



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

## **RELATÓRIO DE ESTÁGIO**



Foto: Eng. Paulo J. Brugger

Aluno: Gilberto dos Santos Giuzio

São José dos Campos/SP, 01 de Novembro de 2011

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Relatório Final de Estágio Curricular aceito em 01 de Novembro de 2011 pelos abaixo assinados:

---

Gilberto dos Santos Giuzio

---

Paulo Scarano Hemsí

Orientador/Supervisor na Empresa/Instituição

---

Paulo Ivo Braga de Queiroz

Orientador/Supervisor no ITA

---

Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

## **INFORMAÇÕES GERAIS**

### **Estagiário**

Nome do Aluno: Gilberto dos Santos Giuzio

Curso: Engenharia Civil-Aeronáutica

### **Empresa/Departamento**

Laboratório de Resistência e Deformabilidade dos Solos - ITA

### **Orientador/Supervisor da Empresa**

Paulo Scarano Hemsí

### **Orientador/Supervisor do ITA**

Paulo Ivo Braga de Queiroz

### **Período**

01/08/2010 a 03/04/2011.

Total de horas: 160 horas

## ÍNDICE

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introdução .....</b>                                                | <b>7</b>  |
| <b>2. A empresa .....</b>                                                 | <b>7</b>  |
| <b>3. Sobre o estágio curricular .....</b>                                | <b>7</b>  |
| <b>4. Atividades desenvolvidas .....</b>                                  | <b>8</b>  |
| <b>4.1 Motivação para o Trabalho com a Atapulgita .....</b>               | <b>9</b>  |
| <b>4.2 Motivação para o Trabalho com o Solo Residual .....</b>            | <b>10</b> |
| <b>5. Ensaio realizado .....</b>                                          | <b>10</b> |
| <b>6. Resultados Obtidos .....</b>                                        | <b>16</b> |
| <b>6.1) Resultados Obtidos com a Bentonita .....</b>                      | <b>16</b> |
| <b>6.2) Resultados Obtidos com o Solo Residual .....</b>                  | <b>17</b> |
| <b>6.2.1) Resultados de Granulometria .....</b>                           | <b>18</b> |
| <b>6.2.2) Resultados de Compactação Proctor Normal e Modificado .....</b> | <b>19</b> |
| <b>6.2.3) Resultados dos Ensaio Triaxiais .....</b>                       | <b>21</b> |
| <b>7. Conclusão .....</b>                                                 | <b>26</b> |
| <b>8. Referências .....</b>                                               | <b>27</b> |

# **1. Introdução**

O presente relatório descreve as atividades desenvolvidas pelo aluno durante o estágio curricular supervisionado de 160 horas realizado no período entre agosto de 2010 e abril de 2011 no Laboratório de Resistência e Deformabilidade dos Solos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. O objetivo deste estágio foi adquirir o conhecimento de técnicas e metodologias de ensaios de laboratório em solos, contribuindo para a formação geotécnica do aluno.

## **2. A empresa**

O estágio foi desenvolvido no Laboratório de Resistência e Deformabilidade dos Solos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, que tem por função realizar ensaios e estudos com solos de diversas naturezas, desde sedimentos moles até solos residuais, podendo realizar ensaios de caracterização (granulometria, limites de Atterberg, massa específica dos grãos), compactação, permeabilidade, adensamento e ensaios de resistência ao cisalhamento, dos tipos compressão simples, cisalhamento direto e compressão triaxial.

A missão do laboratório é contribuir para a formação geotécnica dos alunos do curso de Engenharia Civil-Aeronáutica, e realizar pesquisas em conjunto com alunos de Pós-Graduação da divisão de Engenharia Civil, haja visto a relevância dos trabalhos geotécnicos nas obras de forma geral, aterros, aeroportos, estradas, fundações, taludes, túneis, entre outras.

Agradecemos ao Eng. Paulo José Brugger (Brugger Engenharia Ltda.) pelo fornecimento das amostras de solo utilizadas neste estágio.

## **3. Sobre o estágio curricular**

O estágio Curricular Supervisionado faz parte do projeto pedagógico e é componente curricular obrigatória dos cursos de graduação em engenharia do ITA, devendo abranger um mínimo de horas especificado no currículo aprovado pela congregação referente a cada curso de engenharia do ITA.

O estágio tem por objetivo:

- 1) Permitir ao aluno vivenciar um ambiente em que estejam presentes situações típicas do profissional de engenharia, nas quais possa desenvolver habilidades e competências relativas a: equacionamento e solução de problemas práticos, trabalho em equipe, planejamento, organização e atendimento a cronogramas e orçamentos, integração de sistemas complexos e inserção em projetos mais amplo dos objetivos da empresa ou instituição.
- 2) Permitir ao futuro engenheiro experimentar a realidade do trabalho profissional em uma ou mais situações, de modo que possa se tornar ciente inclusive de outros aspectos de seu desenvolvimento pessoal que devem ser trabalhados e que não estiveram envolvidos até então durante suas atividades normais como aluno de graduação.

O trabalho foi desenvolvido durante o período de agosto de 2010 a abril de 2011 e teve um papel importante ao complementar a formação geotécnica do aluno através do contato direto e prático com instrumentos de análise de solos, sendo ainda um primeiro contato com a pesquisa científica. A experiência pode ser considerada importante para a formação de um engenheiro de projetos/obras, para o qual é importante conhecer melhor de onde se originam, e como são obtidos no laboratório, os parâmetros de solos com os quais são desenvolvidos os projetos, assim como para um engenheiro que planeje seguir uma carreira acadêmica onde há a necessidade de analisar ensaios encontrando soluções novas e desenvolvendo as melhores maneiras de realizar um ensaio, seja seguindo uma norma pré existente ou possivelmente propondo novos métodos.

## **4. Atividades desenvolvidas**

O montante de trabalho realizado no laboratório, pelo aluno, pode ser dividido em duas etapas:

- A primeira etapa: em realizar ensaios de determinação da permeabilidade de uma argila especial, constituída pelo argilo-mineral Atapulgita, quando em contato com soluções salinas capazes de reagir com a própria Atapulgita causando alteração de sua estrutura e mudança de sua permeabilidade.
- A segunda etapa: realizar ensaios de determinação da resistência ao cisalhamento em ensaios triaxiais de um solo residual micáceo utilizado nas obras de um muro de grande altura

reforçado com geogrelhas e face verde envelopada, próximo ao rodoanel de São Paulo (ver foto de capa).

#### **4.1 Motivação para o Trabalho com a Atapulgita**

Na primeira etapa, a idéia era comparar a permeabilidade da atapulgita em água pura e em soluções salinas de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ). Também seriam feitos ensaios semelhantes com a bentonita para efeito de comparação.

A atapulgita é uma argila que, diferentemente da bentonita, apresenta cristais modelados em formato de agulha. O seu uso ocorre principalmente na indústria petrolífera como fluido de perfuração de poços e como um substrato para a produção de tintas, revestimentos, adesivos, etc., tendo sido assim denominada devido à Attapulgis, Geórgia (EUA), local onde foi obtida pela primeira vez.

Assim como a atapulgita, a bentonita é um argilo-mineral com grãos muito pequenos, elevada superfície específica e alta capacidade de adsorção de água. Consiste principalmente de montmorillonita (60 a 80% em peso) podendo conter outras argilas em maior ou menor proporção (e.g., illita e caulinita), além de quartzo, feldspatos, etc. Forma-se geralmente por alteração de cinzas vulcânicas. Contém muitas bases e ferro. O nome advém de um depósito em Fort Benton, EUA.

Um dos principais usos da bentonita é servir como material de camadas impermeabilizantes em aterros sanitários. No entanto, a permeabilidade da bentonita aumenta consideravelmente quando em contato com soluções salinas. A princípio, sabe-se que a atapulgita possui maior permeabilidade que a bentonita quando em contato com água pura; contudo, em contato com uma solução salina o aumento de permeabilidade sofrido pela atapulgita é menor do que aquele sofrido pela bentonita. Dessa forma, a atapulgita pode ser, do ponto de vista técnico, um melhor argilo-mineral para construção de camadas de revestimento de fundo de aterros sanitários, uma vez que sua permeabilidade permanece mais baixa para soluções salinas, em comparação com o que ocorre com a bentonita. A idéia do trabalho era comprovar essa situação empregando especificamente uma atapulgita brasileira proveniente do estado do Piauí.

No entanto houve a impossibilidade de se conseguir o material necessário (amostras da atapulgita do Piauí) dentro do cronograma exigido, e houve a necessidade de mudar o objetivo do estágio.

## **4.2 Motivação para o Trabalho com o Solo Residual**

A ocorrência das obras de construção de um muro de face verde de grande altura (até 27 m) envelopado com geossintéticos construído para o Rodoanel de São Paulo, e da possibilidade de realizar ensaios triaxiais de resistência ao cisalhamento de forma a balizar valores de parâmetros de resistência do solo que pudessem ser utilizados pelo projetista da obra, proporcionou a motivação para o trabalho com o solo residual. O projeto do muro foi desenvolvido pela empresa Brugger Eng. Ltda. Amostras do solo residual foram enviadas para o Laboratório em setembro de 2010. Tal trabalho será descrito em maior detalhe no restante deste relatório.

## **5. Ensaios realizados**

Os ensaios geotécnicos realizados durante este estágio, com amostras de bentonita ou do solo residual micáceo provenientes da obra do muro reforçado, foram os seguintes:

- Granulometria;
- Limite de Liquidez;
- Compactação Proctor normal e modificado;
- Permeabilidade, e
- Compressão Triaxial.

- **Ensaio de Granulometria**



A Análise Granulométrica dos solos é o processo pelo qual se define a distribuição mássica dos tamanhos dos grãos ou partículas do solo, para faixas pré-estabelecidas, calculando-se a percentagem que cada fração possui em relação à massa total da amostra. Obtém-se daí a curva granulométrica, como mostrada na Figura 1. A Norma Brasileira para análise granulométrica de solos é a NBR-07181/1984- Solo: Análise Granulométrica.

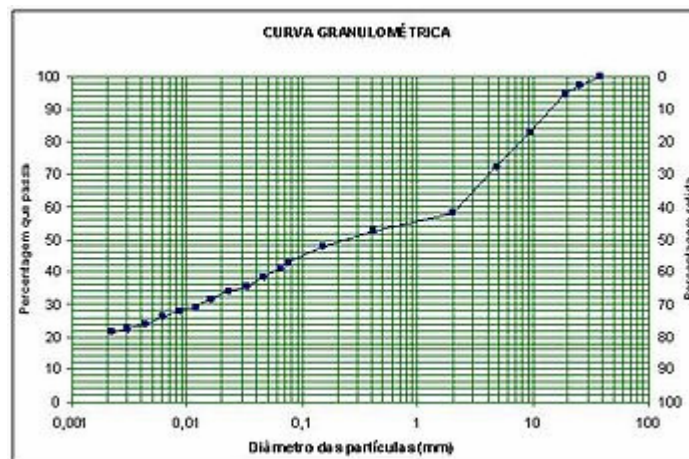


Figura 1: Representação de uma curva granulométrica de solo (Wikipédia,2011)

Para a fração grosseira do solo, a distribuição granulométrica é feita através de peneiramento, e para a fração fina (siltes e argilas) realizada através do ensaio de sedimentação, que se baseia na Lei de Stokes, segundo a qual quanto maior a partícula, maior será sua velocidade terminal de sedimentação.

- **Ensaio de Limite de Liquidez**

O ensaio para determinação do Limite de Liquidez é normalizado pela NBR 6459/1984- Solo: Limite de Liquidez. A partir do levantamento da Curva de Fluidez do solo, consiste na determinação do teor de umidade correspondente a 25 golpes no aparelho de Casagrande.

Para teores de umidade crescentes, aplicam-se golpes no aparelho de Casagrande até o fechamento de parte de uma ranhura inicialmente aberta no solo. Os resultados são plotados com o número de golpes nas ordenadas, em escala logarítmica e os teores de umidade nas

abscissas, devendo-se obter pelo menos quatro pontos para a construção da Curva de Fluidez (Figura 2).

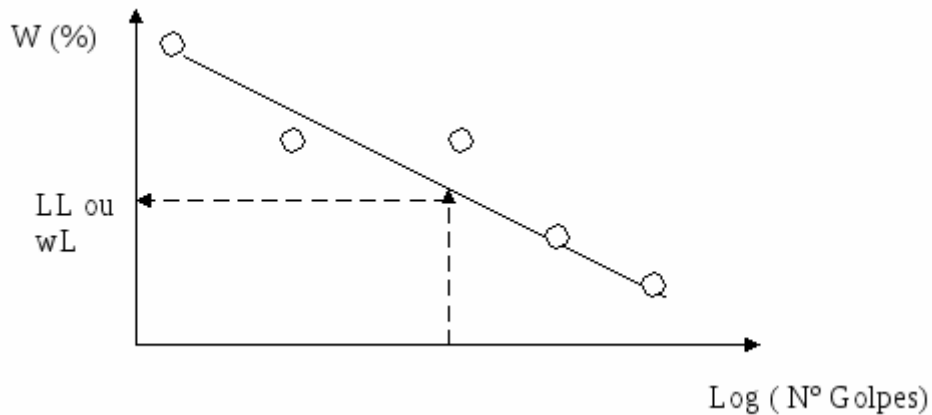


Figura 2: Representação da obtenção do limite de liquidez a partir da Curva de Fluidez (Ecivilnet ,2011)

### • Ensaios de Compactação Proctor Normal e Modificado

Os ensaios de compactação Proctor normal e modificado são de fundamental importância à especificação e controle de qualidade de aterros de solo compactado, uma vez que permitem obter a relação densidade seca máxima versus teor de umidade para a energia e o método de compactação empregados. Seus resultados são extrapolados para o campo, onde permitem definir a especificação de método construtivo do aterro e, posteriormente, controlar sua execução. A metodologia foi desenvolvida pelo engenheiro Ralph Proctor em 1933. No Brasil, seguem a norma NBR 7182/1984- Solo: Ensaios de Compactação.

O ensaio consiste em compactar uma porção de solo em um cilindro de volume conhecido, fazendo-se variar a umidade de forma a obter curva de compactação em formato de “sino”, da qual se obtém a umidade ótima de compactação. O ensaio pode ser realizado em três níveis de energia de compactação, conforme as especificações da obra: normal, intermediária e modificada.

A energia de compactação é dada pela equação:

$$E = \frac{n * N * P * H}{V}$$

Onde:

E: energia aplicada na amostra de solo;

n: número de camadas a serem compactadas no cilindro de compactação;

N: número de golpes aplicados por camada;

P: peso do soquete;

H: altura de queda do soquete; e

V: volume do cilindro.

Para o ensaio Proctor Normal é utilizado soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de 30 cm, compactando-se o solo em 3 camadas com 26 golpes por camada. No ensaio Proctor Modificado, um soquete de 5 kg cai de uma altura de 45 cm, compactando-se o solo em 5 camadas com 50 golpes por camada. Na Figura 3 encontra-se um exemplo de curva de compactação construída no ensaio.

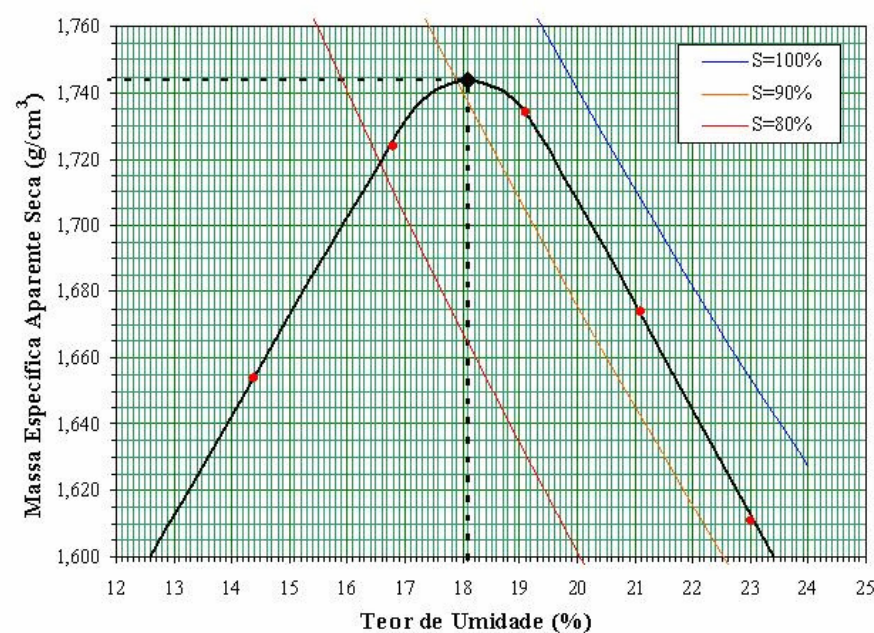


Figura 3. Representação da curva de compactação de solo (Wikipédia. 2011).

- **Ensaio de Permeabilidade**

Com o Ensaio de Permeabilidade objetiva-se determinar o coeficiente de condutividade hidráulica de um solo, de acordo com as normas NBR 13292/1995- Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante, e NBR 14545/2000- Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.

O permeômetro de carga constante se adequa à determinação da condutividade hidráulica de solos granulares, tais como solos com predominância de grãos nas frações areia e/ou pedregulho. Este ensaio consta de dois reservatórios com níveis de água mantidos constantes. Medida a vazão e conhecidas as dimensões do corpo de prova, calcula-se a condutividade hidráulica através da simples aplicação da Lei de Darcy.

- **Ensaio de Compressão Triaxial**

O tipo particular de ensaio geotécnico para a determinação da resistência ao cisalhamento de solos por meio da compressão em câmara triaxial em amostra adensada e rompida sem drenagem é definido pela norma dos EUA ASTM D4767 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils (Figura 4).

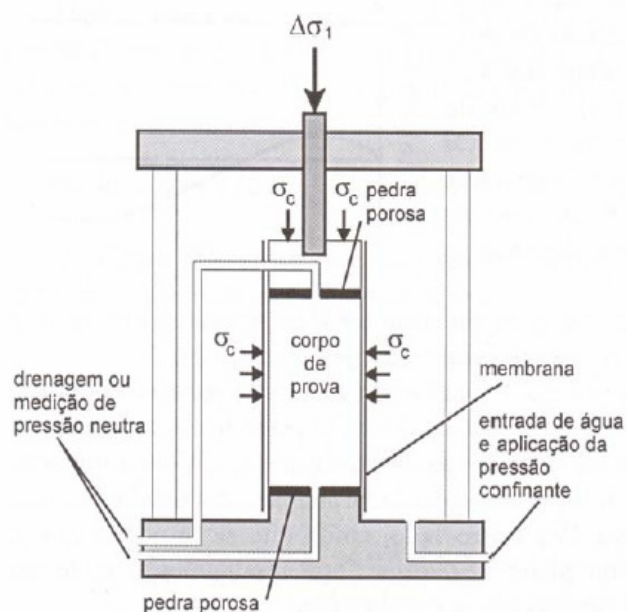


Figura 4. Montagem esquemática de ensaio de compressão em câmara triaxial (Souza Pinto, 2000).

Os ensaios realizados no presente trabalho foram realizados a partir de corpos-de-prova cilíndricos moldados utilizando a compactação Proctor Normal, cortados no torno até as dimensões aproximadas de 3,5 cm de diâmetro por 7,0 cm de altura (Figura 5).



Figura 5: Aspecto do corpo-de-prova compactado (após a ruptura) utilizado em ensaio de compressão triaxial.

O corpo-de-prova é colocado na base da câmara triaxial, com uma pedra porosa na sua base e outra no seu topo, então é colocado uma membrana impermeável envolvendo a amostra que é presa por anéis de borracha (o-rings), o corpo-de-prova é conectado à linhas de drenagem para permitir drenagem até as buretas do painel de aplicação das pressões. Em seguida é iniciada a etapa de saturação do corpo-de-prova, com determinação do parâmetro de pressão neutra  $B$ . Após saturação, é iniciada a etapa de adensamento do corpo-de-prova para o nível de tensão desejado, com medida da variação volumétrica e verificação da dissipação das sobre-pressões neutras no mesmo. Dá-se início então à etapa de cisalhamento do corpo-de-prova, com as linhas de drenagem fechadas. São aplicados carregamentos axiais por meio de pistão conectado à prensa, medindo-se em intervalos de tempo, o acréscimo de tensão axial que está atuando e a deformação vertical do corpo de prova. A ruptura é atingida quando se atinge uma força axial máxima suportada pelo corpo-de-prova ou, de forma convencional, após atingidos 15 a 20 % de magnitude de deformação vertical. Obtido  $\sigma_1$ , os círculos de Mohr são traçados com os pares ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ) obtidos no ensaio. Devem ser realizados três ou mais ensaios com diferentes tensões confinantes, de modo a se obter uma envoltória de Mohr-Coulomb para o solo, conforme mostrado na Figura 6.

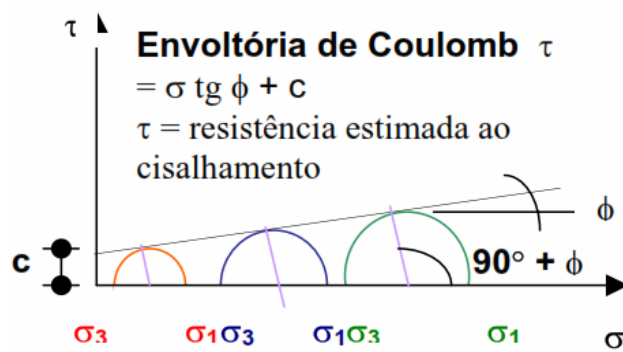


Figura 6: Representação de uma envoltória de Mohr-Coulomb (Souza Pinto 2000)

A força normal que é aplicada ao corpo de prova pelo pistão axial, dividida pela seção transversal do corpo de prova e somada a  $\sigma_3$  corresponde à tensão axial  $\sigma_1$ . A pressão neutra desenvolvida na água intersticial do corpo de prova é medida utilizando-se um transdutor de pressão capaz de medir pressões na água sem exigir variações de volume d'água intersticial da amostra.

## 6. Resultados Obtidos

### 6.1) Resultados Obtidos com a Bentonita

Durante a primeira etapa do estágio (ver Item 4), foram iniciados os trabalhos com a argila bentonita. Desta etapa, destaca-se a realização de ensaios de limite de liquidez, ensaio este considerado de difícil realização neste tipo de material, dadas suas características de elevada adsorção de água, seguida de elevado inchamento volumétrico, e de elevada plasticidade. O limite de liquidez para a bentonita testada foi determinado a partir da Curva de Fluidez composta por sete ensaios (sete pontos), como mostrado na Figura 7 abaixo.

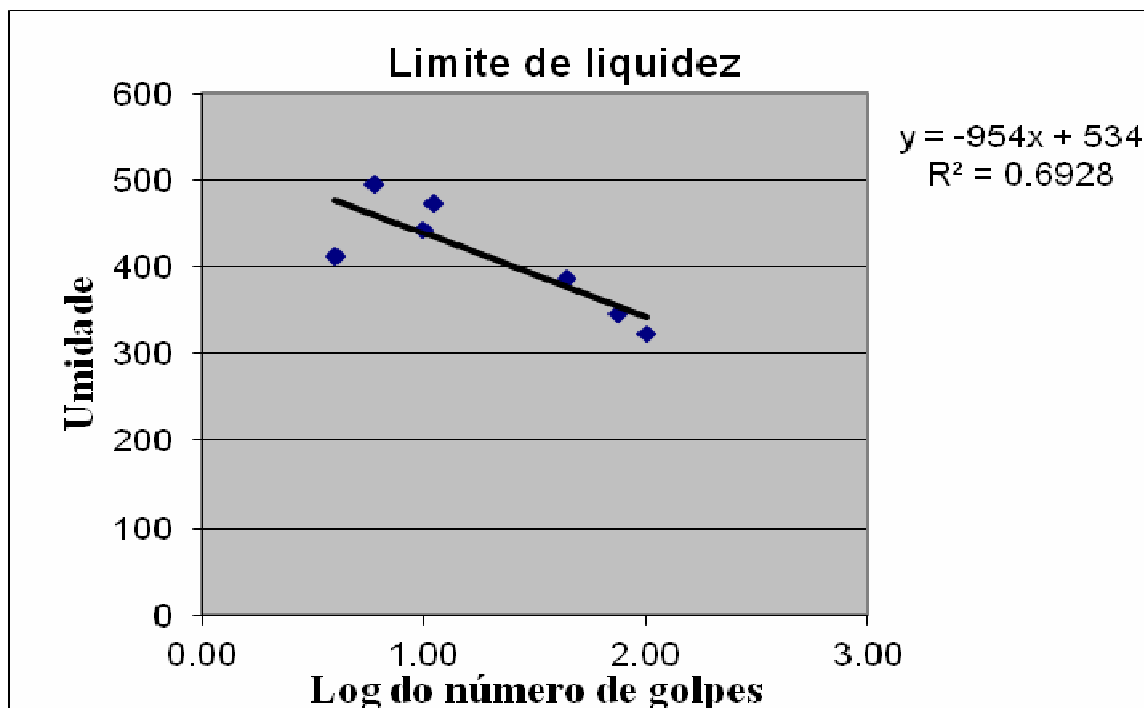


Figura 7. Curva de Fluidez da bentonita testada no laboratório, para a determinação de seu limite de liquidez.

A partir dos resultados dos testes realizados, o teor de umidade gravimétrica correspondente aos 25 golpes no aparelho de Casagrande, convencionado como LL, foi determinado por meio de regressão linear, como mostrada na Figura 7:

$$LL = -95 \cdot \text{Log}(25) + 534 = 401,2$$

Logo, o valor de **LL = 401** foi obtido para a bentonita testada, valor este que se compara de forma consistente com valores reportados na literatura, por exemplo, para bentonita de qualidade média LL ~ 300 e 500 (Heineck 2002)

## 6.2) Resultados Obtidos com o Solo Residual

Já na segunda etapa do estágio (ver Item 4), trabalhando com o solo residual, foram realizados ensaios de ensaios de granulometria, compactação Proctor normal e modificado, e quatro ensaios de compressão em câmara triaxial.

### 6.2.1) Resultados de Granulometria

Foi realizada a análise granulométrica do solo residual micáceo, englobando peneiramento da fração grosseira e sedimentação da fração fina do solo. A curva granulométrica completa foi composta a partir da junção dos resultados dos dois ensaios. Como mostrado na Figura 8, as porcentagens aproximadas de cada fração granulométrica no solo residual são as seguintes:

- 16 % de argila
- 61 % de silte
- 19 % de areia fina
- 2 % de areia média
- 1,5 % de areia grossa
- 0,5 % de pedregulho

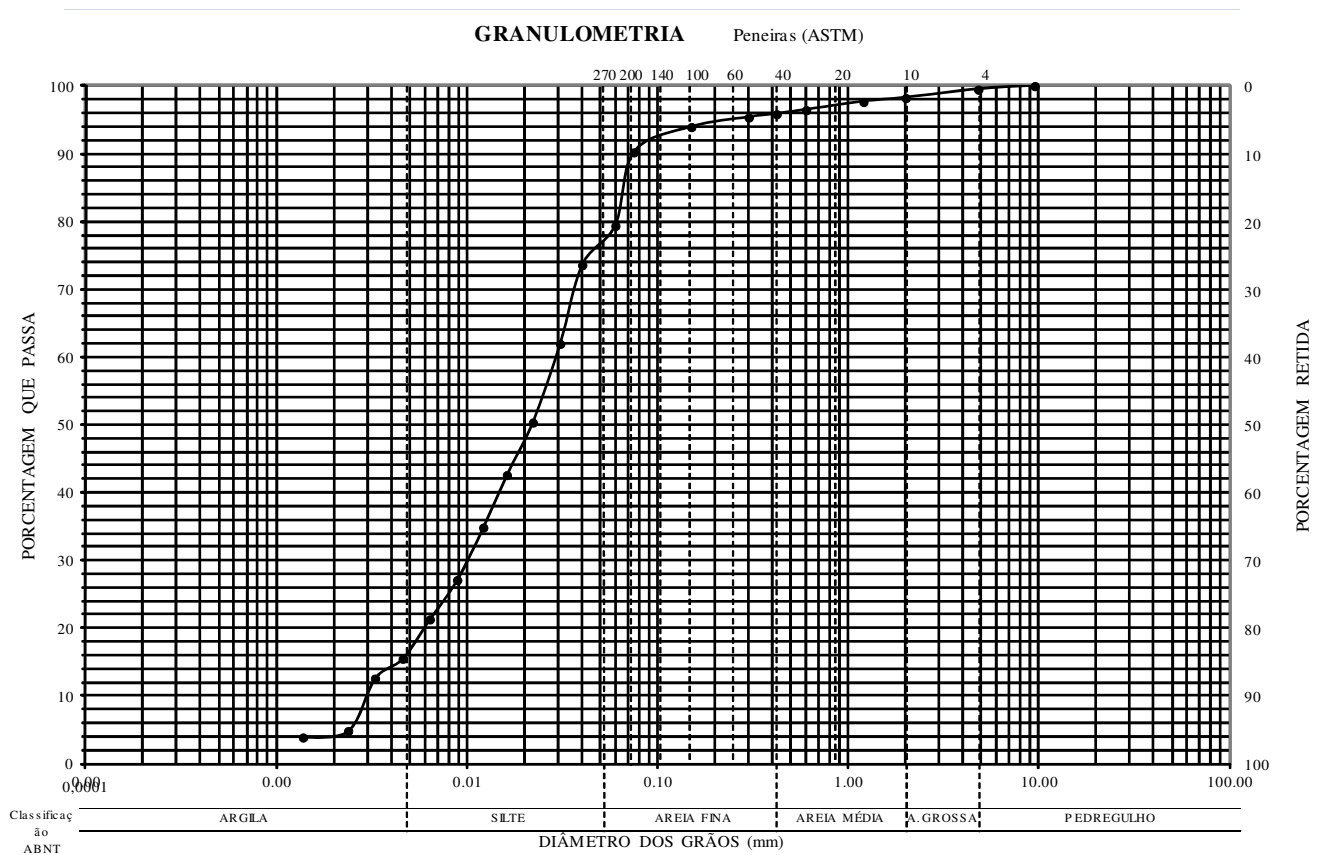


Figura 8. Curva granulométrica por peneiramento e sedimentação, para o solo residual micáceo testado no laboratório.



### 6.2.2) Resultados de Compactação Proctor Normal e Modificado

Foram realizadas duas séries de ensaios de compactação, Proctor Normal e Modificado, no laboratório, para o solo residual micáceo. Ao todo, foram realizados 15 ensaios de compactação, sendo 9 (nove) utilizando a energia Proctor Normal e 6 (seis) utilizando a energia Proctor Modificado. Dentro de cada série, foi variado o teor de umidade gravimétrica, de forma a se obter curvas de compactação, conforme mostrado nas Figuras 9 e 10 a seguir.

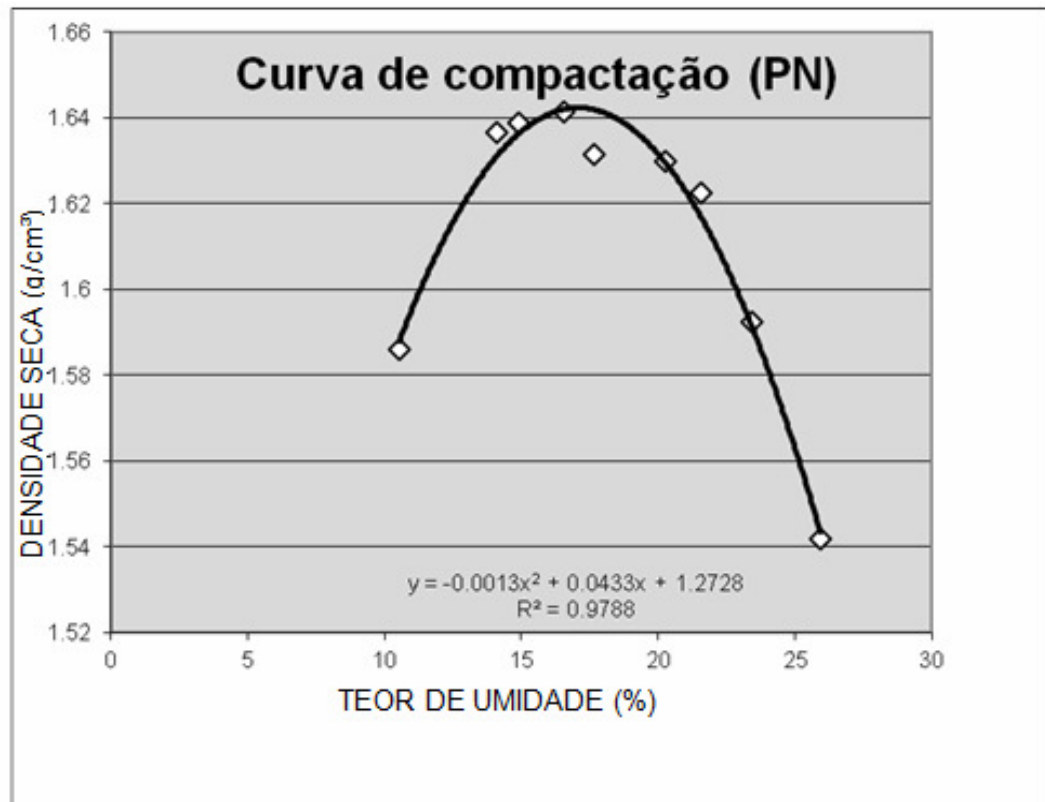


Figura 9. Curva de compactação Proctor Normal para o solo residual micáceo testado no laboratório.

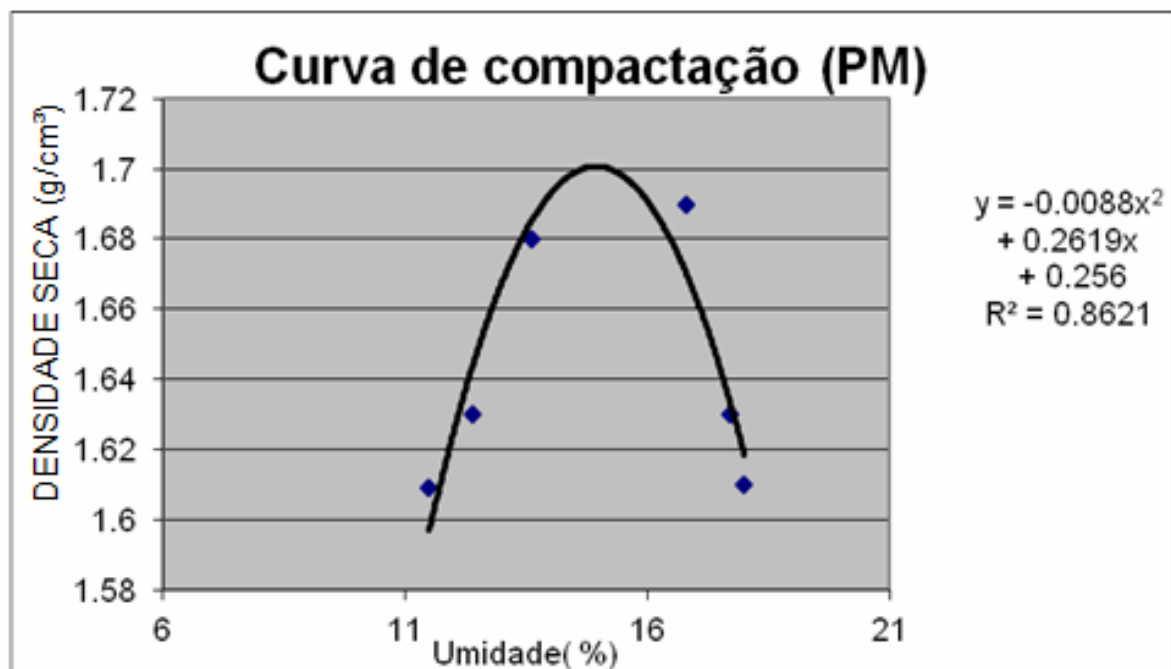


Figura 10. Curva de compactação Proctor Modificado para o solo residual micáceo testado no laboratório.

Utilizando regressões simples parabólicas (ver Figuras 9 e 10), para aproximar o formato esperado das curvas de compactação, foi possível determinar analiticamente os máximos das parábolas, correspondendo aos pontos de máxima densidade seca, ocorrendo para o chamado teor de umidade ótima. Tais resultados foram os seguintes:

Compactação Proctor Normal

Teor de umidade ótima = 17.1 %

Densidade seca máxima = 1.63 g/cm³

Compactação Proctor Modificado

Teor de umidade ótima = 14.9 %

Densidade seca máxima = 1.69 g/cm³

De forma consistente com a literatura (e.g., Lambe e Whitman 1979), para o solo testado foi verificada a diminuição do teor de umidade ótima e o aumento da densidade seca máxima com aumento da energia de compactação, de Proctor Normal para Modificado.

### **6.2.3) Resultados dos Ensaio Triaxiais**

Foram realizados 4 (quatro) ensaios de compressão em câmara triaxial com o solo residual micáceo, do tipo Adensado-Não Drenado, com medida de pressões neutras. Os ensaios foram realizados para corpos-de-prova compactados no teor de umidade ótima do Proctor Normal.

Com o objetivo de determinar uma envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Mohr-Coulomb) foram realizados ensaios para três diferentes valores de tensão lateral de confinamento, a saber  $\sigma_3' = 50, 100$  e  $200$  kPa. Devido ao fato do primeiro ensaio com a tensão da câmara com  $200$  kPa não sair compatível com os demais, foi repetido para melhor confiabilidade do experimento. Os dados dos ensaios foram capturados no computador, empregando sistema de aquisição, e calculados com base em algoritmo desenvolvido em MATLAB (Mathworks) pelo Prof. P. Hemsí. Os resultados obtidos serão apresentados de forma sucinta com base nos gráficos dos ensaios realizados. Não será apresentado detalhamento do cálculo do ensaio (ver norma).

#### Comportamento Tensão-Deformação

A Figura 11 apresenta os resultados de acréscimo de tensão axial (tensão desviatória) versus deformação axial (vertical) do corpo-de-prova, para os quatro ensaios realizados, sendo:

**Ensaio 1:  $\sigma_3' = 55$  kPa,**  
**Ensaio 2: ,  $\sigma_3' = 100$  kPa, e**  
**Ensaio 3 e 4:  $\sigma_3' = 200$  kPa**

Conforme esperado, verifica-se o aumento aproximadamente proporcional da tensão desviatória de ruptura (ainda que convencionada, para uma deformação axial da ordem de 15

%), com o aumento da tensão de confinamento lateral  $\sigma_3'$ , entre os ensaios 1, 2 e 3 (círculos verdes).

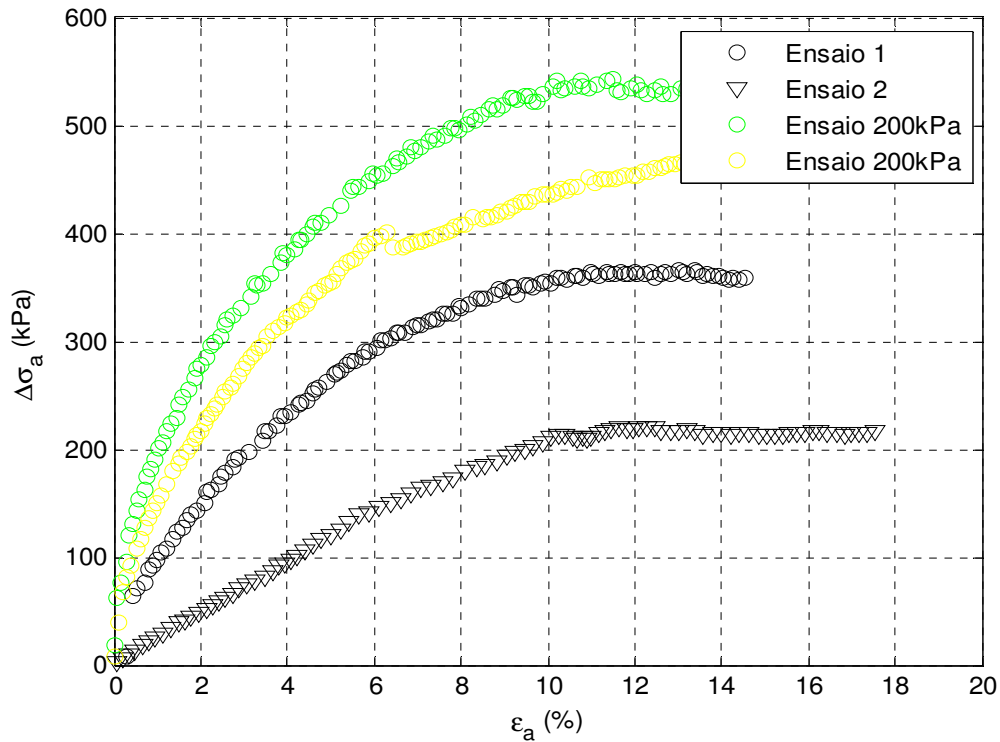


Figura 11. Resultado dos ensaios triaxiais (Ensaio 1 a 4), em termos de comportamento tensão desviatória versus deformação axial (vertical) do corpo-de-prova.

#### Comportamento de Pressões Neutras (da Água dos Poros)

As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados obtidos nos ensaios para pressão neutra total e excesso de pressão neutra gerado pelo carregamento axial (sobre-pressão neutra) versus a deformação axial do corpo-de-prova, para os quatro ensaios realizados.

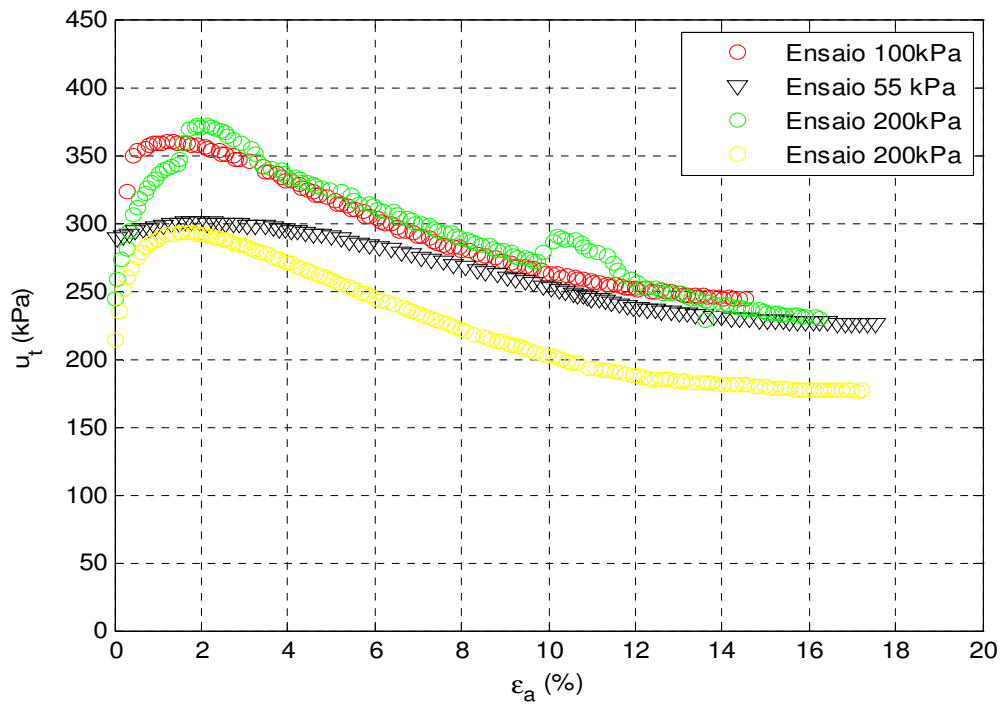


Figura 12. Resultado dos ensaios triaxiais (Ensaio 1 a 4), em termos de comportamento da pressão neutra total versus deformação axial (vertical) do corpo-de-prova.

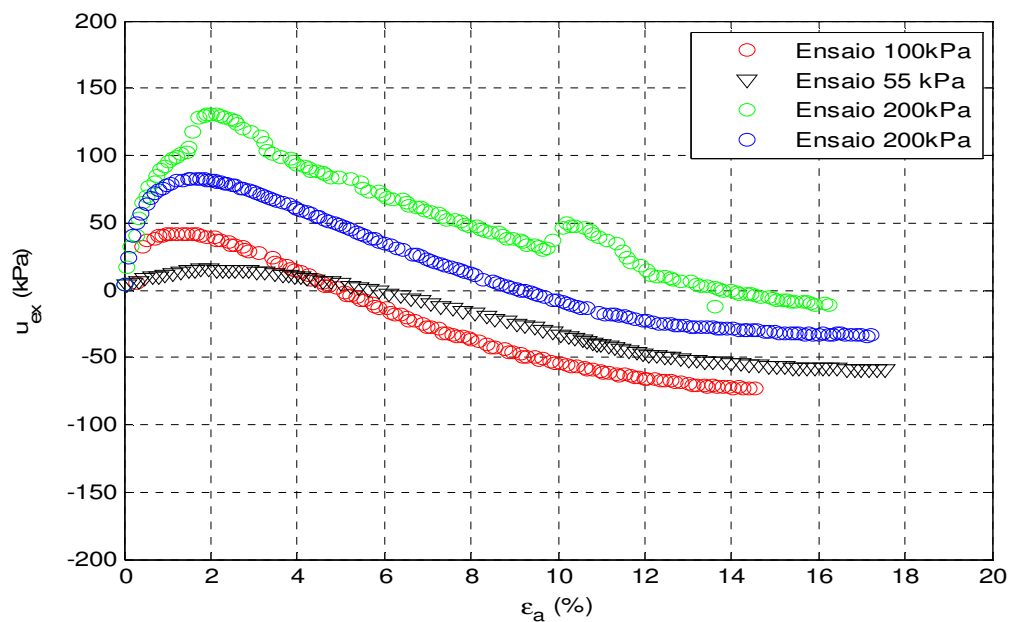


Figura 13. Resultado dos ensaios triaxiais (Ensaio 1 a 4), em termos de comportamento do excesso de pressão neutra gerado pelo carregamento axial versus deformação axial (vertical) do corpo-de-prova.

Os resultados mostrados na Figura 13 indicam que para compressão axial com as tensões confinantes efetivas de 55 kPa, 100 kPa e 200 kPa, foram inicialmente gerados excessos de pressão neutra positivos. Contudo, para os dois níveis de tensão confinante mais baixos, o cisalhamento a partir de um certo ponto gerou tendência dilatante no corpo-de-prova, indicada pelas pressões neutras negativas registradas nos ensaios (não-drenados). Já para a tensão confinante efetiva de 200 kPa, permaneceu a tendência de compressão, e não a dilatante, até o final do ensaio. Tal comportamento é o esperado, à luz do conceito de índice de vazios crítico que é função do nível de confinamento efetivo do solo.

### Comportamento de Trajetórias de Tensão

O passo seguinte foi efetuar o traçado das trajetórias de tensão (definição do MIT, segundo Lambe e Whitman 1979) para tensões totais (TTT) e efetivas (TTE) nos ensaios realizados. As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados, englobando TTT e TTE para os 4 ensaios realizados (Figura 14) e para os três melhores ensaios (Figura 15).

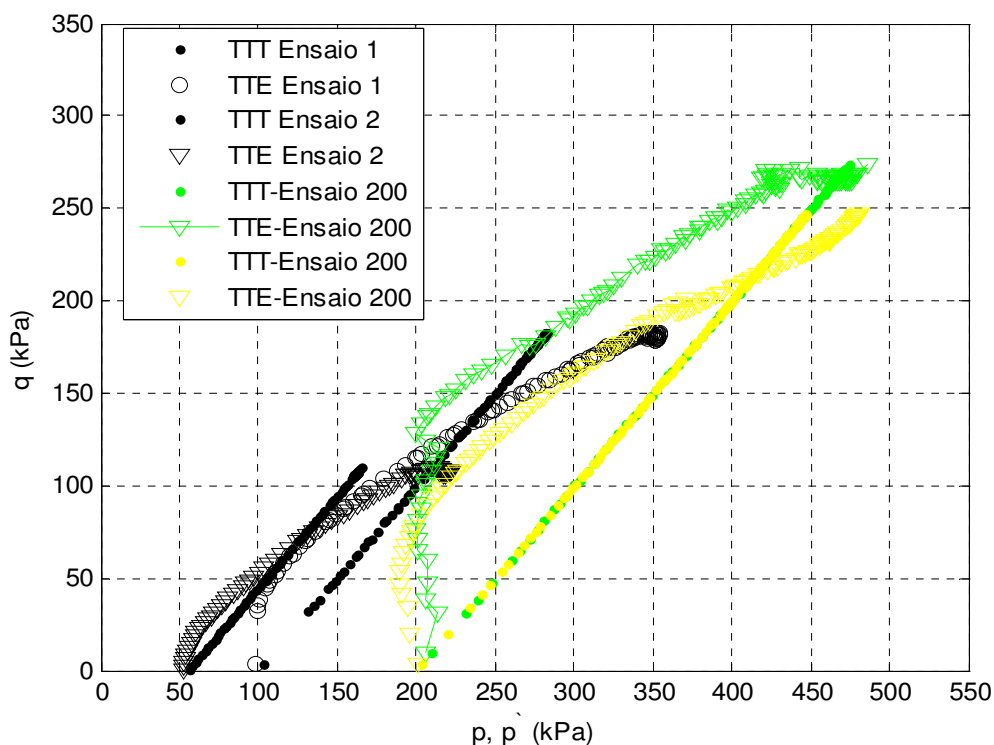


Figura 14. Resultado dos ensaios triaxiais, em termos de trajetórias de tensão totais e efetivas, para os quatro ensaios realizados.

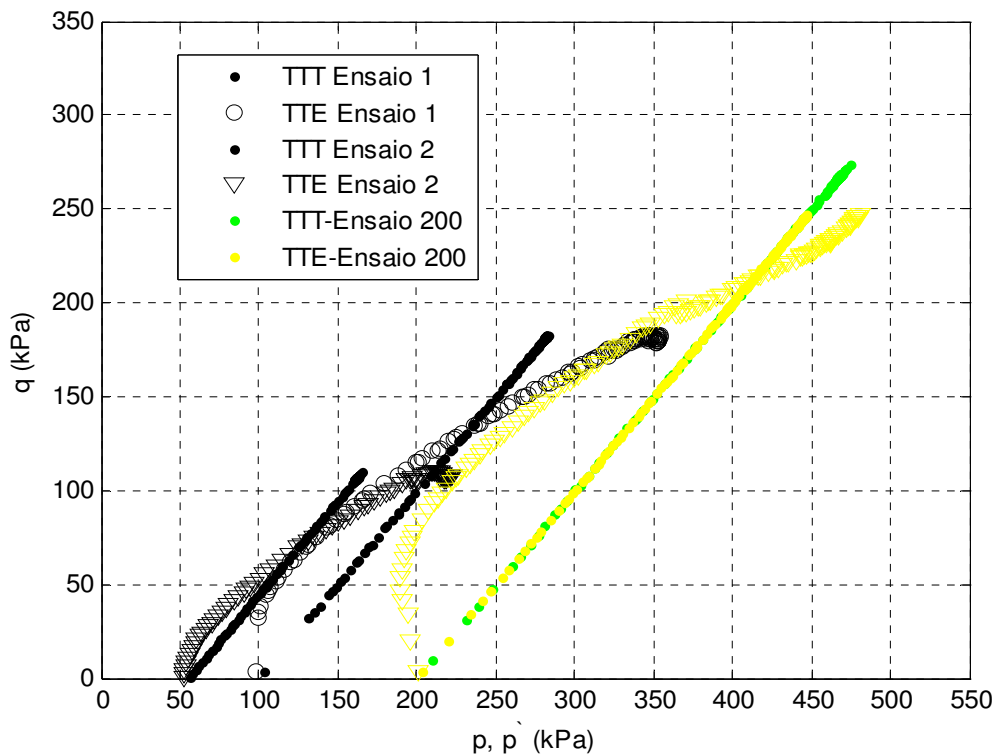
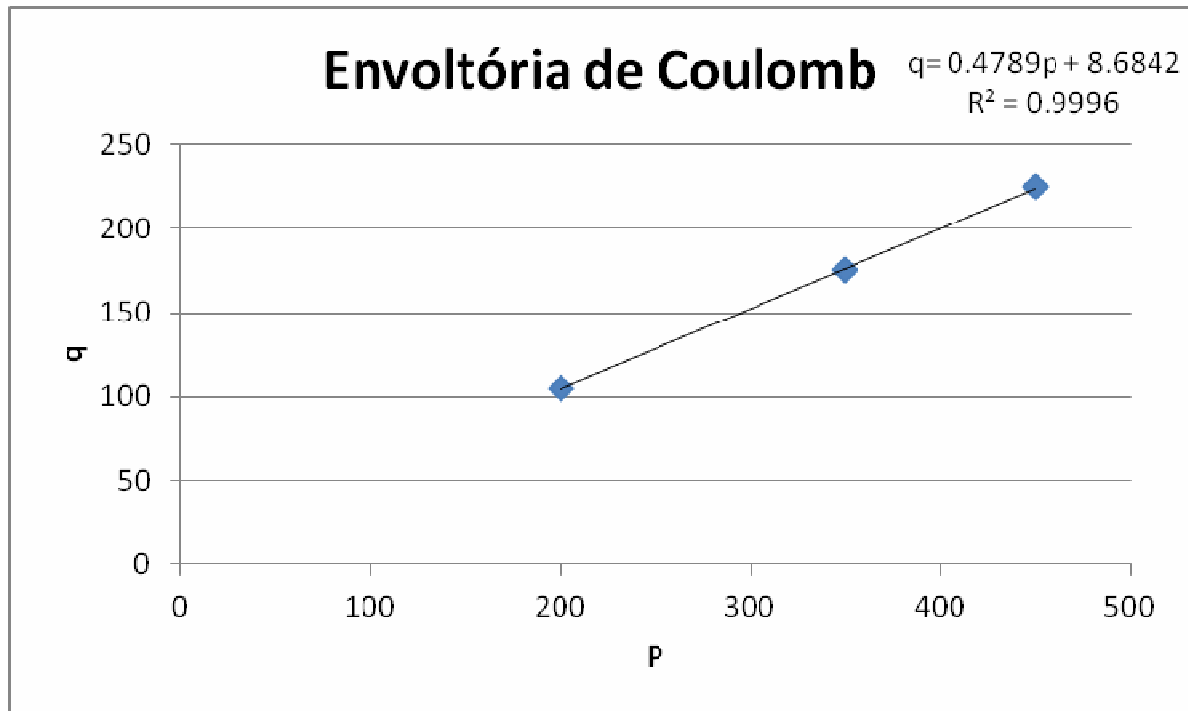


Figura 15. Resultado dos ensaios triaxiais, em termos de trajetórias de tensão totais e efetivas, para os três melhores ensaios realizados.

#### Interpretação de Envoltória de Resistência do Cisalhamento para o Solo

Tomando-se os pontos finais das trajetórias de tensão efetivas como os pontos correspondentes à ruptura do solo (pontos  $p'$  e  $q$  na ruptura), foram obtidos três pares de valores (Figura 15) a partir dos quais foi construída a envoltória de resistência ao cisalhamento, em termos de tensões efetivas, da Figura 16.



(Unidades de p e q: kPa)

Figura 16. Resultado dos ensaios triaxiais: envoltória de resistência ao cisalhamento de Coulomb, em termos de tensões efetivas, para o solo testado, a partir dos ensaios 1, 2 e 3 ( $\sigma'_3 = 55, 100$  e  $200$  kPa).

Dada a reta de regressão linear apresentada na Figura 16, obtém-se o valor da  **$\tan(\alpha')$**  a partir do coeficiente angular da reta de regressão, isto é,  $\tan(\alpha) = 0.479$ . Logo, o ângulo de atrito em termos de tensões efetivas ( $\phi'$ ) pode ser calculado, resultando igual a  $28,6^\circ$  ( $\text{sen } \phi' = \tan \alpha'$ ), ver Lambe e Whitman (1979). Com relação ao intercepto de coesão, os três pontos resultantes dos ensaios indicam um valor de  $a = 8.7$  kPa, donde o intercepto de coesão resulta igual a  $9.9$  kPa.

## 7. Conclusão

Pode-se concluir que embora esse trabalho não tenha chegado em resultados com a primeira parte do projeto que era os ensaios com a Atapulgita, esse é um tema que merece atenção pois existe a possibilidade de gerar bons frutos em estudos futuros. Para a segunda parte do projeto observa-se que os valores obtidos de  $28,6^\circ$  para o ângulo de atrito efetivo do solo residual é



próximo ao utilizado pelo Projetista, que foi de  $30^0$ , sendo ainda a coesão calculada próxima ao utilizado também.

Desta forma, foi atingido o objetivo de fornecer subsídios de parâmetros geotécnicos de projeto ao Projetista do muro verde reforçado com geogrelhas. Acredita-se que houve uma contribuição válida na formação geotécnica do aluno, que em breve será um Engenheiro Civil.

## **8. Referências**

Heineck ,K.S., Consoli, N., Flores, J. (2002). Estudo da morfologia e condutividade hidráulica de misturas de cinza de carvão-bentonita. XII Cobramseg-Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.

Lambe, T.W. e Whitman, R.V. (1979). Soil Mechanics. John Wiley and Sons. New York, EUA.

Souza Pinto, C. (2000). Curso Básico de Mecânica dos Solos. Oficina de Textos. 3ª Edição. São Paulo, Brasil.