

CÁLCULO AUTOMATIZADO PARA EMPUXOS DE TERRA: UMA PROPOSTA EDUCACIONAL

POR HUGO FELIPE DA SILVA PEDRO
JOÃO PEDRO ROSA FERREIRA
LUAN DE CARVALHO RAMOS
MARCELLE BRANDÃO DE CARVALHO
CARLOS VITOR DE ALENCAR CARVALHO



UNIVERSIDADE DE
vassouras



Cálculo Automatizado para Empuxos de Terra: Uma
Proposta Educacional

Autores:

Hugo Felipe da Silva Pedro

João Pedro Rosa Ferreira

Luan de Carvalho Ramos

Marcelle Brandão de Carvalho

Carlos Vitor de Alencar Carvalho

Editora da Universidade de Vassouras

Vassouras/RJ

2020

© 2020 Universidade de Vassouras

1ª Edição 2020

Presidente da Fundação Educacional Severino Sombra (FUSVE)

Marco Antonio Vaz Capute

Reitor da Universidade de Vassouras

Marco Antonio Soares de Souza

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade de Vassouras

Carlos Eduardo Cardoso]

Pró-Reitor de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade de Vassouras

Bruno Lemos

Coordenador do Curso de Engenharia Civil

Enilson Braga

Editores-Chefe das Revistas *Online* da Universidade de Vassouras

Lígia Marcondes Rodrigues dos Santos

Autores

Hugo Felipe da Silva Pedro, João Pedro Rosa Ferreira, Luan de Carvalho Ramos, Marcelle Brandão de Carvalho, Carlos Vitor de Alencar Carvalho

Diagramação e Layout

Carlos Vitor de Alencar Carvalho, Hugo Felipe da Silva Pedro, João Pedro Rosa Ferreira, Luan de Carvalho Ramos

C1267c Cálculo automatizado para empuxos de terra: uma proposta educacional. / Hugo Felipe da Silva Pedro, [et al.]. – Vassouras, RJ: Universidade de Vassouras, 2020.
vi, 137 f.; il.

Formato: E-book

Disponível em: editora.universidadedevassouras.edu.br/index.php/PT/issue/view/189

ISBN: 978-65-87918-09-9

Inclui bibliografia e anexos.

1. Engenharia civil. 2. Smath studio. I. Pedro, Hugo Felipe da Silva. II. Universidade de Vassouras. III. Título.

CDD 624

Vera Lucia Nogueira de Paula

Biblioteca CRB-7 -



Todos os direitos reservados. A reprodução não autorizada desta publicação no todo ou em parte, constitui violação do copyright (Lei. 9.610/98)

Agradecimentos

Apresentação

Capítulo 1 - Introdução

Capítulo 2 - Fundamentação Teórica

Capítulo 3 - Materiais e Métodos

Teorias envolvendo o empuxo

Conhecendo o programa: O SMATH Studio

Principais funcionalidades

Desenvolvimento do roteiro

Distribuições de tensões horizontais e braços de alavanca

Capítulo 4 - Desenvolvimento

Roteiro de Cálculo de Empuxos de Terra:

Simulação 1

Simulação 2

Simulação 3

Simulação 4

Aplicação

Simulação 1

Simulação 2

Simulação 3

Simulação 4

Automatização do Roteiro

Capítulo 5 - Conclusão

Referências Bibliográficas:

Sobre os autores

Apêndices

Índice Remissivo

Agradecimentos

Agradecemos a Deus, em primeiro lugar, pois sem Ele nada seria possível.

Aos nossos pais e familiares por todo incentivo e suporte dado a nós.

À Universidade de Vassouras, pela instrução e orientação ao longo de nossas jornadas na graduação.

Dedicamos um agradecimento especial a todos os professores envolvidos nessa nossa jornada acadêmica, por toda paciência e carinho com os quais contamos ao longo do desenvolvimento de nosso livro.

Agradecemos também pela imagem de capa a S. Hermann & F. Richter por Pixabay.

Apresentação

A tecnologia tem possibilitado um dinamismo considerável na propagação de informações em diferentes áreas, inclusive na educação. O presente trabalho visa facilitar o aprendizado do cálculo de empuxo de terra no âmbito da disciplina de mecânica dos solos, a partir da utilização do software matemático Smath Studio, tornando os cálculos automatizados. Serão apresentados quatro exemplos específicos, que são de suma importância para a construção do aprendizado deste conteúdo, de modo detalhado e preciso. O roteiro automatizado entregará os valores das resultantes de empuxo e seus respectivos braços de alavanca. Para dar melhor sustentação aos resultados, o trabalho apresenta em sua metodologia a base

teórica necessária acrescida de detalhes específicos para as situações abordadas, possibilitando uma compreensão completa dos temas propostos. A fim de assegurar a exatidão dos cálculos desenvolvidos no roteiro, foi utilizado bibliografia pertinente, a qual forneceu dados para elaboração das simulações e trouxe parâmetros para as respostas, que se mostraram corretas. Dado a relevância do tema na esfera profissional, além da acadêmica, é possível tomar este trabalho por base e desenvolver melhorias e adaptações para aplicação em obras reais que necessitem do cálculo dos empuxos de terra. Vale ressaltar a possibilidade de torná-lo ainda mais completo em seu uso, acrescentando novas simulações.

Capítulo 1 - Introdução

A Quarta revolução industrial transformou completamente a forma como se vivia até então. Nada do que a humanidade fazia antes dela permaneceu do mesmo jeito. O Dr. Klaus Schwab, professor, engenheiro e economista alemão, um estudioso da área, reforça e aprimora essa ideia em seu livro - A Quarta Revolução Industrial (2016). Nesse livro, o Dr. Schwab a descreve como um fenômeno iniciado ainda na mudança do século XX para o século XXI, tendo como base a revolução digital. Dentre suas características mais notáveis, têm-se: Uma internet verdadeiramente móvel e global, processadores cada vez menores e mais potentes, além de “Machine

Learning” e inteligência artificial. Ainda falando sobre esse tema o Dr. Klaus Schwab (2016) esclarece:

“A quarta revolução industrial, no entanto, não diz respeito apenas a sistemas e máquinas inteligentes e conectadas. Seu escopo é muito mais amplo. Ondas de novas descobertas ocorrem simultaneamente em áreas que vão desde o sequenciamento genético até a nanotecnologia, das energias renováveis à computação quântica. O que torna a quarta revolução industrial fundamentalmente diferente das anteriores é a fusão dessas tecnologias e a interação entre os domínios físicos, digitais e biológicos.”
(SCHWAB, 2016, p. 19)

Junto com esse fenômeno, a maneira como a informação é adquirida tem se tornado cada vez mais dinâmica, por exemplo, jornais do mundo inteiro têm abolido o uso de papel migrando para o meio digital, possibilitando a propagação de suas informações quase que instantaneamente. Sem falar da velocidade dessa propagação, que possibilita em um curto período de tempo, um ser humano ter mais acesso aos acontecimentos do mundo do que teria em sua vida inteira poucos séculos atrás.

Outro aspecto interessante observado foi que a internet possibilitou a descentralização da informação, jornais de menor relevância antigamente hoje disputam “cliques” quase de igual para igual com jornais maiores na internet. A forma como a informação é absorvida e sua

quantidade mudaram drasticamente. Contrapondo essas inovações, o sistema de educação tradicional tem se mostrado praticamente parado no tempo. As pessoas que em seu dia-a-dia têm as tecnologias cotidianas quase como uma extensão de seus corpos, sentem muito essa obsolescência para o mundo digital.

Se antecipando a esse problema, o professor Seymour Papert, um sul-africano visionário do uso da tecnologia na educação, já na década de 1960, cria a linguagem de programação LOGO, focada inicialmente para crianças, ainda quando os computadores eram muitos limitados, sem interface gráfica e muito menos a internet. A vida e a obra do professor Papert mostra que ele foi uma pessoa engajada com a solução de problemas de cunho educacional em diferentes países ao redor do globo.

Conforme o tempo passa, as ideias do professor Papert vão se tornando cada vez mais relevantes para a verdadeira modernização do ensino, coisa que parece ser inevitável, devido ao avanço das tecnologias e a quantidade de seu uso em nosso cotidiano.

Porém, esta modernização caminha a passos não tão largos quanto deveria, para acompanhar as constantes mudanças que o mundo sofre atualmente em pouco tempo. Este trabalho visa, dentro de seus limites estabelecidos, ajudar na modernização do aprendizado. Busca de maneiras simples, mas eficazes, fazer com que os leitores vejam que é possível e sem muita dificuldade, ajudar na educação e no aprendizado dos estudantes, modernizando a forma como os conhecimentos técnicos são expostos para que seja mais fácil seu entendimento e absorção.

Tem-se como objetivo desenvolver um roteiro automatizado capaz de fazer, de modo correto e bem detalhado, alguns cálculos de certa complexidade. Cálculos estes, referentes à disciplina de Mecânica dos Solos. Como base teórica, adotou-se o método de cálculo da teoria de Rankine (1857) sobre o cálculo de empuxos de solo. Entender esse conceito é de fundamental importância para se entender o estado de equilíbrio plástico e a ruptura do solo. No roteiro, os cálculos realizados permitirão a obtenção de valores referentes ao empuxo de terra ativo e passivo, quando se aplicar, em 4 diferentes perfis de solo. O roteiro entregará também as posições onde as resultantes de empuxo atuam (braços de alavanca). Apesar das distribuições de tensões serem utilizadas nas formulações, o passo a passo não pretende entregá-las graficamente,

porém a estrutura dos cálculos permite a determinação dos valores propostos de modo simples, eliminando a necessidade de análise gráfica das distribuições nos casos demonstrados. Este valor, como é comumente sabido no meio técnico, tem uma grande importância para o cálculo de diversas estruturas de contenção de terras.

Pode-se encontrar um pouco mais sobre essa relação na introdução do capítulo XIII do livro – Fundamentos de Engenharia Geotécnica (Nona edição, 2019) – onde se segue:

“As estruturas de contenção, como muros de arrimo, paredes de subsolos e cortinas, são comumente encontradas na engenharia de fundações, já que suportam taludes de massas de terra. O planejamento e a

construção dessas estruturas exigem um conhecimento amplo sobre forças laterais que atuam entre as estruturas de contenção e as massas de solo contidas. Essas forças laterais são provocadas pelo empuxo lateral da terra. A magnitude e a distribuição do empuxo lateral de terra dependem de muitos fatores, como os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo retido, a inclinação da superfície do aterro, a altura e a inclinação do muro de arrimo na interface muro-aterro, a natureza do movimento do muro sob o empuxo lateral e a adesão do ângulo de atrito na interface parede-aterro.” (DAS & SOBHAN, 2019, p. 449)

Além do aspecto teórico, uma implementação computacional de fácil programação é igualmente importante para os objetivos propostos. A forma visual e didática do roteiro desenvolvido no software Smath Studio ajudará o (a) aluno (a) que tiver contato com ele a entender e absorver melhor alguns conceitos que poderiam ficar um pouco confusos à primeira vista, principalmente no método tradicional de ensino. O Smath Studio é uma poderosa ferramenta matemática, um programa leve e muito eficiente, além de ser gratuito. Tem editor WYSIWYG, facilitando leigos em programação gerar projetos interessantes mesmo sem ter grande conhecimento na área, com o resultado de suas simulações sendo gerados em tempo real permitindo ao usuário a correção de erros rapidamente. Sem contar o seu completo suporte a unidade

de medidas internacionais, recursos computacionais e sua interface clara para o usuário.

Assim sendo, o decorrer deste trabalho vem organizado da forma a seguir: Revisão bibliográfica, que direcionou o desenvolvimento da pesquisa, o desenvolvimento do roteiro ao longo do trabalho, materiais e métodos, e as conclusões referentes aos resultados alcançados e considerações finais do trabalho.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica

Em português encontra-se muitos trabalhos envolvendo novas tecnologias e educação. Objetivando desenvolver uma pesquisa com uma metodologia sistemática afim de catalogar, analisar e avaliar os artigos mais interessantes com respeito ao tema, decide-se fazer uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Na RSL, define-se o objetivo a seguir: Identificar trabalhos acadêmicos que empregam a tecnologia como ferramenta educacional, tratem das temáticas que englobam empuxo de terra e modelagem computacional para cálculos da área de engenharia civil, tendo como meio de pesquisa o Google Acadêmico, selecionando apenas os resultados em

português. Para a RSL, a string de busca foi escolhida como: "Software" or "Programa" and "Empuxo de Terra".

Levando em consideração somente os resultados em português, que demonstram correlação com o tema deste trabalho, foi obtido um retorno de 195 resultados. Desses resultados, foram selecionados 9 trabalhos que demonstraram abordar a temática de maneira semelhante ao objetivo aqui proposto, os quais são apresentados a seguir (Quadro 1):

Quadro 1 - Revisão Sistemática da Literaturas

Autor	Título	Ano
André Ferreira de Azevedo	Análise de estrutura de contenção multiancorada em areia	2016
Abdon José Corrêa Filho	Estudo comparativo de ferramentas computacionais para o dimensionamento de muro de concreto armado	2017

Francielly Soares Neto	Análise comparativa do dimensionamento de muro de arrimo em concreto armado para dois tipos de talude de terra	2017
Petrucio José dos Santos Junior	Cálculo do empuxo ativo com determinação numérica da superfície freática	2010
Luiz Henrique Zanivan Martinello	Desenvolvimento de software educacional para determinação de empuxos de terra e estabilidade de muros de gravidade	2016
Pedro Cristiano do Couto Neto	Desenvolvimento de software para cálculo de muros de arrimo	2015

Fonte: Os Autores (2020)

Em Azevedo (2016), foi abordada a “Análise de Estrutura de Contenção Multiancorada em Areia”, visando realizar verificações de segurança para as estruturas em cada uma das tipologias de ruptura propostas no trabalho. Visto a necessidade de se conhecer os esforços atuantes na parede de contenção, fez-se o uso da Teoria de Rankine

acerca da determinação do empuxo horizontal de terra. Foi também utilizado o software Geo5 (que trabalha com base no Método dos Elementos Finitos) na análise, trazendo resultados quanto à estabilidade das ancoragens.

Em Corrêa Filho (2017), realizou-se um “Estudo Comparativo de Ferramentas Computacionais para o Dimensionamento de Muro de Concreto Armado”, a respeito dos resultados obtidos com cálculos feitos manualmente e em softwares para um mesmo exemplo base, no que diz respeito ao dimensionamento de estruturas de contenção em concreto armado e a determinação dos esforços solicitantes atuantes nas mesmas. Os softwares utilizados foram: Cypecad (2014), no dimensionamento, GEO5 Empuxo de Terra (2016) e Ftool 3.01 para os esforços. O trabalho ainda destaca a

importância do uso de softwares no cálculo de estruturas, apontando ganhos em tempo e precisão de resultados, considerando a operação dessas ferramentas realizada por profissional devidamente habilitado para tal. No processo manual, foi utilizada a Teoria de Rankine para determinação dos empuxos de terra.

No trabalho de Soares Neto (2017), discutiu-se a “Análise Comparativa do Dimensionamento de Muro de Arrimo em Concreto Armado para Dois Tipos de Talude de Terra”, tratando também a importância das estruturas de contenção, tendo em vista o avanço da urbanização em direção aos taludes (ou encostas) e foi proposto um comparativo do dimensionamento de um muro de flexão para dois tipos hipotéticos de solo distintos, verificando-se a estabilidade e analisando-se aspectos relativos ao custo de

aplicação da técnica em questão. Avaliou-se as vantagens desse tipo de muro em comparação com o chamado muro de gravidade. Para o cálculo dos empuxos de terra atuantes na estrutura, foram abordadas duas teorias: Rankine e Coulomb. Sendo a última adotada no desenvolvimento dos cálculos. O trabalho ainda destaca que essas teorias, embora antigas, geram resultados satisfatórios.

Em Santos (2010), desenvolveu-se o “Cálculo do Empuxo Ativo com Determinação Numérica da Superfície Freática”, onde foi implementado um software, de nome “WALLSEEP”, que mostra o nível do lençol freático, a vazão total do sistema de drenagem, além do empuxo ativo que atua na estrutura de contenção. O algoritmo de cálculo, baseia-se em MEC – Método dos Elementos de Contorno, com uma abordagem numérica, necessária para obtenção

da precisão proposta pelo trabalho. Com ele se determina o lençol freático e posteriormente o cálculo do empuxo ativo pelo método de coulomb, levando em conta o nível encontrado dessa superfície freática. O trabalho mostra relevância na verificação das condições de estabilidade de estruturas de arrimo drenantes.

Martinello (2016), apresenta o “Desenvolvimento de Software Educacional para Determinação de Empuxos de Terra e Estabilidade de Muros de Gravidade”, programa esse que tem como objetivo determinar os diagramas referentes as tensões e empuxos de terra utilizando a teoria de Rankine e ainda verificar as condições de estabilidade da estrutura de contenção. Com o nome de “MCalc”, o programa implementado tem como linguagem de programação Object Pascal no ambiente Delphi 10. Tendo

sua interface limpa e intuitiva, o programa permite uma fácil interação de seu usuário com suas várias possibilidades de aplicação, sem contar que seus cálculos são feitos em tempo real e recalculados automaticamente conforme demanda. Com essa condição, conseguimos obter o recalcule rapidamente, com qualquer variação imposta pelos usuários, no que diz respeito a posição do lençol freático, sobrecarga e até uma camada a mais de solo por exemplo. Cumprindo com seu objetivo proposto por seus idealizadores, o “MCalc” é um programa de fácil uso, que pode ser muito bem explorado por alunos de engenharia, principalmente quanto estiverem estudando os conceitos referente as disciplinas dos solos.

Em PC Couto Neto (2015), foi feito um “Desenvolvimento de Software para Cálculo de Muros de

Arrimo”, utilizando a teoria de Rankine para se obter os diagramas de tensões e empuxo de terra, onde foram elaborados os parâmetros dos solos necessários para esses cálculos, e também verificar de forma eficiente a estabilidade de um muro de arrimo de concreto armado, se baseando em cálculos já conhecidos pela bibliografia atual. A linguagem de programação adotada para esse software foi o Visual Basic, que por sua vez possibilita uma atualização automática das informações, com layouts interativos e de forma fácil e acessível para o usuário, podendo ajudá-lo no entendimento das questões e auxiliando na fixação do conteúdo.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos

Teorias envolvendo o empuxo

Dentre todas as preocupações abrangentes da área de engenharia civil, a determinação do empuxo de solos é uma das maiores e mais antigas. Já em 1776 encontramos a primeira contribuição relevante para o tema, muito antes até do estudo da Mecânica dos Solos ser tratado como uma ciência autônoma. As teorias sobre empuxos de solos hoje são bastantes consagradas no meio científico, destacando-se a Teoria de Coulomb (1776) e a Teoria de Rankine (1857).

Os estudos de Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) se baseavam na teoria de equilíbrio limite, que é a consideração de existência de uma superfície de ruptura. Esta teoria tem como vantagem a consideração do atrito

entre o solo e o muro, sem contar a análise de estruturas com o paramento não vertical. Resumindo, as hipóteses consideradas são: Solo homogêneo e isotrópico; A ruptura é considerada um problema bidimensional; O estado de equilíbrio plástico vem do peso de uma cunha de solo; Forças de atrito solo-muro são distribuídas de modo uniforme ao longo de toda superfície de ruptura. Com isso, permitindo o conhecimento da direção do empuxo. O cálculo do empuxo é feito considerando as equações de equilíbrio das forças atuantes sobre uma cunha de deslizamento hipotética.

Já os estudos de William John Macquorn Rankine (1820-1872) sobre o tema levavam em consideração algumas observações diferentes da outra teoria. Também utilizando dos métodos de equilíbrio limite, admitiu-se que

a “cunha de solo” em contato com a contenção se encontre em um dos estados de plastificação, como o ativo ou passivo, considerando a massa de solo como um todo no estado de equilíbrio plástico. A cunha tenta se deslocar da parte fixa do maciço, e olhando para ela são feitas as análises de equilíbrio dos corpos rígidos (indeformável). Suas equações são pensadas tendo em mente um elemento infinitesimal do meio e considerando toda a massa plastificada ao “longo de sua altura”. Esta teoria pressupõe algumas condições iniciais de fundamental importância na análise da resistência ao cisalhamento do solo analisado, sendo elas: Solo totalmente sem coesão (areia seca); Solo totalmente homogêneo, com sua superfície superior horizontal; Ausência de atrito entre o terrapleno e sua

contenção; Massa de solo não submetido a nenhum tipo de sobrecarga.

Das duas teorias mais consagradas foi escolhida a Teoria de Rankine, onde pode-se ver mais a fundo em sua formulação nos textos a seguir.

Para entender e mesurar o empuxo de terra, primeiro deve-se ter em mente o que é o empuxo. Empuxo segundo o Prof. M. Marangon é a ação produzida pelo maciço terroso sobre as obras com ele em contato. Para sua determinação, deve-se entender primeiro sobre tensões horizontais. As tensões horizontais estão diretamente ligadas as tensões verticais presente no terraplano, e essa relação se dá por meio do Coeficiente de Empuxo de Terra (K), podendo ele ser ativo, passivo ou neutro.

$$\sigma'_h = (\sigma'_v \cdot K) \pm (2 \cdot C \cdot \sqrt{K})$$

Equação 1 - Formula da Tensão Efetiva Horizontal.

Onde, σ'_h = Tensão Efetiva Horizontal

σ'_v = Tensão efetiva vertical (kPa)

K = Coeficiente de empuxo (K_a , Ativo e K_p , Passivo)

(Adimensional)

C = Coesão do solo (kPa)

Obs:

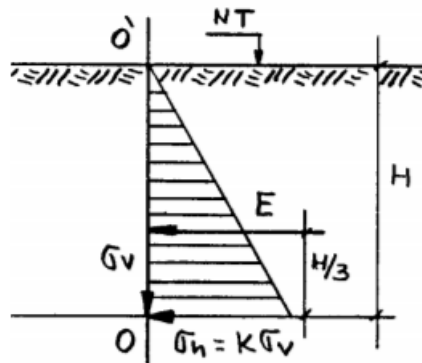
Estado ativo: $\sigma'_h = (\sigma'_v \cdot K_a) - (2 \cdot C \cdot \sqrt{K_a})$

Estado passivo: $\sigma'_h = (\sigma'_v \cdot K_p) + (2 \cdot C \cdot \sqrt{K_p})$

Conforme a altura do terrapleno aumenta, a Tensão Efetiva Vertical também aumenta e como já vimos, por consequência, ao ser relacionada com o Coeficiente de

Empuxo de Terra, nossa Tensão Efetiva Horizontal aparece. Essas Tensões podem facilmente ser expressas em um gráfico genérico, como mostrado na Figura 1:

Figura 1 - Diagrama genérico.



Fonte: Mecânica dos Solos II – Edição 2018, UFJF.

Na face OO' podemos encontrar a contenção, e o nível do terreno é representado por NT .

Assim sendo, enfim, pode-se encontrar o empuxo (E), pelo cálculo da área do triângulo formado na imagem, referente ao diagrama das pressões horizontais, sendo:

$$E = \frac{1}{2} * K * \gamma * h^2$$

Equação 2 - Resultante do empuxo.

Onde, E = Resultante do Empuxo

K = Coeficiente de Empuxo de Terra

γ = Peso Específico do Solo Analisado

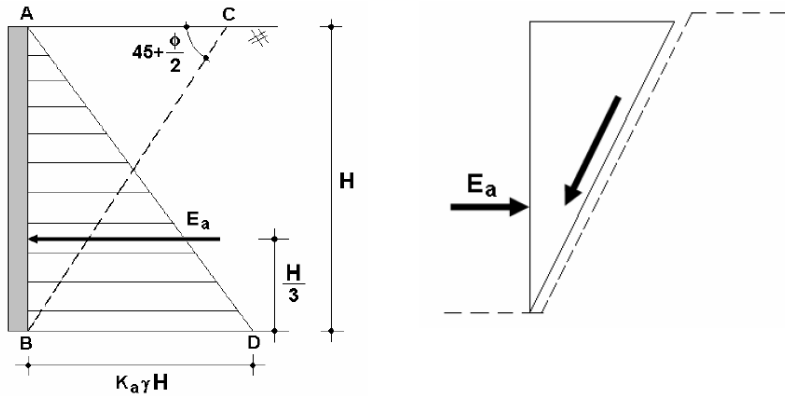
h = Altura Considerada

O empuxo é aplicado no centro de gravidade do diagrama, logo neste caso, a 1/3 de sua altura (H).

Ainda falando sobre o empuxo, como já citado anteriormente nesse trabalho, tem-se algumas condições que ele pode variar, distinguindo em empuxo passivo e ativo.

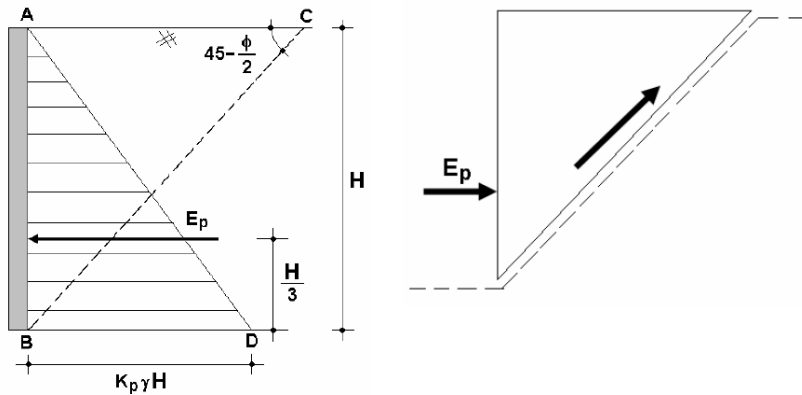
No empuxo ativo, a massa de solo tende a escorregar sobre a contenção que está em contato com ele. Já no empuxo passivo acontece o contrário, a massa de solo tende a se “afastar” do muro.

Figura 2 - Empuxo ativo e seu deslocamento.



Fonte: SANTOS JUNIOR (2010)

Figura 3 - Empuxo passivo e seu deslocamento.



Fonte: SANTOS JUNIOR (2010)

O empuxo ativo assim como o passivo devem ter coeficientes distintos para que suas características sejam consideradas. As equações a seguir mostram o Coeficiente de Empuxo Ativo e o Coeficiente de Empuxo Passivo, sendo um inversamente proporcional ao outro.

$$K_a = \frac{1}{N\phi} = \frac{1}{\text{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)} = \text{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$$

Equação 3 - Coeficiente de Empuxo Ativo.

$$K_p = N\phi = \text{tg}^2\alpha = \text{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$

Equação 4 - Coeficiente de Empuxo Passivo.

Onde, ϕ é o ângulo de atrito do solo.

No decorrer da apresentação dos resultados obtidos nesse trabalho serão abordados e explicados mais casos envolvendo a Teoria de Rankine, só que em condições não ideais, que não eram as premissas do autor ao desenvolver sua teoria. Será abordado ainda itens como coesão, solo saturado, sobrecargas, entre outros, que serão bem explicados mais à frente.

Conhecendo o programa: O SMath Studio

É um programa matemático de uso gratuito e disponível para IOS, Android, Linux, Windows e também para alguns dispositivos portáteis. Esse programa conta com código fechado semelhante ao Mathcad, com um editor WYSIWYG e suas unidades completas de suportes a medições. Que disponibiliza diversos recursos de computação e uma vasta interface de usuário, que é traduzida em cerca de 40 idiomas diferentes e também contém livro de referência matemática integrado.

Sua programação de aplicações numéricas envolve em controlar o equipamento de computação, para produzir um resultado numérico, que nesse contexto conta com três

principais estruturas de programação reconhecidas, a serem seguidas:

- Estruturas Sequenciais: É um diagrama de fluxo completo que consiste em pontos iniciais e finais, e pelo menos um bloco de processamento entre eles, esse diagrama constitui o caso mais simples de uma estrutura sequencial.

- Estruturas de Decisão: Essa estrutura requer uma condição que desencadeia uma decisão no fluxo do programa, e essa condição é representada por uma expressão lógica. Dentro do contexto de programação de cálculo numérico, uma expressão lógica é uma expressão matemática que pode ser verdadeiro ou falso. Os

resultados lógicos “verdadeiro” e “falso” são representados pelos números 1 e 0, respectivamente.

- Estruturas de Repetição (ou estruturas em loop):
Nessa estrutura os cálculos programáveis podem ser realizados usando um ou mais dessas estruturas, ou combinações

O funcionamento dessas estruturas de programação é ilustrado com o uso de diagramas de fluxo. O fluxograma é uma representação gráfica do processo a ser programado.

Principais funcionalidades

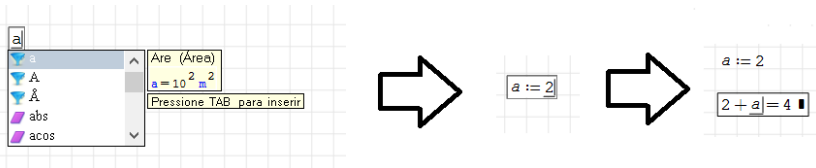
Entre seus principais recursos estão:

- Criação de variáveis e atribuição de valores a elas, podendo fazer a adequação de suas unidades de medidas;
- Resolução de equações diferenciais;
- O usuário tem liberdade para atribuir nome as variáveis e inserir simbologias matemáticas;
- Funções gráficas em duas ou três dimensões;
- Quando se altera o valor de uma variável, todo o processo é recalculado automaticamente.
- Funções gráficas em duas ou três dimensões;
- Programas simples em loop de várias linhas;
- Encontrar raízes de polinômios e funções;

- Operações de matriz, incluindo determinantes;
- Cálculos simbólicos, incluindo resolução de sistemas de equações;
- Diferenciação simbólica e numérica de funções;
- Cálculos simbólicos, incluindo resolução de sistemas de equações;
- Funções definidas pelo usuário;
- Integração numérica.

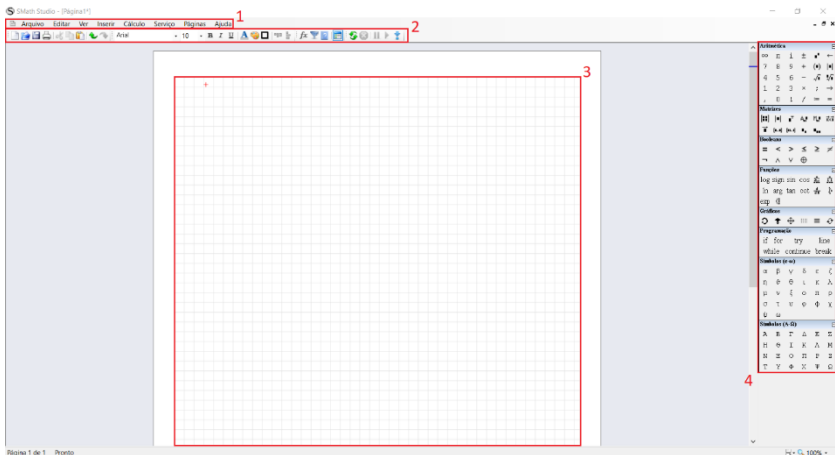
A seguir pode-ser ver um pouco mais, agora em imagens, das interfaces do programa, tanto uma programação básica quanto a sua tela inicial.

Figura 4 - Exemplo de programação genérica.



Fonte: Edição própria

Figura 5 - Tela inicial do Programa.



Fonte: Edição própria

Onde, 1 - Barra de menu, 2 - Barra de ferramentas, 3 - Área de trabalho, 4 - Paletas.

A Barra de menu é a área dos programas onde encontramos os menus, que podem ser utilizados para as mais diversas funções dentro dos aplicativos, como salvar arquivos, encontrar ajuda, interagir com o programa, entre outros.

A Barra de ferramentas pode ser utilizada para acesso rápido as ferramentas mais básicas do programa.

Na área de trabalho é onde de fato a programação acontece, é lá onde desenvolvemos os roteiros, como já visto anteriormente, podemos ver a programação acontecendo.

As paletas são facilitadoras, com várias fórmulas matemáticas e símbolos prontos a serem inseridas na programação apenas clicando sobre elas.

Desenvolvimento do roteiro

A partir do embasamento científico obtido com a Teoria de Rankine para empuxos de terra, escolhida por ser de aplicação mais simples e direta, somado ao software Smath Studio que traz funcionalidades diversas que contribuem para uma roteirização clara e quase tão direta quanto se faria manualmente, com a vantagem de eliminar erros de cálculo e automatizar os processos, o roteiro foi elaborado.

Para o desenvolvimento do roteiro, como já mencionado, foi escolhido o software Smath Studio 0.99. Nele foram construídas todas as equações necessárias, provenientes da Teoria de Rankine, bem como foram relacionados os dados de entrada (variáveis) das equações

e outras informações importantes. Porém, a fim de comprovar a efetividade e precisão do roteiro, foram resolvidos 4 exemplos distintos, todos obtidos em livros da área de geotecnia e mecânica dos solos, esses exemplos apresentam também resolução e gabarito, possibilitando a conferência da funcionalidade adequada do roteiro.

De modo simplificado, a sequência de elaboração seguiu conforme abaixo:

1. Análise do exercício selecionado e coleta de dados;
2. Criação das variáveis no software e posterior atribuição de valores a elas;
3. Definição adequada das unidades de medida;
4. Separação das etapas de cálculo na área de trabalho do software associada ao desenvolvimento das fórmulas;

5. Criação de condicionantes com a função de programação “if” (quando aplicável);
6. Processamento dos cálculos e verificação dos resultados obtidos.

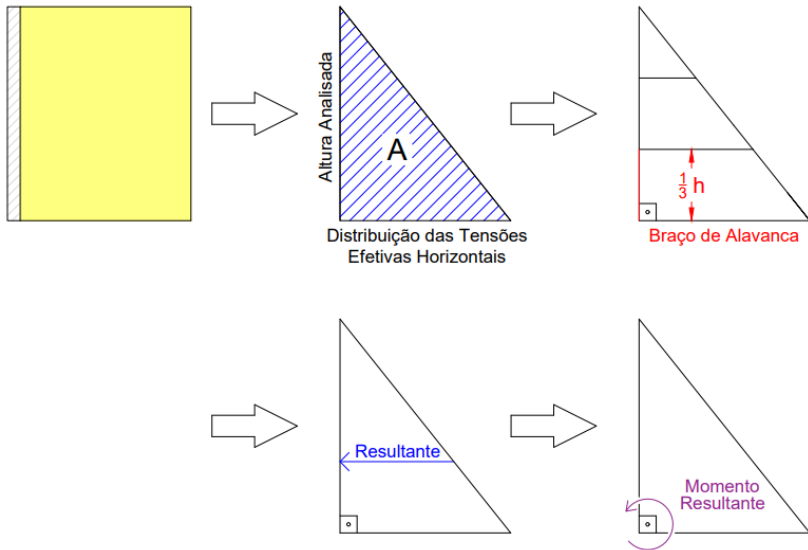
Visto que o software permite a alteração dos valores atribuídos em qualquer momento, pode-se testar diferentes parâmetros em um mesmo caso, pois a atualização de resultados é quase instantânea.

Distribuições de tensões horizontais e braços de alavanca

A partir de agora serão detalhadas as distribuições de tensões horizontais presentes nas simulações que serão apresentadas posteriormente neste trabalho. Com base em cada distribuição, será comentado o processo de determinação de seus respectivos braços de alavanca.

1) **Areia Seca:** Formando uma distribuição de tensões triangular, a resultante localiza-se a $1/3$ da altura contada a partir do ângulo reto.

Figura 6 – Distribuição de tensões ao longo da altura de um muro de arrimo: Areia Seca.

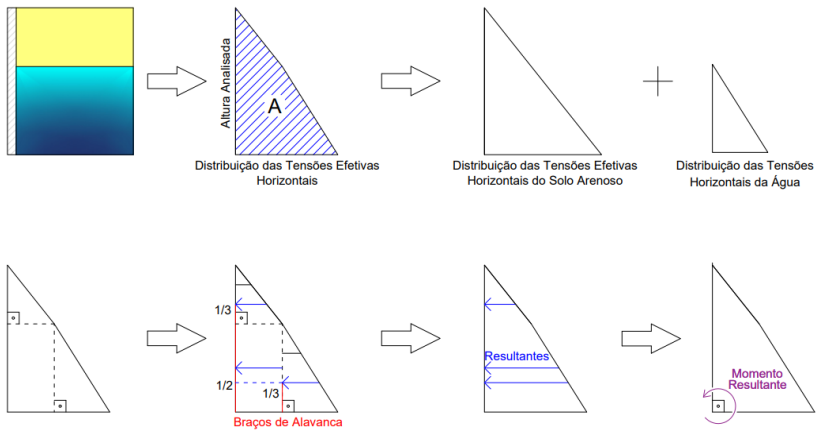


Fonte: Edição própria

2) **Areia com presença de água:** Neste caso, facilita muito dividir a figura em formas conhecidas. Ao separar a distribuição proveniente do solo daquela que vem da água, obtêm-se um triângulo correspondente a água (braço de alavanca determinado conforme o exemplo 1) e uma figura

gerada pela associação de um triângulo e um trapézio cuja base menor é a base do triângulo acima. Como cada resultante gera momento na base do muro de contenção, além da consideração do centro de gravidade de cada figura, deve-se também somar as alturas de aplicação das resultantes à altura restante até atingir a base da estrutura. De posse dessas informações basta dividir a distribuição do solo em um triângulo no topo (areia seca) e o trapézio que resta (areia saturada) em um retângulo complementado por um triângulo (resultante do retângulo aplica-se a $\frac{1}{2}$ da altura), já no triângulo segue o mesmo procedimento já comentado no exemplo 1.

Figura 7 – Distribuição de tensões ao longo da altura de um muro de arrimo: Areia com presença de água.

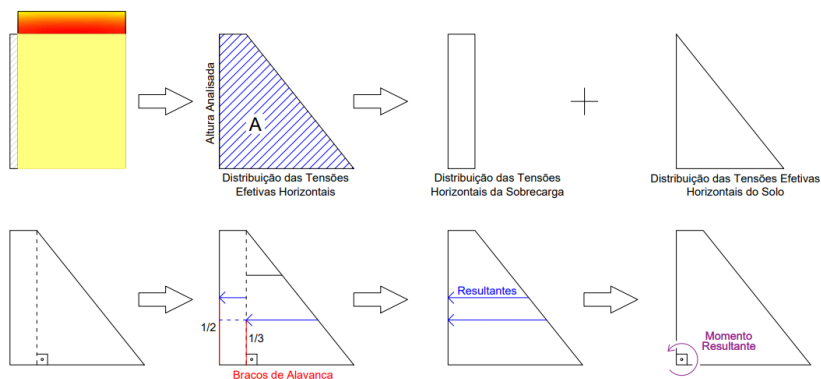


Fonte: Edição própria

3) **Areia seca com sobrecarga:** A areia segue a mesma metodologia descrita previamente nos passos anteriores. A sobrecarga gera uma distribuição de tensões retangular e, portanto, sua resultante é aplicada a metade da altura. Permanece a consideração do braço de alavanca ser a soma entre a altura de aplicação da resultante na

figura e a altura restante até atingir a base do muro de contenção.

Figura 8 – Distribuição de tensões ao longo da altura de um muro de arrimo: Areia seca com sobrecarga.

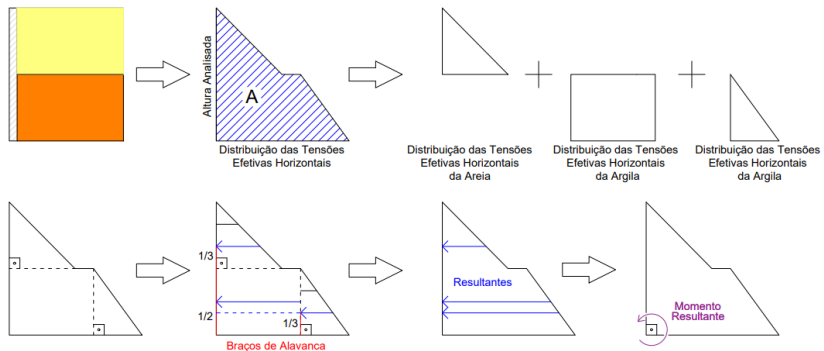


Fonte: Edição própria

4) **Areia seca sobre Argila:** A consideração é parecida com a descrita para a parcela do solo no caso 2, porém a argila (região trapezoidal) possui uma base menor que ultrapassa a base do triângulo proveniente da areia,

mas é possível que a tensão da argila ocasione um recuo na distribuição, sendo que isso é verificável com os cálculos.

Figura 9 – Distribuição de tensões ao longo da altura de um muro de arrimo: Areia seca sobre Argila.

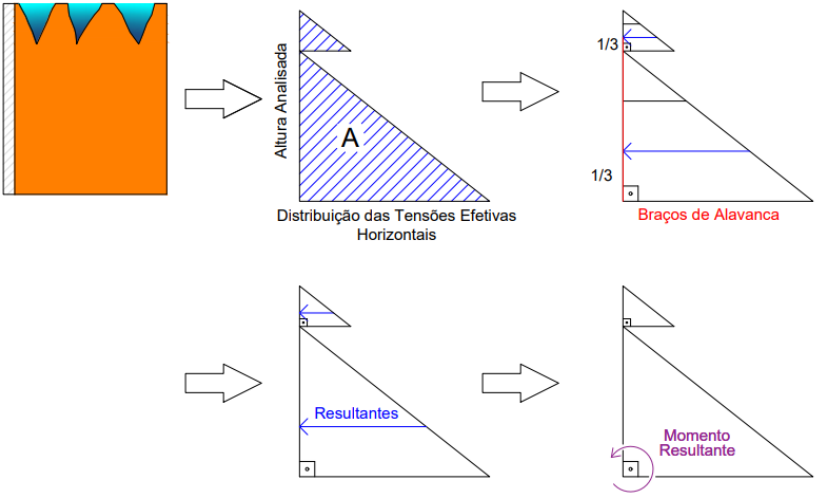


Fonte: Edição própria

5) **Solo coesivo com presença de água nas fendas de tração:** A distribuição é triangular, portanto, a aplicação da resultante acontece a $1/3$ da altura. A grande diferença em relação ao descrito no caso 1 é que a altura considerada resulta da subtração entre a altura total e a profundidade Z_0 (profundidade das fendas de tração). Ao topo desta

distribuição decorrente do solo acrescenta-se uma distribuição triangular proveniente das águas das fendas. Como em todos os casos, a referência para os braços de alavanca totais é a base da contenção.

Figura 10 - Distribuição de tensões ao longo da altura de um muro de arrimo: Solo coesivo com presença de água nas fendas de tração.



Fonte: Edição própria

Capítulo 4 - Desenvolvimento

Roteiro de Cálculo de Empuxos de Terra:

Simulação 1

Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

Tensão efetiva vertical:

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu$$

Equação 5 - Tensão Efetiva Vertical.

Onde, σ_v = Tensão total vertical (kPa)

μ = Poropressão (kPa)

Neste caso, não há Poropressão (μ) pois não existe presença de nível de água.

Calcular o Coeficiente de empuxo ativo (K_a), único presente nesse caso, levando em conta que não há inclinação na superfície do terreno, dada por:

Coeficiente de empuxo ativo:

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

Equação 6 - Coeficiente de Empuxo Ativo.

Onde, ϕ = Ângulo de atrito do solo;

Determinar a tensão efetiva horizontal, em seu estado ativo, dada por:

Tensão efetiva horizontal: (1)

$$\sigma'_h = (\sigma'_v \cdot K_a) - (2 \cdot C \cdot \sqrt{K_a})$$

Onde, σ'_v = Tensão efetiva vertical (kPa)

K_a = Coeficiente de empuxo ativo (Adimensional)

C = Coesão do solo (kPa)

Porém, neste caso, nosso solo sendo areia, não teremos coesão, logo, $C = 0$.

Simplificando o cálculo para:

Tensão efetiva horizontal: $\sigma'_h = \sigma'_v \cdot K_a$

Depois de obtida a tensão efetiva horizontal calcula-se a área do triângulo formado pelo resultado da **Tensão efetiva horizontal** com a **Altura da camada de solo em questão**, obtendo-se assim o valor do empuxo (resultante das tensões efetivas horizontais).

Simulação 2

Profundidade 2 metros:

Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

Tensão efetiva vertical: (5)

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu$$

Onde, σ_v = Tensão total vertical (kPa)

μ = Poropressão (kPa)

Calcular o Coeficiente de empuxo ativo (K_a), único presente nesse caso, levando em conta que não há inclinação na superfície do terreno, dada por:

Coeficiente de empuxo ativo: (3)

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

Onde, ϕ = Ângulo de atrito do solo;

Determinar a tensão efetiva horizontal, em seu estado ativo, dada por:

Tensão efetiva horizontal: (1)

$$\sigma'_h = (\sigma'_v \cdot K_a) - (2 \cdot C \cdot \sqrt{K_a})$$

Onde, σ'_v = Tensão efetiva vertical (kPa)

K_a = Coeficiente de empuxo ativo (Adimensional)

C = Coesão do solo (kPa)

Porém, neste caso, nosso solo sendo areia, não teremos coesão, logo, $C = 0$.

Simplificando o cálculo para:

Tensão efetiva horizontal: $\sigma'_h = \sigma'_v \cdot K_a$

Profundidade 5 metros:

Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

Tensão efetiva vertical: (5)

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu$$

Onde, σ_v = Tensão total vertical (kPa)

μ = Poropressão (kPa)

Calcular o Coeficiente de empuxo ativo (K_a), único presente nesse caso, levando em conta que não há inclinação na superfície do terreno, dada por:

Coeficiente de empuxo ativo: (3)

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

Determinar a tensão efetiva horizontal, em seu estado ativo, dada por:

Tensão efetiva horizontal: (1)

$$\sigma'_h = (\sigma'_v \cdot K_a) - (2 \cdot C \cdot \sqrt{K_a})$$

Onde: σ'_v = Tensão efetiva vertical (kPa)

K_a = Coeficiente de empuxo ativo (Adimensional)

C = Coesão do solo (kPa)

Porém, neste caso, nosso solo sendo areia, não teremos coesão, logo, $C = 0$.

Simplificando o cálculo para:

Tensão efetiva horizontal: $\sigma'_h = \sigma'_v \cdot K_a$

Se houver nível de água, é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da água, que por ter o mesmo valor que a tensão vertical numa certa profundidade, é dada por:

$$\sigma'_h = \gamma_w \cdot h$$

Equação 7 - Tensão horizontal da água.

Onde, γ_w = Peso específico da água (kN/m³)

h = Altura da camada de água (m)

Em caso de solo com presença de nível de água, deve-se calcular as tensões horizontais na profundidade de transição (início do NA), sendo uma relacionada à areia seca e outra à areia saturada. Essa particularidade será melhor explicada adiante.

Visto que cada tipo de solo e a água apresentam seus padrões de distribuição de tensões, ao longo da estrutura de contenção, calcula-se a área formada por cada distribuição e somam-se os resultados, obtendo-se assim o

valor do empuxo ativo (Resultante das tensões horizontais).

Simulação 3

Trata-se de um perfil de solo heterogêneo, composto por uma camada de solo arenoso (iniciando no nível do terreno), por uma camada de solo argiloso (do término da areia até o final do perfil), ainda há presença de nível de água, que inicia e termina com a argila, e também de uma sobrecarga na superfície. Estão presentes as condições de empuxo ativo e passivo.

Obs: A superfície do terreno não possui inclinação.

Para encontrar os valores das resultantes de empuxo ativo e passivo, pode ser utilizado um passo a passo básico, conforme a seguir:

Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

Tensão efetiva vertical: (5)

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu$$

Onde, σ_v = Tensão total vertical (kPa)

μ = Poropressão (kPa)

Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo),
levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Coeficiente de empuxo ativo: (3)

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

Onde, ϕ = Ângulo de atrito do solo;

Coeficiente de empuxo passivo: (4)

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por: (1)

$$\text{Estado ativo: } \sigma'_h = (\sigma'_v \cdot K_a) - (2 \cdot C \cdot \sqrt{K_a})$$

$$\text{Estado passivo: } \sigma'_h = (\sigma'_v \cdot K_p) + (2 \cdot C \cdot \sqrt{K_p})$$

Onde, σ'_v = Tensão efetiva vertical (kPa)

K_a = Coeficiente de empuxo ativo (Adimensional)

K_p = Coeficiente de empuxo passivo (Adimensional)

C = Coesão do solo (kPa)

Se houver nível de água, é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da água, que por ter o mesmo valor que a tensão vertical numa certa profundidade, é dada por: (7)

$$\sigma'_h = \gamma_w \cdot h$$

Onde, γ_w = Peso específico da água (kN/m³)

h = Altura da camada de água (m)

Se houver sobrecarga (q), é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da sobrecarga, que é dada por:

$$\sigma'_h = q \cdot K$$

Equação 8 - Tensão horizontal da sobrecarga.

Obs:

Estado ativo: $\sigma'_h = q \cdot K_a$

Estado passivo: $\sigma'_h = q \cdot K_p$

Em caso de solo heterogêneo, deve-se calcular as tensões horizontais nas profundidades de transição (mudança de solo), sendo uma relacionada ao coeficiente de empuxo da camada superior e a outra relacionada ao da inferior.

Essa particularidade será melhor explicada adiante.

Visto que cada tipo de solo, a água e a sobrecarga apresentam seus padrões de distribuição de tensões, ao longo da estrutura de contenção, calcula-se a área formada por cada distribuição e somam-se os resultados, obtendo-se assim o valor dos empuxos ativo e passivo (resultante das tensões efetivas horizontais).

Simulação 4

Neste exemplo trabalha-se com um solo coesivo argiloso (solos siltosos também são coesivos) na condição ativa. Como o solo é composto por argila desde o nível do terreno até a base da contenção, deve ser considerada a existência de fendas de tração na superfície. A situação conta ainda com uma sobrecarga na superfície. Em resumo, é necessário determinar o empuxo proveniente: da argila, da água que pode ficar acumulada nas fendas de tração e da sobrecarga. De posse desses valores, basta somá-los para obter o empuxo ativo total.

Para encontrar o valor da resultante do empuxo ativo, pode ser utilizado o passo a passo básico a seguir:

Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

Tensão efetiva vertical: (5)

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu$$

Onde, σ_v = Tensão total vertical (kPa)

μ = Poropressão (kPa)

Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo),
levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Coeficiente de empuxo ativo: (3)

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

Onde, ϕ = Ângulo de atrito do solo;

Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por: (1)

$$\text{Estado ativo: } \sigma'_h = (\sigma'_v \cdot K_a) - (2 \cdot C \cdot \sqrt{K_a})$$

Onde, σ'_v = Tensão efetiva vertical (kPa)

K_a = Coeficiente de empuxo ativo (Adimensional)

C = Coesão do solo (kPa)

Se houver nível de água, é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da água, que por ter o mesmo valor que a tensão vertical numa certa profundidade, é dada por: (7)

$$\sigma'_h = \gamma_w \cdot h$$

Onde, γ_w = Peso específico da água (kN/m³)

h = Altura da camada de água (m)

Se houver sobrecarga (q), é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da sobrecarga, dada por: (8)

Estado ativo: $\sigma'_h = q \cdot K_a$

Estado passivo: $\sigma'_h = q \cdot K_p$

Se houver solo argiloso ou siltoso ($c \neq 0$) exposto, deve-se considerar a presença de fendas de tração a partir do topo até uma profundidade “Z0”, sendo então considerado um carregamento de água na mesma profundidade (calculado conforme o passo 4);

$$Z_0 = \frac{2 \cdot C}{\gamma \cdot \sqrt{K_a}}$$

Equação 9 - Profundidade da água nas fendas de tração.

Onde, γ é o peso específico do solo coesivo (kN/m^3)

Visto que cada tipo de solo, a água e a sobrecarga apresentam seus padrões de distribuição de tensões, ao

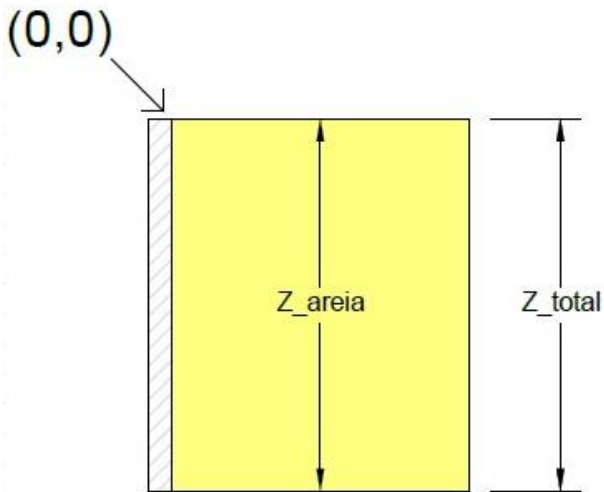
longo da estrutura de contenção, calcula-se a área formada por cada distribuição e somam-se os resultados, obtendo-se assim o valor do empuxo ativo (resultante das tensões efetivas horizontais).

Obs: onde aparece a sobrecarga (q), a unidade é kPa.

Aplicação

Simulação 1

Figura 11 - Simulação 1 - Areia Seca.



Fonte: Edição própria

Dados:

Areia: $c = 0 \text{ kPa}$; $\phi = 35^\circ$; $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$.

$Z_{\text{areia}} = 5 \text{ m}$

$Z_{\text{total}} = 5 \text{ m}$

1. Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

$$\sigma'_v = 17 \cdot 5 = 85\text{kPa}$$

2. Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo), levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Estado ativo:

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{35}{2}\right) = 0,27$$

3. Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por:

Estado ativo:

$$\sigma'_h = (85 \cdot 0,27) - (2 \cdot 0 \cdot \sqrt{0,27}) = 22,95\text{kPa}$$

4. De modo geral, considera-se que o solo em questão apresenta a seguinte distribuição de tensões horizontais:

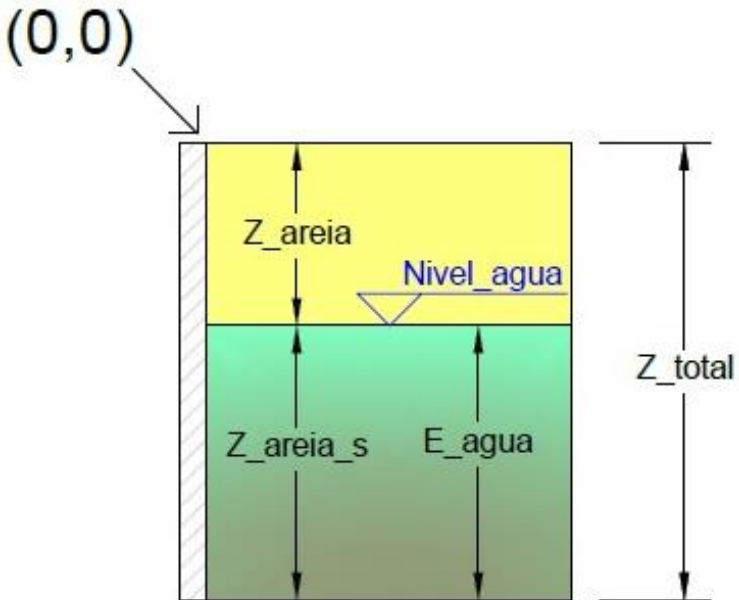
Areia homogênea e sem presença de água - triangular (aumentando junto com a profundidade);

$$\text{Resultante da Areia} = \frac{\sigma'_h \cdot Z_{\text{areia}}}{2} = \frac{22,95 \cdot 5}{2} = 57,37 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Empuxo Ativo} = \text{Resultante da Areia} = 57,37 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Simulação 2

Figura 12 - Simulação 2 - Areia com presença de água.



Fonte: Edição própria

Dados:

Areia seca: $c = 0$ kPa; $\phi = 35^\circ$; $\gamma = 17$ kN/m³.

Areia saturada: $c = 0$ kPa; $\phi = 35^\circ$; $\gamma = 20$ kN/m³.

Nivel_agua: 2 m abaixo da superfície.

$$Z_{\text{areia}} = 2 \text{ m}$$

$$Z_{\text{areia}_s} = 3 \text{ m}$$

$$E_{\text{agua}} = 3 \text{ m}$$

$$Z_{\text{total}} = 5 \text{ m}$$

Fazendo uso do passo a passo mostrado anteriormente, têm-se:

Obs: É necessário destacar que algumas etapas precisarão ser aplicadas mais de uma vez, por se tratar de um perfil com presença de água. Desse modo, a análise será feita por camada e posteriormente os valores obtidos serão relacionados para o resultado final.

Estado ativo:

Areia - profundidade de 2 m

1. Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

$$\sigma'_v = 17 \cdot 2 = 34\text{kPa}$$

2. Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo), levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Estado ativo:

$$Ka = \tan^2\left(45 - \frac{35}{2}\right) = 0,27$$

3. Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por:

Estado ativo:

$$\sigma'_{h1} = (34 \cdot 0,27) - (2 \cdot 0 \cdot \sqrt{0,27}) = 9,18\text{kPa}$$

Areia - profundidade de 5 m

4. Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

$$\sigma'_v = (17 \cdot 2 + 20 \cdot 3) - (10 \cdot 3) = 64 \text{kPa}$$

5. Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo), levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Estado ativo:

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{35}{2}\right) = 0,27$$

6. Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por:

Estado ativo:

$$\sigma'_{h2} = (64 \cdot 0,27) - (2 \cdot 0 \cdot \sqrt{0,27}) = 17,28 \text{kPa}$$

7. Se houver nível de água, é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da água, que por ter o mesmo valor que a tensão vertical numa certa profundidade, é dada por:

$$\sigma'_{hw} = 10 \cdot 3 = 30\text{kPa}$$

8. Como explica o passo 5 do roteiro proposto, é necessário calcular as tensões na mudança de areia seca para saturada e ao final da camada de areia saturada, porque a presença de água altera a distribuição de tensões e aumenta o valor das mesmas, ou seja, influi no valor do empuxo. Por isso, acima foram feitos cálculos para cada camada e tomou-se o cuidado com a transição da areia seca para saturada (daí o cálculo a 2 e a 5 metros).

9. De modo geral, considera-se que os solos e elementos adicionais em questão apresentam as seguintes distribuições de tensões horizontais:

Areia homogênea e sem presença de água - triangular (aumentando junto com a profundidade);

Areia saturada - iniciando onde termina a tensão máxima da areia seca (base do triângulo), segue com inclinação até o final da camada (aumentando com a profundidade). Observando nota-se que se formará um trapézio;

Água - triangular (aumentando com a profundidade);

Cálculo das resultantes:

$$\text{Resultante da Areia Seca} = \frac{\sigma'_{h1} \cdot Z_{\text{areia}}}{2} = \frac{9,18 \cdot 2}{2}$$

$$= 9,18 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante da Areia Saturada} = \frac{(\sigma'_{h1} + \sigma'_{h2}) \cdot Z_{\text{areia}_s}}{2}$$

$$= \frac{(9,18 + 17,28) \cdot 3}{2} = 39,69 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante da Água} = \frac{\sigma'_{hw} \cdot E_{\text{agua}}}{2} = \frac{30 \cdot 3}{2} = 45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

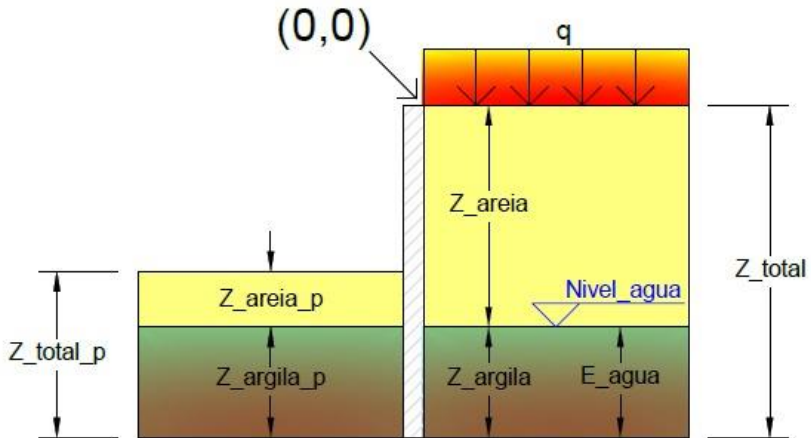
Empuxo Ativo

$$= \text{Resultante da Água} + \text{Resultante da Areia Seca}$$

$$+ \text{Resultante da Areia Saturada} = 93,87 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Simulação 3

Figura 13 – Simulação 3 – Areia e argila com presença de água e sobrecarga.



Fonte: Edição própria

Dados:

Sobrecarga: $q = 50 \text{ kPa}$

Areia: $c = 0 \text{ kPa}$; $\phi = 38^\circ$; $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$.

Argila: $c = 10 \text{ kPa}$; $\phi = 28^\circ$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$.

Nivel_agua: 6 m abaixo da superfície.

$$Z_{\text{areia}} = 6 \text{ m}$$

$$Z_{\text{argila}} = 3 \text{ m}$$

$$E_{\text{agua}} = E_{\text{agua_p}} = 3 \text{ m}$$

$$Z_{\text{agua_p}} = 1,5 \text{ m}$$

$$Z_{\text{argila_p}} = 3 \text{ m}$$

Fazendo uso do passo a passo mostrado anteriormente, têm-se:

Obs: É necessário destacar que algumas etapas precisarão ser aplicadas mais de uma vez, por se tratar de um perfil heterogêneo. Desse modo, a análise será feita por camada e posteriormente os valores obtidos serão relacionados para o resultado final.

Estado ativo:

Areia - profundidade de 6 m

1. Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

$$\sigma'_v = (18 \cdot 6) - (0 \cdot 10) = 108 \text{ kPa}$$

2. Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo), levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Estado ativo:

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{38}{2}\right) = 0,24$$

3. Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por:

Estado ativo:

$$\sigma'_{h1} = (108 \cdot 0,24) - (2 \cdot 0 \cdot \sqrt{0,24}) = 25,92\text{kPa}$$

Argila - profundidade de 6 m

4. Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

$$\sigma'_v = (18 \cdot 6 + 20 \cdot 0) - (0 \cdot 10) = 108\text{kPa}$$

5. Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo), levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Estado ativo:

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{28}{2}\right) = 0,36$$

6. Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por:

Estado ativo:

$$\sigma'_{h2} = (108 \cdot 0,36) - (2 \cdot 10 \cdot \sqrt{0,36}) = 26,88\text{kPa}$$

Argila - profundidade de 9 m

7. Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

$$\sigma'_v = (18 \cdot 6 + 20 \cdot 3) - (3 \cdot 10) = 138\text{kPa}$$

8. Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo), levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Estado ativo:

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{28}{2}\right) = 0,36$$

9. Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por:

Estado ativo:

$$\sigma'_{h3} = (138 \cdot 0,36) - (2 \cdot 10 \cdot \sqrt{0,36}) = 37,68\text{kPa}$$

10. Se houver nível de água, é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da água, que por ter o mesmo valor que a tensão vertical numa certa profundidade, é dada por:

$$\sigma'_{hw} = 10 \cdot 3 = 30\text{kPa}$$

11. Se houver sobrecarga, é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da sobrecarga, que é dada por:

Estado ativo (até 6 m)

$$\sigma'_{hs1} = 50 \cdot 0,24 = 12\text{kPa}$$

Estado ativo (6 a 9 m)

$$\sigma'_{hs2} = 50 \cdot 0,36 = 18\text{kPa}$$

12. Como explica o passo 6 do roteiro proposto, é necessário calcular as tensões nas mudanças de solo, pois junto como o solo mudam também os coeficientes de empuxo e por consequência as tensões efetivas horizontais, ou seja, influi no valor do empuxo. Por isso, acima foram feitos cálculos para cada camada e tomou-se o cuidado com a transição da areia para a argila (daí o cálculo a 6 m para ambos os solos). Importante destacar que o mesmo cuidado deve ser tomado com a tensão oriunda da sobrecarga.

13. De modo geral, considera-se que os solos e elementos adicionais em questão apresentam as seguintes distribuições de tensões horizontais:

Areia homogênea e sem presença de água - triangular (aumentando junto com a profundidade);

Argila saturada - iniciando onde termina a tensão máxima da areia (base do triângulo), segue com inclinação até o final da camada (aumentando com a profundidade). Observando nota-se que se formará um trapézio;

Água - triangular (aumentando com a profundidade);

Sobrecarga - retangular, uniforme do topo ao final da camada (sofrendo alteração em transições de solo).

A partir disso as resultantes das tensões horizontais (empuxos) podem ser determinadas.

Cálculo das resultantes:

$$\text{Resultante da Areia} = \frac{\sigma'_{h1} \cdot Z_{\text{areia}}}{2} = \frac{25,92 \cdot 6}{2} = 77,76 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\begin{aligned} \text{Resultante da Argila} &= \frac{(\sigma'_{h2} + \sigma'_{h3}) \cdot Z_{\text{argila}}}{2} \\ &= \frac{(26,88 + 37,68) \cdot 3}{2} = 96,84 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Resultante do Solo

= Resultante da Areia + Resultante da Argila =

$$174,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante da \u00c1gua} = \frac{\sigma'_{hw} \cdot E_{\text{agua}}}{2} = \frac{30 \cdot 3}{2} = 45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante da Sobrecarga 1} = \sigma'_{hs1} \cdot Z_{\text{areia}} =$$

$$12 \cdot 6 = 72 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante da Sobrecarga 2} = \sigma'_{hs2} \cdot Z_{\text{argila}} =$$

$$18 \cdot 3 = 54 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante da Sobrecarga} =$$

$$\text{Resultante da Sobrecarga 1} + \text{Resultante da Sobrecarga 2}$$

$$= 126 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\begin{aligned} \text{Empuxo} &= \\ &\text{Resultante do Solo} + \text{Resultante da \u00c1gua} \\ &+ \text{Resultante da Sobrecarga} \\ &= 345,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Estado Passivo:

Areia - profundidade de 1,5 m

1. Determinar a tens\u00e3o efetiva vertical, dada por:

$$\sigma'_v = (18 \cdot 1,5) - (0 \cdot 10) = 27\text{kPa}$$

2. Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo), levando em conta se h\u00e1 inclina\u00e7\u00e3o na superf\u00edcie do terreno:

Estado passivo:

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{38}{2}\right) = 4,2$$

3. Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por:

Estado passivo:

$$\sigma'_{h1_p} = (27 \cdot 4,2) + (2 \cdot 0 \cdot \sqrt{4,2}) = 113,4 \text{ kPa}$$

Argila - profundidade de 1,5 m

4. Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

$$\sigma'_v = (18 \cdot 1,5 + 20 \cdot 0) - (0 \cdot 10) = 27 \text{ kPa}$$

5. Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo), levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Estado passivo:

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{28}{2}\right) = 2,77$$

6. Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por:

Estado passivo:

$$\sigma'_{h2_p} = (27 \cdot 2,77) + (2 \cdot 10 \cdot \sqrt{2,77}) = 108,07 \text{ kPa}$$

Argila - profundidade de 4,5 m

7. Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

$$\sigma'_v = (18 \cdot 1,5 + 20 \cdot 3) - (3 \cdot 10) = 57 \text{ kPa}$$

8. Calcular o coeficiente de empuxo (ativo ou passivo), levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Estado passivo:

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{28}{2}\right) = 2,77$$

9. Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por:

Estado passivo:

$$\sigma'_{h3,p} = (57 \cdot 2,77) + (2 \cdot 10 \cdot \sqrt{2,77}) = 191,17\text{kPa}$$

10. Se houver nível de água, é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da água, que por ter o mesmo valor que a tensão vertical numa certa profundidade, é dada por:

$$\sigma'_{hw,p} = 10 \cdot 3 = 30\text{kPa}$$

11. Como explica o passo 6 do roteiro proposto, é necessário calcular as tensões nas mudanças de solo, pois junto como o solo mudam também os coeficientes de empuxo passivo e por consequência as tensões efetivas horizontais, ou seja, influi no valor do empuxo passivo. Por isso, acima foram feitos cálculos para cada

camada e tomou-se o cuidado com a transição da areia para a argila (daí o cálculo a 1,5 m para ambos os solos).

12. De modo geral, considera-se que os solos em questão e a água apresentam as seguintes distribuições de tensões horizontais:

Areia homogênea e sem presença de água - triangular (aumentando junto com a profundidade);

Argila saturada - iniciando onde termina a tensão máxima da areia (base do triângulo), segue com inclinação até o final da camada (aumentando com a profundidade).

Observando nota-se que se formará um trapézio;

Água - triangular (aumentando com a profundidade);

A partir disso as resultantes das tensões horizontais (empuxos) podem ser determinadas.

Cálculo das resultantes:

$$\begin{aligned} \text{Resultante Passiva da Areia} &= \frac{\sigma'_{h1_p} \cdot Z_areia_p}{2} = \frac{113,4 \cdot 1,5}{2} \\ &= 85,05 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Resultante Passiva da Argila =

$$\begin{aligned} &\frac{(\sigma'_{h2_p} + \sigma'_{h3_p}) \cdot Z_argila_p}{2} = \frac{(108,07 + 191,17) \cdot 3}{2} \\ &= 448,86 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Resultante Passiva do Solo =

Resultante Passiva da Areia + Resultante Passiva da Argila

$$= 533,91 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante Passiva da \u00c1gua} = \frac{\sigma'_{\text{hw}_p} \cdot E_{\text{agua}_p}}{2} = \frac{30 \cdot 3}{2}$$

$$= 45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Empuxo Passivo =

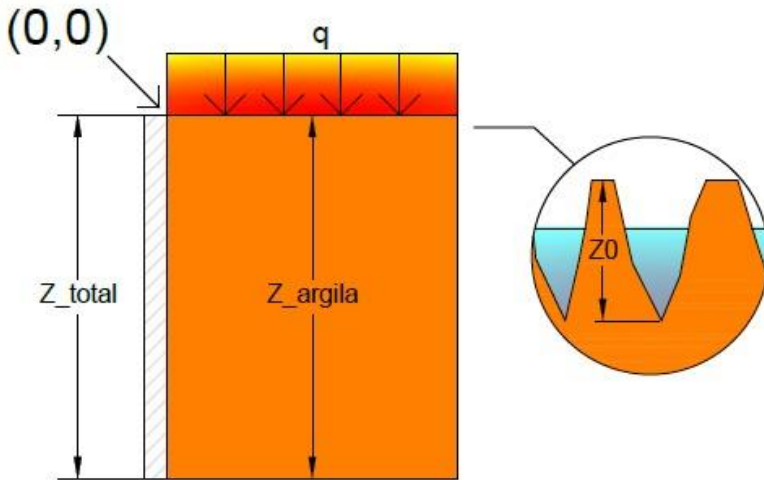
Resultante Passiva do Solo

+Resultante Passiva da \u00c1gua

$$= 578,91 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Simulação 4

Figura 14 - Simulação 4 - Argila com sobrecarga.



Fonte: Edição própria

Dados:

Sobrecarga: $q = 20 \text{ kPa}$

Argila: $c = 5 \text{ kPa}$; $\phi = 28^\circ$; $\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$.

$Z_{total} = Z_{argila} = 4 \text{ m}$

Calculando a resultante do empuxo ativo através do passo a passo anteriormente apresentado, têm-se:

1. Determinar a tensão efetiva vertical, dada por:

$$\sigma'_v = (16,5.4) - (0.10) = 66\text{kPa}$$

2. Calcular o coeficiente de empuxo ativo, levando em conta se há inclinação na superfície do terreno:

Estado ativo:

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{28}{2}\right) = 0,36$$

3. Determinar a tensão efetiva horizontal, dada por:

Estado ativo:

$$\sigma'_h = (66.0,36) - (2.5. \sqrt{0,36}) = 17,76\text{kPa}$$

4. Se houver nível de água, é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da água, que por ter o mesmo valor que a tensão vertical numa certa profundidade, é dada por:

$$\sigma'_h = \gamma_w \cdot h$$

Nota: Como não há presença de nível de água neste caso, este passo permanece como referência para o cálculo da tensão proveniente da água nas fendas de tração.

5. Se houver sobrecarga, é necessário calcular a tensão horizontal oriunda da sobrecarga, que é dada por:

Estado ativo

$$\sigma'_{hs} = 20 \cdot 0,36 = 7,2\text{kPa}$$

6. Se houver solo argiloso ou siltoso ($c \neq 0$) exposto, deve-se considerar a presença de fendas de tração a partir do topo até uma profundidade “Z0”, sendo então considerado um carregamento de água na mesma profundidade (calculado conforme o passo 4);

$$Z_0 = \frac{2 \cdot 5}{16,5 \cdot \sqrt{0,36}} = 1,01\text{m}$$

$$\sigma'_{hw} = 10 \cdot 1,01 = 10,1\text{kPa}$$

7. De modo geral, considera-se que os solos e elementos adicionais em questão apresentam as seguintes distribuições de tensões horizontais:

Argila - triangular (aumentando com a profundidade), sendo que a altura desse triângulo

corresponde ao resultado da subtração entre a espessura da camada de argila e o valor da profundidade Z_0 ;

Água nas fendas - triangular (aumentando com a profundidade);

Sobrecarga - retangular, uniforme do topo ao final da camada.

A partir disso as resultantes das tensões horizontais (empuxos) podem ser determinadas.

$$\begin{aligned} \text{Resultante da Argila} &= \frac{\sigma'_h \cdot (Z_{\text{argila}} - Z_0)}{2} \\ &= \frac{17,76 \cdot (4 - 1,01)}{2} = 26,55 \frac{\text{KN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Resultante da Água nas Fendas =

$$\frac{\sigma'_{hw} \cdot Z0}{2} = \frac{10,1 \cdot 1,01}{2} = 5,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante da Sobrecarga} = \sigma'_{hs} \cdot Z_{\text{total}} = 7,2 \cdot 4 = 28,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Empuxo Ativo =

Resultante da Argila + Resultante da Água nas Fendas

$$+ \text{Resultante da Sobrecarga} = 60,45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Automatização do Roteiro

Conhecendo toda a formulação e método apresentados, tornar os cálculos automatizados no Smath Studio consiste basicamente em transcrevê-los para a área de trabalho do software, que permite ao usuário inserir dados como se estivesse redigindo um texto numa ferramenta office, respeitando sua lógica de funcionamento. Visto a praticidade de modelagem oferecida pela ferramenta, o processo de automatização mostra-se simples ao se aplicar as instruções anteriormente demonstradas no capítulo destinando à metodologia e os recursos que poderão ser vistos nos apêndices de A a D, que apresentarão todo o roteiro desenvolvido no Smath Studio incluindo os cálculos para os braços de alavanca. É

importante destacar que os cálculos desenvolvidos no Smath Studio utilizaram quatro casas decimais que, posteriormente, foram reduzidas para 2 casas decimais na versão final. Já os cálculos apresentados no capítulo "Desenvolvimento" utilizaram apenas 2 casas desde o início. Com isso pode-se observar pequenas diferenças nos resultados finais, porém ambos estão corretos.

Capítulo 5 - Conclusão

Como apresentado na introdução, este trabalho objetivou apresentar um roteiro de cálculo automatizado para o cálculo de empuxos de terra em situações pré-definidas (com dados de entrada modificáveis) e, com isso, facilitar o aprendizado dos estudantes na disciplina de Mecânica dos Solos.

Logrando êxito em seus objetivos propostos, o roteiro é de fácil implementação e reprodução, sendo muito útil, nas ciências dos solos. Os resultados obtidos foram verificados junto as literaturas específicas da área, comprovando assim sua precisão matemática. E ainda, a facilidade da implementação pode inspirar a todos os que

a utilizarem, a criarem seus próprios modelos, para novos problemas analisados por eles.

Observa-se que, posteriormente, o processo de cálculos desenvolvidos pode servir de base para o aprimoramento de seus recursos para fins de prática dos profissionais de engenharia, possibilitando a otimização do trabalho dos mesmos, gerando ganhos de tempo e precisão matemática.

Visto o caráter acadêmico e o aspecto educacional deste trabalho, uma proposta interessante para pesquisas futuras seriam aprimoramento do roteiro automatizado para que ele se torne capaz de solucionar outros perfis de solo, além das simulações aqui apresentadas. Interessante também que uma versão aprimorada traga a plotagem

automática das distribuições de tensões horizontais, contribuindo ainda mais no estudo da engenharia geotécnica.

Referências Bibliográficas:

AZEVEDO, André F. de. Análise de estrutura de contenção multiancorada em areia. 2016. 18 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2016. Disponível em: <<https://monografias.ufrn.br/jspui/handle/123456789/3059>>

FILHO, Abdon J. C. FILHO, Márcio C. S. Estudo comparativo de ferramentas computacionais para o dimensionamento de muro de concreto armado. 2017. Revista Técnico-Científica do CREA-PR - 7º edição, Paraná, PR, 2017. Disponível em: <<http://creaprw16.crea->

pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/251>

SOARES, Francielly N. Análise comparativa do dimensionamento de muro de arrimo em concreto armado para dois tipos de talude de terra. 2017. 99 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unidade Delmiro Gouveia-Campus do Sertão, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, AL, 2018. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/3694>>

SANTOS JUNIOR, Petrucio J. dos. Cálculo do empuxo ativo com determinação numérica da superfície freática. 2010. 97 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 2010. Disponível

em:

<<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/25874>

3>

MARTINELLO, Luiz H. Z. Desenvolvimento de software educacional para determinação de empuxos de terra e estabilidade de muros de gravidade. 2016. 20 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, SC, 2016.

Disponível

em:

<<http://repositorio.unesc.net/handle/1/4989>>

COUTO NETO, Pedro C. do. Desenvolvimento de software para cálculo de muros de arrimo. 2015. 117 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília - Faculdade de Tecnologia e

Ciências Sociais Aplicadas, Brasília, DF, 2015. Disponível em:

<<https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/235/6354>>

CAMPOS, Flavio R. Diálogo entre Paulo Freire e Seymour Papert: a prática educativa e as tecnologias digitais de informação e comunicação. 2009. 183 f. Tese (Doutorado em Letras) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, 2009. Disponível em: <<http://tede.mackenzie.br/jspui/handle/tede/2360>>

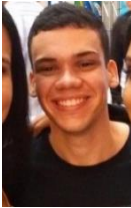
IVASHOV, Andrey. Smath Studio: Software Matemático. Versão 0.99.7579, 01 out. 2010. Disponível em: <<https://en.smath.com/view/SMathStudio/summary>>

SCHWAB, Klaus. A Quarta Revolução Industrial. 1 ed. Edipro, 1 de fevereiro de 2018.

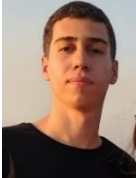
DAS, Braja M. Fundamentos da Engenharia Geotécnica. 9 ed. São Paulo: Cengage, 2019.

KNAPPETT, J. A. CRAIG, R. F. Mecânica dos solos. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

Sobre os autores



HUGO FELIPE DA SILVA PEDRO
Aluno de graduação em Engenharia Civil na
Universidade de Vassouras
E-mail: hugofelipe009@gmail.com



JOÃO PEDRO ROSA FERREIRA
Aluno de graduação em Engenharia Civil na
Universidade de Vassouras
E-mail: joaopedrocivil1998@gmail.com



LUAN DE CARVALHO RAMOS
Aluno de graduação em Engenharia Civil na
Universidade de Vassouras
E-mail: luan.ramos0297@gmail.com



CARLOS VITOR DE ALENCAR CARVALHO
Pós-doutorado em Educação Matemática.
Doutorado e Mestrado em Engenharia Civil.
Aperfeiçoamento/Extensão Universitária em
Competitive Project Management na State
University of New York at New Paltz
Graduação em Engenharia Civil.
Professor Titular da Universidade de Vassouras.
E-mail: cvtorc@gmail.com
carlos.vitor@universidadedevassouras.edu.br



MARCELLE BRANDÃO DE CARVALHO
Mestrado em Geotecnia pela Universidade do
Estado do Rio de Janeiro. Graduação em Engenharia
Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
Professora Assistente da Universidade de Vassouras.
E-mail: marcelle_bc@hotmail.com

Apêndices

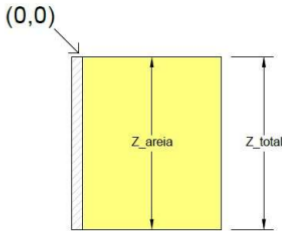
APÊNDICE A - Simulação 1

As imagens a seguir possuem a mesma fonte: Os autores.

28 set 2020 15:05:45 - Roteiro de Cálculo - Empuxo de Terra - Artigo - TCC - Versão 28-09-2020 am

Roteiro e Cálculo para empuxo de terra - condição ativa

Calcule a força de empuxo ativo total em um muro vertical liso com 5 m de altura que faz a contenção de uma areia de peso específico 17 kN/m³, para a qual $\phi' = 35^\circ$ e $c' = 0$; a superfície da areia é horizontal, e o nível do lençol freático está abaixo da base do muro.



Dados de entrada:

Profundidade total (Z_{total}) $Z_{total} := 5 \text{ m}$

Coesão da areia (C_{areia}) $C_{areia} := 0 \text{ kPa}$

Peso específico (G_{areia}) $G_{areia} := 17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

ângulo atrito areia (Ang_{atrito_areia}) $Ang_{atrito_areia} := 35 \text{ deg}$

Profundidade da camada da areia (Z_{areia}) $Z_{areia} := 5 \text{ m}$

1 / 20

Processamentos Resultados

Areia - profundidade de 5m

Cálculo a tensão efetiva vertical

$$Tensão_efetiva_vertical := Z_areia \cdot G_areia$$

$$Tensão_efetiva_vertical = 85 \text{ kPa}$$

Cálculo do coeficiente de empuxo ativo

$$Ka1 := \left(\tan \left(\left(45 \text{ deg} - \frac{Ang_atrito_areia}{2} \right) \right) \right)^2 = 0,27$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal

$$\chi1 := (Tensão_efetiva_vertical \cdot Ka1) - (2 \cdot C_areia \cdot \sqrt{Ka1}) = 23,03 \text{ kPa}$$

Cálculo do empuxo

$$Resultante_areia := \frac{\chi1 \cdot Z_areia}{2} = 57,59 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Empuxo := Resultante_areia \quad Empuxo = 57,59 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pode ser calculado o braço de alavanca (ponto onde atua a resultante do empuxo):

Sendo M o momento gerado por cada resultante, temos:

$$M_areia := Resultante_areia \cdot \frac{Z_areia}{3}$$

$$M_areia = 95,98 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

Sendo y o braço de alavanca, temos:

$$y := \frac{M_areia}{Empuxo} \quad y = 1,67 \text{ m}$$

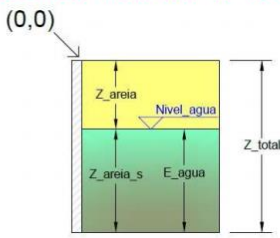
APÊNDICE B - Simulação 2

As imagens a seguir possuem a mesma fonte: Os autores.

28 set 2020 15:05:45 - Roteiro de Cálculo - Empuxo de Terra - Argo - TCC - Versão 28-09-2020.am

Roteiro e Cálculo para empuxo de terra - condição ativa

Determine a força de empuxo no muro para o caso de o lençol freático se elevar a um nível de 2 m abaixo da superfície da areia. O peso específico saturado da areia é 20 kN/m³.



Dados de entrada:

Profundidade total (Z_{total}) $Z_{total} := 5 \text{ m}$

Coesão da areia (C_{areia}) $C_{areia} := 0 \text{ kPa}$

Peso específico (G_{areia}) $G_{areia} := 17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Peso específico saturado (G_{areia_s}) $G_{areia_s} := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Peso específico da água (G_{agua}) $G_{agua} := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Ângulo atrito areia (Ang_{atrito_areia}) $Ang_{atrito_areia} := 35 \text{ deg}$

3 / 20

Profundidade da camada de areia seca (Z_areia) Z_areia := 2 m

Profundidade da camada de areia saturada (Z_areia_s) Z_areia_s := 3 m

Nível a água (Nivel_agua): Nivel_agua := 2 m

Extensão da camada de água (E_água) E_agua := 3 m

Processamentos Resultados

Areia - profundidade de 2 m

Cálculo a tensão efetiva vertical

```
if Nivel_agua < Z_areia
  Tensao_efetiva_vertical := G_areia_s · Z_areia_s - G_agua · E_agua
else
  Tensao_efetiva_vertical := G_areia · Z_areia
```

Tensao_efetiva_vertical = 34 kPa

Cálculo do coeficiente de empuxo ativo

$$K_a := \left(\tan \left(\left[45 \text{ deg} - \frac{\text{Ang atrito areia}}{2} \right] \right) \right)^2 = 0,27$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal

$$oh1 := \left(\left(\left(\text{Tensao_efetiva_vertical} \cdot K_a \right) \right) - \left(2 \cdot C_{\text{areia}} \cdot \sqrt{K_a} \right) \right) = 9,21 \text{ kPa}$$

Areia - profundidade de 5 m

Cálculo a tensão efetiva vertical

```
if Nivel_agua < Z_areia_s
  Tensao_efetiva_vertical_s := (G_areia · Z_areia + G_areia_s · Z_areia_s) - G_agua · E_agua
else
  Tensao_efetiva_vertical_s := G_areia · Z_areia
```

Tensao_efetiva_vertical_s = 64 kPa

Cálculo do coeficiente de empuxo ativo

$$Ka2 := \left(\tan \left(45 \text{ deg} - \frac{\text{Ang atrito areia}}{2} \right) \right)^2 = 0,27$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal

$$ch2 := (((\text{Tensao_efetiva_vertical_s} \cdot Ka2))) - (2 \cdot C_areia \cdot \sqrt{Ka2}) = 17,34 \text{ kPa}$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal proveniente da água

$$\text{Tensão_água} := E_agua \cdot C_agua$$

$$\text{Tensão_água} = 30 \text{ kPa}$$

Cálculo do empuxo

$$\text{Resultante_areia_seca} := \frac{ch1 \cdot E_areia}{2} = 9,21 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante_areia_saturada} := \frac{(ch1 + ch2) \cdot E_areia_s}{2} = 39,84 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante_água} := \frac{\text{Tensão_água} \cdot E_agua}{2} = 45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Empuxo_ativo} := \text{Resultante_água} + \text{Resultante_areia_saturada} + \text{Resultante_areia_seca}$$

$$\text{Empuxo_ativo} = 94,05 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Cálculo do braço de alavanca (ponto onde atua a resultante do empuxo ativo)

Sendo M o momento gerado por cada resultante, temos:

$$M_{\text{areia_seca}} := \text{Resultante_areia_seca} \cdot \left(\frac{Z_{\text{areia}}}{3} + Z_{\text{areia_s}} \right)$$

$$M_{\text{areia_seca}} = 33,78 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{areia_saturada}_1} := \frac{ch1 \cdot Z_{\text{areia_s}}^2}{2}$$

$$M_{\text{areia_saturada}_1} = 41,46 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{areia_saturada}_2} := \frac{(ch2 - ch1) \cdot Z_{\text{areia_s}}^2}{6}$$

$$M_{\text{areia_saturada}_2} = 12,19 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{areia_saturada}} := M_{\text{areia_saturada}_1} + M_{\text{areia_saturada}_2} = 53,66 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{água}} := \text{Resultante_água} \cdot \frac{Z_{\text{areia_s}}}{3} \quad M_{\text{água}} = 45 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{total}} := M_{\text{areia_seca}} + M_{\text{areia_saturada}} + M_{\text{água}}$$

$$M_{\text{total}} = 132,44 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

Sendo y o braço de alavanca, temos:

$$y := \frac{M_{\text{total}}}{\text{Empuxo_ativo}}$$

$$y = 1,41 \text{ m}$$

APÊNDICE C - Simulação 3

As imagens a seguir possuem a mesma fonte: Os autores.

28 set 2020 15:05:45 - Roteiro de Cálculo - Empuxo de Terra - Argo - TCC - Versão 28-09-2020.am

Roteiro e Cálculo para empuxo de terra - condição ativa

As condições do solo adjacente a uma cortina de estacas-prancha são mostradas na figura, sendo suportada uma sobrecarga de 50 kPa na superfície atrás do muro. Para o solo 1, uma areia acima do lençol freático, $c' = 0$, ângulo de atrito = 38° , e gama = 18 KN/m^3 . Para o solo 2, uma argila saturada, $c' = 10 \text{ KPa}$, ângulo de atrito = 28° , e gama sat = 20 KN/m^3 . Calcular os empuxos ativo e passivo.

Dados de entrada:

Sobrecarga (q) $q := 50 \text{ kPa}$

Profundidade total (Z_{total}) $Z_{total} := 9 \text{ m}$

Coesão da areia (C_{areia}) $C_{areia} := 0 \text{ kPa}$

Coesão da argila (C_{argila}) $C_{argila} := 10 \text{ kPa}$

Peso específico (G_{argila}) $G_{argila} := 20 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$

Peso específico (G_{areia}) $G_{areia} := 18 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$

7 / 20

```

Peso específico da água (G_água)  $G_{\text{água}} := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$ 
ângulo atrito argila (Ang_atrito_argila)  $\text{Ang\_atrito\_argila} := 28 \text{ deg}$ 
ângulo atrito areia (Ang_atrito_areia)  $\text{Ang\_atrito\_areia} := 38 \text{ deg}$ 
Profundidade da camada da areia (Z_areia)  $Z_{\text{areia}} := 6 \text{ m}$ 
Nível a água (Nivel_água):  $\text{Nivel\_água} := 6 \text{ m}$ 
Profundidade P1 (Z_p1):  $Z_{\text{p1}} := 6 \text{ m}$ 
Profundidade da camada da argila (Z_argila)
 $Z_{\text{argila}} := Z_{\text{total}} - Z_{\text{areia}}$   $Z_{\text{argila}} := 3 \text{ m}$ 
Profundidade 0 da camada da argila (Z_argila0)  $Z_{\text{argila0}} := 0 \text{ m}$ 
Extensão da camada de água (E_água)  $E_{\text{água}} := 3 \text{ m}$ 

```

Processamentos e Resultados

Areia - profundidade de 6m

Cálculo a tensão efetiva vertical

```

if Nivel_água < Z_areia
  Tensao_efetiva_vertical := G_areia * Z_areia - G_água * E_água
else
  Tensao_efetiva_vertical := G_areia * Z_areia

```

$Tensao_efetiva_vertical = 108 \text{ kPa}$

Cálculo do coeficiente de empuxo ativo

$$Ka1 := \left(\tan \left(\left(45 \text{ deg} - \frac{\text{Ang_atrito_areia}}{2} \right) \right) \right)^2 = 0,24$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal

$ch1 := [Tensao_efetiva_vertical \cdot Ka1] - [2 \cdot C_areia \cdot \sqrt{Ka1}] = 25,69 \text{ kPa}$

Argila - profundidade de 6m

Cálculo a tensão efetiva vertical

```
if Nivel_agua < z_argila
  Tensao_efetiva_vertical := (G_areia · z_areia + G_argila · z_argila0) - G_agua · E_agua
else
  Tensao_efetiva_vertical := (G_areia · z_areia + G_argila · z_argila0)
```

Tensao_efetiva_vertical = 108 kPa

Cálculo do coeficiente de empuxo ativo

$$Ka2 := \left(\tan \left(\left(45 \text{ deg} - \frac{\text{Ang_atrito_argila}}{2} \right) \right) \right)^2 = 0,36$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal

$$ch2 := (\text{Tensao_efetiva_vertical} \cdot Ka2) - (2 \cdot C_argila \cdot \sqrt{Ka2}) = 26,97 \text{ kPa}$$

Argila - profundidade de 9m

Cálculo a tensão efetiva vertical

```
if Nivel_agua < z_total
  Tensao_efetiva_vertical := (G_areia · z_areia + G_argila · z_argila) - G_agua · E_agua
else
  Tensao_efetiva_vertical := (G_areia · z_areia + G_argila · z_argila)
```

Tensao_efetiva_vertical = 138 kPa

Cálculo do coeficiente de empuxo ativo

$$Ka2 := \left(\tan \left(\left(45 \text{ deg} - \frac{\text{Ang_atrito_argila}}{2} \right) \right) \right)^2 = 0,36$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal

$$ch3 := (\text{Tensao_efetiva_vertical} \cdot Ka2) - (2 \cdot C_argila \cdot \sqrt{Ka2}) = 37,81 \text{ kPa}$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal proveniente da sobrecarga

$$q = 50 \text{ kPa}$$

$$\text{Tensão_sobrecarga1} := q \cdot Ka1$$

$$\text{Tensão_sobrecarga1} = 11,89 \text{ kPa}$$

$$\text{Tensão_sobrecarga2} := q \cdot Ka2$$

$$\text{Tensão_sobrecarga2} = 18,05 \text{ kPa}$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal proveniente da água

$$\text{Tensão_água} := E_água \cdot G_água$$

$$\text{Tensão_água} = 30 \text{ kPa}$$

Cálculo do empuxo

$$\text{Resultante_areia} := \frac{oh1 \cdot z_areia}{2} = 77,07 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante_argila} := \frac{(oh3 + oh2) \cdot z_argila}{2} = 97,17 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante_solo} := \text{Resultante_areia} + \text{Resultante_argila} = 174,24 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante_água} := \frac{\text{Tensão_água} \cdot E_água}{2} = 45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante_sobrecarga1} := \text{Tensão_sobrecarga1} \cdot z_areia = 71,36 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante_sobrecarga2} := \text{Tensão_sobrecarga2} \cdot z_argila = 54,16 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante_sobrecarga} := \text{Resultante_sobrecarga1} + \text{Resultante_sobrecarga2} = 125,52 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Empuxo} := \text{Resultante_água} + \text{Resultante_sobrecarga} + \text{Resultante_solo} = 344,76 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Cálculo do braço de alavanca (ponto onde atua a resultante do empuxo)

Sendo M o momento gerado por cada resultante, temos:

$$M_{\text{areia}} := \text{Resultante_areia} \cdot \left(\frac{Z_{\text{areia}}}{3} + Z_{\text{argila}} \right)$$

$$M_{\text{areia}} = 385,37 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{argila1}} := ch2 \cdot Z_{\text{argila}} \cdot \frac{Z_{\text{argila}}}{2}$$

$$M_{\text{argila1}} = 121,38 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{argila2}} := (ch3 - ch2) \cdot \frac{Z_{\text{argila}}}{2} \cdot \frac{Z_{\text{argila}}}{3}$$

$$M_{\text{argila2}} = 16,25 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{argila}} := M_{\text{argila1}} + M_{\text{argila2}}$$

$$M_{\text{argila}} = 137,63 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{sobrecarga1}} := \text{Tensão_sobrecarga1} \cdot Z_{\text{areia}} \cdot \left(\frac{Z_{\text{areia}}}{2} + Z_{\text{argila}} \right)$$

$$M_{\text{sobrecarga1}} = 428,19 \cdot \frac{1}{\text{m}} \text{ kN m}$$

$$M_{\text{sobrecarga2}} := \text{Tensão_sobrecarga2} \cdot Z_{\text{argila}} \cdot \frac{Z_{\text{argila}}}{2}$$

$$M_{\text{sobrecarga2}} = 81,23 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{sobrecarga}} := M_{\text{sobrecarga1}} + M_{\text{sobrecarga2}}$$

$$M_{sobrecarga} = 509,42 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\acute{a}gua} := \text{Resultante}_{\acute{a}gua} \cdot \frac{Z_{argila}}{3} \quad M_{\acute{a}gua} = 45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{total} := M_{areia} + M_{argila} + M_{sobrecarga} + M_{\acute{a}gua}$$

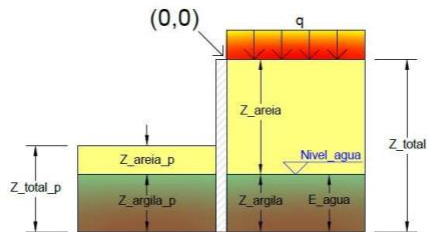
$$M_{total} = 1077,42 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sendo y o braço de alavanca, temos:

$$y := \frac{M_{total}}{\text{Empuxo}}$$

$$y = 3,13 \text{ m}$$

Roteiro e Cálculo para empuxo de terra - condição passiva



Dados de entrada:

Profundidade total (Z_{total_p}) $Z_{total_p} := 4,5 \text{ m}$

Coesão da areia (C_{areia_p}) $C_{areia_p} := 0 \text{ kPa}$

Coesão da argila (C_{argila_p}) $C_{argila_p} := 10 \text{ kPa}$

Peso específico (G_argila_p) $G_{argila_p} := 20 \frac{kN}{m^3}$

Peso específico (G_areia_p) $G_{areia_p} := 18 \frac{kN}{m^3}$

Peso específico da água (G_agua) $G_{agua} := 10 \frac{kN}{m^3}$

ângulo atrito argila (Ang_atrito_argila) $Ang_atrito_argila := 28 \text{ deg}$

ângulo atrito areia (Ang_atrito_areia) $Ang_atrito_areia := 38 \text{ deg}$

Profundidade da camada da areia (Z_areia_p) $Z_{areia_p} := 1,5 \text{ m}$

Nível a água (Nivel_agua_p): $Nivel_agua_p := 1,5 \text{ m}$

Profundidade da camada da argila (Z_argila_p)

$Z_{argila_p} := Z_{total_p} - Z_{areia_p}$ $Z_{argila_p} = 3 \text{ m}$

Profundidade 0 da camada da argila (Z_argila0_p) $Z_{argila0_p} := 0 \text{ m}$

Extensão da camada de água (E_água) $E_{agua_p} := 3 \text{ m}$

Processamentos Resultados

Areia - profundidade de 1,5m

Cálculo a tensão efetiva vertical

```
if Nivel_agua_p < Z_areia_p
  Tensao_efetiva_vertical_p := G_areia_p * Z_areia_p - G_agua * E_agua_p
else
  Tensao_efetiva_vertical_p := G_areia_p * Z_areia_p

Tensao_efetiva_vertical_p = 27 kPa
```

Cálculo do coeficiente de empuxo passivo

$$Kp1 := \left(\tan \left(45 \text{ deg} + \frac{\text{Ang_atrito_areia}}{2} \right) \right)^2 = 4,2$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal

$$ch1_p := ((\text{Tensao_efetiva_vertical_p} \cdot Kp1)) + (2 \cdot C_areia_p \cdot \sqrt{Kp1}) = 113,5 \text{ kPa}$$

Argila - profundidade de 1,5m

Cálculo a tensão efetiva vertical

```
if Nivel_agua_p < z_argila0_p
  Tensao_efetiva_vertical_p := (G_areia_p \cdot z_areia_p + G_argila_p \cdot z_argila0_p) - G_agua \cdot E_agua_p
else
  Tensao_efetiva_vertical_p := (G_areia_p \cdot z_areia_p + G_argila_p \cdot z_argila0_p)
```

$$\text{Tensao_efetiva_vertical_p} = 27 \text{ kPa}$$

Cálculo do coeficiente de empuxo passivo

$$Kp2 := \left(\tan \left(45 \text{ deg} + \frac{\text{Ang_atrito_argila}}{2} \right) \right)^2 = 2,77$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal

$$ch2_p := ((\text{Tensao_efetiva_vertical_p} \cdot Kp2)) + (2 \cdot C_argila_p \cdot \sqrt{Kp2}) = 108,07 \text{ kPa}$$

Argila - profundidade de 4,5m

Cálculo a tensão efetiva vertical

```
if Nivel_agua_p < z_total_p
  Tensao_efetiva_vertical_p := (G_areia_p \cdot z_areia_p + G_argila_p \cdot z_argila_p) - G_agua \cdot E_agua_p
else
  Tensao_efetiva_vertical_p := (G_areia_p \cdot z_areia_p + G_argila_p \cdot z_argila_p)
```

$$\text{Tensao_efetiva_vertical_p} = 57 \text{ kPa}$$

Cálculo do coeficiente de empuxo passivo

$$Kp2 := \left(\tan \left(45 \text{ deg} + \frac{\text{Ang atrito argila}}{2} \right) \right)^2 = 2,77$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal

$$ch3_p := ((\text{Tensao efetiva vertical}_p \cdot Kp2)) + (2 \cdot C \text{ argila}_p \cdot \sqrt{Kp2}) = 191,17 \text{ kPa}$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal proveniente da água

$$\text{Tensão}_\text{água}_p := E_\text{água}_p \cdot G_\text{água}$$

$$\text{Tensão}_\text{água}_p = 30 \text{ kPa}$$

Cálculo do empuxo passivo

$$\text{Resultante}_\text{areia}_p := \frac{ch1_p \cdot Z_\text{areia}_p}{2} = 85,13 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante}_\text{argila}_p := \frac{(ch3_p + ch2_p) \cdot Z_\text{argila}_p}{2} = 448,85 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante}_\text{solo}_p := \text{Resultante}_\text{areia}_p + \text{Resultante}_\text{argila}_p = 533,98 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante}_\text{água}_p := \frac{\text{Tensão}_\text{água}_p \cdot E_\text{água}_p}{2} = 45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Empuxo}_\text{passivo} := \text{Resultante}_\text{água}_p + \text{Resultante}_\text{solo}_p = 578,98 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Cálculo do braço de alavanca (ponto onde atua a resultante do empuxo passivo)

Sendo M o momento gerado por cada resultante, temos:

$$M_{\text{areia}_p} := \text{Resultante_areia}_p \cdot \left(\frac{Z_{\text{areia}_p}}{3} + Z_{\text{argila}_p} \right)$$

$$M_{\text{areia}_p} = 297,94 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{argila1}_p} := ch2_p \cdot Z_{\text{argila}_p} \cdot \frac{Z_{\text{argila}_p}}{2}$$

$$M_{\text{argila1}_p} = 486,32 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{argila2}_p} := (ch3_p - ch2_p) \cdot \frac{Z_{\text{argila}_p}}{2} \cdot \frac{Z_{\text{argila}_p}}{3}$$

$$M_{\text{argila2}_p} = 124,64 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{argila}_p} := M_{\text{argila1}_p} + M_{\text{argila2}_p}$$

$$M_{\text{argila}_p} = 610,96 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{água}_p} := \text{Resultante_água}_p \cdot \frac{Z_{\text{argila}_p}}{3} \quad M_{\text{água}_p} = 45 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{total}_p} := M_{\text{areia}_p} + M_{\text{argila}_p} + M_{\text{água}_p}$$

$$M_{\text{total}_p} = 953,9 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN m}$$

Sendo y_p o braço de alavanca, temos:

$$y_p := \frac{M_{\text{total}_p}}{\text{Empuxo_passivo}}$$

$$y_p = 1,65 \text{ m}$$

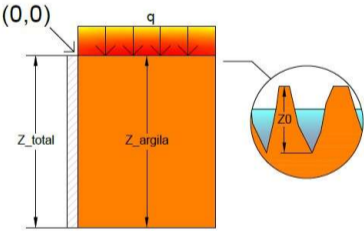
APÊNDICE D - Simulação 4

As imagens a seguir possuem a mesma fonte: Os autores.

28 set 2020 15:05:45 - Roteiro de Cálculo - Empuxo de Terra - Arigo - TCC - Versão 28-09-2020.am

Roteiro e Cálculo para empuxo de terra - condição ativa

Considere um muro de 4 m de altura, cuja massa de solo ainda sofre um carregamento de 20 KPa. O solo possui coesão de 5 KPa, $\phi = 28^\circ$ e $\gamma = 16,5 \text{ KN/m}^3$. Calcule o valor do empuxo ativo pela teoria de Rankine.



Dados de entrada:

Profundidade total (Z_{total}) $Z_{total} := 4 \text{ m}$

Sobrecarga (q) $q := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Coesão da argila (C_{argila}) $C_{argila} := 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Peso específico (G_{argila}) $G_{argila} := 16,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Peso específico da água (G_{agua}) $G_{agua} := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

ângulo atrito argila (Ang_atrito_argila) $\text{Ang_atrito_argila} := 28 \text{ deg}$

17 / 20

Profundidade da camada da argila (Z_argila) $Z_{argila} := Z_{total}$

$Z_{argila} = 4 \text{ m}$

Processamentos Resultados

Cálculo do coeficiente de empuxo ativo (Ka)

$$K_a := \left(\tan \left(\left(45 \text{ deg} - \frac{Ang_{atrito_argila}}{2} \right) \right) \right)^2 = 0,36$$

Cálculo da Profundidade Z0

$$Z_0 := \frac{2 \cdot C_{argila}}{G_{argila} \cdot \sqrt{K_a}} \quad Z_0 = 1,01 \text{ m}$$

Cálculo a tensão efetiva vertical

$$Tens\tilde{a}o_efetiva_vertical := G_{argila} \cdot Z_{argila}$$

$$Tens\tilde{a}o_efetiva_vertical = 66 \text{ kPa}$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal

$$ch := \left(\left(\left(Tens\tilde{a}o_efetiva_vertical \cdot K_a \right) \right) - \left(2 \cdot C_{argila} \cdot \sqrt{K_a} \right) \right) = 17,82 \text{ kPa}$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal proveniente da água nas fendas de tração

$$ch_agua := G_{agua} \cdot Z_0$$

$$ch_agua = 10,09 \text{ kPa}$$

Cálculo da tensão efetiva Horizontal proveniente da sobrecarga

$$q = 20 \text{ kPa}$$

$$Tens\tilde{a}o_sobrecarga1 := q \cdot K_a$$

$$Tens\tilde{a}o_sobrecarga1 = 7,22 \text{ kPa}$$

Cálculo do empuxo ativo

$$\text{Resultante_argila} := \frac{(ch) \cdot (Z_{\text{argila}} - Z_0)}{2} = 26,65 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante_água_fendas} := \frac{ch \cdot \text{água} \cdot Z_0}{2}$$

$$\text{Resultante_água_fendas} = 5,09 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Resultante_sobrecarga} := \text{Tensão_sobrecarga} \cdot Z_{\text{total}}$$

$$\text{Resultante_sobrecarga} = 28,88 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Empuxo_ativo} := \text{Resultante_água_fendas} + \text{Resultante_argila} + \text{Resultante_sobrecarga}$$

$$\text{Empuxo_ativo} = 60,62 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Cálculo do braço de alavanca (ponto onde atua a resultante do empuxo)

Sendo **M** o momento gerado por cada resultante, temos:

$$M_{\text{argila}} := \text{Resultante_argila} \cdot \left(\frac{Z_{\text{argila}} - Z_0}{3} \right)$$

$$M_{\text{argila}} = 26,58 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{sobrecarga}} := \text{Resultante_sobrecarga} \cdot \frac{Z_{\text{total}}}{2}$$

$$M_{\text{sobrecarga}} = 57,77 \cdot \frac{1}{2} \text{ kN m}$$

$$M_{\text{água_fendas}} := \text{Resultante_água_fendas} \cdot \left(\frac{Z_0}{3} + (Z_{\text{total}} - Z_0) \right)$$

$$M_{\text{água_fendas}} = 16,93 \frac{\text{kN m}}{\text{m}}$$

$$M_{total} := M_{sobrecarga} + M_{argila} + M_{\acute{a}gua_fendas}$$

$$M_{total} = 101,27 \cdot \frac{1}{m} \text{ kN m}$$

Sendo y_p o braço de alavanca, temos:

$$y := \frac{M_{total}}{Empuxo_{ativo}}$$

$$y = 1,67 \text{ m}$$

Índice Remissivo

A

Areia com presença de água · 47, 49, 75

Areia seca · 46, 47, 72, 81

Areia seca com sobrecarga · 49, 50

Areia seca sobre argila · 50, 51

B

Braço de alavanca · 2, 5, 12, 46, 52, 105

C

Coefficiente de empuxo · 30, 54, 56, 57, 58, 59, 63, 64, 68, 69

Coesão do solo · 30, 55, 57, 59, 64, 69

E

Educação · 5, 10, 11, 17

Empuxo ativo · 19, 22, 33, 54, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 67, 68, 69, 71, 100, 111

Empuxo de terra · 5, 12, 17, 25, 29

Empuxo Passivo · 34, 35, 98

Engenharia geotécnica · 109

Equilíbrio plástico · 12, 27, 28

Estruturas de contenção de terras · 13

F

Fendas de tração · 51, 67, 70, 101, 102

G

Geotecnia · 44

I

Inteligência artificial · 8

M

Machine learning · 8

Mecânica dos solos · 12, 26, 31, 107

P

Poropressão · 53, 56, 58, 63, 68

Programa · 2, 15, 23, 36, 37, 40, 42

Q

Quarta revolução industrial · 7

R

Roteiro automatizado · 5, 12, 108

Ruptura do solo · 12

S

Simulações · 6, 15, 46, 108

Smath Studio · 5, 15, 43, 105, 113

Software · 5, 15, 19, 20, 22, 25, 43, 44, 45, 105, 112

Solo coesivo com presença de água nas fendas de tração · 51, 52

T

Tensão efetiva horizontal · 54, 55, 57, 59

Tensão efetiva vertical · 30, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 63, 64, 68, 69

Teoria de coulomb · 26

Teoria de rankine · 19, 21, 26, 29, 35, 43