

DESENVOLVIMENTO DE UMA CÉLULA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS TRIAXIAIS EM SOLOS COMPACTADOS RÍGIDOS

Development of a cell for triaxial tests in rigid compacted soils

Alex Duarte de Oliveira*

Francisco Chagas da Silva Filho**

José Rafael Diógenes Pessoa***

RESUMO – Este trabalho apresenta uma célula triaxial desenvolvida para realizar ensaios em solos compactados de alta rigidez. O equipamento foi desenvolvido para facilitar a execução do ensaio triaxial, possibilitando a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, em laboratórios que não disponham de grande infraestrutura ou mesmo no campo. Na célula apresentada, a pressão confinante é aplicada por ar comprimido, não há um sistema de aplicação de contrapressão e não é possível o monitoramento das poro-pressões desenvolvidas. O ensaio é executado com baixa velocidade, livre drenagem para a água e o ar e a fase de ruptura pode ser realizada numa prensa de CBR (com deformações controladas) ou numa prensa de adensamento adaptada (com tensões controladas). Para a verificação do equipamento foram realizados ensaios, nas mesmas condições, utilizando a célula desenvolvida e a convencional. Os resultados obtidos indicaram que a nova célula pode ser utilizada para solos rígidos, como os utilizados normalmente em pequenas barragens de terra.

SYNOPSIS – This paper presents a triaxial cell designed to carry out tests on rigid compacted soils. The equipment was designed to facilitate the execution of the triaxial test, allowing the soil shear strength parameters to be determined in laboratories that do not have large infrastructure or even in the field. In the presented cell, the confining pressure is applied by compressed air, there is no backpressure system and it is not possible to monitor the developed pore pressures. The test is run at low speed, in free drainage conditions for water and air, and the shearing step can be performed in a CBR apparatus (strain controlled) or in an adapted oedometer apparatus (load controlled). To check the equipment, tests were carried out, under the same conditions, using the developed and the conventional cells. The results indicate that the new cell can be used for rigid compacted soils, normally used in small earth dams.

PALAVRAS CHAVE – Solos compactados, ensaios triaxiais, barragens.

1 – INTRODUÇÃO

A região Nordeste do Brasil é conhecida por possuir um regime pluviométrico irregular e de baixa intensidade, o que torna frequente a ocorrência de prolongados períodos de escassez de chuva. Para amenizar os efeitos da seca, é comum a construção de pequenas barragens de terra, distribuídas espacialmente por toda a região (Miranda, 1988).

* Mestre em Geotecnia, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE, Brasil.
E-mail: alexcatarinense@gmail.com

** Doutor em Geotecnia, Professor Adjunto, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE, Brasil.
E-mail: fchagas@ufc.br

*** Mestrando em Geotecnia, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE, Brasil.
E-mail: eng.rafaeldiogenes@hotmail.com

Os solos utilizados para a construção dessas pequenas barragens, geralmente, são areias ou pedregulhos argilosos de baixa plasticidade. Esses materiais, quando compactados e submetidos a ensaios triaxiais convencionais (ensaios saturados com trajetórias de tensões de compressão por carregamento), não geram variações significativas de poro-pressões. Dessa forma, os parâmetros de resistência totais e efetivos obtidos são bastante próximos.

O Quadro 1 apresenta as propriedades geotécnicas de quatro solos utilizados na construção de pequenas barragens, enquanto o Quadro 2 apresenta os resultados de ensaios triaxiais consolidados hidrostáticamente e não drenados (CIU) realizados com os mesmos solos apresentados no Quadro 1. Os resultados apresentados na Quadro 2 são compostos por valores de tensão confinante (σ_c), tensão desvio ($\Delta\sigma$), variação de poro-pressões (Δu), coesão total e efetiva (c , c') e ângulo de atrito total e efetivo (ϕ , ϕ').

Quadro 1 – Caracterização geotécnica de quatro solos utilizados na construção de pequenas barragens.

Propriedades	Solo			
	1	2	3	4
Pedregulho (%)	31	0	0	3
Areia (%)	50	69	68	67
Silte (%)	4	5	3	4
Argila (%)	15	26	28	26
Limite de Liquidez (%)	22	25	19	20
Limite de Plasticidade (%)	14	15	12	12
Umidade ótima (%)	7,8	10,5	11,0	10,5
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	1,90	1,92	1,91	1,91

Os dados apresentados nos Quadros 1 e 2 foram retirados de relatórios técnicos cedidos pelo Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará – UFC.

Os materiais utilizados na construção de pequenas barragens, além de não gerarem excessos significativos de poro-pressão, encontram-se, em campo, na condição não saturada. Para prever o comportamento de solos não saturados é necessário determinar os parâmetros de resistência do solo em função da sucção. Isso pode ser feito através de ensaios de laboratório com sucção controlada, no entanto, esses ensaios não são usualmente empregados na prática devido a limitações econômicas impostas pelo longo tempo necessário para sua execução, bem como dificuldades associadas à interpretação dos resultados e à estimativa da sucção em campo (Schnaid *et al.*, 1995).

Outro problema relacionado à execução de pequenas barragens é a baixa quantidade de recursos financeiros disponíveis. Por esse motivo, muitas dessas pequenas barragens são projetadas utilizando apenas resultados de ensaios de caracterização e compactação, sem a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, através dos ensaios de triaxiais ou de cisalhamento direto.

Com o objetivo de amenizar estes problemas, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma célula triaxial simplificada de baixo custo de aquisição, para a execução de ensaios triaxiais em solos compactados, na condição não saturada, com livre drenagem para a água e o ar e sem o monitoramento das poro-pressões. O aparelho foi testado e seus resultados comparados aos resultados obtidos com a célula triaxial convencional, nas mesmas condições de ensaio.

A seguir, apresenta-se a descrição completa do equipamento e resultados dos ensaios triaxiais realizados com a célula convencional e a proposta neste trabalho.

Quadro 2 – Resultados dos ensaios triaxiais CIU realizados com os solos do Quadro 1.

Solo	σ_c (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	Δu (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	50	165,1	0,0	10	33,7	5	35,3
	100	360,0	-3,1				
	200	659,6	-5,3				
2	50	379,0	-9,5	20	28,8	15	29,2
	100	552,5	-8,0				
	200	807,3	-17,0				
3	50	772,5	3,2	10	33,8	0	35,0
	100	894,5	5,7				
	200	1170,8	10,0				
4	50	704,5	-42,6	8	33,9	5	35,6
	100	981,0	-63,8				
	200	1355,8	-84,9				

2 – DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

O equipamento desenvolvido foi construído em aço, com dimensões apropriadas para os aparatos já existentes no laboratório da UFC. A célula montada possui 35 cm de altura e 14 cm de diâmetro e comporta um corpo de prova (CP) com 15 cm de altura e 6,4 cm de diâmetro. As dimensões do corpo-de-prova foram escolhidas para possibilitar a execução de ensaios com solos que possuam partículas de diâmetros maiores, como pedregulhos ou britas, mas sem que o peso total do equipamento ficasse muito elevado. As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, um corte da seção transversal da célula montada e uma fotografia do equipamento completo desmontado, juntamente com a identificação de todos os seus componentes.

O cilindro externo possui paredes com 0,7 mm de espessura e uma válvula acoplada para aplicação e leitura da pressão de confinamento. As flanges superior e inferior são rosqueáveis e a vedação destas é feita através de *O-rings*. O fundo da peça é também utilizado como base para o corpo de prova, que é envolvido por uma membrana de borracha de formato cilíndrico.

O fundo da célula é a única parte que necessita ser desmontada para a realização do ensaio. Os demais componentes, incluindo a membrana de borracha, permanecem fixos. O corpo-de-prova é introduzido diretamente pelo fundo, sem a necessidade de desmontar e montar o equipamento. Antes de introduzir a amostra, retira-se o ar da célula aplicando uma pequena sucção pela válvula de pressão, para desobstruir a membrana e facilitar a alocação do corpo-de-prova. Após o posicionamento da amostra, o fundo da célula é recolocado e a pressão confinante aplicada. O solo fica completamente isolado da pressão confinante, mas conectado ao ambiente, de modo que a pressão do ar nos seus vazios pode ser considerada igual à atmosférica.

A transmissão de carga ao corpo de prova é feita através de um eixo de aço com uma esfera na ponta, ligado a um cabeçote de aço bipartido. Esse tipo de ligação foi utilizado para simular o comportamento de uma rótula, deixando o corpo de prova livre para se deformar. O detalhe dessa ligação está apresentado na Figura 1.

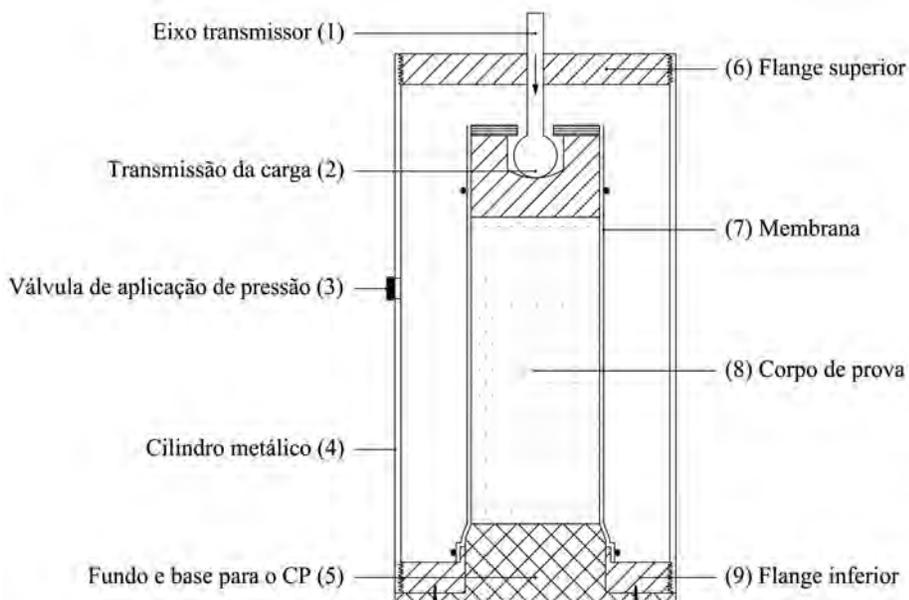


Fig. 1 – Seção transversal da célula triaxial desenvolvida com a identificação dos componentes.



Fig. 2 – Célula triaxial desenvolvida desmontada com a identificação dos componentes.

O princípio de funcionamento da célula é basicamente o mesmo da célula convencional. O corpo-de-prova é envolvido por uma membrana e submetido a uma pressão de confinamento hidrostática. Após um curto período de consolidação, tem início a fase de cisalhamento, que pode ser executada através da imposição de uma taxa constante de deslocamento axial ou através da aplicação de incrementos de carga axial, assim como pode ser feito na célula convencional. Neste processo, o corpo-de-prova pode ser inundado, semelhante ao ensaio de cisalhamento direto, mas não há a aplicação de contrapressões, nem o monitoramento das poro-pressões.

Optou-se por não incluir um sistema de aplicação de contrapressão, porque, desta forma, a célula se torna independente da estrutura do laboratório, podendo o ensaio ser executado em locais sem muita infraestrutura, utilizando apenas um pequeno compressor e uma prensa mecânica com tensões controladas. Acredita-se que os solos compactados de alta rigidez (materiais para os quais a célula foi projetada) não geram excessos significativos de poro-pressões, não sendo necessário o seu monitoramento.

Utilizando a célula desenvolvida, o ensaio triaxial é realizado não saturado (com a umidade de moldagem), com livre drenagem para a água e para o ar, sem monitoramento das poro-pressões e sem medidas de variação volumétrica. Entende-se que estas condições de ensaio são bastante próximas das condições encontradas no campo, tornando os resultados do ensaio mais próximos dos valores reais.

Esta célula apresenta como vantagens a simplicidade de execução do ensaio, o baixo custo para sua construção e o mecanismo de ruptura semelhante ao do triaxial convencional, sem a pré-definição de um plano de ruptura.

Além da câmara triaxial, também foram construídos um soquete e um cilindro de compactação específicos para a moldagem dos corpos de prova do ensaio. Estes equipamentos de compactação foram confeccionados com base nas descrições da NBR 7182 (1988), mas com as dimensões necessárias para moldar o corpo de prova utilizado na célula desenvolvida. As compactações foram realizadas em 3 camadas com 16 golpes em cada camada, resultando numa energia equivalente à Proctor Normal obtida com o equipamento padrão da NBR 7182 (1988).

3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Após a construção dos equipamentos, foram realizados ensaios para avaliar a qualidade dos resultados produzidos e a sua aplicabilidade. Para isso, foram utilizadas misturas de solo preparadas com uma areia argilosa (SC), compactada na umidade ótima da energia Proctor Normal, com diferentes frações de material fino (argila e silte). O percentual de finos das amostras foi variado com o objetivo de mostrar a influência da granulometria do solo sobre a qualidade dos resultados obtidos com o equipamento projetado. Todos os ensaios realizados foram repetidos, nas mesmas condições, utilizando a célula convencional do ensaio triaxial. Além dos ensaios realizados com as misturas preparadas, também foram realizados ensaios triaxiais, com as duas células, utilizando o solo natural (apenas destorroado e compactado).

3.1 – Materiais utilizados

O solo utilizado foi coletado no Campus da Universidade Federal do Ceará. Todo o material foi completamente destorroado e homogeneizado, antes da execução dos ensaios. A caracterização do material foi feita através da determinação da densidade real dos grãos, da curva granulométrica, dos índices de consistência e da curva de compactação Proctor Normal. O Quadro 3 apresenta os resultados obtidos e as normas seguidas para cada ensaio.

Após a caracterização do solo, foram preparadas três misturas, variando o percentual da amostra com diâmetro inferior ao da peneira n.º 200 (0,075 mm). As misturas utilizadas foram preparadas com porcentagens de finos iguais a 8, 16 e 24%. No caso do solo natural, o percentual de finos foi de 32%, conforme mostrado no Quadro 3. A Figura 3 apresenta as curvas de compactação obtidas para o solo natural e com as misturas utilizadas.

Pela Figura 3 pode-se observar, como esperado, que a redução do percentual de finos do solo ocasionou uma redução da umidade ótima e tornou as curvas de compactação mais abertas. A máxima massa específica seca foi obtida com a mistura de 24% de finos.

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de caracterização física e compactação realizados com o solo utilizado na pesquisa.

Índices físicos	Valores	Normas
Limite de Liquidez	22%	NBR 6459 (1984)
Limite de Plasticidade	15%	NBR 7180 (1984)
Índice de Plasticidade	7%	-
Densidade Real dos Grãos	2,66	DNER (1994)
% de Areia Grossa (0,42 < D < 2,0 mm)	6%	NBR 7181 (1984)
% de Areia Fina e Média (0,05 < D < 0,42 mm)	62%	
% de Silte (0,002 < D < 0,05 mm)	5%	
% de Argila (D < 0,002 mm)	27%	
Umidade ótima	12%	NBR 7182 (1988)
Massa específica seca máxima	1,95	

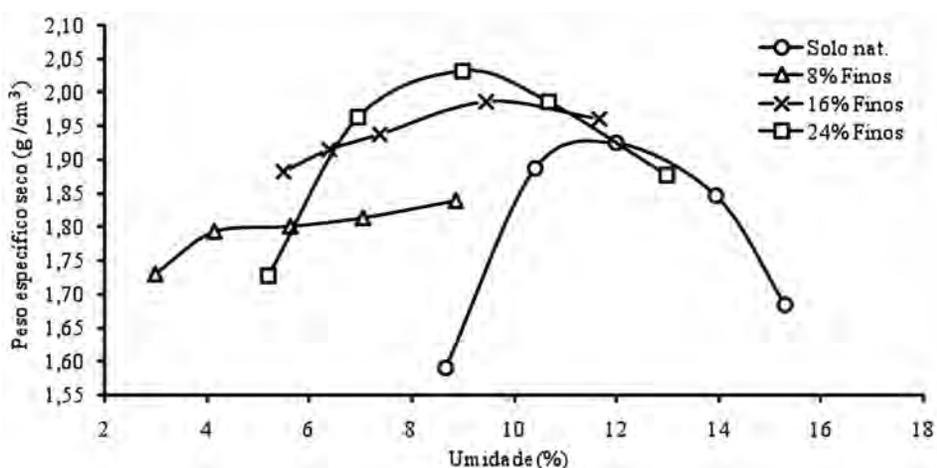


Fig. 3 – Curvas de compactação Proctor Normal obtidas para o solo natural e para as misturas com 8, 16 e 24% de finos.

3.2 – Ensaios realizados

3.2.1 – Ensaios de caracterização

A caracterização física do solo foi feita através da determinação da densidade real dos grãos, da granulometria, dos limites de consistência e da curva de compactação Proctor Normal.

Os ensaios de determinação da densidade real dos grãos e de análise granulométrica foram realizados, seguindo os procedimentos descritos nas normas NBR 7181 (1984) e DNER (1994), respectivamente. A determinação dos limites de liquidez e plasticidade foram realizadas conforme os métodos descritos nas normas NBR 6459 (1984) e NBR 7180 (1984), respectivamente. Por último, os ensaios de compactação na energia Proctor Normal foram realizados seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 7182 (1988).

3.2.2 – Ensaio triaxial convencional

Para avaliar o comportamento das poro-pressões do solo natural, foram realizados ensaios triaxiais convencionais do tipo CIU. Os corpos-de-prova foram submetidos a tensões confinantes efetivas de 50, 100 e 200 kPa e adensados por um período de 24 horas. Para garantir a condição de saturação, foram aplicadas contrapressões de até 290 kPa, através de incrementos sucessivos de no máximo 50 kPa, acompanhados do monitoramento do parâmetro B de Skempton (1954), até atingir valores de B que indicassem um grau de saturação próximo de 100%.

A aplicação das cargas foi feita através de um sistema com quatro colunas independentes de mercúrio, que permitem a execução simultânea de dois ensaios. As tensões aplicadas e as poro-pressões geradas nos corpos-de-prova foram monitoradas através de dois transdutores eletrônicos calibrados para pressões de até 1000 kPa com precisão de 1 kPa. O transdutor que mede a pressão externa é acoplado diretamente ao sistema de aplicação de carga, enquanto o que mede a pressão interna é acoplado à base da célula triaxial.

A prensa utilizada nos ensaios possui capacidade de 50 kN. A ruptura dos corpos de prova foi feita a uma velocidade, aproximadamente constante, de 0,1219 mm/min., a mesma empregada nos ensaios CIU comumente realizados pelo Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC para este tipo de solo. As deformações axiais foram obtidas através da medição do deslocamento relativo entre o pistão e a célula triaxial, feita por um extensômetro com precisão de 0,001 mm acoplado ao pistão da célula. As tensões geradas foram medidas com os mesmos anéis dinamométricos com capacidade de 10 e 50 kN.

3.2.3 – Ensaio triaxial com a célula desenvolvida

O procedimento de execução do ensaio triaxial utilizando a célula desenvolvida é praticamente o mesmo do ensaio convencional, não havendo a aplicação de contrapressão.

A primeira etapa para a realização do ensaio é a moldagem dos corpos-de-prova, que é feita utilizando os equipamentos de compactação confeccionados para o ensaio. As amostras de solo são compactadas na umidade ótima do ensaio Proctor, que também deve ser realizado utilizando os equipamentos construídos.

Após a moldagem, o corpo-de-prova é submetido a uma fase rápida de consolidação, através da aplicação de uma pressão de confinamento hidrostática. Esta etapa, com duração de uma hora, tem o objetivo de simular o efeito da sobreposição de pequenas camadas. A aplicação da pressão é feita através de um compressor de ar e controlada por um transdutor ligado à válvula por onde a pressão é aplicada.

Após a consolidação, tem início a etapa de cisalhamento. Esta etapa é realizada em uma prensa convencional para ensaios triaxiais, mas também pode ser realizada numa prensa de CBR ou numa prensa de adensamento adaptada. Os acréscimos de carga axial são medidos por um anel dinamométrico, enquanto as deformações axiais são medidas através de um extensômetro acoplado ao eixo transmissor. Desta forma, o ensaio fornece como resultados apenas os acréscimos de tensões mobilizados e as deformações axiais do corpo-de-prova.

Os corpos-de-prova são rompidos nas mesmas condições em que são compactados (ou extraídos do campo) e sem o impedimento da drenagem. Dessa maneira, acredita-se que os resultados do ensaio são mais próximos das condições reais de campo. A partir desses resultados, as análises de estabilidade são feitas em termos de tensões totais, considerando que os efeitos da sucção e das poro-pressões estejam incorporados nas respostas geradas pelos corpos-de-prova. Os ensaios realizados com a célula desenvolvida foram repetidos, utilizando a célula convencional, nas mesmas condições: sem aplicação de contrapressão.

4 – RESULTADOS OBTIDOS

4.1 – Ensaio triaxiais convencionais

Os ensaios triaxiais CIU convencionais foram realizados com o solo natural compactado nas condições do ponto ótimo da curva Proctor normal. As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, as curvas tensão-deformação e a geração de poro-pressões dos corpos-de-prova, durante o ensaio.

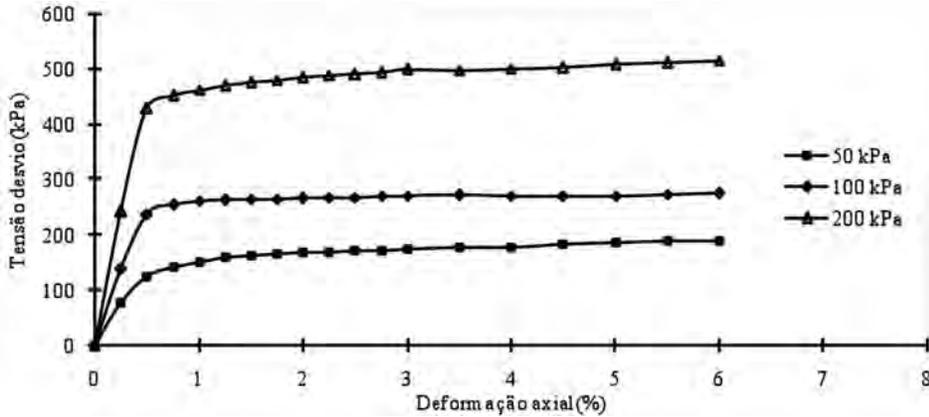


Fig. 4 – Curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios triaxiais CIU realizados com o solo natural, utilizando tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa.

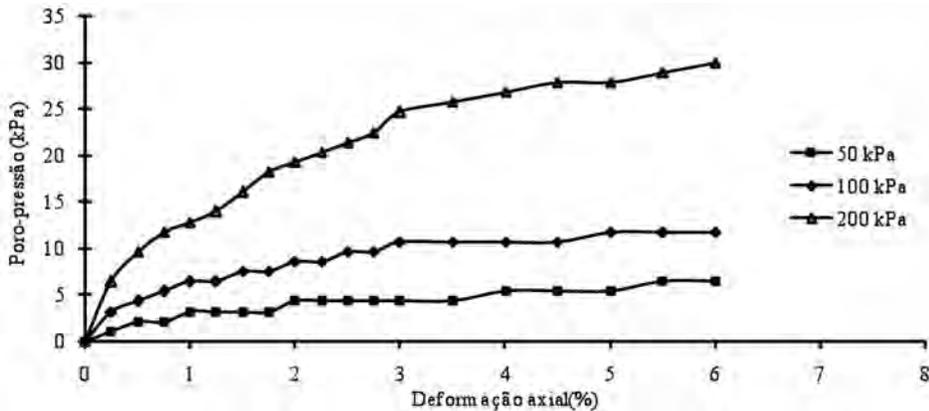


Fig. 5 – Geração de poro-pressão nos ensaios triaxiais CIU realizados com o solo natural, utilizando tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa.

Pelas Figuras 4 e 5, observa-se que o solo apresentou um comportamento tensão-deformação inicial aparentemente linear, com um ponto de plastificação bem definido. Para o nível de deformação deste ponto, foram gerados pequenos excessos de poro-pressões, crescentes com a tensão de confinamento. Este comportamento é similar ao apresentado pelos solos utilizados na construção de pequenas barragens de terra.

4.2 – Ensaios triaxiais para teste do equipamento

Para testar o equipamento desenvolvido, foram realizados ensaios triaxiais utilizando o solo natural compactado no ponto ótimo da curva Proctor Normal e utilizando as misturas de solo preparadas com teores de finos de 8, 16 e 24%, também compactadas no ponto ótimo da energia normal.

Os resultados dos ensaios triaxiais realizados com a célula desenvolvida utilizando o solo natural são apresentados na Figura 6. As curvas tensão-deformação obtidas com a célula desenvolvida não apresentaram um ponto de plastificação bem definido, como ocorreu nos ensaios CIU convencionais. Também foram verificados aumentos das tensões desvio, para as três tensões confinantes, até deformações axiais da ordem de 5%. Apesar do comportamento diferente, as máximas tensões axiais obtidas com as duas células foram da mesma ordem de grandeza.

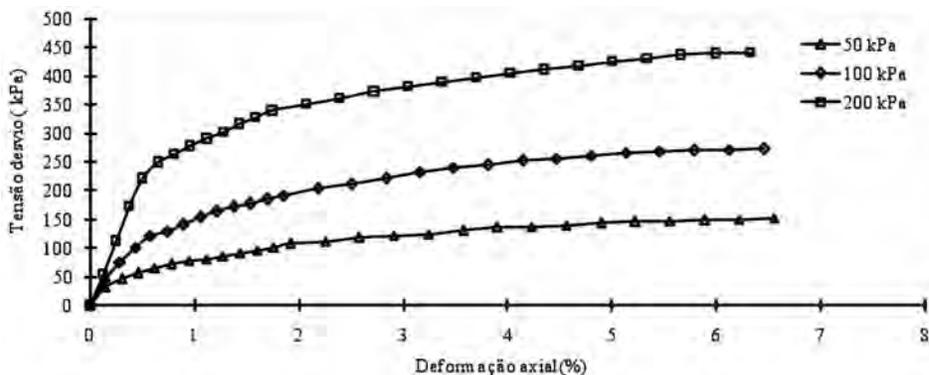


Fig. 6 – Curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios triaxiais realizados com a célula desenvolvida utilizando o solo natural e tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa.

Os resultados obtidos com as misturas de solo com 8, 16 e 24% de finos estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 7, 8 e 9, onde a letra A foi utilizada para representar a célula proposta e a letra B para representar a célula convencional.

Pelas Figuras 7, 8 e 9, percebe-se que os resultados obtidos com a célula desenvolvida foram bastante próximos dos obtidos com a célula convencional, apresentando maior conformidade para as misturas com percentuais de finos iguais a 8 e 16%. Estes resultados mostram que a célula desenvolvida é mais apropriada para solo com baixo teor de finos, onde a permeabilidade é relativamente alta e os efeitos da sucção são menos relevantes, o que facilita a drenagem do solo e reduz as variações de poro-pressões.

Embora os resultados obtidos com as misturas de 8 e 16% de finos tenham apresentado maior conformidade, as curvas obtidas com a mistura de 24% de finos também se mostraram bastante próximas, de modo que não houve grande discrepância entre os parâmetros de resistência obtidos com as duas células (Quadro 4). Isso indica que a célula criada, mesmo utilizando pressão confinante a ar e uma membrana de borracha, forneceu resultados coerentes.

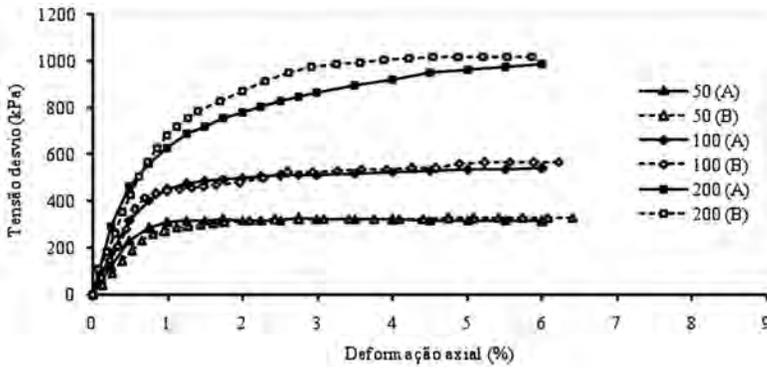


Fig. 7 – Curvas tensão-deformação obtidas para a mistura com 8% de finos, utilizando a célula triaxial desenvolvida (A) e a célula convencional (B).

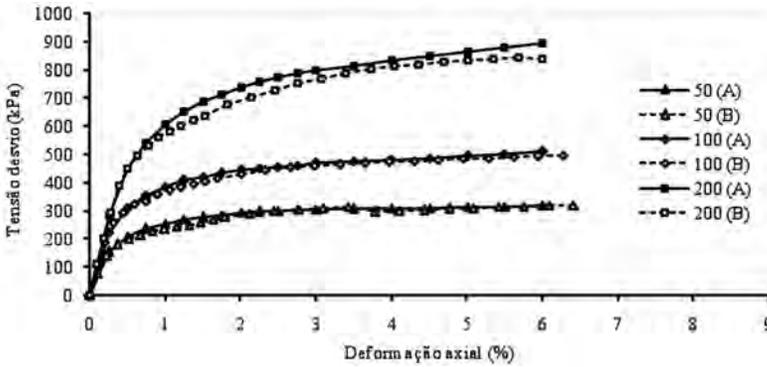


Fig. 8 – Curvas tensão-deformação obtidas para a mistura com 16% de finos, utilizando a célula triaxial desenvolvida (A) e a célula convencional (B).

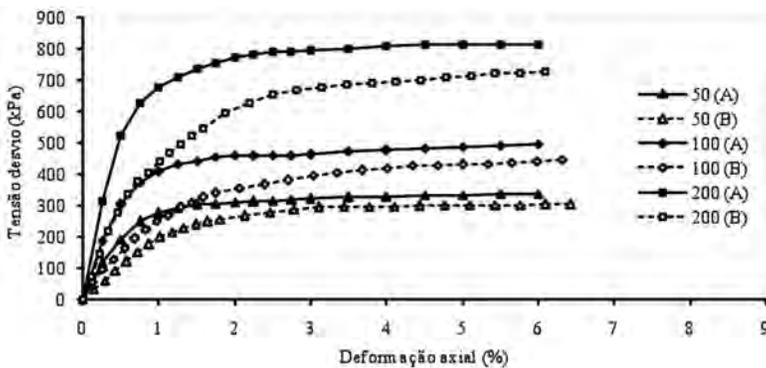


Fig. 9 – Curvas tensão-deformação obtidas para a mistura com 24% de finos, utilizando a célula triaxial desenvolvida (A) e a célula convencional (B).

4.3 – Comparação entre os resultados

O Quadro 4 apresenta os parâmetros de resistência obtidos com os ensaios triaxiais realizados com a célula convencional e a desenvolvida.

Quadro 4 – Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios triaxiais realizados com a célula desenvolvida e a célula convencional.

Material	Célula Convencional		Célula Desenvolvida	
	c (kPa)	ϕ (kPa)	c*(kPa)	ϕ^* (kPa)
Solo natural saturado	8,5	30,8	-	-
Solo natural não saturado	-	-	16,5	29,5
Mistura 24 % de finos	13,0	39,3	11,5	37,6
Mistura 16% de finos	1,0	41,7	2,0	40,4
Mistura 8% de finos	0,0	44,3	0,0	45,4

Os resultados do Quadro 4 mostram que os parâmetros obtidos com as duas células, para as misturas com 8, 16 e 24% de finos, foram bastante próximos. Os ensaios realizados com o solo natural também forneceram resultados próximos, sendo a coesão obtida na célula desenvolvida duas vezes maior que a coesão do ensaio CIU. Este aumento da coesão pode ter ocorrido devido à contribuição da sucção e ao fato de os ensaios terem sido realizados em condições diferentes de drenagem.

Acredita-se que para solos com baixo percentual de finos, como as misturas utilizadas, a sucção no entorno da umidade ótima de compactação seja muito baixa, diminuindo a sua influência sobre os resultados. Dessa forma, os parâmetros de resistência obtidos com a célula desenvolvida e com a célula convencional devem ser bastante próximos.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de uma célula para a realização de ensaios triaxiais em solos compactados rígidos. A célula facilita a execução do ensaio triaxial, possibilitando a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, em laboratórios que não disponham de grande infraestrutura e até mesmo no campo.

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que a célula desenvolvida fornece resultados concordantes, quando comparada à célula triaxial convencional. Desta forma, é possível a obtenção de parâmetros de resistência de solos compactados não saturados em condições mais próximas das encontradas no campo. Além disso, a execução do ensaio é bastante simples e seus custos são menores que os do ensaio triaxial convencional, viabilizando a obtenção de parâmetros de resistência para pequenas barragens.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará pelos equipamentos cedidos e pelo financiamento para a construção da célula.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DNER (1994). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem: *ME 093: Solos – determinação da densidade real*. Rio de Janeiro.
- Miranda, A.N. (1988). *Behavior of small dams during initial filling*. Dissertação de PhD, Colorado State University, Fort Collins, USA, 229p.
- NBR 6459 (1984). *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.
- NBR 7180 (1984). *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.
- NBR 7181 (1984). *Solo – Análise granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.
- NBR 7182 (1988). *Solo – Ensaio de Compactação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.
- Schnaid, F.; Consoli, N.C.; Mantaras, F.M. (1995). *O uso do ensaio pressiométrico na determinação de parâmetros de solos não saturados*. Solos e Rochas, n.18, v.4, pp.129-137.
- Skempton, A.W. (1954). *The pore-pressure coefficients A and B*. Géotechnique, London, v.4, pp.143-147.