}_p é igual a $\gamma_w \cdot |\underline{U}| \cdot (h_s^2 - h_w^2)$. A área em movimento dentro da seção $z = h$ vale $A = \left(\frac{\pi}{2} - \tau\right) \cdot R^2 - R \cdot x_M \cdot \cos \tau$.

O trabalho da pressão p_s vale $p_s \cdot A \cdot |\underline{U}| \cdot \sin(\alpha - \varphi)$ O trabalho da força horizontal Q_h é evidentemente $Q_h \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$. Por fim, a contribuição da carga vertical Q_v vale $\varepsilon \cdot Q_v \cdot |\underline{U}| \cdot \sin(\alpha - \varphi)$ com ε igual a 0 se $X_v < x_M$ igual a 1 se $X_v \geq x_M$ desta forma o trabalho resulta em:

(equação 72)

$$W_{\text{ext}} + W_u = (\gamma^+ \cdot V_2^+ + (\gamma^+ - \gamma_w) \cdot V_2^-) \cdot |\underline{U}| \cdot \sin(\alpha - \varphi) +$$

$$\gamma_w (h_s^2 - h_w^2) \cdot R' \cdot |\underline{U}| \cos(\alpha - \varphi) + Q_h \cdot |\underline{U}| \cos(\alpha - \varphi) +$$

$$(p_s \cdot A + \varepsilon \cdot Q_v) \cdot |\underline{U}| \cdot \sin(\alpha - \varphi)$$

5.3.3 Mecanismo N°3

O mecanismo N°3 é uma variação do mecanismo N°2 correspondente a situação onde o ângulo α esta contido no intervalo $\left]0, \arctan\left(\frac{H-x_p}{2R}\right)\right]$, de modo que o plano MP não intersepta a face superior da célula como mostrado na figura 16.

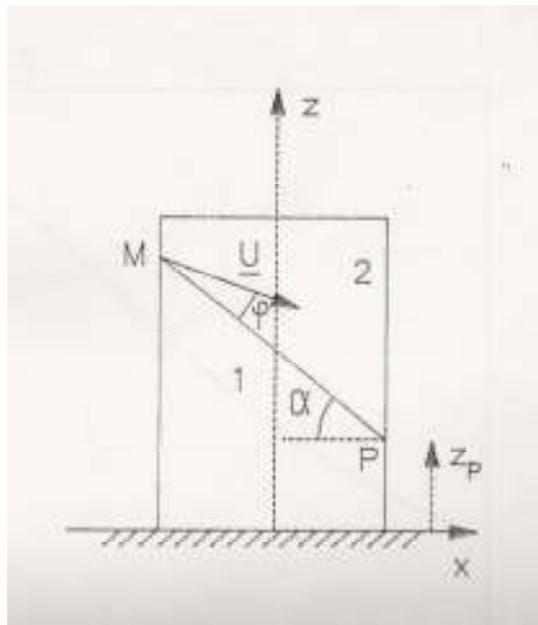


Figura 16: mecanismo N°3

A cinemática do bloco n°2 é a mesma descrita para o mecanismo N°2 com a parte situada no domínio $x > 0$ animada de uma velocidade de translação igual a $\underline{U}_P = |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \underline{e}_x$ e a outra parte é imóvel.

Para o cálculo dos trabalhos $W_{ext}(\underline{U}) + W_u(\underline{U})$ deve-se efetuar as seguintes alterações $R' = R$, $\varepsilon = 1$ e os valores de V_2^+, V_2^- e V_2^- mudam para:

(equação 73)

$$V_2 = (H - z_p - R \cdot \tan \alpha) \cdot \pi \cdot R^2$$

Caso 1: $h_s < z_p$

(equação 74)

$$V_2^+ = V_2; V_2^- = 0$$

Caso 2: $z_p < h_s < z_p + 2 \cdot R \cdot \tan \alpha$

$$V_2^- = F(h_s - z_p, R, \alpha); V_2^+ = V_2 - V_2^-$$

Caso 3: $h_s > z_p + 2 \cdot R \cdot \tan \alpha$

$$V_2^+ = (H - h_s) \cdot \pi \cdot R^2; V_2^- = V_2 - V_2^+$$

Da forma que a expressão de $W_{ext}(\underline{U}) + W_{int}(\underline{U})$ é igual a do mecanismo N°2 mudando apenas algumas variáveis.

5.4 ESTABILIDADE DE UMA CORTINA NA CONFIGURAÇÃO PORTUÁRIA

A estabilidade de uma cortina na configuração portuária pode ser feita com referência ao diagrama da figura 17 com $h_w' = h_w$. O carregamento é definido por:

- γ^- peso específico do solo úmido e por γ^+ peso específico do solo seco;
- sobrecarga p_s aplicada sobre a face superior da cortina nas células principais e de contorno;
- força concentrada vertical Q_v e uma força concentrada horizontal Q_h aplicada em todas as células principais da cortina;
- alturas de água h_w em cada lado da estrutura e da altura do nível d'água h_s dentro do talude.

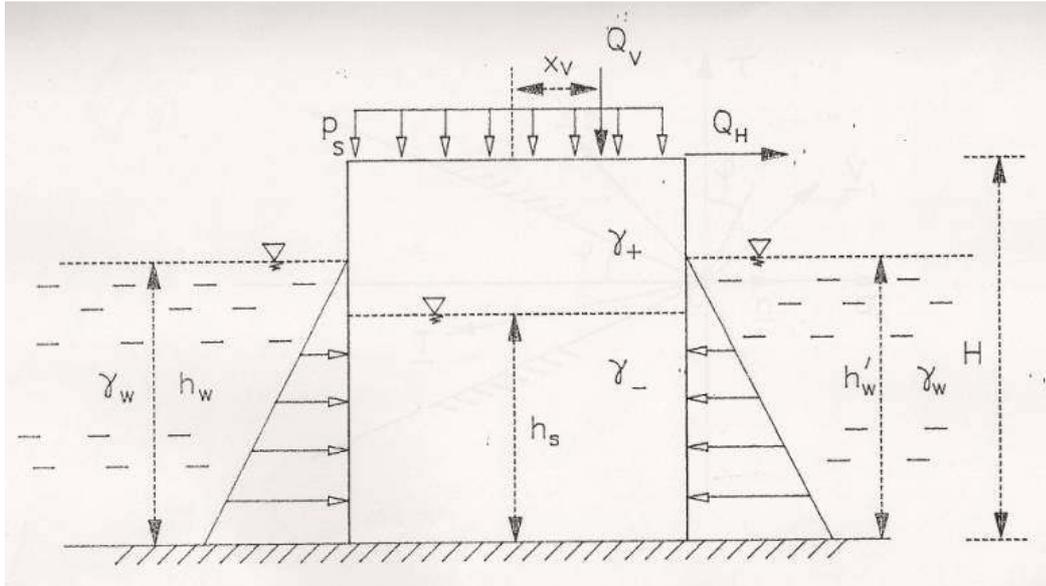


Figura 17: configuração portuária

As capacidades de resistência são como anteriormente descritas e caracterizadas pelos parâmetros δ_{rs} , φ , f e T_σ .

A idéia, desta fase do estudo, consiste em generalizar os mecanismos N°1, N°2 e N°3 apresentado no capítulo 5.3 A geometria da cortina é apresentada na figura 18.

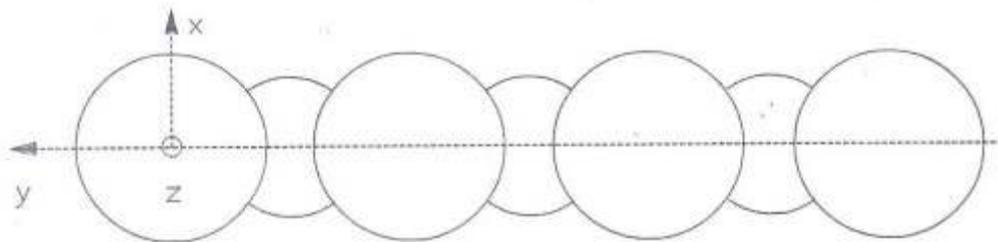


Figura 18: células principais e de contorno

Nota-se por N o numero de células principais e por $N-1$ o numero de células de contorno. Os vetores $C_p.I$ juntam o centro da célula principal ao ponto de encontro I . Os vetores $C_r.I$ juntam o centro das células de contorno ao ponto I . Estes vetores são perpendiculares, como mostrados na figura 19. Deste modo, $C_p.I$ forma um ângulo θ com a horizontal.

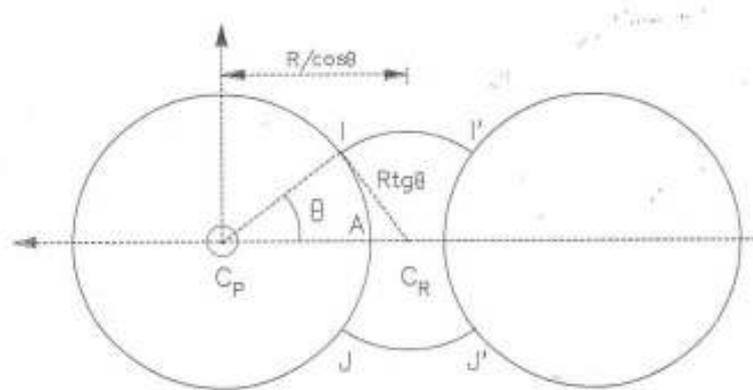


Figura 19: ponto de encontro entre células principais e de contorno

5.4.1 Generalização do Mecanismo N^o1: Mecanismo Q1

Para as N células principais adotam-se a cinemática do mecanismo N^o1. E para as células de encaixe a cinemática será descrita a seguir.

A velocidade das células de contorno junto a uma célula principal é dada pelo conjunto de equações 62. Escolhe-se atribuir ao arco II' a velocidade $\underline{U}(C^+)$ e para o arco JJ' a velocidade $\underline{U}(C^-)$. É natural fixar a componente de velocidade segundo a velocidade do talude interior dentro das células de contorno; esta escolha permite evitar a interpenetração malha-talude interno tanto ao nível da interface IA quanto da interface II', contudo, nota-se que uma descontinuidade de velocidades eventual ao nível da interface talude interno-substrato forma um ângulo superior ou igual a δ_{rr} com a horizontal. A velocidade agora possui uma componente ascendente. Para minimizar o trabalho resistente dos pesos neste movimento, deve-se minimizar os volumes em movimento no talude interno das células de encaixe. A idéia é limitar o volume a zona cilíndrica de geratriz vertical dentro da seção, caracterizada pelo ângulo X, hachurado na figura 20, animado de uma velocidade de translação igual a:

(equação 75)

$$\underline{V} = |\underline{U}_2| \cdot c$$

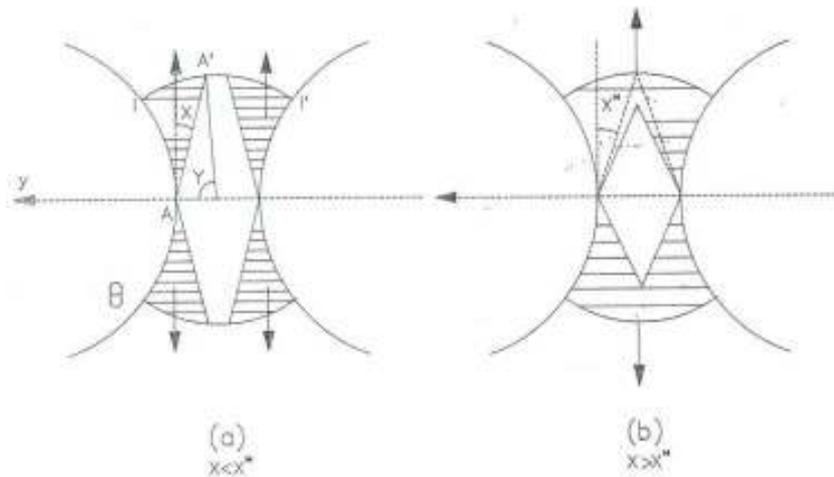


Figura 20: zona de movimento nas células de encaixe

A velocidade na célula de contorno é nula em decorrência da zona hachurada. O plano vertical de traço AA' e seu simétrico constituem uma superfície de descontinuidade. Para que as condições impostas pelo critério de Coulomb sejam respeitadas, torna-se fácil enxergar que o ângulo X verifica a condição:

(equação 76)

$$\sin X \geq \frac{\sin \varphi}{\cos \delta_{rr}}$$

A minimização do volume em movimento conduz a fixar a igualdade na equação 76. Assim, o valor de X resulta em $X^* = \theta/2$, de onde se obtêm as duas situações da figura 20.

5.4.1.1 Aplicação do Teorema Cinemático

5.4.1.1.1 Trabalho Resistente Máximo

O trabalho resistente máximo vem ao nível da resistência ao arrancamento dos gabiões e é dado para uma única célula pela equação 62. E por analogia:

(equação 76)

$$W_{rm}(\Omega, \underline{U}) = 4 \cdot N \cdot H \cdot T_o \cdot |\underline{U}_2| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$$

5.4.1.1.2 Trabalho das Forças Externas

A função $W_{ext}(\underline{U}) + W_u(\underline{U})$ é composta por:

- contribuição W_{hid}^{ext} da pressão externa atuando nas faces laterais da cortina;
- contribuição W_{hid}^{int} da pressão hidrostática u interna atuando nas mesmas faces;
- contribuição $W_{\gamma'}$ das forças gravitacionais agindo sobre os blocos em movimento em todas as células;
- contribuição $W_v = N \cdot Q_v \cdot U_1$ das forças concentradas verticais e a contribuição W_{superf} da pressão p_s .

A contribuição é calculada por uma célula única pela equação 64. É conveniente substituir o raio da célula pelo comprimento $L = 2 \cdot R \left(1 + \frac{N-1}{\cos\theta} \right)$ da cortina assim resultando em:

(equação 78)

$$W_{hid}^{ext}(\underline{U}) = -\gamma_w \cdot h_w^2 \cdot L \cdot |\underline{U}_2| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$$

E a expressão de W_{hid}^{int} é semelhante e vale:

(equação 79)

$$W_{hid}^{int}(\underline{U}) = +\gamma_w \cdot h_w^2 \cdot L \cdot |\underline{U}_2| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$$

O cálculo da contribuição dos esforços gravitacionais torna-se necessário determinar as frações V_r^+ e V_r^- do volume V_r , em movimento dentro da célula de encaixe (seção hachurada da figura 20), localizados acima e abaixo do nível d'água dentro da célula de cota h_s .

A seção total ϕ da célula de contorno vale:

(equação 80)

$$\varphi = 2 \cdot R^2 \cdot (\tan \theta + \theta \cdot (\tan^2 \theta - 1))$$

A Expressão de φ_R depende do valor do angulo X:

E para o caso $X \leq X^* = \theta/2$:

É fácil de observar que o ângulo Y da figura 20 é dado pela equação:

(equação 81)

$$\cos(Y - X) = \cos(X) \cdot \tan \frac{\theta}{2}$$

E com isso:

(equação 82)

$$\varphi_R = \varphi - 2 \cdot R^2 \cdot \tan \theta \cdot \left(\left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \cdot \sin Y + \left(\frac{\pi}{2} - Y \right) \cdot \tan \theta \right)$$

E para o caso $X \geq X^* = \theta/2$:

(equação 83)

$$\varphi_R = \varphi - 2 \cdot R^2 \cdot \frac{1}{\tan X} \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)^2$$

Com estas expressões os volumes V_R^- e V_R^+ escrevem-se:

(equação 84)

$$V_R^- = \varphi_R \cdot h_s; V_R^+ = \varphi_R \cdot (H - h_s)$$

A expressão de $W_{\gamma'}$ é obtida a partir da equação 73 em conjunto com a contribuição das células de encaixe:

$$\begin{aligned}
 W_{\gamma'} &= N. ((\gamma^+.V_1^+ + (\gamma^- - \gamma_w).V_1^-).U \\
 &+ 2. (\gamma^+.V_2^+ + (\gamma^- - \gamma_w).V_2^-).|U_2|. \sin(\alpha - \varphi)) - \\
 &(N - 1). (|U_2| \cos(\alpha - \varphi). \tan \delta_{rs}. (\gamma^+.V_R^+ + (\gamma^- - \gamma_w).V_R^-))
 \end{aligned}
 \tag{equação 85}$$

Por fim, a contribuição da carga superficial p_s é solicitante ao nível das células principais e resistente nas células de encaixe. Seu trabalho é:

$$W_{superf}(\underline{U}) = p_s. (N. \pi. R^2. U_1 - (N - 1). \phi \rho_R. |U_2| \cos(\alpha - \varphi). \tan \delta_{rs})
 \tag{equação 86}$$

Em conclusão o trabalho $W_{ext}(\underline{U}) + W_u(\underline{U})$ fica:

$$W_{ext}(\underline{U}) + W_u(\underline{U}) = (W_{\gamma'} + W_v + W_{superf} + W_{hid}^{int} + W_{hid}^{ext}).(\underline{U})
 \tag{equação 87}$$

5.4.2 Generalização do Mecanismo N°2: Mecanismo Q2

A idéia consiste em aplicar o movimento do mecanismo N°2 a todas as células sendo elas principais e de contorno. O bloco que se situa acima do plano inclinado π em relação ao plano horizontal move-se com uma velocidade de translação \underline{U} como descrito na figura 15. O motivo desta escolha reside no fato de que o trabalho das forças gravitacionais é solicitante

em toda a estrutura. Nota-se, novamente, que x_M abscissa do traço do plano π na face superior das células. A parte do encaixe situado no domínio $x \geq x_M$ é dotada de um movimento de translação horizontal. Para que o vetor velocidade seja compatível com a condição de não interpenetração dos materiais na interface malha-talude interior, é necessário que o traço do plano π seja situado na linha de contorno ($x_M = R \cdot \sin \theta$) ou ($x_M \geq R \cdot \sin \theta$). Assim, se limita ao caso de $x_M = R \cdot \sin \theta$ para maximizar o trabalho das forças gravitacionais. O vetor velocidade de Q2 depende de um único parâmetro cinemático, que não é outro que a inclinação α que o plano π faz com a horizontal.

5.4.1.1 Aplicação do Teorema Cinemático

5.4.1.1.1 Trabalho Resistente Máximo

O trabalho resistente máximo é:

(equação 88)

$$W_{rm}(\Omega, \underline{U}) = 2 \cdot N \cdot H \cdot T_o \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$$

5.4.1.1.2 Trabalho das Forças Externas e Intersticiais

Os volumes em movimento respectivamente nas células principais e de encaixe são V_P e V_R . E denota-se $d = R \cdot \tan \theta$ o raio das células de contorno e z_P e z_R respectivamente a cota em que o plano π corta as células principais e de contorno e valem:

(equação 89)

$$z_P = H - \tan \alpha \cdot (R - x_M)$$

$$z_R = H - \tan \alpha \cdot (d - x_M)$$

E deste modo V_P e V_R ficam:

se $h_g \geq z_P$:

(equação 90)

$$V_P^- = F(h_g - z_P, R, \alpha); V_P^+ = V_P - V_P^-$$

se $h_g \leq z_P$:

$$V_P^- = 0; V_P^+ = V_P$$

se $h_g \geq z_R$:

$$V_R^- = F(h_g - z_R, R, \alpha); V_R^+ = V_R - V_R^-$$

se $h_g \leq z_R$:

$$V_R^- = 0; V_R^+ = V_R$$

Assim o trabalho das forças gravitacionais é igual:

(equação 91)

$$W_{\gamma'} = (N \cdot (\gamma^+ \cdot V_p^+ + (\gamma^- - \gamma_w) \cdot V_p^-) +$$

$$(N - 1) \cdot (\gamma^+ \cdot V_R^+ + (\gamma^- - \gamma_w) \cdot V_R^-)) \cdot |\underline{U}| \cdot \sin(\alpha - \varphi)$$

O trabalho da força distribuída p_s é:

(equação 92)

$$W_{\text{superf}} = p_s \cdot |\underline{U}| \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot R^2 \cdot (N \cdot [\pi/2 - \theta - \sin \theta \cdot \cos \theta] +$$

$$(N - 1) \cdot \left[\theta \cdot \tan^2 \theta - \frac{\sin^3 \theta}{\cos \theta} \right])$$

O trabalho das forças Q_v e Q_h são respectivamente:

(equação 93)

$$W_v = \varepsilon \cdot Q_v \cdot N \cdot |\underline{U}| \cdot \sin(\alpha - \varphi)$$

$$\text{Com } \varepsilon = \begin{cases} = 0 & \text{se } x_v < x_M = R \cdot \sin \theta \\ = 1 & \text{se } x_v \geq x_M = R \cdot \sin \theta \end{cases}$$

(equação 94)

$$W_h = Q_h \cdot N \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$$

A soma dos trabalhos das pressões hidrostática é:

(equação 95)

$$W_{\text{ext}}^{\text{int}} + W_{\text{hid}}^{\text{ext}} = \gamma_w \cdot (h_s^2 - h_w^2) \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \left[\frac{L}{2} + R \cdot (\cos \theta - 1) \right]$$

O trabalho das forças externas e intersticiais é igual:

$$W_{\text{ext}}(\underline{U}) + W_u(\underline{U}) = (W_{\gamma'} + W_v + W_h + W_{\text{superf}} + W_{\text{hid}}^{\text{int}} + W_{\text{hid}}^{\text{ext}}) \cdot (\underline{U})$$

(equação 96)

5.4.3 Generalização do Mecanismo N°2: Mecanismo Q3

A idéia consiste em associar:

- as células principais a cinemática do bloco em translação com velocidade \underline{U} da figura 15 para o bloco acima do plano inclinado π com ângulo α com a horizontal;
- o encaixe uma translação horizontal com velocidade $|\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$ para parte situada no domínio $x \geq 0$ e o resto se mantém imóvel;
- as células de contorno a cinemática descrita no mecanismo Q1 na figura 20 para a parte situada no domínio $x \geq 0$ e o resto permanece imóvel.

Para o plano π cortar a face superior de uma das células principais. Com as notações da figura 15 se traduz numa limitação sobre α que é $\alpha \geq \arctan\left(\frac{H-z_p}{2 \cdot R}\right)$.

5.4.3.1 Aplicação do Teorema Cinemático

5.4.3.1.1 Trabalho Resistente Máximo

O trabalho resistente máximo é o mesmo do mecanismo Q2

5.4.3.1.2 Trabalho das Forças Externas

Os valores de V_P^+ e V_P^- ficam:

se $h_s \geq z_p$:

(equação 97)

$$V_P^- = F(h_s - z_P, R, \alpha); V_P^+ = V_P - V_P^-$$

se $h_s \leq z_P$:

$$V_P^- = 0; V_P^+ = V_P$$

Os valores de V_R^+ e V_R^- correspondem ao movimento dos volumes calculados pelo mecanismo Q1 e valem:

(equação 98)

$$V_R^- = \frac{1}{2} h_s \cdot \varphi_R; V_R^+ = \frac{1}{2} (H - h_s) \cdot \varphi_R$$

Onde a seção φ_R é dado pelas equações 83 e 84, com esses valores é possível calcular o trabalho das forças gravitacionais:

(equação 99)

$$W_{y'} = N \cdot (\gamma^+ \cdot V_P^+ + (\gamma^- - \gamma_w) \cdot V_P^-) \cdot |\underline{U}| \cdot \sin(\alpha - \varphi) +$$

$$(N - 1) \cdot ((\gamma^+ \cdot V_R^+ + (\gamma^- - \gamma_w) \cdot V_R^-) \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \tan \delta_{rs})$$

O trabalho da força distribuída p_s é:

(equação 100)

$$W_{superf} = p_s \cdot |\underline{U}| \cdot (N \cdot R^2 \cdot [\pi/2 - \tau - \sin \tau \cdot \cos \tau] \cdot \sin(\alpha - \varphi) - (N - 1) \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \tan \delta_{rs} \cdot \frac{\rho_R}{2})$$

O trabalho das forças Q_v e Q_h são respectivamente:

(equação 101)

$$W_v = \varepsilon \cdot Q_v \cdot N \cdot |\underline{U}| \cdot \sin(\alpha - \varphi)$$

$$\text{Com } \varepsilon = \begin{cases} = 0 & \text{se } x_v < x_M \\ = 1 & \text{se } x_v \geq x_M \end{cases}$$

(equação 102)

$$W_h = Q_h \cdot N \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$$

A soma dos trabalhos das pressões hidrostática é:

(equação 103)

$$W_{ext}^{int} + W_{hid}^{ext} = \gamma_w \cdot (h_s^2 - h_w^2) \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot R \left[\frac{N - 1}{\cos \theta + 1} \right]$$

O trabalho das forças externas e intersticiais é igual:

(equação 104)

$$W_{ext}(\underline{U}) + W_u(\underline{U}) = (W_v + W_h + W_{superf} + W_{hid}^{int} + W_{hid}^{ext}) \cdot (\underline{U})$$

5.4.4 Generalização do Mecanismo N°3 Mecanismo Q4

O mecanismo Q4 é a variação do mecanismo Q3 que corresponde à situação da figura 16, onde o plano MP não intersecta a face superior da célula. O ângulo de inclinação α verifica a condição $\alpha \leq \arctan\left(\frac{H-z_p}{2.R}\right)$.

A cinemática associada:

- as células principais a cinemática do bloco em translação com velocidade \underline{U} da figura 16 para o bloco acima do plano inclinado π com ângulo α com a horizontal;
- o encaixe uma translação horizontal com velocidade $|\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$ para parte situada no domínio $x \geq 0$ e o resto se mantém imóvel;
- as células de contorno a cinemática descrita no mecanismo Q1 na figura 20 para a parte situada no domínio $x \geq 0$ e o resto permanece imóvel.

Os valores de V_p^+ e V_p^- em movimento nas células principais são dados por:

(equação 105)

$$V_p = (H - z_p - R \cdot \tan \alpha) \cdot \pi \cdot R^2$$

Caso 1: $h_s \leq z_p$

(equação 106)

$$V_p^- = 0; V_p^+ = V_p - V_p^-$$

Caso 2: $z_p \leq h_s \leq z_p + 2 \cdot R \cdot \tan \alpha$

$$V_p^- = F(h_s - z_p, R, \alpha); V_p^+ = V_p - V_p^-$$

Caso 3: $h_s \geq z_p + 2 \cdot R \cdot \tan \alpha$

$$V_p^+ = (H - h_g) \cdot \pi \cdot R^2; V_p^- = V_p - V_p^+$$

O cálculo de $W_{y'}$ e $W_{ext}^{int} + W_{hid}^{ext}$ mantêm-se o mesmo do mecanismo Q3 utilizando para o primeiro os volumes de V_R^+ e V_R^- do conjunto de equações 90 e do conjunto de equações 98.

Os trabalhos das forças concentradas e distribuída mudam para:

$$W_v = Q_v \cdot N \cdot |\underline{U}| \cdot \sin(\alpha - \varphi)$$

(equação 107)

$$W_h = Q_h \cdot N \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$$

(equação 108)

$$W_{superf} = p_s \cdot |\underline{U}| \cdot (N \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sin(\alpha - \varphi) -$$

(equação 109)

$$(N - 1) \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \tan \delta_{rs} \cdot \frac{\rho_R}{2})$$

O trabalho $W_{ext}(\underline{U}) + W_u(\underline{U})$ mantêm-se a mesma do mecanismo Q3.

5.5 ESTABILIDADE DE UMA CORTINA NA CONFIGURAÇÃO DE TABIQUE

A estabilidade de uma cortina na configuração de tabique pode fazer referencia ao diagrama da figura 21. E o carregamento é definido por:

- a) γ^- peso específico do solo úmido e por γ^+ peso específico do solo seco;

- b) sobrecarga p_s aplicada sobre a face superior da cortina nas células principais e de contorno;
- c) uma força concentrada vertical Q_v e uma força concentrada horizontal Q_h aplicada em todas as células principais da cortina;
- d) alturas de água h_w a montante da estrutura e da altura do nível d'água h_s dentro do talude;
- e) altura de água h_r igual à altura do talude o qual esta inserida a jusante da estrutura.

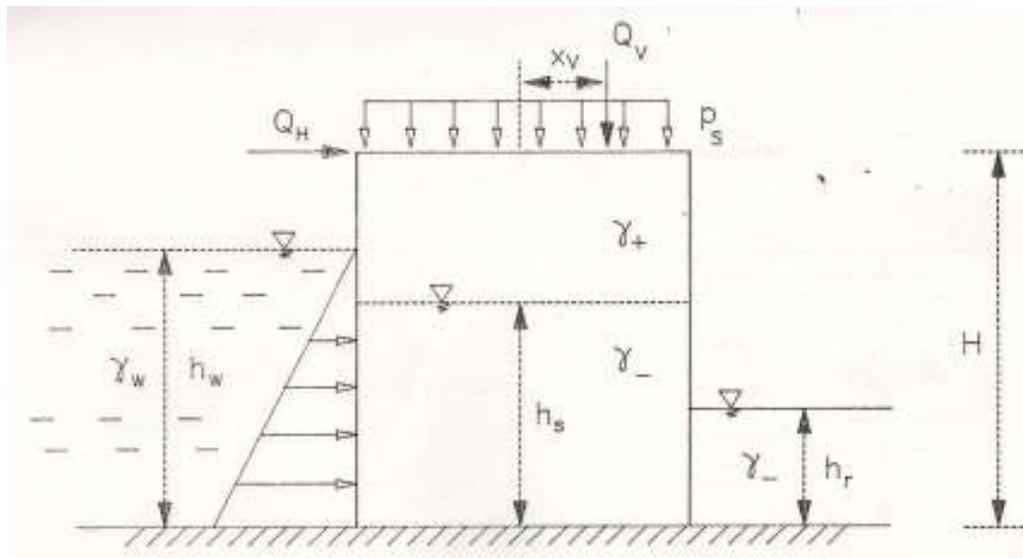


Figura 21: configuração de tabique

É claro que os mecanismos Q2, Q3 e Q4 descritos no capítulo 5.4 para a configuração portuária são imediatamente utilizáveis, e se desenvolvem na direção a montante. Entretanto não se pode esquecer que a configuração de tabique não é simétrica. A idéia é conservar os movimentos que se dirigem a jusante, na direção do talude, e para os outros blocos se desenvolvem num mecanismo do tipo imóvel.

Neste conjunto de movimentos, a força concentrada horizontal será motora se for orientada na direção do talude e será computada como positiva, como indica a figura 21. As capacidades de resistência são definidas pelos parâmetros δ_{rs} , ϕ , f e T_ϕ .

5.5.1 Generalização dos mecanismos Q3 e Q4: Mecanismo B3 e B4

Os mecanismos para o estudo da estabilidade de uma cortina nesta nova configuração pode ser obtida pela extensão dos mecanismos Q3 e Q4. Em complemento com o vetor de

velocidade do talude exterior. Um mecanismo derivado de Q1 não será considerado devido a não simetria da estrutura.

O complemento do vetor de velocidades no talude exterior deve obedecer ao fato de não haver interpenetração dos materiais na interface talude exterior cortina. Para cada um dos mecanismos Q3 e Q4, o encaixe no contato do talude exterior é animado com uma velocidade de translação horizontal de intensidade igual a $|\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi)$, onde \underline{U} designa em Q3 e Q4 a velocidade do bloco em movimento nas células principais.

O vetor de velocidade proposto para o talude exterior consiste em dois blocos em movimento como mostrado na figura 22.

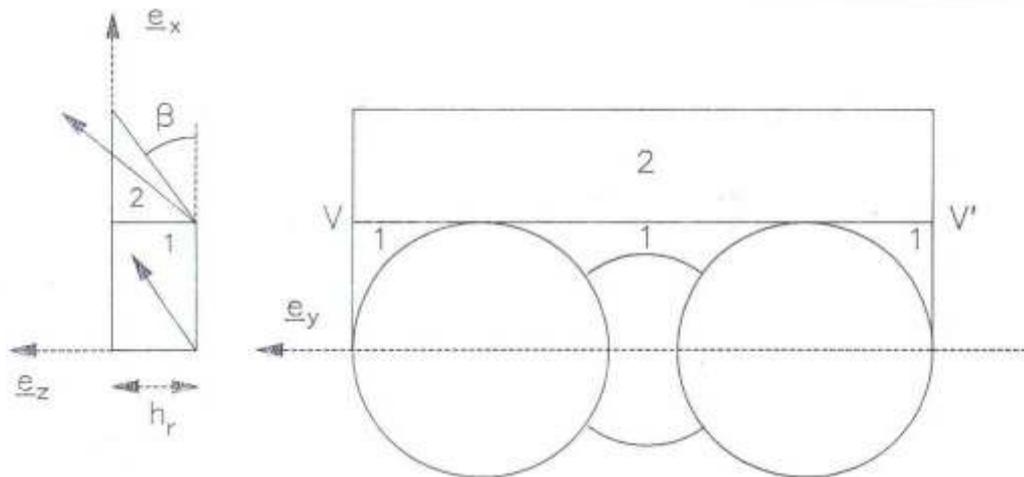


Figura 22: movimento do talude exterior

O bloco n°1 é delimitado pelo plano VV' vertical tangente ao encaixe ao nível das células principais e para o encaixe entre gabiões. A altura do bloco não é outro que h_r e é animado da velocidade:

(equação 110)

$$\underline{V}_1 = |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot [\underline{e}_x + \tan \delta_{rs} \cdot \underline{e}_z]$$

O bloco n^o2 é um prisma de seção triangular, delimitado pelo plano vertical VV' e o plano inclinado Δ que forma um ângulo β com a horizontal. O ângulo β constitui um novo parâmetro cinemático. A velocidade \underline{V}_2 forma um ângulo φ com o plano Δ . A descontinuidade de velocidade $\underline{V}_2 - \underline{V}_1$ forma um ângulo $\frac{\pi}{2} - \varphi$ com a normal \underline{e}_x ao plano VV' como demonstrado na figura 23.

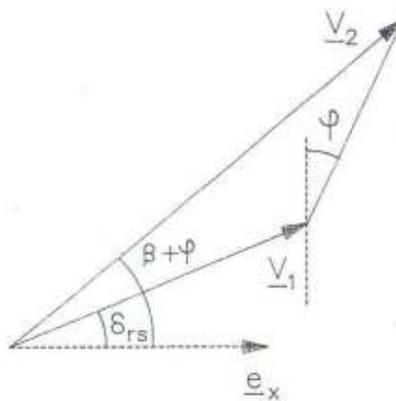


Figura 23: hodografo dos blocos 1 e 2 do talude exterior

(equação 111)

Designa-se por B3 e B4 a extensão dos mecanismos Q3 e Q4, onde não se considera os efeitos de borda ao nível das faces laterais (paralelas planos Oxz) dos blocos n^o1 e n^o2. Esta aproximação conduz, inevitavelmente, a uma diminuição da precisão segundo as condições nos extremos, contudo, devido ao numero elevado de células esta consideração é justificável.

5.5.1.1. Aplicação do Teorema Cinemático

5.5.1.1.1 Trabalho Resistente Máximo

O trabalho resistente máximo é o mesmo dos mecanismos Q3 e Q4 e é dado pela equação 131.

5.5.1.1.2 Trabalho das Forças Externas

Já o trabalho das forças externas e intersticiais é expresso pela equação:

$$W_{\text{ext}}(\underline{U}) + W_{\text{u}}(\underline{U}) = (W_{\gamma'} + W_{\gamma^S} + W_{\nu} + W_h + W_{\text{superf}} + W_{\text{hid}}^{\text{int}} + W_{\text{hid}}^{\text{ext}}) \cdot (\underline{U}) \quad (\text{equação 112})$$

O trabalho das pressões de água interna e externa torna-se conveniente substituir h_w por h_r .

$$W_{\text{ext}}^{\text{int}} + W_{\text{hid}}^{\text{ext}} = \gamma_w \cdot (h_s^2 - h_r^2) \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot R \left[\frac{N - 1}{\cos \theta + 1} \right] \quad (\text{equação 113})$$

As forças horizontais Q_h não trabalham no mecanismo B3 uma vez que, seu ponto de aplicação permanece imóvel (o plano $\pi = \text{PM}$ passa acima do seu ponto de aplicação). Em contrapartida, no mecanismo B4 é motora uma vez que o plano $\pi = \text{PM}$ passa abaixo do seu ponto de aplicação com isso:

$$W_h = \begin{cases} 0 & \text{B3} \\ N \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \varphi) & \text{B4} \end{cases} \quad (\text{equação 114})$$

A força Q_v é solicitante desde que seu ponto de aplicação esteja em movimento:

(equação 115)

$$W_v = \begin{cases} 0 & \text{se } x_v > x_M \\ Q_v \cdot N \cdot |U| \cdot \sin(\alpha - \varphi) & \text{se } x_v < x_M \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{B3} \\ \text{B4} \end{matrix}$$

$$x_M = r - \frac{(H - z_p)}{\tan \alpha}$$

Para o cálculo do trabalho da força distribuída p_s é interessante também distinguir se o plano π corta ou não a face superior da cortina. E vale:

Para o mecanismo B3:

(equação 116)

$$W_{\text{superf}} = p_s \cdot |U| \cdot (N \cdot R^2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \tau - \sin \tau \cdot \cos \tau\right) \cdot \sin(\alpha - \varphi) - (N - 1) \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \tan \delta_{rs} \cdot \frac{\theta_R}{2})$$

Para o mecanismo B4:

(equação 117)

$$W_{\text{superf}} = p_s \cdot |U| \cdot (N \cdot R^2 \cdot \pi \cdot \sin(\alpha - \varphi) - (N - 1) \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot \tan \delta_{rs} \cdot \frac{\theta_R}{2})$$

A expressão de W_v' é calculado pela equação 102 e com isso só falta calcular o trabalho das forças gravitacionais junto ao talude exterior. O comprimento da cortina é igual a $2 \cdot R \cdot \left[\frac{N-1}{\cos \theta + 1}\right]$, o volume (totalmente submerso) do bloco n°2 vale:

(equação 118)

$$V_2^- = 2 \cdot R \cdot h_r^2 \cdot \frac{\left[\frac{N-1}{\cos\theta + 1} \right]}{2 \cdot \tan\beta}$$

O trabalho resistente das forças de peso no movimento do bloco n°2 vale $(\gamma^- - \gamma_w) \cdot V_2^- \cdot |\underline{V}_2| \cdot \sin(\beta + \varphi)$.

É conveniente escolher β buscando minimizar esta quantidade. β vale:

(equação 119)

Nota-se β^* o valor correspondente β dentro do intervalo $\left[0, \frac{\pi}{2} - 2 \cdot \varphi \right]$. O valor do trabalho resistente das forças de peso no movimento do bloco n°1 é $(\gamma^- - \gamma_w) \cdot V_1^- \cdot |\underline{V}_1| \cdot \sin \delta_{rs}$ onde:

(equação 120)

$$V_1^- = R \cdot h_r^2 \cdot \left(2 \cdot \left(1 + \frac{N-1}{\cos\theta + 1} \right) - \frac{N}{2} \cdot \pi - (N-1) \cdot (\tan\theta + \theta \cdot (\tan^2\theta - 1)) \right)$$

Em resumo, o termo complementar W_γ^c resulta em:

(equação 121)

$$W_\gamma^c = -(\gamma^- - \gamma_w) \cdot (V_1^- \cdot |\underline{V}_1| \cdot \sin \delta_{rs} + V_2^-)$$

5.5.2 Estabilidade de uma Cortina ao Deslizamento: Mecanismo B5

A idéia consiste em fazer o trabalho da pressão exterior na face a montante ($x < 0$), onde toda a cortina é animada de um movimento de translação de velocidade \underline{U} :

(equação 122)

$$\underline{U} = |\underline{U}| \cdot [\cos \delta_{rs} \cdot \underline{e}_x + \sin \delta_{rs} \cdot \underline{e}_z]$$

O complemento da cinemática do talude a jusante é de maneira análoga ao do parágrafo anterior. A velocidade do bloco nº1 coincide com \underline{U} (figura 24). A equação 114 continua válida desde que se substitua $|\underline{V}_1|$ por \underline{U} .

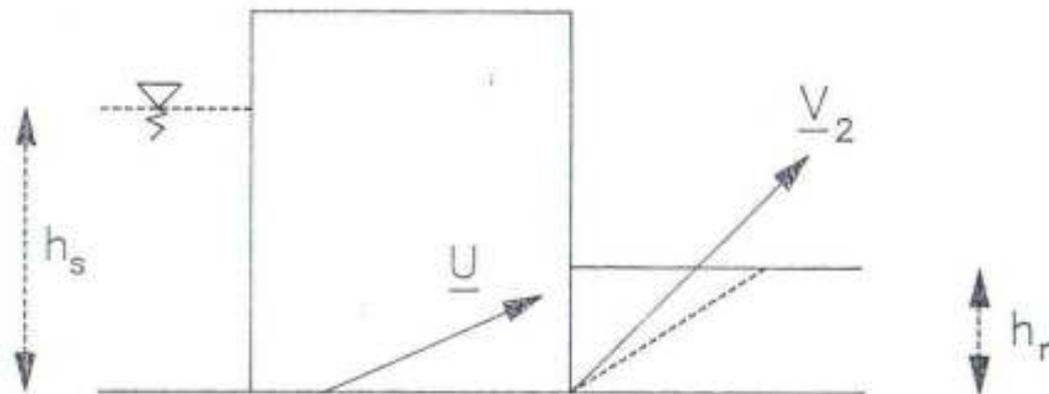


Figura 24: mecanismo de deslizamento da cortina

O trabalho das pressões de água é dado por:

(equação 123)

$$W_{hid}^{int} + W_{hid}^{ext} = \gamma_w \cdot (h_w^2 - h_r^2) \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\delta_{rs}) \cdot R \left[\frac{N-1}{\cos \theta + 1} \right]$$

O trabalho das forças gravitacionais vale:

(equação 124)

$$W_{\gamma'} = -(N \cdot \pi \cdot R^2 + (N-1) \cdot \wp) \cdot (\gamma^+ \cdot (H - h_s) + (\gamma^- - \gamma_w) \cdot h_s) \cdot |\underline{U}| \cdot \cos \delta_{rs}$$

O valor de \wp é calculado pela equação 83, para o cálculo do termo complementar $W_{\gamma'}^S$ a equação 124 continua válida. Como as forças gravitacionais o trabalho das forças concentradas e distribuídas são resistentes neste mecanismo e valem:

(equação 125)

$$W_v = -Q_v \cdot N \cdot |\underline{U}| \cdot \sin \delta_{rs}$$

$$W_h = Q_h \cdot N \cdot |\underline{U}| \cdot \cos \delta_{rs}$$

$$W_{superf} = -p_s \cdot |\underline{U}| \cdot \sin \delta_{rs} \cdot (N \cdot \pi \cdot R^2 + (N - 1) \cdot \rho)$$

Observa-se que o trabalho resistente máximo é igual a zero, com isso a estabilidade do mecanismo pode ser verificado pelo fator de confiança que por definição divide-se em dois casos:

$$\text{Caso 1: } \{ \infty, \text{ se } (W_{v'} + W_{v'}^c) + (W_v + W_h + W_{superf}) + (W_{hid}^{int} + W_{hid}^{ext}) \leq 0$$

$$\text{Caso 2: } \{ 0, \text{ se } (W_{v'} + W_{v'}^c) + (W_v + W_h + W_{superf}) + (W_{hid}^{int} + W_{hid}^{ext}) > 0$$

Para o caso 2 a estrutura é instável.

5.6 APLICAÇÃO

O exemplo proposto por este trabalho é uma solução alternativa a utilizada no porto Triunfo no Paraguai a 130 Km da cidade de Encarnación que ao invés de uma estrutura de contenção do tipo muro de arrimo como foi utilizado, será verificada uma cortina de gabiões tipo saco de raio de 1,5 m, o comprimento da obra é de 245 m. Os fatores de majoração e minoração usados serão os do Eurocode 07. A figura 25 mostra uma foto do porto, já à figura 26 mostra o sistema de gabiões adotado pelo projeto original.



Figura 25: Porto Triunfo

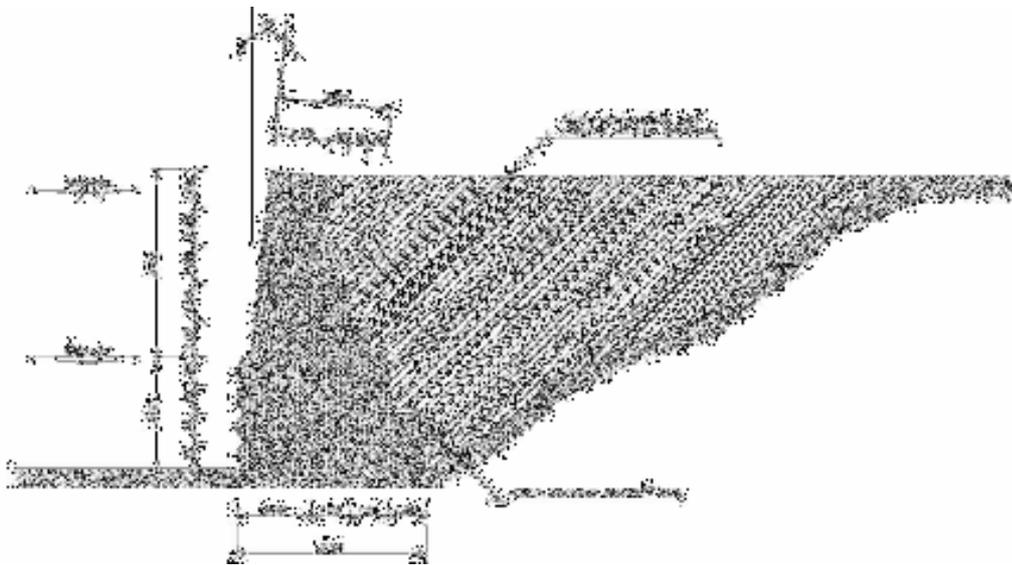


Figura 26: croqui da estrutura de contenção de Porto Triunfo

Características dos materiais:

Material	ϕ (ângulo de atrito)	γ (peso específico) KN/m ³	c (coesão) KPa
Aterro Compacto	35°	20	1,2
Argila orgânica	15°	18	5
Pedra Fragmentada (material de enchimento dos gabiões)	45°	23	0
Resistência da Malha Hexagonal de dupla torção KN			
Malha dos Gabiões	60		

Quadro 1: propriedades dos materiais

Sobrecarga no topo:

Q_v	0 kN/m ²
Q_h	0 kN
p_s	0 kN

Quadro 2: sobrecargas no topo da cortina

Pesos específicos:

Material	γ (peso específico) kN/m ³
γ^+	23
γ^-	25
γ_w	10
γ (aterro)	22

Quadro 3: pesos específicos

Alturas:

Alturas	m
H	8
h_s	7,5
h_r	7,5
h_w	7,5

Quadro 4: alturas

Ângulos:

Ângulos	
α	27,5
β	35
δ	52,5
Ψ	15

Quadro 5: ângulos

Os ângulos α e δ foram escolhidos conforme o cálculo do empuxo por Coulomb e valem respectivamente $\alpha = \pi/4 - \varphi/2$ e $\delta = \pi/4 + \varphi/2$.

Verificação da Ruptura da Estrutura

A verificação é feita utilizando os mecanismos B3 e B4, é necessário ressaltar que se deve calcular o fator de confiança para os dois mecanismos para que se encontre o mecanismo, com as características do solo e da estrutura, que melhor representa a ruptura do sistema.

Mecanismo B3

Inicialmente devem-se calcular os volumes necessários para o cálculo do trabalho da força peso.

$$\theta = \dots$$

$$X_M = R \cdot \sin \theta$$

Arbitrou-se o valor de

Adotara-se

$$z_P = h$$

$$z_R = l$$

$$\sin \tau = \frac{h}{l}$$

$$V_p = 2 \cdot R^3 \cdot \tan \alpha \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \cos^3 \tau - \frac{1}{2} \cdot \sin \tau \right] \cdot \left(\frac{\pi}{2} \right)$$

$$\sin \tau = \frac{h_1}{l_1}$$

$$V_{\overline{P}} = 2.R^3.\tan \alpha.\left[\frac{1}{3}.\cos^3 \tau - \frac{1}{2}.\sin \tau.\left(\frac{\pi}{2}\right.\right.$$

V

obedece o critério da equação 119.

$$V_2^- =$$

$$V_1^- = h_r.R^2.\left(2.\left(1 + \frac{N-1}{\cos \theta + 1}\right) - \frac{N}{2}.\pi - (N-1).\left(\tan \theta + \theta.\left(\tan^2 \theta - 1\right)\right)\right) = 455;$$

\underline{V}

$$W_{\dot{\varphi}}^c = -(\gamma^- - \gamma_w) \cdot (V_1^- \cdot |\underline{V}_1| \cdot \sin \delta_{rs} + V_2^- \cdot |\underline{V}_2| \cdot \sin(\beta^* + \varphi)) = 2769\text{E}$$

já que

$$W_{rm} = 2 \cdot N \cdot H \cdot T_o \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \epsilon)$$

Mecanismo B4

Mantiveram-se os valores de z_P e z_R do mecanismo anterior com isso para que α respeite deve ser menor que $37,44^\circ$ assim $\alpha = 30^\circ$:

Com isso

$$V_p = (H - z_p -$$

V

obedece o critério da equação 119.

$$V_2^- =$$

$$V_1^- = h_r \cdot R^2 \cdot \left(2 \cdot \left(1 + \frac{N-1}{\cos\theta+1} \right) - \frac{N}{2} \cdot \pi - (N-1) \cdot (\tan\theta + \theta \cdot (\tan^2\theta - 1)) \right) = 455;$$

$|\underline{V}$

$$W_{\dot{V}}^c = -(\gamma^- - \gamma_w) \cdot (V_1^- \cdot |\underline{V}_1| \cdot \sin \delta_{rs} + V_2^- \cdot |\underline{V}_2| \cdot \sin(\beta^* + \varphi)) = 2769\text{E}$$

já que

$$W_{rm} = 2 \cdot N \cdot H \cdot T_o \cdot |\underline{U}| \cdot \cos(\alpha - \epsilon)$$

$$F_c = \frac{W_{rm}(\Omega, \underline{U})}{W_{ext}(\underline{U}) + W_u(\underline{U})} = 1,146$$

Com estes resultados chega-se a conclusão de que o mecanismo B3 é mais adequado ao exemplo, sendo a estrutura estável, não havendo rompimento da estrutura de contenção.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho de diplomação foi idealizado com intuito de aprimorar os conhecimentos nas áreas de estruturas e geotecnia da Engenharia Civil através da aplicação da análise limite na verificação de cortinas de gabiões tipo saco de grande raio. Com a pesquisa bibliográfica, o desenvolvimento dos mecanismos e posteriormente durante a aplicação, pode-se constatar as características e peculiaridades do método, além das etapas de cálculo necessárias para a verificação.

Com a aplicação pode-se verificar que os mecanismos são adequados uma vez que o fator de confiança encontrado para a estrutura é 1,106 para o mecanismo B3 e 1,146 para o mecanismo B4, já considerando os fatores de segurança. Com isso, prova-se que estes mecanismos estão muito próximos do mecanismo ótimo.

Este trabalho propiciou o aprendizado de noções da mecânica do contínuo e da análise de estruturas tridimensionais, como também a ampliação do conhecimento sobre análise limite e de geotecnia.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA BARROS, P. L. de. **Obras de Contenção Manual Técnico**. Campinas: Editora da Maccaferri do Brasil, 2005.
- BUHAN, P. de. **Plasticité et Calcul à la Rupture**. 1^{re}. ed Paris: Presses de L'école Nationale de Ponts Et Chaussées, 2007.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARTIZATION. Eurocode 07. Geotechnical design. Bruxelas, 2004.
- HACHICH, W. **Fundações - Teoria E Pratica**. São Paulo: Editora Pini, 2003.
- KINDER, H und HILGEMANN, W. **Atlas zur Weltgeschichte**. Vol. 1, Deutscher Taschenbuch Verlag, Munchen 299 p.
- MASUERO, J. R.; CREUS, G. J. **Introdução à Mecânica Estrutural**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 1997.
- SALENÇON, J. **Calcul à la Rupture et Analyse Limite**. 1^{re}. ed Paris: Presses de L'école Nationale de Ponts Et Chaussées, 1983.
- _____. **Mécanique des milieux continus: concepts généraux**. Palaiseau: Presses de L'ecole Polytechnique, 2000.