

# ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL VIRTUAL

**Renato Mareto** - renato.mareto@ufv.br

**Cláudio H. C. Silva** - silvac@ufv.br

**Paulo S. A. Barbosa** - pbarbosa@ufv.br

**Dario C. Lima** - declima@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenharia Civil (DEC/UFV),  
Campus Universitário. CEP 36570-000 – Viçosa – MG

**Walcyr D. Nascimento** - walcyr.duarte@ifsudestemg.edu.br

Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, campus Juiz de Fora. CEP 36080-001 –  
Juiz de Fora – MG

**Resumo:** *O objeto educacional apresentado neste trabalho foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar alunos e técnicos no aprendizado do ensaio de compressão triaxial que é constantemente usado nos laboratórios de Mecânica dos Solos para a determinação da resistência ao cisalhamento de solos. A interface gráfica e os recursos de interatividade usuário-computador foram obtidos graças ao emprego de linguagem de programação orientada, que permitiu ainda animar situações como montagem e manuseio de aparelhos e a execução de todas as etapas do ensaio. O programa é dividido em módulos que correspondem às diversas etapas do ensaio, o que permite maior clareza de detalhes e o entendimento da importância de cada uma das etapas do ensaio. O que diferencia este objeto educacional de outros existentes é o fato de que ele gera, aleatoriamente, as características do solo, fazendo com que se tenha um material diferente a cada vez que se usa o programa, evitando-se assim que o processo de aprendizagem se torne monótono ou cansativo. Esse software vem sendo usado pelos alunos de graduação das engenharias civil e ambiental da Universidade Federal de Viçosa, concomitantemente com levantamento de opiniões dos usuários, de modo a se detectar a necessidade de melhorias e também novas ideias para refinar o programa. Foi observado que os alunos têm demonstrado maior interesse nas aulas práticas após o uso deste recurso digital.*

**Palavras-chave:** *Geotecnia, Ensaio de compressão triaxial, Ensaio virtuais, Interatividade, Simulação computacional.*

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos de ensino-aprendizagem têm passado por grandes mudanças nos últimos anos. A tendência atual está no sentido de se facilitar a aprendizagem diminuindo-se a carga horária em sala de aula e ampliando-se o tempo de contato do aluno com as atividades de cunho prático, como os ensaios de laboratório, por exemplo. A busca por novas ferramentas e formas de ensino que permitam essa mudança na forma de ensinar e que mostrem ganhos significativos na aprendizagem tem sido ampliada com o advento da computação gráfica. A produção de materiais digitais para o auxílio no ensino de engenharia geotécnica intensificou-se a partir da década de 1990 (JASKA et al, 2000).

Desde então se tem notado grande produção de recursos educacionais digitais nos mais diferentes formatos com o intuito de viabilizar o trabalho do aluno fora da sala de aula (BUDHU & COLEMAN, 2002; YUEN et al, 2005; SANTANA & LAMAS, 2007; NASCIMENTO 2009), indo desde simples apresentações de *slides* até softwares de ensino interativo. Neste contexto, desde 2006, um grupo de pesquisadores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (DEC/UFV), formado por professores, alunos de graduação e pós-graduação, vêm desenvolvendo ferramentas de apoio ao processo de ensino-aprendizagem em geotecnia fundamentadas em metodologias de ensino que privilegiam o desenvolvimento da prática reflexiva do aluno (BARBOSA et al., 2006; NASCIMENTO et al., 2008; NASCIMENTO, 2009).

No meio geotécnico existem ensaios de longa duração que não permitem aos alunos acompanharem todas as etapas de sua realização tampouco analisar e discutir os resultados assim que eles são obtidos. Muitos desses ensaios exigem ainda instalações amplas e equipamentos caros, o que tem sido um entrave no ensino de geotecnia em muitas instituições de ensino que não os possuem. Com base nessas constatações, buscaram-se soluções virtuais para os problemas de falta de estrutura e deficiência nas aulas práticas. Mais ainda, é interessante ressaltar que as modificações em técnicas e normas poderão ser facilmente ajustadas, diferentemente do que aconteceria nos livros impressos.

No ambiente virtual de geotecnia proposto pelo DEC/UFV, os recursos educacionais são implementados por meio de técnicas de programação visual, com recursos de interatividade usuário-computador, animações de práticas laboratoriais e simulações numéricas. Esse ambiente virtual, intitulado "Laboratório Virtual de Geotecnia", está em pleno desenvolvimento (MARETO et al., 2009; NASCIMENTO et al., 2009a; NASCIMENTO et al., 2009b) e contará com diversas ferramentas que simularão os mais diferentes ensaios realizados nos laboratórios de geotecnia.

Este trabalho apresenta o ensaio de compressão triaxial virtual, objeto educacional desenvolvido para mediar a aprendizagem do ensaio de compressão triaxial e a determinação da resistência ao cisalhamento de solos.

## **2. DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL VIRTUAL**

A ruptura dos solos se dá, preferencialmente, por cisalhamento, em planos no maciço onde a razão entre as tensões cisalhantes e normais atinge um valor crítico. Esses planos são denominados planos de ruptura e suas inclinações são função dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

A resistência ao cisalhamento de um solo é uma propriedade de determinação e conhecimento extremamente complexos, além de ser influenciada pelas características de permeabilidade e compressibilidade do material. Dentre os problemas usuais em que é necessário conhecer a resistência do solo destacam-se a estabilidade de taludes, a capacidade de carga de fundações e os empuxos de terra sobre estruturas de contenção.

Comumente no ensaio de compressão triaxial empregam-se corpos de prova cilíndricos com relação altura/diâmetro da ordem de 2 a 2,5, que são envolvidos por uma membrana flexível impermeável e colocados dentro de uma câmara, como se ilustra na Figura 1. Posteriormente, preenche-se a câmara com água e aplica-se uma pressão na mesma que atua como tensão confinante no corpo de prova ( $\sigma_3$ ). O ensaio é realizado acrescentando-se a tensão vertical, o que introduz tensões de cisalhamento no solo, até que ocorra a ruptura ou se atinja um nível de deformação considerada como excessiva. As

diversas conexões da câmara com o exterior permitem medir ou dissipar poro pressões geradas e medir variações de volume do corpo de prova.



Fig. 1: Célula contendo o corpo de prova do ensaio de compressão triaxial.

Das diversas maneiras de se conduzir o ensaio de compressão triaxial, o ensaio adensado e drenado (CD) é dos mais complexos, demandando maior tempo em sua realização e maior quantidade de aspectos a serem analisados durante sua execução e aprendizagem por parte dos alunos. Devido a essa complexidade relativa, e por ser o mais desafiador em termos de programação da interatividade, ele foi escolhido como o objeto deste artigo.

Dentre os procedimentos necessários ao desenvolvimento do recurso digital destacam-se a modelagem digital dos aparatos usados na execução do ensaio e o desenvolvimento da interatividade usuário-computador. Numa primeira etapa foram modelados tridimensionalmente, em escala, com o uso de softwares de modelagem digital, todos os aparelhos e ferramentas usados no ensaio. Para aumentar a sensação de realidade os principais componentes ganharam efeitos de superfície, movimento e animação, tudo facilmente controlado pelo usuário. Em seguida foram elaborados, via linguagem de programação orientada a objeto, as maneiras pelas quais o usuário se comunica com o programa. Resumidamente, pode-se dizer que, além de se preparar e executar o ensaio, o usuário pode analisar os dados obtidos sem ter que sair de casa e tampouco sujar as mãos. Essa forma de interação com o software permite que o aluno possa participar de todas as etapas práticas do processo de determinação de resistência do solo, fixando concretamente a teoria e desenvolvendo senso crítico quanto às operações laboratoriais.

### 3. RESULTADOS

O ensaio triaxial virtual é facilmente acessado no menu "*Tensões no solo/Ensaio triaxial*" à direita da tela principal do software. O objeto educacional referente ao ensaio de compressão triaxial é dividido em sete módulos: 1 - Conceitos teóricos e tipos de ensaios de compressão triaxial; 2 – Montagem da célula do ensaio; 3 – Saturação por percolação; 4 – Saturação por contra pressão; 5 – Verificação do parâmetro "B"; 6 – Adensamento; 7 – Ruptura; os quais contêm conceitos teóricos, animações, exemplos e situações reais experimentadas nos laboratórios de mecânica dos solos. Seu propósito principal é permitir ao usuário compreender cada fase do processo de compressão triaxial, enfatizando o princípio das tensões efetivas através das diversas fases de

compressão com e sem drenagem, além de permitir ao usuário dominar a técnica de execução do ensaio de compressão triaxial. Ricamente ilustrado e complementado por recursos de animação, o objeto simula de forma prática e interativa todas as etapas necessárias à obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos (coesão e ângulo de atrito interno) além da visualização dos comportamentos *tensão desvio versus deformação* e *poro pressão versus deformação*. Para aumentar ainda mais a gama de possibilidades deste software, nas etapas do ensaio ou de análise dos dados que envolvam cálculos, o programa gera as constantes aleatoriamente, de modo a evitar que o uso repetido do objeto educacional torne-se monótono ou cansativo.

### 3.1 Módulo 1: Ensaio CD em solos

Esta parte do software "Laboratório Virtual de Geotecnia" trata do ensaio de compressão triaxial adensado e drenado (CD). Neste ensaio há permanente drenagem do corpo de prova. Aplica-se a tensão confinante e espera-se até que o corpo de prova adense. A seguir a tensão axial é aumentada lentamente, de modo que todo o excesso de tensão neutra no interior do corpo de prova seja dissipado. Dessa forma, a tensão neutra no cisalhamento permanece praticamente nula (ou constante, no caso de ensaios realizados com contra pressão) e as tensões totais medidas são tensões efetivas.

### 3.2 Módulo 2: Montagem da célula do ensaio de compressão triaxial

Nesta etapa, possibilita-se ao usuário conhecer os equipamentos utilizados para a execução e montagem da célula do ensaio de compressão triaxial, bem como a importância de cada componente nessa montagem (Figura 2). Nessa etapa do trabalho o aluno simula a montagem através de animação do tipo "arraste e solte". Ele monta a célula clicando, arrastando e soltando cada componente na área correspondente ao seu emprego, seguindo a ordem correta de montagem. Caso ele tente executar uma etapa em desacordo com o procedimento usual, o usuário não poderá prosseguir com a animação, sendo permitido a ele refazer o procedimento. Só se consegue avançar para a próxima etapa tendo esta sido realizada corretamente, sendo necessário assim que o aluno use ao máximo seus conhecimentos teóricos para prosseguir com as atividades.

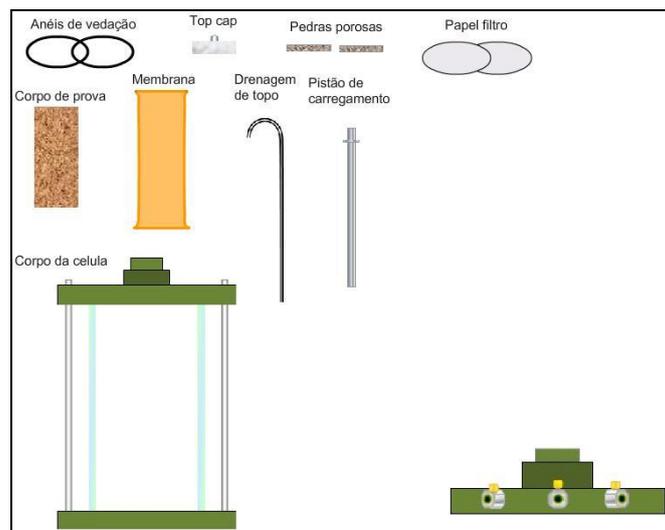


Figura 2 - Montagem da célula do ensaio de compressão triaxial.

### 3.3 Módulo 3: Saturação por percolação

Depois que a célula está montada passa-se à segunda etapa do procedimento, que é a saturação por percolação do corpo de prova, uma vez que se está simulando o ensaio de compressão triaxial do tipo adensado, drenado ou não, como descrito acima. A primeira ação é dirigida a se conectar o tubo à célula e ao reservatório de água (vide Figura 3). Para isto, clica-se e arrasta uma das pontas da mangueira até a torneira na parede e a outra até o registro na base da célula. Para se preencher a célula com água e aplicar as tensões de confinamento e contra pressão, deve-se seguir as instruções do programa. Esta etapa exige grande atenção do responsável pela execução do ensaio, pois a aplicação errada de tensões ou a abertura das torneiras em ordem incorreta podem levar à perda do corpo de prova.

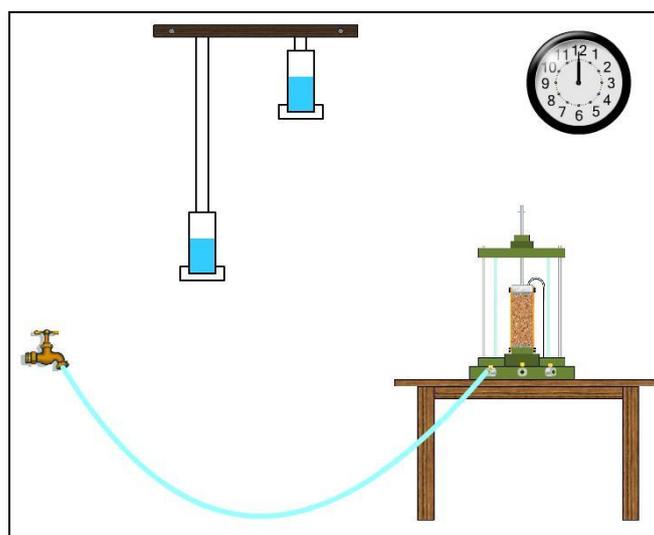


Figura 3 - Saturação por percolação.

### 3.4 Módulo 4: Saturação por contra pressão

O objetivo deste módulo é mostrar ao usuário o procedimento de saturação por contra pressão, usado regularmente nos laboratórios de geotecnia. Ele será levado a perceber a eficiência de se aplicar incrementos nas tensões de confinamento e contra pressão, mantendo-se sempre uma diferença de 5 kPa entre elas, para se chegar à saturação do corpo de prova.

Nesta etapa estão esquematizados os painéis de aplicação e controle das pressões de confinamento e da contra pressão, como se ilustra na Figura 4, e a célula contendo o corpo de prova, que foi saturado por percolação na etapa anterior.

Refere-se que esta etapa do ensaio consiste em se aplicar, por meio de sistema de ar comprimido, a pressão de confinamento ( $\sigma_3$ ) e a contra pressão ( $u_b$ ) no corpo de prova. Nesta etapa, o usuário pode regular as pressões, abrindo e fechando os registros (ou torneiras) dos painéis através de cliques do mouse sobre os mesmos. Após, ele deve abrir as respectivas torneiras de aplicação de  $\sigma_3$  e  $u_b$  na base da célula, nesta ordem. Caso ele tente executar esta operação em ordem inversa, lhe é apresentada uma tela de advertência, alertando-o sobre o seu equívoco.

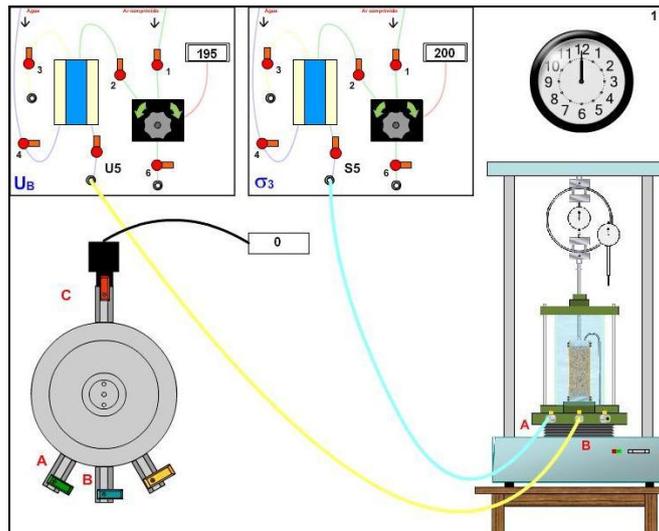


Figura 4 - Saturação por contra pressão.

### 3.5 Módulo 5: Verificação do parâmetro "B"

Na Mecânica dos Solos Clássica é comum trabalhar com amostras saturadas de solos. Assim, é importante se garantir que os corpos de prova estejam saturados antes do início do ensaio propriamente dito. A verificação da saturação é realizada por meio do "parâmetro B" de poro pressão de Skempton. Devido à importância desta verificação, deu-se especial atenção à sua implementação nesta etapa do software.

A saturação é usualmente verificada para contrapressões iguais ou superiores a 200 kPa. O usuário pode optar por fazer ou não esta verificação, ficando esta opção disponível para  $u_b$  igual ou superior a 200 kPa. Na verificação da saturação, não é mais permitido que se varie  $\sigma_3$ , mas apenas  $u_b$ . Para que isto fique claro para o usuário, as torneiras referentes à  $u_b$  ficam inativas e, caso ele tente manipulá-las, uma tela de advertência surge, explicando-lhe o porquê da impossibilidade de se variar o modo de ação de  $u_b$  no corpo de prova, como se apresenta na Figura 5.

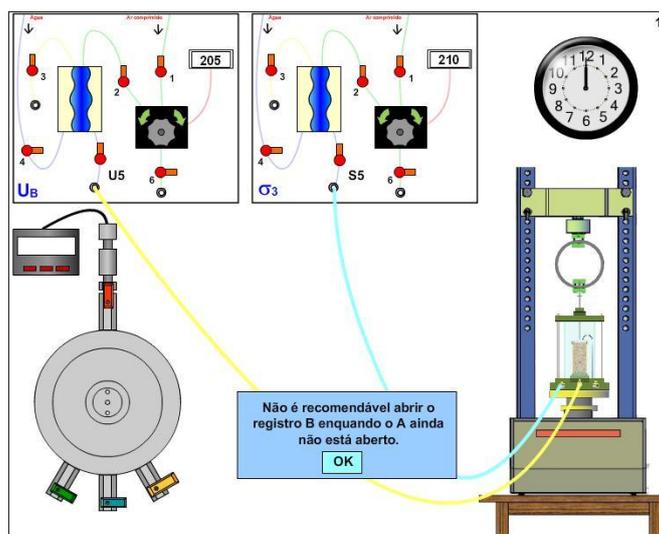


Figura 5 - Mensagem de advertência.

Nesta etapa, o software permite ao aluno realizar o procedimento de verificação do parâmetro "B", desenvolver os cálculos de interesse e verificar se os resultados obtidos estão corretos. Atestada a saturação do corpo de prova, passa-se para à etapa de adensamento do corpo de prova.

### 3.6 Módulo 6: Adensamento

Este módulo retrata a etapa de adensamento do corpo de prova no ensaio de compressão triaxial. Nela o software gera, aleatoriamente, cada vez que é iniciado, as dimensões do corpo de prova e as características do solo. O usuário inicia esta fase definindo, dentre algumas opções correntemente usadas nos laboratórios de Mecânica dos Solos, quais serão as pressões de confinamento usadas durante o adensamento. Em seguida, inicia-se o adensamento, instruindo-se o aluno a fazer as primeiras leituras nos instrumentos. Feito isso, ele pode iniciar o adensamento. Esta é uma fase demorada do ensaio, na qual o operador deve ficar extremamente atento ao relógio para tomar as leituras de variação de volume ( $\Delta V$ ) nos intervalos corretos de tempo. Com isto, pretende-se despertar no aluno a percepção de quão importante é esta etapa do ensaio de compressão. Para que o usuário não fique esperando pelo fim desta fase, que dura por volta de 24 horas, ele pode acelerar o tempo e avançar para a fase de ruptura sem prejuízos ao seu aprendizado (Figura 7).

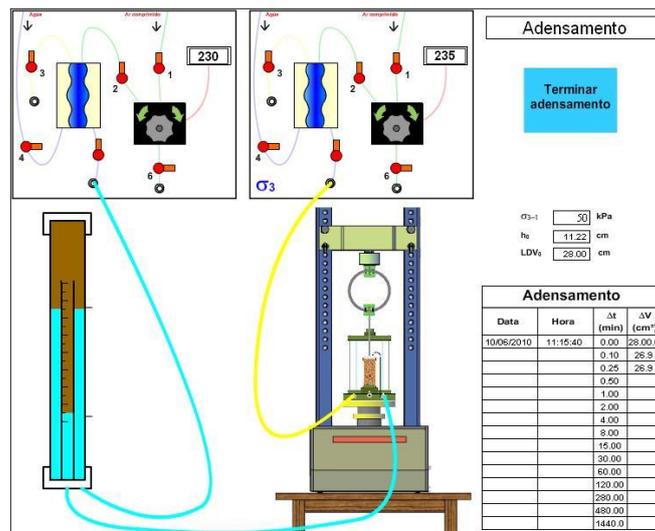


Figura 6 - Adensamento.

### 3.7 Módulo 7: Ruptura

A última etapa do ensaio de compressão triaxial é dirigida à ruptura do corpo de prova por meio do acréscimo da tensão vertical, o que induz tensões verticais na amostra, até que esta rompa ou atinja uma deformação excessiva.

Iniciando-se a etapa de ruptura, o usuário precisa fornecer à planilha de cálculos do software os dados colhidos ao final da etapa de adensamento, como a altura e a seção transversal do corpo de prova, por exemplo. Feito isto, o usuário inicia a fase de ruptura, acionando a prensa hidráulica usada no ensaio e que está esquematizada neste módulo (Figura 7). Assim como na fase de adensamento, o operador tem de colher os dados em determinados intervalos de tempo. As leituras de variação de altura e volume do corpo de prova e da força aplicada são mostradas ao usuário em uma tabela, de forma

organizada e clara, com o objetivo de facilitar-lhe o entendimento da fase final do ensaio e permitir-lhe a análise dos dados.

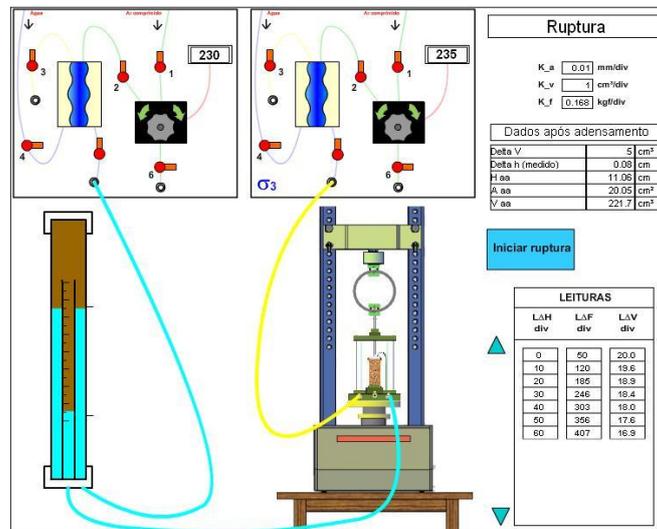


Figura 7 - Ruptura.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aprendizado proporcionado pelas aulas práticas é de extrema importância para a formação profissional de alunos e técnicos. É muito comum a realização de ensaios no ensino de engenharia, porém, devido a limitações de espaço físico e de profissionais, muitas vezes não é possível a obtenção dos resultados esperados. Neste contexto, os ensaios virtuais apresentam-se como uma alternativa no ensino dos ensaios de laboratório, ao permitirem o uso individualizado pelo aluno, que terá esse material como seu laboratório próprio.

Uma das vantagens dos ensaios virtuais é que se podem variar as condições do ambiente e dos equipamentos, bem como os materiais a serem ensaiados. Essas características de interatividade permitem aos alunos observarem alguns detalhes específicos do comportamento dos diversos materiais quando estes são ensaiados em diferentes situações, detalhes estes que dificilmente poderiam ser analisados em aulas teóricas ou em aulas práticas de curta duração (em média duas horas).

O ensaio virtual de compressão triaxial vem sendo introduzido nas aulas de Mecânica dos Solos do curso de Engenharia Civil da UFV como material complementar com o objetivo principal de auxiliar os alunos no processo de aprendizagem. Os estudantes têm demonstrado maior interesse e participação nas aulas práticas após a disponibilidade do software. Paralelamente ao emprego do software, a equipe de desenvolvimento tem colhido informações e opiniões dos usuários, a fim de detectar a necessidades de melhorias e novas ideias, de modo a refinar o software.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, P.S.A. et al. Aplicações do Cabri géomètre na engenharia civil: construindo taludes virtuais. III Congresso Iberoamericano de Cabri - IBEROCABRI 2006 (CD ROM)

BUDHU, M.; COLEMAN, A. The design and evaluation of interactivities in a digital library. D-Lib Magazine, 8 (11), Nov. 2002.

HEAD, K.H. Manual of soil laboratory testing. Vol. 2: Permeability, Shear strength and compressibility tests. London: Pentech Press, 1982.

JAKSA, M. B. et al. Computer aided learning in geoenvironmental education: current resources and future trends. Proc. GeoEng 2000, Melbourne, 2000.

MARETO, R. et al. Implementação do ensaio virtual de permeabilidade. In: COBENGE, Recife, 2009. (CD ROM)

NASCIMENTO, W.D. GEOWEB, um facilitador para a aprendizagem em geotecnia. Tese de Doutorado. Viçosa: UFV, 2009.

NASCIMENTO, W.D. et al. Desenvolvimento de software interativo para apoiar o ensino do movimento de água nos solos. In: COBENGE, São Paulo, 2008. (CD ROM)

NASCIMENTO, W.D. et al. Desenvolvimento de um software educacional para determinar os limites de consistência de um solo. In: COBENGE, Recife, 2009a. (CD ROM)

NASCIMENTO, W.D. et al. Um estudo sobre fluxo de água em permeâmetros virtuais. In: VIII International Conference on Graphics Engineering of Arts and Design – GRAPHICA2009, Bauru, 2009b. (CD ROM)

SANTANA, T.; LAMAS, P. Computational tools for teaching graduate courses in geotechnical engineering. ICEE 2007, Coimbra, Portugal, 2007.

YUEN, S.T.S. et al. Collaborative development of multimedia courseware in geotechnical engineering education. Proceedings of the 2005 Australasian Association for Engineering Education /AaeE 4th Global Colloquium on Engineering Education, Paper 68, 2005.

## **TRIAxIAL COMPRESSION TEST VIRTUAL**

***Abstract:** The educational object presented in this work was developed with the goal of helping students in learning triaxial compression test which is constantly used in soil Mechanics laboratories for the determination of shear strength of soils. The graphic interface and the user-computer interactivity capabilities were obtained through the use of oriented programming language, which allowed even animate situations such as equipment assembly and handling, and the implementation of all laboratory test steps. The program is divided into modules that correspond to the different steps of the test, which allows greater clarity of detail and the understanding of the importance of each action. What differentiates this object from the others existing educational tools is the fact that it generates, randomly, the characteristics of the soil, producing a different material each time the user initiates the program, thus avoiding that the learning process becomes monotonous or tedious. This software is being used by graduate students of civil and environmental engineering of the Federal University of Viçosa, concurrently with survey of the opinions of users, in order to detect the need for improvements and new ideas to refine the program. It was noted that students have shown greater interest in classroom practices after using this digital resource.*

**Keywords:** Geotechnique, Triaxial compression test, Virtual test, Interactivity, Computer simulation.