

UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS ORIENTADAS PARA O ENSINO NO CURSO DE ENGENHARIA GEOLÓGICA

COMPUTATIONAL TOOLS FOR TEACHING UNDERGRADUATE COURSES ON GEOLOGICAL ENGINEERING

Santana, Teresa, *Centro de Investigação em Estruturas e Construção, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, mtgs@fct.unl.pt*

Lamas, Pedro, *Centro de Estudos Geológicos, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, pcl@fct.unl.pt*

Dimitrovová, Zuzana, *Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, zdim@fct.unl.pt*

RESUMO

O Processo de Bolonha coloca novos desafios aos Cursos Superiores em geral e, em particular, os que integram a área da Geotecnia. O regime de ECTS (European Credit Transfer System), baseado no tempo de trabalho global do aluno para atingir os objectivos propostos para uma determinada disciplina, implicou a redução da carga horária presencial. Na licenciatura de Engenharia Geológica da Universidade Nova de Lisboa, os programas de Mecânica dos Solos, Movimentos de Terrenos e Estabilidade de Taludes e Resistência de Materiais foram adaptados a esta nova realidade, procurando tirar maior partido do trabalho individual realizado para além do tempo de aulas. Neste sentido foram implementados, em software comercial (versão estudante ou de fácil aquisição), alguns problemas didácticos, os quais utilizam a folha EXCEL da Microsoft e os programas SLOPE/W e ANSYS.

ABSTRACT

The Bolonha Process assigns new challenges in higher education and in geotechnical courses in particular. The ECTS (European Credit Transfer System), based on the student workload required to achieve the objectives of a programme study, implied reducing contact hours. In the undergraduate course on Geological Engineering, the programmes of the disciplines of Soil Mechanics, Earth Movements and Slope Stability and Mechanics of Materials were modified to take into account private study beyond taught classes. Being so, it was used commercial software (student version or easily available) for solving some didactical examples, such as spreadsheet applications with Microsoft EXCEL, SLOPE/W e ANSYS.

1. INTRODUÇÃO

O antigo sistema de créditos, em vigor nas Universidades portuguesas, centrado basicamente na carga horária presencial, propicia uma pedagogia baseada na transmissão de conhecimentos, com aulas teóricas expositivas de mera acumulação de informação por parte dos alunos. Mesmo nas denominadas aulas práticas, ou teórico-práticas, os alunos são muitas vezes levados a assistir apenas à resolução de questões ou problemas de aplicação da teoria transmitida, desincentivando-se assim um trabalho autónomo e formativo de procura de soluções.

A integração no espaço europeu implicou a adesão do nosso país ao Processo de Bolonha com um sistema de créditos ECTS, baseado no tempo de trabalho global do aluno para atingir os

objectivos propostos para uma determinada disciplina, valorizando também o trabalho individual dos estudantes. Este sistema implicou uma reorganização pedagógica dos cursos, com uma diminuição da carga horária presencial em algumas disciplinas, como é o caso das disciplinas de Mecânica dos Solos, Movimentos de Terrenos e Estabilidade de Taludes e Resistência de Materiais do curso de Engenharia Geológica da Universidade Nova de Lisboa, para as quais foram desenvolvidos novos programas com a preocupação acrescida de levar os alunos a adquirirem capacidades cognitivas próprias.

Neste sentido, alguns exemplos didáticos, antes resolvidos nas aulas práticas tradicionais de papel e lápis, são agora desenvolvidos, pelos alunos, nos seus computadores pessoais, num processo de estímulo à iniciativa e criatividade, cabendo ao professor a tarefa de os orientar e motivar.

Os exemplos apresentados referem-se à utilização do EXCEL da Microsoft e dos programas SLOPE/W (versão estudante) e ANSYS (licença de utilização em rede disponível no Departamento de Engenharia Civil). Os enunciados são propostos nas aulas práticas, com dados diferentes para cada aluno, sendo explicados os procedimentos a seguir para a realização dessa tarefa. Os trabalhos são desenvolvidos fora do tempo de aula, ao longo do semestre, num prazo curto que acompanha o desenrolar das aulas teórico-práticas.

2. IMPLEMENTAÇÃO EM EXCEL DA EQUAÇÃO DA CONSOLIDAÇÃO

2.1 Generalidades

A consolidação é estudada na disciplina de Mecânica dos Solos da licenciatura, fornecendo-se aos alunos as ferramentas necessárias ao cálculo de assentamentos por consolidação primária e da sua evolução ao longo do tempo. O cálculo de propriedades relevantes de um solo submetido a um ensaio edométrico, a estimativa de assentamentos totais após consolidação ou a determinação do excesso de pressão intersticial durante o carregamento, são alguns exemplos do que é feito em termos de aplicações práticas simples.

Relativamente à teoria da consolidação unidimensional, é apresentada uma solução analítica para um caso simples evidenciando que, para casos mais gerais, em que as soluções analíticas não são possíveis, se recorre a soluções aproximadas, por exemplo o método das diferenças finitas. A aplicação deste método à resolução da equação diferencial que rege o fenómeno da consolidação implementa-se facilmente em folha de cálculo.

2.2 Solução pelo método das diferenças finitas

Como é sabido, a equação de consolidação tem a forma:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$$

em que u_e é o excesso de pressão intersticial e C_v é o coeficiente de consolidação. Aplicando o desenvolvimento em série de Taylor à resolução das derivadas parciais de primeira e segunda ordem obtém-se:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t}(u_{i,j+1} - u_{i,j}) \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{(\Delta z)^2}(u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) \quad (1)$$

O par (i,j) representa o nó de intersecção da linha i com a coluna j, sendo que as linhas representam as diferentes divisões da camada de solo em profundidade (z) e as colunas representam as divisões do tempo (t). Considerando que se faz uma divisão em m linhas e n colunas, vem: $\Delta z = H/m$ e $\Delta t = t/n$, onde H é a espessura da camada e t o tempo total, como indicado na figura 1.

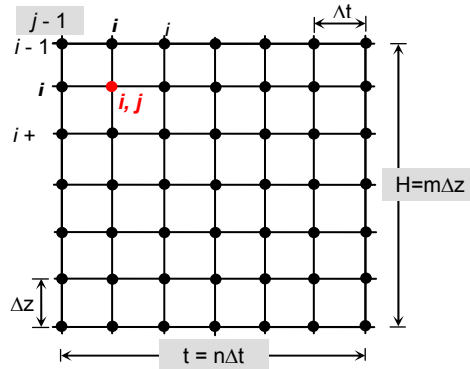


Figura 1 – Grelha da camada de solo (adaptado de [2])

Substituindo as duas últimas equações na equação da consolidação e simplificando, tem-se que:

$$u_{i,j+1} = u_{i,j} + \frac{C_v \Delta t}{(\Delta z)^2}(u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) \quad (2)$$

Esta equação é válida apenas para os nós que não estão localizados nas fronteiras. Aos nós localizados nas fronteiras aplicam-se condições especiais: numa fronteira permeável, o excesso de pressão intersticial é zero em todos os seus nós e numa fronteira impermeável, como a água está impedida de drenar através dela:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 = \frac{1}{2\Delta z}(u_{i-1,j} - u_{i,j}) = 0$$

a equação da consolidação toma a forma:

$$u_{i,j+1} = u_{i,j} + \frac{C_v \Delta t}{(\Delta z)^2}(2u_{i-1,j} - 2u_{i,j}) \quad (3)$$

Para calcular a distribuição do excesso de pressão intersticial no tempo e numa camada de solo, é necessário, primeiro, estabelecer o excesso de pressão intersticial inicial em profundidade, para o instante inicial. Em seguida é necessário identificar as condições de fronteira: nas fronteiras permeáveis, o excesso de pressão intersticial é sempre nulo e nas fronteiras impermeáveis, aplica-se a expressão (3). Depois é só aplicar a equação (2) a cada nó interior, até que, por iterações sucessivas, a diferença entre o novo valor e o anterior esteja dentro de um limite aceitável.

2.3 Exemplo

Um exemplo trabalhado pelos alunos refere-se ao caso simples esquematizado na figura 2, propondo-se o cálculo da variação do excesso de pressão intersticial no tempo e com a profundidade, na camada de argila, após carregamento. Os dados de entrada referem-se a H (espessura da camada), a C_v (coeficiente de consolidação do solo) e à distribuição em profundidade do excesso de pressão intersticial inicial.

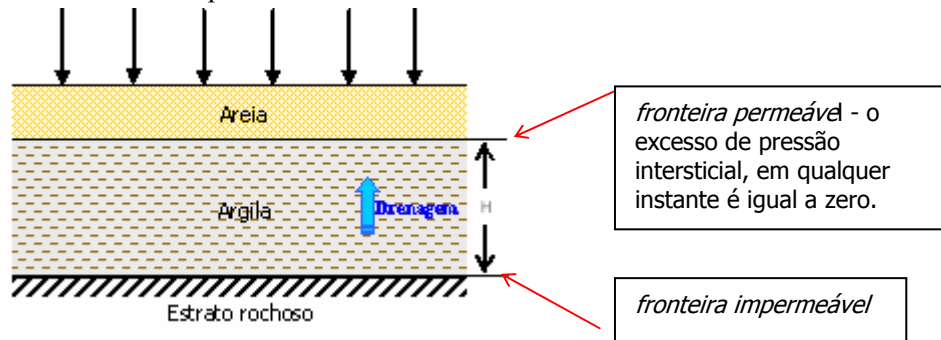


Figura 2 – Representação esquemática do problema da consolidação

Para a resolução divide-se a camada de argila numa malha, como a indicada na figura 1. Daqui resulta que, em Excel, as células da folha de cálculo representam os nós dessa malha, nas quais se vão inserir as equações correspondentes à sua posição, como referido em 2.2. De modo a evitar problemas de convergência, estudos anteriores concluíram que a grandeza $\alpha = C_v \Delta t / (\Delta z)^2$ deverá ser considerada inferior, ou quanto muito igual a 0,25, limitando-se com esta escolha, o número de subdivisões da malha.

No exemplo apresentado as células da primeira linha têm valor nulo, correspondente a uma fronteira permeável, nas células da última linha insere-se a equação correspondente a uma fronteira impermeável. A distribuição em profundidade do excesso das pressões intersticiais iniciais ($t=0$) resultantes do carregamento aplicado, é inserida na primeira coluna. Em seguida acciona-se o cálculo iterativo nas opções com, por exemplo, 100 iterações e uma alteração máxima de 0,001.

Na figura 3 é apresentado um resultado obtido para $H = 6$ m, $C_v = 2,34$ m²/ano e uma distribuição triangular do excesso de pressão intersticial inicial.

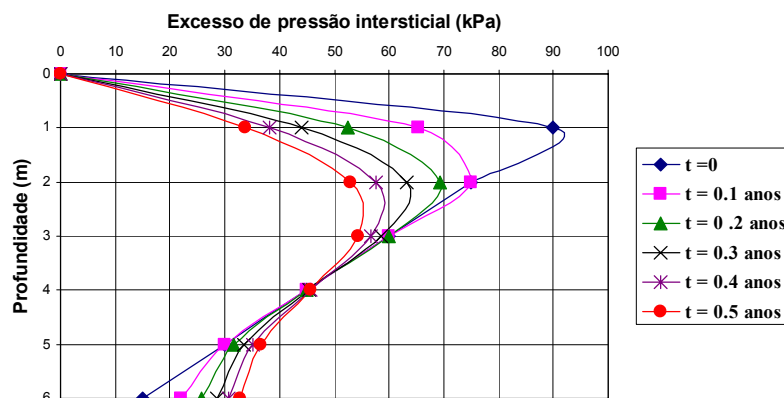


Figura 3 – Excesso de pressão intersticial em profundidade para tempos diferentes

3. DESENHO EM EXCEL DE LINHAS EQUIPOTENCIAIS

3.1 Generalidades

O escoamento bidimensional em solos, com isotropia de permeabilidades, é ensinado igualmente na disciplina de Mecânica dos Solos. Introduce-se assim o conceito de rede de percolação constituída por linhas de corrente e equipotenciais, as suas propriedades e condições de fronteira. A partir da sua representação gráfica, é possível calcular, com alguma aproximação, o caudal escoado, a pressão intersticial em qualquer ponto da rede, subpressões e gradientes hidráulicos. Todos estes cálculos são exemplificados nas aulas teórico-práticas, a partir de casos simples, com redes de percolação já traçadas.

De facto, a construção gráfica dessas redes nas aulas práticas, há muito que foi abandonada. Por um lado, a morosidade do processo de tentativa e erro, por outro, a maior facilidade de utilização de meios de cálculo automático, hoje disponíveis, que fornecem soluções numéricas para os problemas de escoamento. No entanto, o interesse didáctico do traçado da rede de percolação e a sua interpretação levou a que, no caso dos escoamentos confinados com fronteiras conhecidas, se tenha vindo a utilizar um método misto: o aluno implementa, na folha de cálculo, a resolução numérica da função potencial, obtendo num gráfico as linhas equipotenciais, para sobre esse gráfico, em papel, tentar desenhar as linhas de corrente.

3.2 Solução pelo método das diferenças finitas

A equação que rege o escoamento bidimensional da água num solo com isotropia de permeabilidades é a equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

em que h é a carga hidráulica.

Aplicando o desenvolvimento em série de Taylor à resolução da equação e fazendo $\Delta x = \Delta z$ (o que significa a existência de uma malha quadrada), obtém-se:

$$h_{i,j} = \frac{1}{4}(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) \quad (4)$$

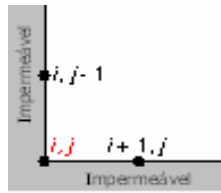
Na percolação confinada, uma ou mais fronteiras são impermeáveis. Através destas fronteiras não há escoamento, ou seja, para uma superfície impermeável horizontal:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{1}{\Delta x}(h_{i,j+1} - h_{i,j-1}) = 0 \rightarrow h_{i,j+1} = h_{i,j-1}$$

que substituindo na equação (4):

$$h_{i,j} = \frac{1}{4}(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + 2h_{i,j+1}) \quad (5)$$

Existem vários tipos de geometria nas fronteiras impermeáveis. Por exemplo, para uma geometria do tipo da da figura 4, a equação de diferenças finitas é do tipo:



$$h_{i,j} = \frac{1}{2}(h_{i+1,j} + h_{i,j-1}) \quad (6)$$

Figura 4 – Tipo de fronteira impermeável

À semelhança do caso anterior, o par (i,j) representa o nó de intersecção da linha i com a coluna j , sendo que as linhas representam as diferentes divisões da camada de solo na horizontal (x) e as colunas representam as diferentes divisões da camada de solo em profundidade (z).

3.3 Exemplo

O exemplo fornecido aos alunos está esquematizado na figura 5, propondo-se a obtenção das linhas equipotenciais. Os dados de entrada referem-se a D (espessura da camada), H (altura de água a montante) e H_1 , profundidade enterrada da estaca-prancha.

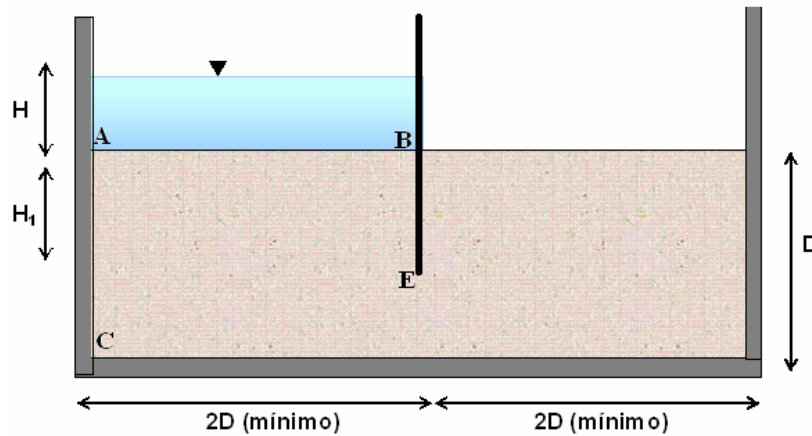


Figura 5 – Representação esquemática do problema de percolação

Para a implementação do método em Excel, divide-se a camada de solo numa malha quadrada. Se o problema for simétrico, só é necessário considerar metade do escoamento. Em seguida, identificam-se as fronteiras: impermeáveis (linhas de percolação) e permeáveis (linhas equipotenciais), determinando-se as cargas hidráulicas nestas últimas.

Como anteriormente, as células da folha de cálculo representam os nós da malha, nas quais se vão inserir as equações correspondentes, accionando o cálculo iterativo, como referido anteriormente. No exemplo apresentado, a carga hidráulica em todos os nós da linha equipotencial AB é H . Por questões de simetria, a carga hidráulica ao longo de todos os nós da fronteira sob a estaca-prancha é $H/2$. A equação (5), correspondente a uma fronteira impermeável, é inserida nas células da última linha e nas células das colunas AC e BE . Na célula correspondente ao nó C (ver figura 4) é inserida a equação (6) e nas restantes células (nós interiores), é inserida a equação (4). O gráfico do Excel é do tipo superfície, com as séries definidas em linhas, invertendo as séries no eixo vertical. Para obter linhas equipotenciais em número suficiente, é apenas necessário refinar a divisão da escala na legenda da figura.

Na figura 6 é apresentado o resultado obtido para uma geometria com $H = 6$ m, $H_1 = 6$ m e $D = 12$ m.

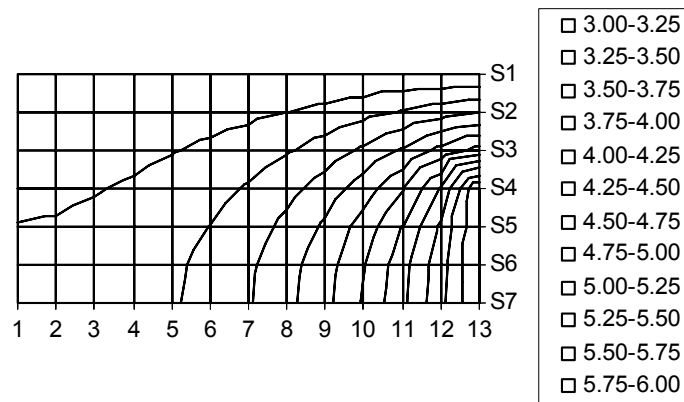


Figura 6 – Linhas equipotenciais

4. AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES COM RECURSO AO PROGRAMA SLOPE/W

4.1. Generalidades

Na disciplina de Movimentos de Terrenos e Estabilidade de Taludes, são fornecidas as bases teóricas de alguns métodos determinísticos de avaliação de estabilidade (coeficiente de segurança global) que utilizam técnicas de equilíbrio limite. Pretende-se que os alunos fiquem habilitados: a avaliar a estabilidade de taludes com características geométricas e geológicas e geotécnicas diferenciadas, a analisar os efeitos da geologia, hidrogeologia e pressões intersticiais sobre a estabilidade e a compreender as forças em jogo nas diferentes situações.

Nas aulas práticas, são fornecidos aos alunos os elementos necessários para a avaliação de coeficientes de segurança (FS) com recurso a diversos métodos de fatias como o de Fellenius, os de Bishop e de Janbu simplificados e o de Spencer. Estes três últimos apresentam cálculos muito mais complexos do que o primeiro pois, por admitirem forças de interação entre fatias, a equação para o FS passa a ser não linear, complicando os cálculos, os quais passam a efectuar-se por iterações. A fim de possibilitar um mais fácil acesso dos alunos aos diferentes métodos, foi utilizado o programa SLOPE/W numa versão para estudante, disponível a título gratuito na Internet, que utiliza a teoria do equilíbrio limite para o cálculo do coeficiente de segurança de taludes em solos. A última versão, permite:

- analisar problemas com um solo ou mais solos diferentes sobre bedrock;
- inserir, para cada solo, o seu peso volúmico total, coesão e ângulo de atrito;
- ter em conta pressões intersticiais definidas com uma só linha piezométrica;
- testar superfícies circulares e não circulares;
- calcular coeficientes de segurança utilizando métodos diferentes.

4.2. Exemplo

Os elementos fornecidos em aula constam de um conjunto de referências geométricas e parâmetros físico-mecânicos que possibilitam a análise de uma determinada situação geotécnica, comparando os resultados obtidos pelos diferentes métodos de análise. O exemplo apresentado aos alunos, esquematizado na figura 7, consiste num talude com banquetas, constituído por duas camadas distintas de solo sobrejacentes a um firme rochoso (*bedrock*) e atravessado por um determinado nível piezométrico. As referências geométricas são as indicadas na mesma figura.

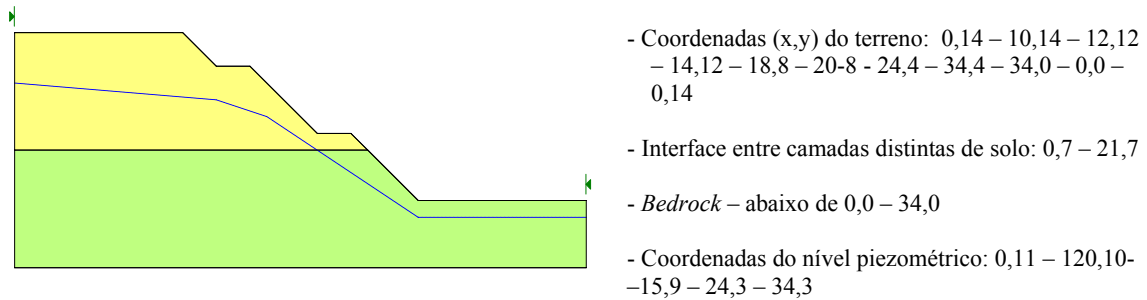


Figura 7 – Aspecto final do esquema do talude apresentado aos alunos

Os parâmetros físico-mecânicos foram distribuídos de modo diferenciado para cada aluno, a fim de permitir resultados distintos para todos eles.

Ao accionar o programa, os alunos têm a oportunidade de comparar resultados, nomeadamente entre o métodos de Fellenius e o de Bishop simplificado, ambos satisfazendo apenas o equilíbrio de momentos. Na figura 8 apresentam-se os resultados obtidos por estes dois métodos, recorrendo aos seguintes parâmetros: $\gamma = 17,5 \text{ kN.m}^{-3}$, $c' = 6 \text{ kPa}$ e $\phi' = 20^\circ$ na camada superior de solo e $\gamma = 20 \text{ kN.m}^{-3}$, $c' = 25 \text{ kPa}$; e $\phi' = 15^\circ$ na camada inferior.

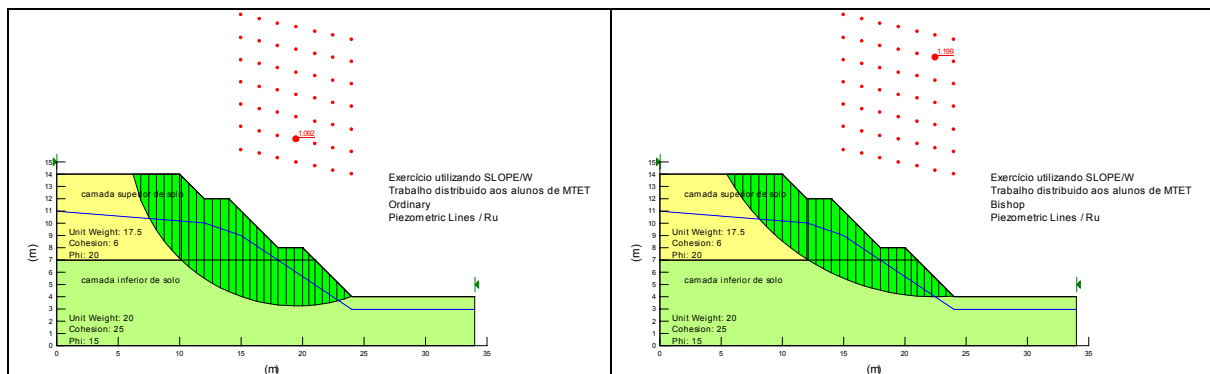


Figura 8 - Resultados obtido pelo método de Fellenius e pelo método de Bishop simplificado

Das diversas análises que o programa permite efectuar, a partir do corpo livre que fica registado em cada método de cálculo, reveste-se de grande interesse didáctico a verificação dos polígonos de forças obtidos fatia a fatia, os quais comprovam a maior ou menor validade da relação entre as forças postas em jogo.

5. CÁLCULO DAS FORÇAS CRÍTICAS DAS COLUNAS PERFEITAS COM RECURSO AO PROGRAMA ANSYS

5.1. Generalidades

Reconhecida a importância dos problemas de instabilidade na área da geotecnia, os cursos de Engenharia Geológica têm no seu plano curricular uma disciplina de Resistência de Materiais, em cujas aulas teórico-práticas são fornecidos os fundamentos teóricos dos conceitos de estabilidade. Começa-se pela definição de equilíbrio estável, indiferente e instável, explicam-se as diferenças entre teoria de primeira e de segunda ordem e a demonstração do conceito faz-se no problema mais simples, ou seja, deriva-se analiticamente a fórmula da força crítica da coluna de Euler. Depois de determinar a força crítica de Euler, estudam-se as influências da forma da secção transversal da coluna, do tipo dos apoios e da posição real da força de compressão aplicada. Pretende-se que os alunos adquiram noções básicas de instabilidade em si, que é um fenómeno não-linear com bifurcação de solução. Requer por isso os fundamentos teóricos bastante difíceis para o nível dos conhecimentos dos alunos do terceiro ano da Licenciatura em Engenharia Geológica. No entanto estes conhecimentos serão extremamente importantes nas outras disciplina igualmente mencionadas neste artigo, onde as aplicações serão direccionadas para os problemas mais concretos da prática geotécnica.

Nas aulas práticas da Resistência de Materiais, os problemas com solução analítica disponível são resolvidos e os resultados são comparados. A fórmula analítica para coluna bi-articulada e com um lado encastrado é posteriormente verificada numa aula de laboratório computacional com recurso ao programa comercial ANSYS. Uma formação resumida, direccionada ao problema em causa, é igualmente dada na aula laboratorial. O trabalho no computador é individual, os dados geométricos variam de aluno para aluno e exige-se um relatório do trabalho efectuado com comparação dos resultados (os calculados à mão, usando a metodologia exposta nas aulas, e os numéricos obtidos do software ANSYS) como uma das condições necessárias para a obtenção da frequência.

5.2. Exemplo

Como já foi mencionado, para um problema demonstrativo na aula prática foi escolhido o da determinação da força crítica da coluna perfeita bi-articulada e com um lado encastrado. Os alunos calculam primeiro cinco primeiras forças críticas F_{cr}^k , $k=1, \dots, 5$. Para o caso bi-articulado

as forças obtêm-se directamente da fórmula de Euler $F_{cr}^k = \frac{k^2 \pi^2 EI}{L^2}$, onde E, I e L designam o

módulo de Young, o momento de inércia e a altura, respectivamente. As primeiras cinco forças críticas da coluna com um lado encastrado e outro articulado calculam-se da fórmula

$F_{cr}^k = \beta_k^2 \frac{EI}{L^2}$, onde β_k corresponde às cinco primeiras soluções da equação $\beta \cos(\beta) - \sin(\beta) = 0$, com o seguinte gráfico da figura 9.

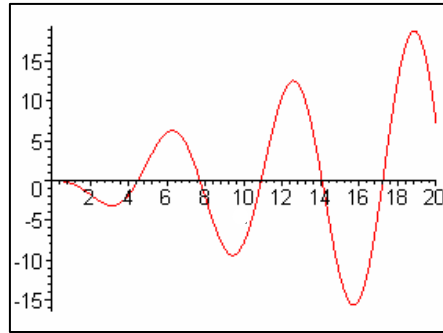


Figura 9 – Gráfico da função $\beta \cos(\beta) - \sin(\beta) = 0$

Na aula laboratorial usando o software ANSYS, além dos valores das forças críticas, os alunos podem visualizar os modos de instabilidade normalizados (figura 10), a distribuição das tensões correspondentes e as animações.

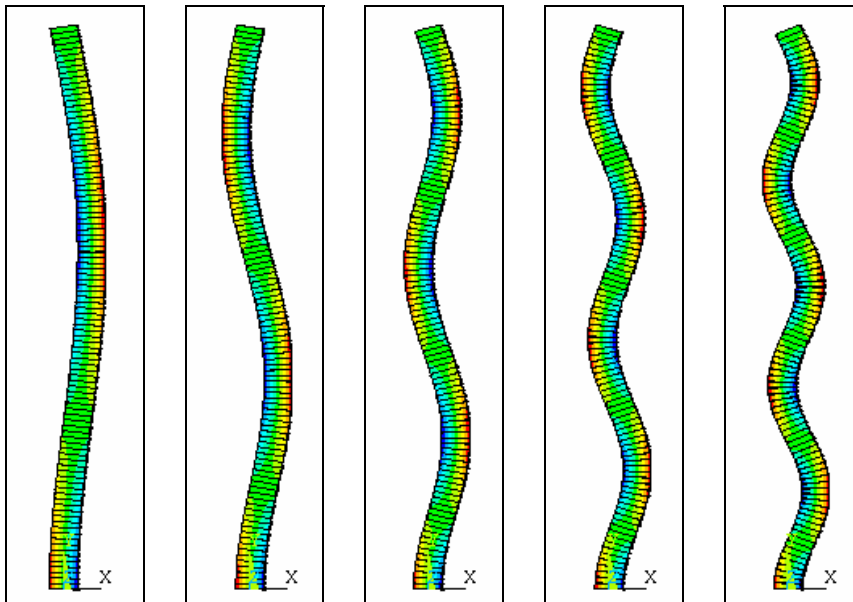


Figura 10 – Cinco primeiros modos de instabilidade com tensões normalizadas da coluna com lado inferior encastrado e lado superior articulado

6. CONCLUSÕES

No domínio da Engenharia, e nomeadamente na maior parte das escolas de engenharia portuguesas, têm sido experimentados com sucesso, desde os primeiros anos, modelos de aprendizagem baseados na resolução de problemas pelos alunos, pretendendo-se que eles construam a sua própria aprendizagem.

O Processo de Bolonha veio reforçar esta ideia de que é o aluno que deve ensinar-se a si mesmo, valorizando assim o trabalho individual na obtenção de aprovação numa determinada disciplina. Neste sentido, procurou-se uma diversificação dos meios de aprendizagem, incentivando, logo no 3º ano do curso, a utilização, de ferramentas computacionais, algumas só usadas nos últimos anos em disciplinas de especialidade ou de projecto.

Os exemplos apresentados destinaram-se, antes de tudo, a motivar os alunos, pertencentes à área da Geotecnia, a aprender, de uma forma agradável, embora com esforço e dedicação. Aos docentes coube apenas orientá-los e apontar-lhes caminhos alternativos.

De facto, o computador revelou-se uma ferramenta estimulante para os alunos, da qual tiraram o maior partido, explorando muitas vezes as soluções para além do que lhes foi solicitado. Além disso, a preocupação de que os trabalhos computacionais tivessem prazos curtos, coincidentes com o desenvolvimento de cada matéria, implicou que o processo de aprendizagem fosse regular e continuado, ao longo de todo o semestre.

À data do Congresso, estes ou outros exemplos terão já sido implementados no curso de Engenharia Civil da FCT/UNL, na disciplina de Mecânica dos Solos.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos alunos Ana Sousa, Alexandre Gomes e Patrícia Ferreira, do curso de Engenharia Geológica da FCT/UNL, a colaboração neste trabalho.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bardet, Jean-Pierre (1997) - "Experimental Soil Mechanics", Prentice Hall.
- [2] Budhu, Muni (2000) - "Soil Mechanics and Foundations", John Wiley and Sons.
- [3] Programa Geo-Slope, <http://www.geo-slope.com/products/geostudio/>
- [4] Programa ANSYS, Ansys, Inc. <http://www.ansys.com/>