

DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* EDUCACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DE EMPUXOS DE TERRA E ESTABILIDADE DE MUROS DE GRAVIDADE

Luiz Henrique Zanivan Martinello (1), Ingrid Milena Reyes Martinez Belchior (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) luizhnriq@gmail.com, (2) ingridbelchior@unescc.net

RESUMO

Conhecendo as dificuldades enfrentadas por alunos no entendimento de questões relacionadas a cálculo de empuxos e estabilidade de muros de gravidade e reconhecendo que a utilização de *softwares* educacionais por alunos auxilia na fixação do conteúdo praticado em sala de aula, sentiu-se a necessidade de criar um *software* educacional voltado para a área de geotecnia que, utilizando a teoria clássica de Rankine, obtenha como resultados a determinação dos diagramas de tensões e empuxos de terra e também a verificação das condições de estabilidade de muros de gravidade. Com o fim de suprir esta necessidade, foi desenvolvido um *software* denominado MCalc mediante a utilização da linguagem de programação *Object Pascal* em ambiente Delphi 10. Com uma interface limpa e intuitiva, MCalc possui uma utilização fácil e várias possibilidades de interação. Além disso, a cada ação do usuário com o MCalc, os resultados são recalculados automaticamente. Assim, ao realizar qualquer alteração de nível freático ou sobrecarga, ou mesmo ao inserir uma nova camada de solo, o resultado pode ser verificado em tempo real. A versatilidade do MCalc foi verificada através de uma jornada de testes desenvolvida com estudantes do curso de Engenharia Civil da UNESC, onde foram obtidos resultados satisfatórios quanto a avaliação da facilidade de uso do novo *software* criado neste trabalho. Portanto, o objetivo de desenvolver um *software* de usabilidade fácil para cálculo de empuxos de terra e estabilidade de muros de gravidade, sem a necessidade de realização de cursos específicos, foi atendido.

Palavras-chave: Software educacional. Empuxos de terra. Estabilidade. Muro de gravidade.

1. INTRODUÇÃO

A procura por *softwares* computacionais como ferramenta facilitadora de conhecimento para alunos e profissionais da engenharia civil está cada vez mais frequente. Métodos e objetivos tradicionais de aprendizagem são pelo menos bem entendidos e razoavelmente bem definidos. Mas novos métodos - por exemplo, aprendizagem por meio de pesquisa, colaboração, ou visualização - e novos objetivos

ainda não foram acordados pela comunidade educacional e muito menos operacionalizados. As aplicações computacionais dirigidas à educação não estão mais simplesmente tentando ensinar habilidades tradicionais de modo mais rápido, eficiente e com um menor custo. Em vez disso, estão tentando participar de um processo de mudança dos métodos de ensino e aprendizagem e redefinindo os objetivos e resultados desejáveis desses processos (VALENTE, 1999, p.50).

O processo de aprendizado pode ser acelerado quando há a possibilidade de verificar os dados e resultados relacionados ao problema na forma de desenhos e gráficos.

Dentre os *softwares* de uso específico para geotecnia, podem-se citar o conjunto de *softwares Geo5*, desenvolvidos pela *fine software* e o *LimitState:GEO*, produzido pela *LimitState*. O *Geo5* é um pacote de programas que se comunicam entre si, em que cada um deles trata um tipo de estrutura, porém sua utilização se torna complexa pela enorme quantidade de recursos que este possui. O *LimitState:GEO* possui utilização mais fácil em relação ao primeiro, por possuir um número menor de ferramentas, onde as estruturas que calcula estão disponíveis em um mesmo ambiente. Estes e outros *softwares* com fins geotécnicos geralmente apresentam custos elevados, o que dificulta o acesso para estudantes, profissionais da área e entidades com menor poder aquisitivo, além da necessidade da realização de treinamentos voltados às suas configurações e utilização, para que o usuário realize a correta interpretação de seus resultados.

Observando a complexidade e a enorme quantidade de passos a serem seguidos para calcular os diversos muros de gravidade previstos em exercícios praticados em salas de aula, sentiu-se a necessidade da criação de um *software* que possa auxiliar o aluno a determinar o diagrama de tensões atuantes, a intensidade e localização dos empuxos exercidos pela massa de solo e sobrecarga adicionada sobre a mesma, bem como a partir da geometria do muro de gravidade definido pelo usuário, calcular os coeficientes de segurança contra tombamento, rompimento do solo (capacidade de carga) e deslizamento da base, que determinam a estabilidade de um muro de gravidade.

Desta forma, foi desenvolvido um *software* educacional para determinação de empuxos de terra e estabilidade de muros de gravidade, com uma interface limpa e intuitiva que permite ao usuário fácil acesso as suas ferramentas, menus e resultados.

Durante o decorrer da execução do *software*, ao inserir ou alterar camadas de solo, muro ou esforços atuantes sobre o solo, os cálculos e verificações são realizados automaticamente, fazendo com que os resultados sejam apresentados novamente a cada nova interação. Isto permite ao usuário verificar e discutir os resultados obtidos em tempo real.

Portanto, este *software* pretende se converter em uma ferramenta que facilite o entendimento de problemas envolvendo a determinação de empuxos de terra e estabilidade para muros de gravidade, fortalecendo assim a fixação de conhecimentos durante a formação do engenheiro civil, enquanto acadêmico da disciplina de mecânica dos solos 2.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: TEORIA DE EMPUXOS DE TERRA DE RANKINE E DETERMINAÇÃO DE ESTABILIDADE PARA MUROS DE GRAVIDADE

O *software* foi desenvolvido utilizando a teoria de Rankine, proposta em 1857, que se baseia no pressuposto de que existe uma relação adequada entre as pressões verticais e laterais em planos verticais dentro de uma massa homogênea, isotrópica e material sem coesão atrás de um muro de arrimo (CERNICA, 1995 p. 334).

Segundo Caputo (2015, p. 118):

Entende-se por empuxo de terra a ação produzida pelo maciço terroso sobre as obras com ele em contato. A determinação do seu valor é fundamental na análise e projeto de obras como muros de arrimo, cortinas de estacas-pranchas, construções de subsolos, encontros de pontes etc. [...] O empuxo de terra que atua sobre um suporte que resiste, porém cede certa quantidade que depende de suas características estruturais, denomina-se empuxo ativo (E_a). Ao contrário, quando a parede avança contra o terrapleno, teremos o chamado empuxo passivo (E_p). Pode-se dizer que o estado ativo é aquele que corresponde a uma distensão do solo e estado passivo o que corresponde a uma compressão.

Moliterno (1994, p.2) diz que:

O projeto de um muro de arrimo, como acontece com qualquer outro tipo de estrutura, consiste essencialmente na repetição sucessiva de 2 passos:

- a) Determinação ou estimativa das dimensões
- b) Verificação da estabilidade aos esforços atuantes.

Para a escolha das dimensões, o projetista lança mão da própria experiência e observação ou, ainda, pode ser orientada por fórmulas empíricas.

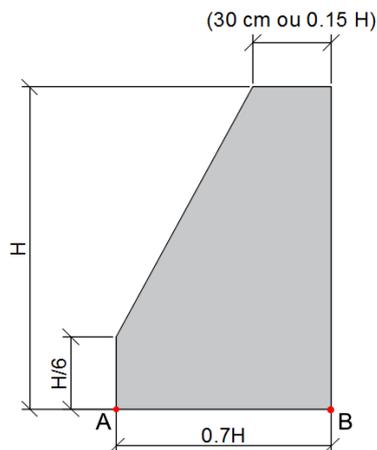
Determinadas as forças que atuam na estrutura, tais como o seu peso próprio, empuxos causados pela pressão da terra, eventuais cargas aplicadas [...], podemos ter a ideia da estabilidade.

Conhecimentos da mecânica dos solos, são importantes em duas fases do projeto:

- a) Avaliação da pressão da terra atuando no solo
- b) Verificação da capacidade suporte do solo das fundações.

Para a escolha das dimensões do muro, o *software* utiliza o critério de pré-dimensionamento sugerido por Marchetti (2007, p.42), como mostrado na figura 1.

Figura 1: Parametrização do aplicativo para pré-dimensionamento do muro



Fonte: Marchetti (2007).

Para o cálculo da estabilidade do muro, foi considerada a metodologia utilizada em Caputo (2015) e Liu (2008), onde os fatores de segurança adotados, considerando o tombamento, deslizamento da base e capacidade de carga da fundação são descritos a seguir.

2.1.1. FATOR DE SEGURANÇA CONTRA O TOMBAMENTO

Para que o muro não tombe em torno da extremidade externa A da base mostrada na figura 1, o momento do peso do muro deve ser maior que o momento do empuxo total, ambos tomados em relação ao ponto A (CAPUTO, 2015, p. 162). O fator de segurança contra o tombamento adotado no *software* é 1.5, considerando solo granular (LIU, 2008, p. 441) e sua equação é apresentada abaixo.

$$F_s = \frac{\sum M_{res}}{\sum M_{sol}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

ΣM_{res} : somatório de momentos resistivos, ou seja, o momento gerado pelo peso do muro somado ao empuxo passivo de projeto ($1/3$ do empuxo passivo horizontal, denominado E_{ph}), se considerado, em relação ao ponto A; e

ΣM_{sol} : somatório de momentos solicitantes, ou seja, o momento gerado pelo empuxo ativo.

2.1.2. FATOR DE SEGURANÇA CONTRA DESLIZAMENTO DA BASE

A segurança contra o deslizamento do muro é determinada pela equação 2. O seu valor mínimo deve ser 1.5 quando o empuxo passivo de projeto é desconsiderado e 2 quando considerado (GOODMAN, 1968 apud LIU, 2008, p. 441).

$$FS_{desliz} = \frac{\Sigma F_{res} * \mu}{\Sigma F_{sol}} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

ΣF_{res} : somatório de forças resistivas, ou seja, o peso próprio do muro mais o empuxo vertical, caso a massa de terra possua inclinação, acrescentado do empuxo passivo horizontal de projeto, quando considerado;

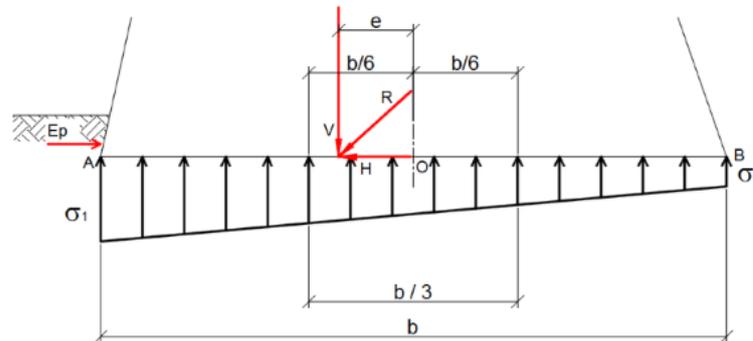
μ : coeficiente de atrito entre o solo e muro; e

ΣM_{sol} : somatório de forças solicitantes, ou seja, esforço de empuxo ativo gerado pela massa de terra contra o muro.

2.1.3. FATOR DE SEGURANÇA PARA CAPACIDADE DE CARGA DA FUNDAÇÃO

O fator de segurança utilizado para evitar que o solo abaixo do muro se rompa é determinado dividindo-se a capacidade de carga do solo que apoia a estrutura com a carga gerada pelos esforços atuantes sobre esta camada de apoio. Esta carga atuante pode ser determinada de acordo com a localização da resultante dos esforços atuantes em relação ao centro da base do muro. Se esta resultante R se localizar no terço central da base, como mostra a figura 2, o diagrama de tensões aproximado será na forma de um trapézio (CAPUTO, 2015, p.163). O valor mínimo adotado para este fator é 3 (LIU, 2008, p. 441).

Figura 2: Capacidade de carga com resultante no terço central da base



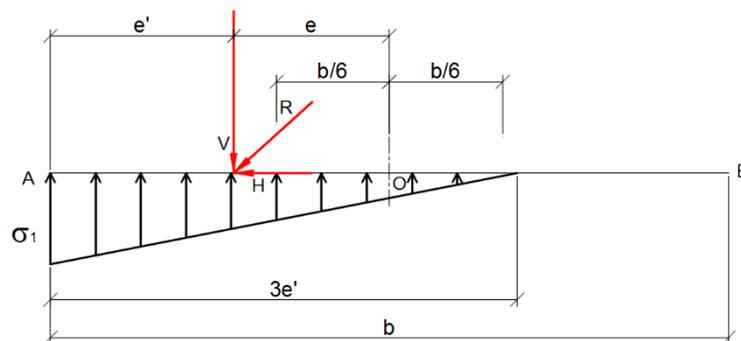
Fonte: Adaptado de Caputo (2015).

Para este caso, utiliza-se as equações 3 e 4 para determinar a máxima tensão atuante.

$$\sigma_1 = \frac{V}{b} \left(1 + \frac{6e}{b} \right) \quad \sigma_2 = \frac{V}{b} \left(1 - \frac{6e}{b} \right) \quad \text{Equações (3 e 4)}$$

Quando a resultante R se localizar fora do terço central, a distribuição será triangular, conforme mostra a figura 3, porém limitada a parte que dá compressão (CAPUTO, 2015, p. 164).

Figura 3: Capacidade de carga com resultante fora do terço central da base



Fonte: Adaptado de Caputo (2015).

Utiliza-se a equação 5 para determinar a máxima tensão atuante para este caso.

$$\sigma_1 = \frac{2V}{3e'} \quad e' = \frac{\sum M}{\sum Fv} \quad \text{Equações (5 e 6)}$$

Onde:

e' : posição da carga resultante total, em relação ao ponto A;

$\sum M$: somatório dos momentos atuantes (solicitantes diminuindo os resistivos);

$V, \sum Fv$: somatório de cargas verticais geradas pelo peso próprio do muro somando-se a ação do empuxo ativo vertical, caso a massa de solo possua inclinação; e

e: excentricidade da carga resultante total, em relação ao ponto O, localizado no centro da base do muro.

Conhecida a máxima tensão atuante sobre a camada de base do muro, pelas quais os valores são determinados pelas equações mostradas anteriormente, divide-se o valor da capacidade de carga do solo da fundação com a máxima tensão calculada. Seu coeficiente mínimo de segurança deve ser 3 (LIU, 2008, p. 441).

2.2. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE E UTILIZAÇÃO NA ENGENHARIA

O desenvolvimento deste trabalho se iniciou com a revisão bibliográfica sobre a teoria de Rankine para a determinação de empuxos de terra e sobre as condições de estabilidade para muros de gravidade.

Posteriormente, o aplicativo foi desenvolvido em computador convencional com sistema operacional *Windows 10*, utilizando linguagem de programação *Object Pascal* em ambiente Delphi 10, que é uma ferramenta de desenvolvimento robusta e capaz de atender as necessidades de desenvolvedores de qualquer porte (LEÃO, 2003, p.7), além de possuir componentes que permitem o desenvolvimento de aplicações para a plataforma *Windows* de maneira simples e que permitem a utilização de interface gráfica com usuário.

Foi aplicado o conhecimento técnico em programação para dar início ao desenvolvimento do *software*. A linguagem de programação utilizada foi *Object Pascal*. Esta linguagem utiliza orientação a objetos, permitindo que haja uma reutilização do código criado, diminuindo o tempo de desenvolvimento, bem como o número de linhas de código (MACHADO, 2014).

Após o desenvolvimento do aplicativo, foi realizada uma jornada de testes com um grupo de 14 estudantes da disciplina de mecânica dos solos II da UNESC, com o fim de verificar a versatilidade do *software* desenvolvido e detectar possíveis falhas da ferramenta.

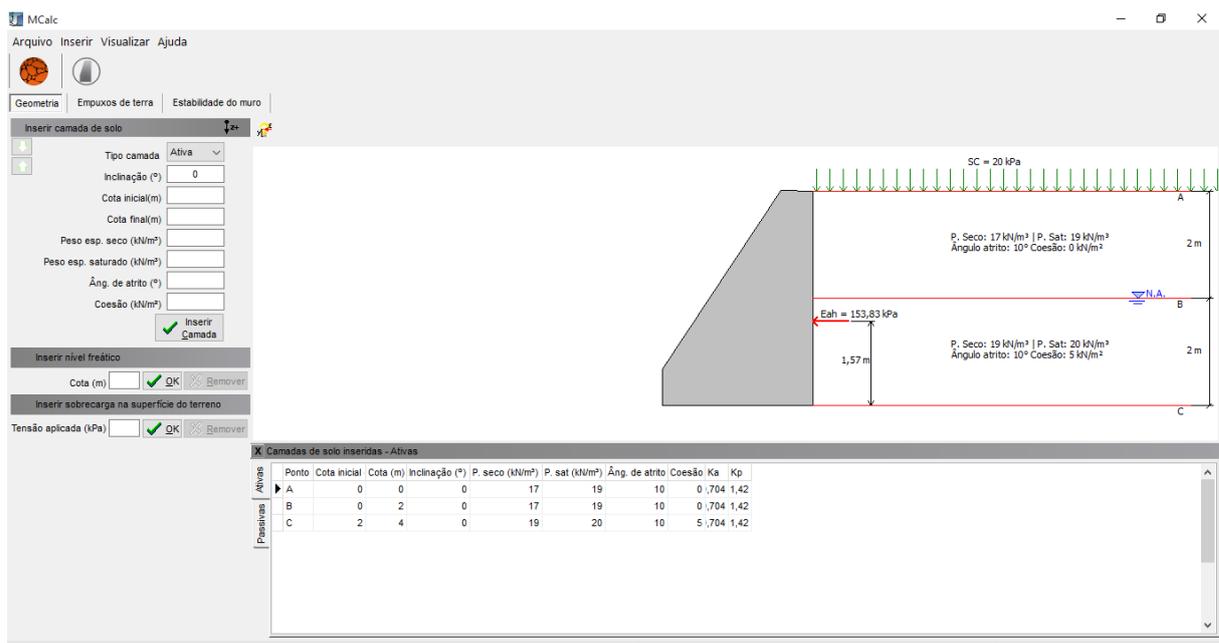
O sistema internacional de unidades foi estabelecido durante a programação do aplicativo. Portanto, o usuário deverá ingressar os dados de forma consistente com este sistema. Para fins educacionais, neste trabalho o peso específico da água foi considerado como 10,0 kN/m³.

2.2.1. IDENTIDADE DO APLICATIVO

O aplicativo desenvolvido chama-se MCalc. Este nome foi escolhido considerando que a letra M faz referência às palavras Massa (massa de terra) e Muro (muro de gravidade) e que o aplicativo foi desenvolvido para calcular (Calc) os esforços de empuxos de terra e solucionar estabilidade de muros de gravidade. Desta forma, foi definido o nome MCalc, um termo fácil de lembrar e disseminar. Sua utilização simples segue os seguintes passos:

1. Inserir Camadas de solo (obrigatório)
2. Inserir nível freático (opcional)
3. Inserir sobrecarga na superfície do terreno (opcional)
4. Inserir o muro de gravidade a ser verificado.

Figura 4: Tela principal do aplicativo Mcalc



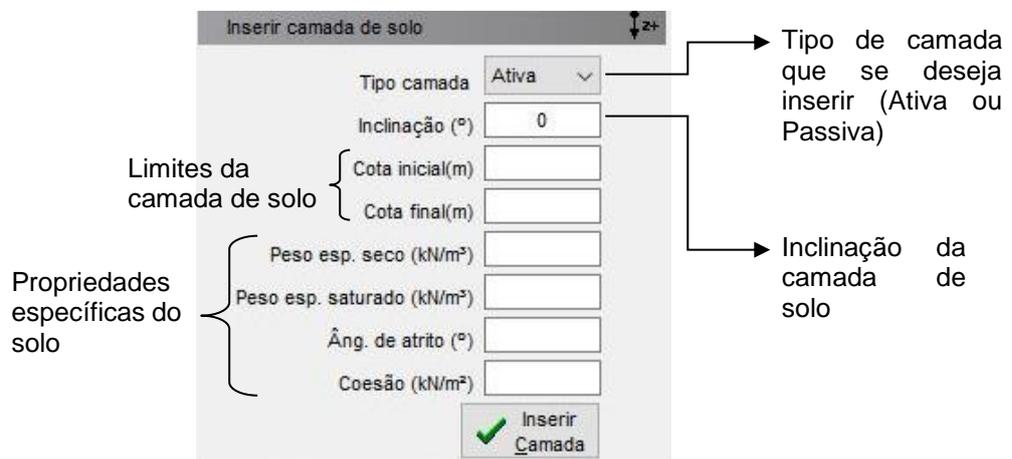
Fonte: Do autor, 2016.

2.2.2. INSERIR CAMADA DE SOLO

O aplicativo MCalc possui uma interface simples com o usuário, onde todas as operações necessárias para entrada de dados e obtenção de resultados são realizadas na mesma interface. O primeiro passo fundamental para o sistema calcular os esforços atuantes no muro se realiza através da inserção de camadas de solo. O painel de digitação das camadas de solo (figura 5) pode ser acessado através do

menu Inserir >> Solo, ou pelo atalho de teclado F2. Ao confirmar a inserção de cada camada, o MCalc irá automaticamente realizar a representação gráfica e o cálculo do esforço de empuxo gerado pela mesma.

Figura 5: Painel para inserir camada de solo

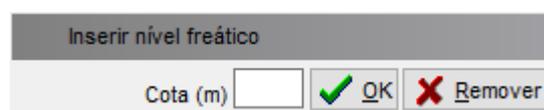


Fonte: Do autor, 2016.

2.2.3. INSERIR NÍVEL FREÁTICO

No caso de o solo possuir um nível freático, o usuário poderá inserir a cota da posição do nível de água (N.A.) após a digitação de pelo menos uma camada de solo. A janela para sua digitação (figura 6) fica abaixo do painel de digitação das propriedades da camada de solo. Após a confirmação da entrada do nível freático, o sistema irá realizar a representação gráfica do N.A. inserido, e também calculará, de forma automática, os esforços efetivos referentes a massa de solo inserida anteriormente.

Figura 6: Painel para inserir nível freático



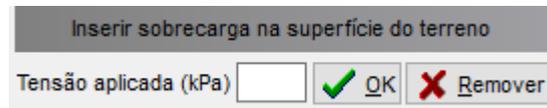
Fonte: Do autor, 2016.

2.2.4. INSERIR SOBRECARGA NA SUPERFÍCIE DO TERRENO

Na existência de uma sobrecarga na superfície do terreno, sua digitação também poderá ser realizada no mesmo painel de digitação das camadas de solo, na janela com título "Inserir sobrecarga na superfície do terreno" (figura 7). O MCalc irá

realizar sua representação gráfica e calculará os esforços provenientes da sobrecarga inserida.

Figura 7: Painel para inserir sobrecarga na superfície do terreno



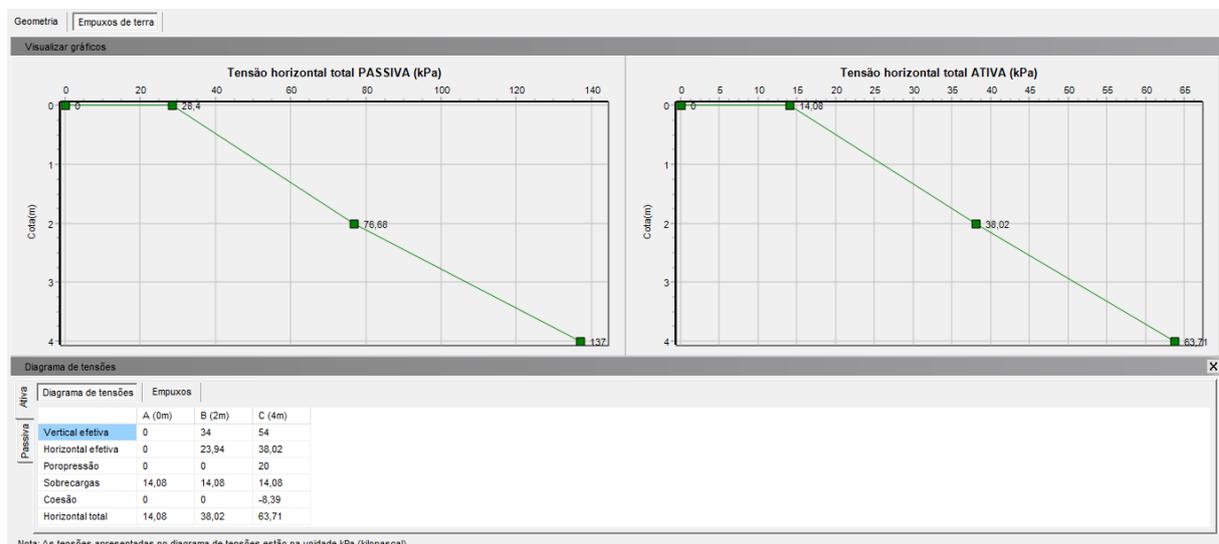
Fonte: Do autor, 2016.

2.2.5. PAINEL DE DIAGRAMAS DE TENSÕES E GRÁFICOS

O aplicativo foi desenvolvido de modo que, após o usuário inserir a primeira camada de solo, a aba “Empuxos de terra” é habilitada, para que se tenha acesso ao diagrama de tensões geradas pela massa de solo e também para que se possa visualizar os gráficos das tensões horizontais totais, conforme mostrado na figura 8.

Vale ressaltar que os gráficos de tensões horizontais totais apresentam o resultado das tensões originadas pela massa de solo, acrescentando a ação exercida pela sobrecarga e poropressão (esforço exercido pela presença do nível freático na massa de solo).

Figura 8: Visualização dos gráficos de tensões horizontais passiva e ativa



Fonte: Do autor, 2016.

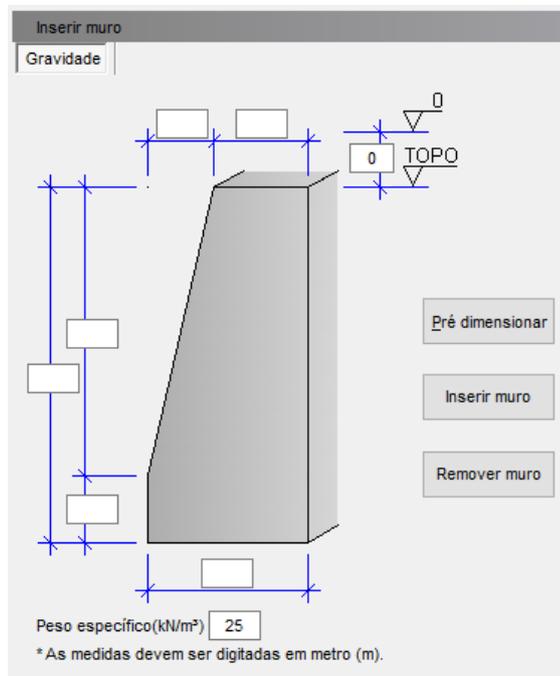
2.2.6. INSERIR MURO

Definidas as camadas de solo, o segundo passo a ser seguido é inserir o muro de gravidade do qual se deseja verificar a estabilidade. O usuário deverá digitar a sua

altura e, caso necessário, clicar no botão denominado “Pré dimensionar” para que o sistema calcule as demais dimensões do muro, de acordo com os valores mínimos mostrados na figura 1 deste trabalho.

O painel de digitação das dimensões (figura 9) está disponível através do menu Inserir >> Muro ou pelo Atalho F3. Após inserir o muro, o sistema habilitará a aba “Estabilidade do muro” e calculará os seus parâmetros de estabilidade por tombamento, deslizamento da base e capacidade de carga da fundação. Se o muro possuir altura menor que a da massa total de solo, o MCalc limitará o cálculo do empuxo desde a superfície do terreno até a base do muro.

Figura 9: Painel para inserir muro de gravidade

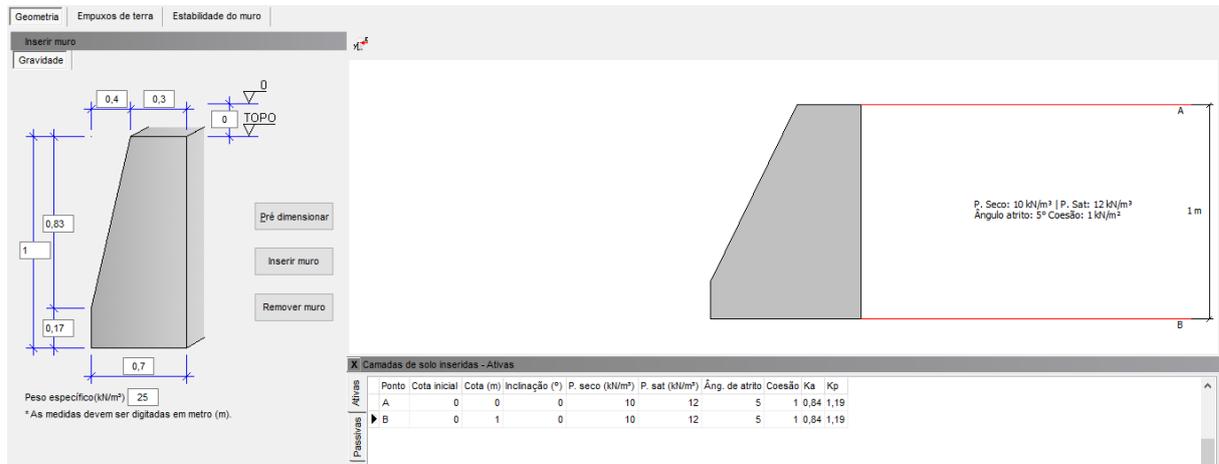


Fonte: Do autor, 2016.

2.2.7. PAINEL DE VISUALIZAÇÃO DO MURO E MASSA DE SOLO

A cada interação do usuário, a representação gráfica do elemento (solo, nível freático, carga ou muro) que está sendo inserido ou alterado é realizada através do painel lateral, para que o usuário visualize o desenho do exercício que está sendo calculado pelo MCalc. Este painel está disponível na aba “Geometria” (figura 10).

Figura 10: Representação gráfica do muro e massa de solo

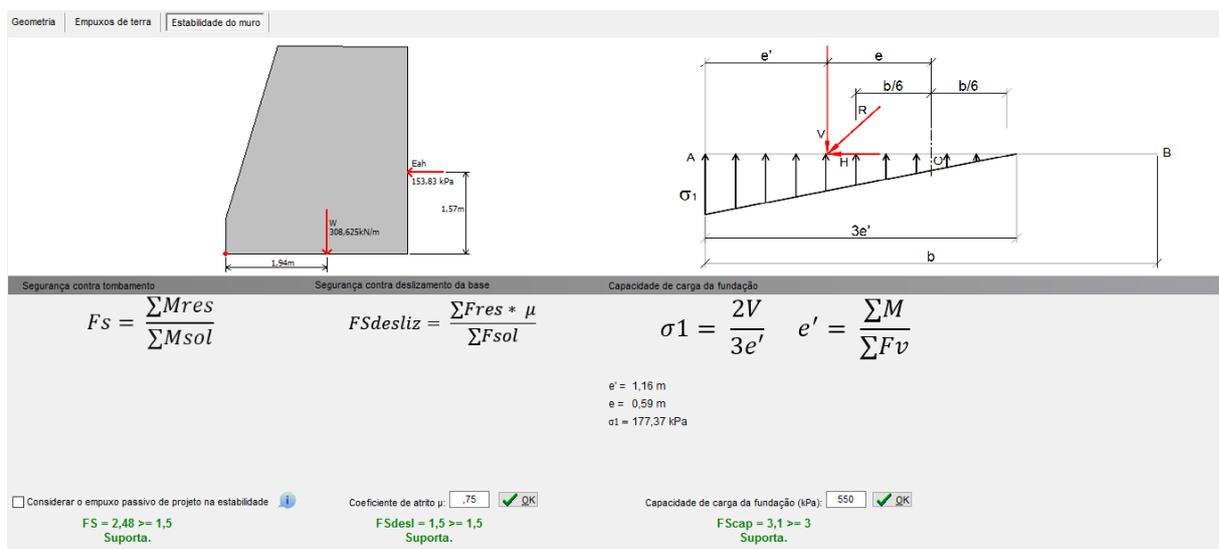


Fonte: Do autor, 2016.

2.2.8. PAINEL DE CÁLCULO DA ESTABILIDADE DO MURO

Após o muro inserido, a aba “Estabilidade do muro” é habilitada (figura 11). Nesta aba são apresentadas as fórmulas que devem ser utilizadas pelo usuário para conferência das condições de estabilidade do muro que está sendo calculado. O fator de segurança contra tombamento já é calculado automaticamente pelo MCalc. Para calcular a segurança contra deslizamento e capacidade de carga, o usuário deverá ingressar os valores do coeficiente de atrito do solo com o muro (μ) e o valor da capacidade de carga da fundação, obtidos do exercício que está sendo calculado.

Figura 11: Visualização do painel de estabilidade do muro



Fonte: Do autor, 2016.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. TESTES COM O USUÁRIO

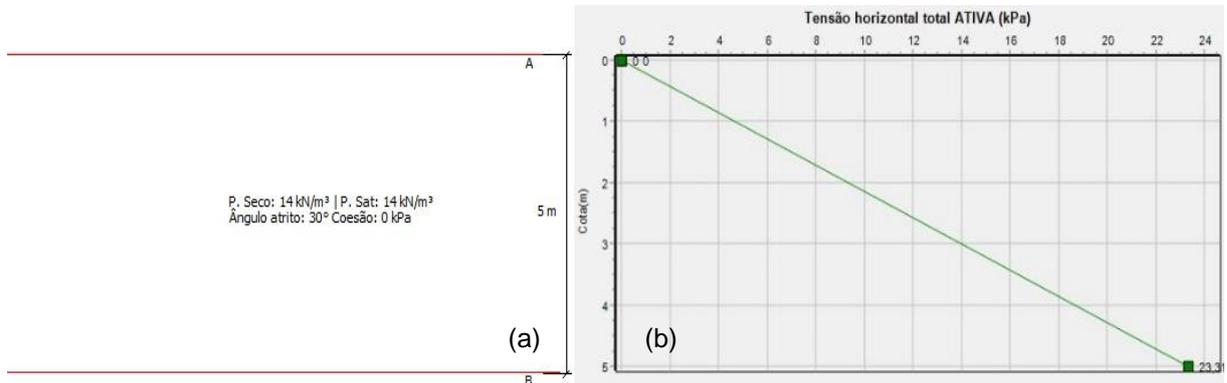
Com a finalidade de verificar a versatilidade do uso do *software* desenvolvido, foi solicitado a 14 estudantes da disciplina de mecânica dos solos II da UNESC para utilizarem o programa MCalc afim de solucionar três tipos de problemas de empuxos de terra e dimensionar um muro de gravidade para cumprir com os requisitos de estabilidade. Os problemas de empuxos de terra executados pelos estudantes foram classificados como seguem:

- Problema Tipo [a] (figura 12): Determinação do Empuxo ativo para um perfil de solo com uma camada de solo não coesivo ($c' = 0$ kPa).
- Problema Tipo [b] (figura 13): Determinação do Empuxo ativo para um perfil de solo com duas camadas de solo não coesivo ($c' = 0$ kPa) e com presença de nível freático.
- Problema Tipo [c] (figura 14): Determinação do Empuxo ativo para um perfil de solo com uma camada de solo coesivo e sobrecarga na superfície.
- Problema envolvendo a solução para estabilidade de um muro de gravidade (figura 15): Perfil de solo com duas camadas, sendo uma do tipo não coesivo ($c' = 0$ kPa) e a segunda do tipo coesivo ($c' = 5$ kPa).

Para realizar o lançamento dos dados destes problemas no *software*, os alunos foram instruídos a seguirem os passos descritos nos itens 2.2.1 a 2.2.8 deste trabalho. Os estudantes reportaram que as principais dificuldades encontradas foram no momento de inserir um maciço de terra multicamadas com nível freático proposta no problema Tipo [b], porém esta dificuldade foi justificada pela maioria por ser o primeiro contato com o *software*, sendo que este obstáculo pode ser superado com uma prática maior do seu uso.

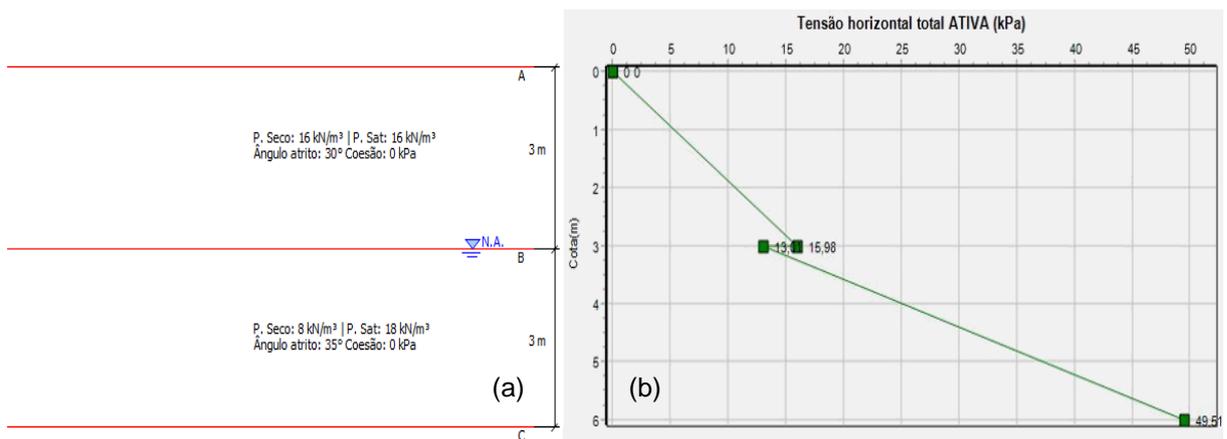
A visualização da saída gerada pelo MCalc para os quatro tipos de problemas, juntamente com seus gráficos de tensão horizontal total, são mostrados nas figuras 12, 13, 14 e 15.

Figura 12: Visualização da saída obtida pelo MCalc como solução do problema tipo [a]: (a) – Perfil de solo; (b) – Gráfico de tensão horizontal total.



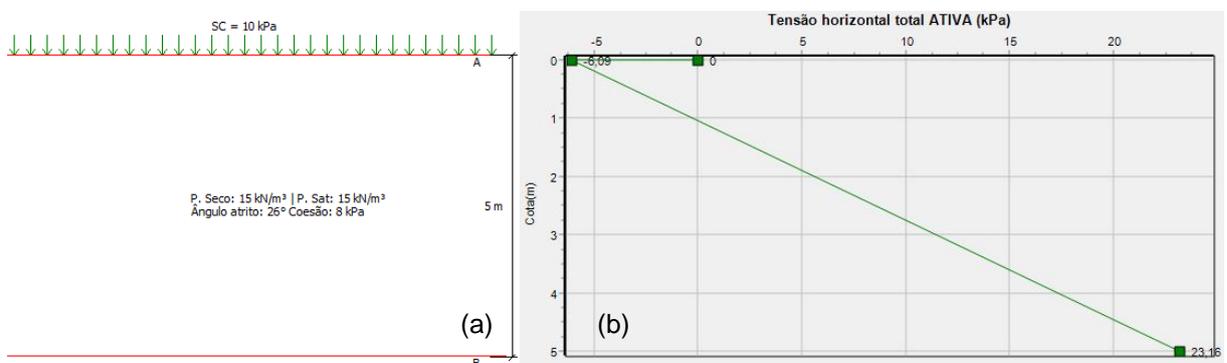
Fonte: Do autor, 2016.

Figura 13: Visualização da saída obtida pelo MCalc como solução do problema tipo [b]: (a) – Perfil de solo; (b) – Gráfico de tensão horizontal total.



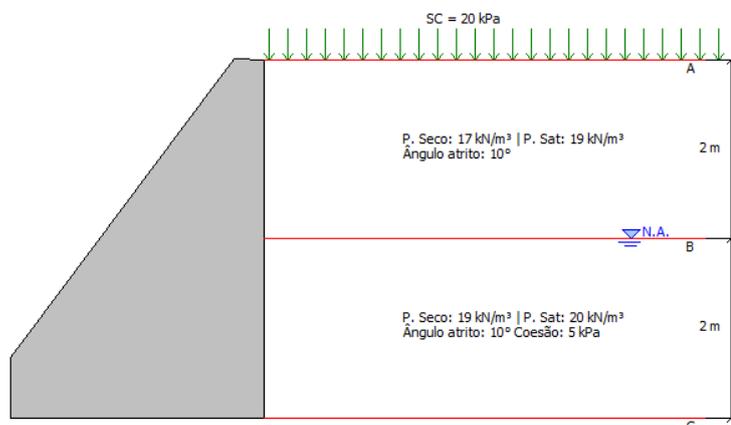
Fonte: Do autor, 2016.

Figura 14: Visualização da saída obtida pelo MCalc como solução do problema tipo [c]: (a) – Perfil de solo; (b) – Gráfico de tensão horizontal total.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura 15: Visualização da saída obtida pelo MCalc para o problema de verificação de estabilidade de muro de gravidade.



Fonte: Do autor, 2016.

A quantidade de tentativas necessárias para os alunos resolverem os problemas descritos acima utilizando o *software* MCalc estão descritas na tabela 1.

Tabela 1: Quantidade de tentativas necessárias para resolução dos problemas propostos.

Problema	Tentativas	Número de alunos	Percentual de alunos (%)
[a]	1	14	100
	1	5	36
[b]	2	7	50
	3	2	14
[c]	1	8	57
	2	5	36
	3	1	7
Muro	1	9	64
	2	4	29
	3	1	7

Fonte: Do autor, 2016.

Como pode ser observado na tabela 1, a questão tipo [a] foi a que apresentou menor número de tentativas, pois este exercício foi resolvido pelo autor deste trabalho em conjunto com os alunos, sendo a primeira demonstração de uso do *software* para o grupo. Após isto, os alunos foram instruídos a realizarem a solução dos exercícios tipo [b], [c] e o muro por conta própria. Pode-se observar que o a maioria dos alunos necessitou entre uma e duas tentativas para resolver os problemas [b] e [c], o que significa que os acadêmicos foram adquirindo experiência na medida que foram

utilizando o *software*, diminuindo a taxa de erros no lançamento dos dados do problema.

Ao final do questionário, foi solicitado para os estudantes fazerem uma avaliação geral do *software* qualificando-o quanto ao nível de dificuldade de uso. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 2.

Tabela 2: Avaliação do nível de dificuldade de uso do *software*, segundo o grupo de alunos consultado.

Nível de dificuldade	1 – Muito difícil	2 – Difícil	3 - Normal	4 - Fácil	5 – Muito fácil
Quantidade de alunos	0	0	4	8	2

Fonte: Do autor, 2016.

Alguns alunos contribuíram com sugestões de melhorias para o *software*, dentre as quais são citadas:

- Atualização automática de resultados ao alterar qualquer valor.
- Atalho para remover todas as camadas de solo ou iniciar um novo projeto.
- Modo de copiar os dados das camadas entre o lado ativo e o passivo.
- Adequar a escala do gráfico de tensões para obter valores mais precisos.
- Ao remover todas as camadas de solo, o campo de preenchimento do nível freático ficará vazio.

Estas melhorias foram implementadas, facilitando ainda mais o uso do aplicativo.

3.2. DETERMINAÇÃO DA ESTABILIDADE DE UM MURO DE GRAVIDADE

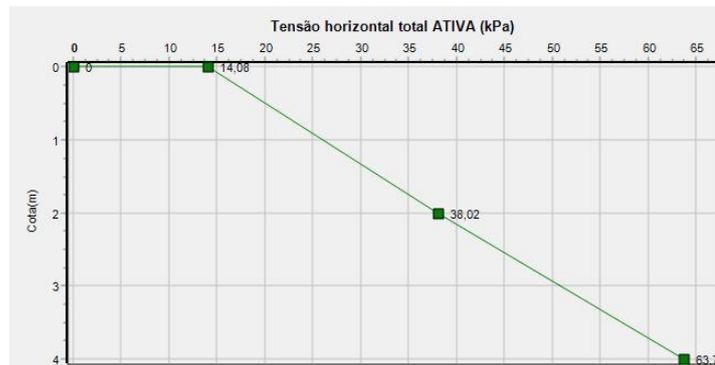
Nesta seção será apresentada a solução do exercício mostrado na figura 15, ao qual também foi utilizado no questionário aplicado ao grupo de alunos. Tendo como dados iniciais as camadas de solo mostradas na figura 15, a altura do muro sendo de 4m, peso específico muro de 25 kN/m³, o coeficiente de atrito entre o solo e o muro (μ) é 0,75 e a capacidade de carga da fundação é 550 kPa, foi iniciado o lançamento destas informações no *software*. Os valores do diagrama de tensões obtido podem ser visualizados na tabela 3 e o gráfico de tensões horizontais totais gerado pelo programa MCalc é mostrado na figura 16.

Tabela 3: Valores do diagrama de tensões obtido pelo *software* MCalc

Tensão / Ponto	A (0m)	B (2m)	C (4m)
Tensão vertical efetiva (kPa)	0	34	54
Tensão horizontal efetiva (kPa)	0	23,94	38,02
Tensão de poropressão (kPa)	0	0	20
Tensão de sobrecargas (kPa)	14,08	14,08	14,08
Tensão de coesão (kPa)	0	0	-8,39
Tensão horizontal total (kPa)	14,08	38,02	63,71

Fonte: Do autor, 2016.

Figura 16: Gráfico de tensão horizontal total ativa gerado pelo *software* MCalc

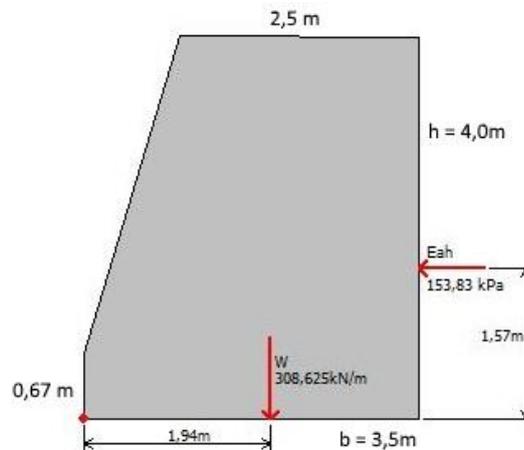


Fonte: Do autor, 2016.

Determinado o gráfico de tensões horizontais totais, o *software* determina o esforço de empuxo ativo, onde é considerada a força solicitante na determinação dos coeficientes de segurança da estabilidade do muro. Desta maneira, o valor do empuxo ativo horizontal calculado no *software* MCalc foi de 153,83 kPa e sua localização a 1,57m da base do muro inserido.

Inserido o muro no *software* MCalc através da metodologia mostrada no item 2.2.6 deste trabalho, foram estabelecidas por meio de tentativas, as medidas de altura e larguras de base e topo do muro que atendam aos coeficientes mínimos de segurança que garantam a estabilidade do muro. Estas medidas podem ser visualizadas na figura 17. Determinadas as dimensões, o esforço vertical causado pelo peso próprio do muro (W) foi de 308,625 kN/m, e sua localização definida a 1,94m da extremidade, localizando-se no terço central da base. Aplicando-se as equações sugeridas nos itens 2.1.1 a 2.1.3 deste trabalho, o *software* determinou os coeficientes de segurança apresentados na tabela 4.

Figura 17: Dimensões do muro adotadas para atender os parâmetros de estabilidade.



Fonte: Do autor, 2016.

Tabela 4: Dimensão da base e fatores de segurança encontrados no exercício

Base do muro (m)	F.S. tombamento	F.S. escorregamento	F.S. ruptura da fundação
3,5	$2,48 \geq 1,5$	$1,5 \geq 1,5$	$3,1 \geq 3,0$

Fonte: Do autor, 2016.

4. CONCLUSÕES

Considerando que a usabilidade do aplicativo é fácil e que o ambiente desenvolvido proporciona um fácil aprendizado e fixação de conteúdo aplicado em sala de aula, espera-se que o *software* MCalc seja amplamente utilizado no ambiente acadêmico como uma ferramenta facilitadora de conhecimento.

Como proposta do uso do *software* em salas de aula, o professor pode desenvolver ou copiar exercícios de livros, aplicando-os no *software* e ocultando o valor do empuxo encontrado, para que os alunos possam desenvolver seus resultados, e posteriormente discuti-los de acordo com os resultados calculados no programa. Ainda na sua aplicação, pode-se realizar várias interações, alterando os valores de sobrecarga e nível freático e discutindo as diferenças de valores apresentadas entre uma interação e outra, demonstrando assim a versatilidade e as inúmeras possibilidades que o *software* permite para sua utilização.

A conclusão deste trabalho, portanto, é que o objetivo de desenvolver um *software* educacional para cálculo de empuxos de terra e estabilidade de muros de gravidade voltado para estudantes do curso de Engenharia Civil que estejam cursando

a disciplina de mecânica dos solos 2, foi atendido. Em sugestão para trabalhos futuros pode-se propor a possibilidade de continuar o desenvolvimento deste *software*, implementando por exemplo outras possibilidades de formas de muro além do de gravidade, como o muro de flexão, onde a massa de solo pode ser aplicada acima da base do muro, ou outras formas de muro. Também pode-se realizar a implementação de cargas pontuais e/ou sobrecargas com dimensões finitas acima do muro e da massa de terra. Ainda pode-se incrementar o *software* com a possibilidade de lançar camadas impermeáveis onde se possa intercalar o lançamento de camadas de solo saturado e seco na mesma massa de terra. Finalmente, se referindo a desenvolvimento de *software*, são inúmeras as possibilidades.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUDHU, Muni. **Soil mechanics and foundations**. New York, USA: John Wiley & Sons, 2000. 586 p.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros; RODRIGUES, José Martinho de Azevedo. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 2.v. 560 p.

CERNICA, John N. **Geotechnical engineering: soil Mechanics**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1995. 453 p.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 2015. xv, 612 p.

GOODMAN, L.J.; R.H. Karol, **Theory and practice of foundation engineering**. New York, USA: Macmillan Publishing Co, 1968. 384 p.

LEÃO, Marcelo. **Borland Delphi 7 curso completo**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Axcel Books, 2003. 1399 p.

LIU, Cheng; EVETT, Jack B. **Soils and foundations**. 7. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008. 502 p.

MACHADO, Henrique M. **Os 4 pilares da programação orientada a objetos** [2014]. Disponível em: <<http://www.devmedia.com.br/os-4-pilares-da-programacao-orientada-a-objetos/9264>>. Acesso em: outubro 2016.

MARCHETTI, Osvaldemar. **Muros de arrimo**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007. 152 p.

MOLITERNO, Antonio. **Caderno de muros de arrimo**. 2. ed. rev. São Paulo: Edgard Blücher, 1994. 194 p.

VALENTE, José Armando. **O computador na sociedade do conhecimento**. Campinas, SP: UNICAMP/NIED, 1999. 142 p.

LimitState: GEO. LimitState, Sheffield S1 4DP - Reino Unido, 2016. v.3.2. Disponível em: <<http://www.limitstate.com/geo>>. Acesso em: 03/11/2016.

Software geotécnico Geo5. Fine civil engineering software, Praga-República Tcheca, 2016. v.2016.53. Disponível em: <<http://www.finesoftware.com.br/software-para-geotecnia/>>. Acesso em 03/11/2016.