3
Programa Experimental

O programa de ensaios estabelecido teve como principal objetivo identificar o efeito da adição dos dois tipos de cinzas estudados, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cinza de casca de arroz, nas propriedades de resistência e deformabilidade de um solo arenoso e de um solo argiloso. Para tal, foram feitas misturas cinza-areia e cinza-argila, variando as porcentagens das cinzas utilizadas. A variação das porcentagens da cinza de bagaço de cana foi de 5 %, 10% e 20%, no solo arenoso, já no solo argiloso, foi de 10% e 20%; para a cinza de casca de arroz, a variação foi de 10% e 20% para ambos os solos estudados.

Dessa forma foram realizados ensaios de Caracterização Física do solo puro e, posteriormente, nas misturas, visando obter os índices físicos de todos os materiais envolvidos na pesquisa e visando evidenciar parâmetros que podem se correlacionar com o real desempenho mecânico dos materiais. Foi realizado o estudo do comportamento dos materiais, por meio dos resultados dos Ensaios de Caracterização Mecânica, que consistiram em ensaios de cisalhamento direto.

Serão descritas neste capítulo as etapas propostas para este programa experimental, os materiais utilizados, os métodos de execução dos ensaios e os equipamentos utilizados na presente pesquisa.

Os ensaios de caracterização mecânica foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

3.1.
Materiais utilizados

Foram utilizados quatro tipos de materiais distintos, sendo estes: areia, solo argiloso, cinza de bagaço de cana (Bc) e cinza casca de arroz (Ca). Trabalhou-se com estes materiais puros e em misturas, dos solos, acrescidos de diferentes teores de cinzas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

3.1.1
Areia

A areia (Figura 3), utilizada na presente pesquisa é procedente da praia da Barra da Tijuca, localizada na Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro-RJ. A coleta do material foi realizada entre os postos 5 e 6. Para realização da coleta, uma trincheira, de aproximadamente de 40 cm de profundidade foi cavada a fim de se evitar que eventuais impurezas fossem coletadas junto com solo. O solo foi armazenado em sacos plásticos e transportado até o local de estudo. Os resultados da caracterização deste material são apresentados no capítulo 4. A Figura 4 ilustra o local de coleta do material.

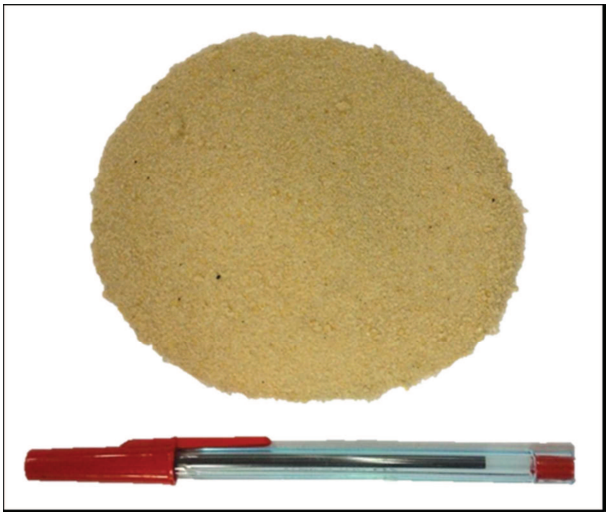

Figura 3 Areia em estudo

Figura 4 Local de coleta do material na praia da Barra da Tijuca - RJ

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

3.1.2
Solo argiloso

O solo argiloso utilizado nesse trabalho é um solo coluvionar, argilo-arenoso, não saturado (Soares, 2005), que foi coletado no Campo Experimental II, localizado no interior do *campus* da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, conforme o esquema mostrado na Figura 5. O material foi retirado entre 0,0 m até 2,00 m de profundidade, desde a superfície da encosta. Este solo possui características de tonalidade vermelha amarelada, textura micro-granular e aspecto homogêneo, sendo constituído, basicamente, por quartzo, granada alterada, argilominerais, essencialmente caulinita, e óxidos de ferro e alumínio, como produto do intemperismo dos minerais primários da biotita gnaisse. A Figura 6 apresenta uma foto do solo coluvionar utilizado.

O material foi retirado manualmente e depositado em baldes cilíndricos de plástico. Aproximadamente 50 kg deste solo foram levados para o laboratório e colocados na estufa a 60 °C. Depois de atingir uma umidade constante, foi colocado em sacolas de plástico lacradas e guardado na câmara úmida. No local da coleta, foi observada a presença de alguns pedregulhos de quartzo. Durante o processo de preparação do solo para os ensaios foram retiradas as raízes presentes no material.

Este tipo de solo foi utilizado anteriormente em outras pesquisas desenvolvidas na PUC-Rio e na COPPE/UFRJ. Sertã (1986) fez um estudo dos aspectos geológicos e geotécnicos do solo residual do Campo Experimental II, deixando um amplo conhecimento das suas características. Outros autores como Marinho (1986), Lins (1991), Daylac (1994), Beneveli (2002) e Soares (2005), utilizaram este solo para realizar ensaios especiais e testar equipamentos desenvolvidos na PUC-Rio. Esse material foi escolhido devido à grande quantidade de informação disponível e por causa da localização de fácil acesso e por te sido utilizado em outras pesquisas neste grupo como por Ramirez (2012), Quispe (2013), Bolanos (2013), Calheiros (2013) e Meliande (2014).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

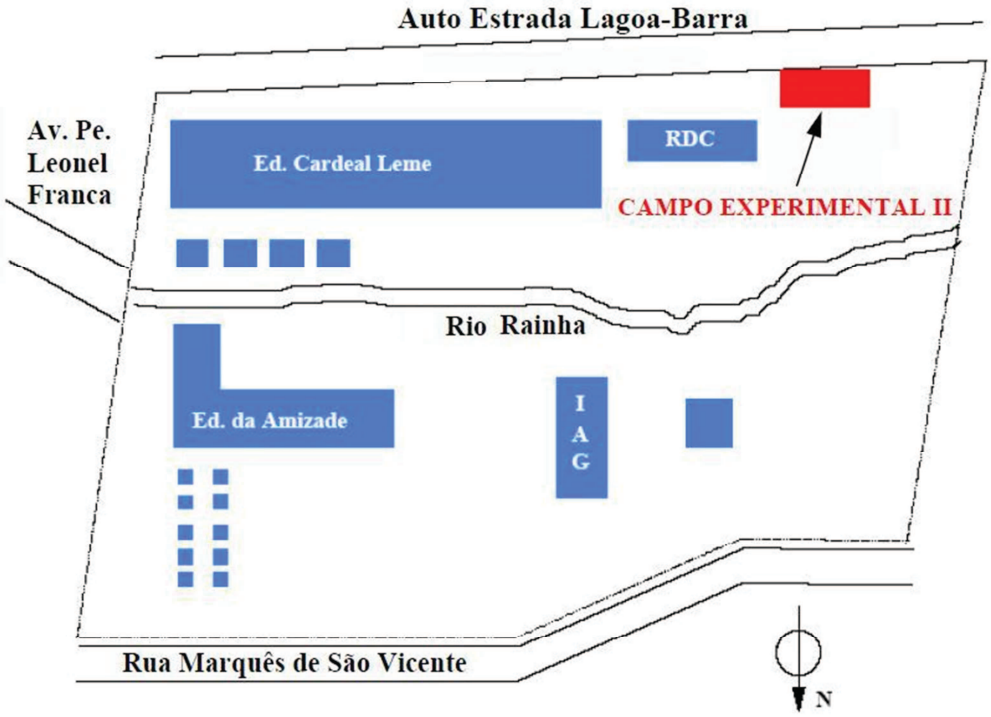

Figura 5 Localização do Campo Experimental II PUC-Rio (Soares 2005)

Figura 6 Solo Argiloso utilizado

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

3.1.1.
Água

A água utilizada na preparação das misturas para realização dos ensaios de cisalhamento direto e dos ensaios de caracterização física foi água destilada, conforme especificações em normas.

3.1.2.
Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

A cinza de bagaço de cana-de-açúcar (Figura 7) utilizada nesta pesquisa é proveniente da Companhia Açucareira Usina Barcelos, localizada no Município de São João da Barra/RJ.

Figura 7 Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar

Cordeiro (2006) estudou o comportamento da mesma cinza em misturas com cimento Portland e descreveu o modo como a cinza foi coletada junto à unidade sucroalcooleira Companhia Açucareira Usina Barcelos, localizada no Município de São João da Barra, na região Norte do Estado do Rio de Janeiro. A Usina Barcelos possui capacidade para a moagem de 3.200 toneladas de cana-de-açúcar por dia (Azevedo, 2002) e queimava, diariamente, durante o período de colheita da cana, que vai de maio a dezembro, cerca de 140 toneladas de bagaço, que saem diretamente das moendas para as caldeiras geradoras de vapor d'água.

A coleta da cinza foi realizada em dias de limpeza dos salões das caldeiras. A limpeza é condicionada pela produção da Usina e, em geral, ocorre

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

semanalmente. Após a coleta, formou-se um lote, com cerca de 180 kg de cinza residual, que foi homogeneizado e fracionado (Figura 8), para a realização das diferentes etapas do programa experimental. Todo o lote foi seco em estufa por 24 horas à temperatura de 110°C ± 5°C.

Figura 8 Pilha cônica e alongada, utilizada na homogeneização e no quarteamento da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar (Fonte Cordeiro,2006)

A cor é indicativa do grau de calcinação a que o bagaço foi submetido e, consequentemente, de seu teor de carbono. Na Figura 9, podem ser vistas as cinzas com cores distintas, produzidas nas caldeiras, além do bagaço de cana *in natura*. A cinza preta é proveniente de um processo de combustão incompleto (Figura 9-b). Com maior temperatura e/ou tempo de exposição ao calor, maior quantidade de carbono é liberada e a cinza adquire cor que varia em tons de vermelhos (Figura 9-c) a branco (Figura 9-d). Neste trabalho, optou-se por coleta seletiva de forma a compor um lote de cinza com baixo teor de carbono.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

Figura 9 Bagaço de cana-de-açúcar (a) e diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: cinza escura, com alto teor de carbono, característico de combustão incompleta (b), cinza, com menor teor de carbono (c), e cinza gerada após combustão completa (d). (Fonte Cordeiro 2006)

3.1.3.
Cinza de casca de arroz

3.1.3.1.
A produção de cinzas casca de arroz

A coleta da cinza de casca de arroz foi feita junto à Indústria de Beneficiamento de Arroz Urbano Agroindustrial (Figura 10), no Município de Jaraguá do Sul, em Santa Catarina.

Figura 10 Indústria de Beneficiamento de Arroz Urbano agroindustrial, localizada em Jaraguá do Sul/SC. Fotografias dos silos de armazenagem do arroz (a) e da planta industrial (b) (Fonte Cordeiro, 2006)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

3.1.4.
Cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cinza casca de arroz ultrafinas

As cinzas, estudadas neste trabalho, foram também utilizadas por Cordeiro (2006), que analisou a viabilidade de utilização de cinzas ultrafinas de bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral em concreto de resistência convencional (25 MPa) e de alto desempenho entre misturas com cinzas, em teores de substituição de cimento Portland de 10%, 15%, 20% e 40%, e concretos de referência.

Para tal estudo, foi necessário que as cinzas tivessem granulometria próxima à do cimento, ou seja, elas precisavam ser muito mais finas do que as obtidas junto às indústrias supracitadas.

Cordeiro (2006) obteve as cinzas residuais ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e de casca de arroz por meio do estudo de diferentes processos de moagem mecânica. A investigação de diferentes configurações de moagem na elevação da atividade pozolânica foi conduzida com cinza residual do bagaço. Na moagem da cinza residual da casca de arroz, foi executada apenas a metodologia que se mostrou mais adequada à cominuição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE/UFRJ e a metodologia de moagem que se mostrou mais adequada foi a de moagem ultrafina em moinho vibratório.

Na moagem vibratória – moagem vibratória/alumina – realizada, empregou-se o moinho vibratório (Aulmann & Beckschulte Maschininfabrik), com vaso cilíndrico de aço e diâmetro interno de 19 cm, com capacidade de 33 litros. A cada batelada, utilizaram-se 8 litros de amostra e 16,5 litros de corpos moedores cilíndricos (*cylpebs*) de alumina com diâmetro de 13 mm e altura de 13 mm. Os tempos de moagem foram de 8 min, 15 min, 30 min, 60 min, 120 min e 240 min. E o melhor tempo de moagem foi definido como sendo o de 60 min, pois, para tempos maiores, não foram obtidas reduções significativas no tamanho das partículas.

3.1.5.
Misturas solo-cinza

Para realização dos ensaios e preparação das misturas, tanto o solo, quanto as cinzas, foram secas em estufa a 60°C, pois, no laboratório da Pontifícia

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), a estufa que seca a 100º é apenas utilizada em pequenas porções de material, devido ao seu tamanho. Logo após, foram armazenadas e etiquetadas em sacos plásticos bem vedados e mantidas na câmara úmida. Para preparação das misturas solo-cinza, calculou-se a quantidade de cada material, individualmente, em relação ao peso seco total que seria utilizado.

Após a mistura a seco, realizaram-se os ensaios de caracterização física, química e mecânica que serão descritos no decorrer deste capítulo. Para os ensaios mecânicos, adicionou-se a quantidade de água necessária para se obter a umidade determinada para o ensaio, que foi de 10% para as misturas com solo arenoso. A determinação desta umidade, utilizada nos ensaios, foi feita por meio do ensaio de cisalhamento direto no solo arenoso puro. Foram feitos ensaios com a areia apresentando 5, 10, 15 e 20% de umidade, obtendo-se melhor resistência do material quando este apresentava 10% de umidade. Dessa forma, determinou-se tal porcentagem para realização do ensaio em todas as misturas com areia pura.

Para o solo argiloso, foi utilizada a umidade ótima de cada mistura que, por sua vez, foi obtida por meio do ensaio de compactação.

As porcentagens da cinza de bagaço de cana utilizadas foram de 5 %,10% e de 20%, no solo arenoso, e, no solo argiloso, de 10% e 20%; já na cinza de casca de arroz, houve variação de 10% e 20% para ambos os solos estudados.

A determinação das porcentagens de ambas as cinzas utilizadas foi baseada nas pesquisas feitas por Cordeiro (2006) que avaliou a influência das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e de casca de arroz em misturas delas com cimento Portland.

A Tabela 1 apresenta as siglas que descrevem os materiais utilizados na presente pesquisa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

Tabela 1 Símbolos utilizados para os solos e misturas

Material/Mistura	% Solo	% Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar (Bc)	% Cinza de Casca de Arroz (Ca)	Símbolo
Solo Arenoso	100	-	-	Areia
Solo Argiloso	100	-	-	Argila
Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar	-	100	-	Bc
Cinza de Casca de Arroz	-	-	100	Ca
Mistura 1	95	5	-	Bc_5Areia_{95}
Mistura 2	90	10	-	$Bc_{10}Areia_{90}$
Mistura 3	80	20	-	$Bc_{20}Areia_{80}$
Mistura 4	90	-	10	$Ca_{10}Areia_{90}$
Mistura 5	80	-	20	$Ca_{20}Areia_{80}$
Mistura 6	90	10	-	$Bc_{10}Argila_{90}$
Mistura 7	80	20	-	$Bc_{20}Argila_{80}$
Mistura 8	90	-	10	$Ca_{10}Argila_{90}$
Mistura 9	80	-	20	$Ca_{20}Argila_{80}$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

3.2. Métodos e procedimentos de ensaio

Serão apresentadas, a seguir, as etapas referentes aos ensaios realizados neste trabalho, bem como a descrição detalhada dos procedimentos utilizados e a normatização seguida para realização destes.

O objetivo da realização deste programa experimental foi a de se obter a caracterização física, química e mecânica do solo e misturas solo-cinza, avaliando seu comportamento por meio de ensaios de cisalhamento direto, e de se obter seus parâmetros de resistência, para avaliar a aplicabilidade das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e de casca de arroz, como estabilizantes dos solos em estudo.

Abaixo, são apresentados os ensaios laboratoriais realizados para caracterização física e mecânica dos solos e misturas estudadas:

a) Propriedades físicas e de classificação dos materiais:

- Densidade real dos grãos;
- Índice de vazios máximo e mínimo do solo;
- Análise granulométrica;

- Limite de liquidez;
- Limite de plasticidade.

b) Propriedades químicas:

- Composição química.

c) Propriedades mecânicas:

- Ensaio de compactação;
- Ensaio de cisalhamento direto.

3.2.1. Ensaios de caracterização física

Com o objetivo de se determinar as propriedades índice da amostra de solo arenoso e das misturas em estudo, foram executados ensaios de caracterização física no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Os materiais foram preparados, conforme procedimentos normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os ensaios realizados seguiram os métodos estabelecidos pelas seguintes normas.

Para solo argiloso do campo experimental da PUC-Rio e para as misturas solo argiloso-cinza, foram executados ensaios de caracterização física do material. Por ser proveniente de amostras deformadas, o solo foi preparado conforme procedimentos normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os ensaios realizados seguiram os métodos estabelecidos pelas seguintes normas:

- NBR 6508/1984 – Solo – Determinação da densidade real dos grãos;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica;
- NBR 12004/1990 – Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos;
- NBR 12051/1991 – Solo – Determinação do índice de vazios mínimos de solos não coesivos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

3.2.1.1. Densidade real dos grãos

Para determinação da densidade real dos grãos do solo e das misturas solo-cinza, utilizou-se o material passante na peneira #40 (0,425 mm), adotando-se os procedimentos descritos, segundo a norma NBR 6508 (ABNT, 1984).

Do material passante na peneira #40, seco, em estufa a 105°C, foram utilizados, aproximadamente, 100 gramas. Posteriormente, foram colocados 30g da amostra de material em três picnômetros de 250 ml, e foi adicionada água a estes, de forma a que o solo ficasse totalmente submerso. Através de uma válvula à vácuo, realizou-se o processo de deaeração da mistura, a fim de que todo o ar presente nos vazios do solo fosse retirado. Completou-se o volume restante com água destilada de maneira lenta, para que não houvesse entrada de ar nos picnômetros. Após o procedimento descrito anteriormente, para que houvesse a equalização da temperatura dos picnômetros, que baixo, devido à aplicação de vácuo, aqueles foram imersos em água, e pesou-se cada conjunto (picnômetro+solo+água). Obtido este valor, o material que estava contido nos picnômetros foi descartado e estes foram, novamente, preenchidos, desta vez apenas com água destilada. Em seguida, foram pesados (picnômetro+água). A temperatura da água foi determinada por meio de um termômetro e garantiu-se que o valor desta, na equalização do primeiro conjunto, fosse igual à do segundo. A partir dos dados obtidos, foi possível determinar a densidade real dos grãos segundo a Equação 1 a seguir:

$$G_s = \frac{W_d}{(W_1 + W_d - W_2)} . G_{wt} \qquad \text{eq.(1)}$$

Onde:

W_1= peso do picnômetro + água;

W_d= peso do solo;

W_2= peso do picnômetro + água + solo;

G_{wt}= constante de correção para temperatura igual a 22°C;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

Os resultados obtidos para todos os materiais envolvidos são apresentados no capítulo 4.

3.2.1.2. Análise granulométrica

Para a determinação da curva granulométrica do solo com cinzas puras e misturas realizadas, peneiraram-se 1000 gramas do material na peneira #40 (0,425 mm), seguindo a norma NBR 7181 (ABNT, 1984).

O material retido na peneira foi lavado e, posteriormente, seco, por 24h, em estufa a 105 °C, realizando-se o peneiramento grosso logo após este período.

Do material passante na peneira #40, utilizaram-se 70 gramas para a sedimentação, sendo este misturado com 125 ml de uma solução de hexametafosfato de sódio e deixado em repouso durante, pelo menos, 12 horas. Após este processo, o material foi submetido à dispersão mecânica, sendo transferido, em seguida, para uma proveta de 1.000 ml, onde o restante do volume foi completo com água destilada para, então, serem feitas as devidas leituras.

Depois de realizada a sedimentação, todo o material foi lavado na peneira #200 e o que ficou retido foi levado à estufa, para que, quando seco, proceda-se o peneiramento fino.

Para a areia em estudo, só foi necessária a realização do peneiramento grosso.

3.2.1.3. Índice de vazios máximos e mínimos

Para determinação dos índices de vazios máximos e mínimos, tanto do solo arenoso puro, quanto das misturas, foram utilizados um funil, um cilindro metálico e uma mesa vibratória. A principio, foram obtidas as dimensões do cilindro metálico, visando calcular seu volume interno e seu peso.

A determinação do índice de vazio máximo procedeu segundo a NBR 12004/1990. Inicialmente, a amostra de material foi homogeneizada e, com o auxílio de um funil, despejada no cilindro metálico, de forma que a altura de queda do material mantivesse-se constante para que este permanecesse no estado mais fofo possível. Neste processo, o funil foi movido segundo uma trajetória

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

constante em movimento circular, da borda para o centro do molde, de forma a que as camadas fossem compostas de espessuras uniformes. O molde foi preenchido de 1 até 2 cm acima do topo e o excesso de material foi retirado com o auxilio de uma régua biselada. Após este processo, o conjunto foi pesado.

A determinação do índice de vazio mínimo procedeu segundo a NBR 12051/1991. O processo inicial de homogeneização e o método de utilização do funil, para despejo do material no cilindro, deram-se da mesma forma que a descrita anteriormente para o índice máximo. Com o auxílio do funil, primeiramente, 1/3 do volume de cilindro foi preenchido, colocando-se, em seguida, um disco-base e um peso em seu interior para se aplicar uma sobrecarga no material. Fixou-se o cilindro a uma mesa vibratória por 1 min. O processo foi repetido em mais duas camadas, até que o cilindro fosse preenchido de 1 até 2 cm acima do topo. Após esse processo, o excesso de material foi retirado e o conjunto foi pesado.

Em ambos os casos o processo foi repetido três vezes, a fim de se ter uma maior precisão no resultado. O valor final calculado foi obtido tirando-se uma média das três repetições.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

3.2.1.4. Limites de atterberg

Os ensaios de limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), que permitem caracterizar a interação solo-água, foram realizados segundo os procedimentos descritos pelas normas brasileiras NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT, 1984), respectivamente.

Através dos dados obtidos, por meio destes ensaios, pode-se determinar o Índice de Plasticidade (IP) dos materiais, segundo a Equação 2 a seguir:

$$\mathrm{IP}\ (\%) = \mathrm{LL}(\%) - \mathrm{LP}(\%) \qquad \text{eq.(2)}$$

O Limite de Liquidez é obtido por meio do teor de umidade do solo quando há o fechamento de uma ranhura padrão feita em uma massa de tal solo, colocada na concha de um aparelho normalizado, denominado aparelho de Casagrande, sob

a ação de 25 golpes. O Limite de Liquidez (LL) marca a transição do estado plástico ao estado líquido do solo.

O Limite de Plasticidade marca a transição do estado plástico para o estado semi-sólido do solo.

3.2.2. Ensaios de caracterização química

Para determinar os componentes químicos, classificar e definir a existência ou não de periculosidade das cinzas estudadas no presente trabalho, Cordeiro (2006) realizou ensaios de "*Espectometria de fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDX)" e "Ensaio para determinação de matéria orgânica"* na cinza de bagaço de cana-de-açúcar e na cinza de casca de arroz.

Estes ensaios são de grande relevância, uma vez que a classificação do resíduo, como perigoso ou não perigoso, e inerte ou não inerte, define a escolha do tipo de disposição final que ele deve ter, assim como suas aplicações.

Para a presente pesquisa, não se fez necessária a repetição de todos estes ensaios, devido ao fato de que as cinzas são provenientes do mesmo local que o estudado por Cordeiro (2006), optando-se, então, somente pela realização do ensaio para se analisar a composição química do material e o e*nsaio de solubilização e lixiviação*.

3.2.3. Ensaio de caracterização mecânica

Com o objetivo de se verificar as propriedades mecânicas dos materiais e das misturas estudadas, para determinação da viabilidade do emprego destas em obras geotécnicas, como as citadas anteriormente, foram realizados ensaios de compactação e cisalhamento direto. Os ensaios realizados seguiram os métodos estabelecidos pelas seguintes normas:

- NBR 7182/1986 – Ensaio de Compactação;
- ASTM D 3080/2004 – Ensaio de Cisalhamento Direto.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

3.2.3.1.
Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados para o solo argiloso puro e em mistura, com 10 e 20 % de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e de cinza de casca de arroz, a fim de determinar a umidade ótima de compactação ($w_{ótm}$) e o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) dos materiais. Estes ensaios foram realizados segundo as diretrizes da norma NBR 7182 (ABNT, 1986), utilizando-se a energia de compactação Proctor Normal e reuso de material.

Após secagem do solo puro em estufa a 60°C, iniciou-se o processo de destorroamento, passando-o, posteriormente, pela peneira #4, adotando-se o procedimento descrito pela norma NBR 6457 (ABNT, 1986), de preparação com secagem prévia até a umidade higroscópica. Em seguida, adicionou-se uma determinada quantidade de água ao material, para que este ficasse com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima. Este valor pode ser estimado, inicialmente, por meio do limite de plasticidade, cujo valor pode se aproximar ao da umidade ótima. Após mistura do solo puro e com as diversas porcentagens de cinza ao volume de água calculado, homogeneizou-se bem o material, armazenando-o na câmara úmida, quando não compactado em seguida para que não houvesse perda de umidade.

Após a preparação das misturas, o material foi colocado dentro do molde cilíndrico pequeno (cilindro Proctor), de dimensões 10 cm x 12,7 cm (diâmetro x altura). Aplicaram-se 26 golpes com um soquete pequeno, de massa igual a 2,5 kg, que se deixou cair na camada de solo, a uma altura de 30,5 cm, aproximadamente. As porções de solo compactadas devem ocupar cerca de 1/3 da altura total do molde – compactação em três camadas.

Para se conseguir uma boa aderência entre as camadas compactadas, escarificou-se bem cada uma delas antes de se compactar a camada sobrejacente. Em geral, depois das três camadas serem completadas, atinge-se uma altura maior que a do molde, o que ocorre devido à utilização de um anel complementar, o qual garante ter a altura total necessária. Este excesso é removido ao final do ensaio, acertando-se o volume de solo em relação à altura do molde.

Completado o processo de compactação, pesa-se o cilindro juntamente com o solo. Com o peso total do corpo de prova e o volume do cilindro, é possível

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

calcular seu peso específico. Por meio da retirada de três amostras do interior do corpo de prova, em sua parte média, determina-se sua umidade média, após secagem em estufa. Com a obtenção destes dois valores, calcula-se a massa específica seca do material.

Finalizado todo o procedimento, um novo corpo de prova é preparado com uma quantidade maior de água, aumentando-se a umidade da mistura em aproximadamente 5%. A partir daí, realiza-se uma nova compactação e obtém-se, dessa forma, um novo par de valores de umidade (w) e massa específica seca (γ_d). Com todos os pontos obtidos, plota-se um gráfico de peso específico *versus* umidade, tendo-se, então, a curva de compactação. Os valores de $w_{ótm}$ e $\gamma_{dmáx}$ obtidos correspondem ao ponto máximo das curvas e foram utilizados para moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto.

Todo o processo foi repetido cinco vezes para cada mistura, a fim de se obter cinco pares de valores, sendo, ao menos, dois no ramo seco e dois no ramo úmido da curva de compactação. Para se obter esta curva, o procedimento se repete de forma a que a densidade seca máxima obtida se reduza duas ou três vezes.

Concluiu-se que todo o processo poderia ser realizado com reuso de material, depois de ter sido feito um teste com solo puro, compactando-o com e sem reuso. A curva de compactação para ambos os casos deu, aproximadamente, os mesmos resultados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

3.2.3.2. Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento do solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer a ruptura, ou como a tensão cisalhante no plano em que a ruptura estiver ocorrendo.

Gerscovich (2010) afirma que a resistência ao cisalhamento de um solo é função de dois componentes: o embricamento e a resistência entre as partículas, sendo este último dividido em mais dois componentes que são a coesão e o ângulo de atrito.

O embricamento consiste no trabalho necessário para movimentar a partícula de forma ascendente. No caso de um solo denso, como o utilizado por

Benedetti (2011), em sua pesquisa, há uma força adicional para superar o embricamento entre as partículas, levando à ocorrência de uma expansão volumétrica durante o ensaio, chamada de dilatância.

A coesão pode ser dividida em coesão aparente, resultante das pressões capilares da água contida nos solos, e coesão verdadeira, oriunda de pequenas atrações entre as partículas que dependem da natureza dos solos ou sedimentos. Para solos ou sedimentos com granulometria fina, o ângulo de atrito aumenta com a redução da plasticidade e, para solos granulares, o ângulo de atrito depende da forma e da aspereza dos grãos e do fato de a amostra ser bem ou mal graduada.

Atualmente, existem diversos métodos para se determinar a resistência ao cisalhamento de um solo, no entanto, os mais utilizados incluem o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio triaxial. Como, na presente pesquisa, foi realizado o ensaio de cisalhamento direto, apenas este será enfocado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

3.2.4.
Ensaio de resistência ao cisalhamento

O ensaio de cisalhamento direto permite a determinação da resistência ao cisalhamento do solo por meio da obtenção dos parâmetros coesão e ângulo de atrito. Durante o ensaio, uma tensão normal pré-definida é aplicada ao corpo de prova e uma tensão cisalhante, que irá provocar a ruptura, é, continuamente, aplicada e verificada, obtendo-se, assim, a tensão cisalhante máxima suportada pelo solo.

Os parâmetros coesão e ângulo de atrito são agrupados pelo critério de Mohr-Coulomb, expresso na equação eq. (3), e, graficamente, na Figura 11.

$$\tau = c' + \sigma' \mathrm{tg}\phi' \qquad \text{eq.(3)}$$

em que:

τ é a tensão cisalhante efetiva em kPa;

σ' é a tensão normal efetiva em kPa;

ϕ' é o ângulo de atrito interno;

c' é a coesão aparente.

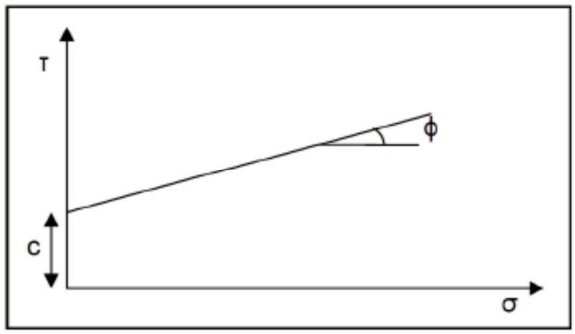

Figura 11 Representação gráfica do critério de ruptura de Mohr-Coulomb

Como vantagens, podem-se destacar o fato de este ensaio ser simples e de apresentar facilidade de execução. Como desvantagens, Das (2007) aponta o fato de a ruptura ocorrer ao longo de um plano pré-determinado, o que não é relevante para determinados casos. Ressalta, também, que este ensaio não permite um controle de drenagem do corpo de prova, já que a caixa não possui um sistema de vedação adequado e eficiente.

Ainda segundo este autor, o ensaio de cisalhamento pode ser realizado com tensão controlada ou com deformação controlada. Nos ensaios com tensão controlada, a força de cisalhamento é aplicada em incrementos iguais, até que o corpo de prova sofra ruptura. Já nos ensaios com deformação controlada, uma taxa constante de deslocamento cisalhante é aplicada a uma metade da caixa por um motor que atua por meio de engrenagens. A vantagem do segundo método é que, no caso de uma areia compacta, a resistência ao cisalhamento de pico, na ruptura, e a resistência ao cisalhamento inferior, no ponto após a ruptura, chamado de resistência última, podem ser observadas graficamente. Além disso, este método modela melhor as situações reais de campo. A Figura 12 apresenta um esquema do equipamento de cisalhamento direto, com deformação controlada, o qual foi utilizado na presente pesquisa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

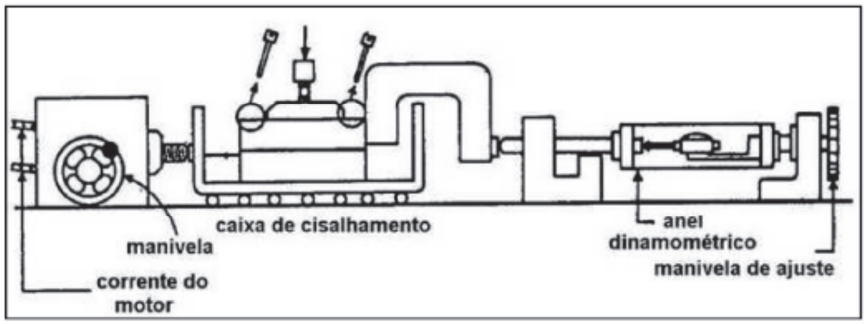

Figura 12 Esquema do equipamento do ensaio de cisalhamento direto com deformação controlada (Gerscovich, 2010, *apud* Benedetti, 2011)

Segundo Pinto (2006), a resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar, sem sofrer ruptura ou a tensão cisalhante no plano em que a ruptura estiver ocorrendo. Esta resistência depende do peso, da tensão normal atuante e do grau de "aspereza" da superfície de contato, ou seja, do atrito entre as partículas do solo. No entanto, a atração química, existente entre as partículas, pode provocar uma resistência que independe da tensão normal atuante no plano e que constitui uma coesão real. Esta deve ser diferenciada da chamada coesão aparente que constitui uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos úmidos não saturados.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para os dois tipos de solo em estudo, com solo puro e em misturas, com 5, 10 e 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e solo arenoso, misturas de 10 e 20% de cinza de casca de arroz e areia, e misturas de 10 e 20% de cinza de bagaço de cana e solo argiloso, com as mesmas porcentagens de cinza de casca de arroz e solo argiloso, visando determinar a resistência ao cisalhamento do solo por meio da obtenção dos parâmetros coesão (c), ângulo de atrito (φ) e componentes relacionados à resistência entre as partículas. Estes ensaios foram realizados segundo os métodos descritos pela norma ASTM D 3080/2004.

Devido às características de cada solo em estudo, estes tiveram métodos de moldagem do corpo de prova diferentes. A seguir, serão descritos, separadamente, os métodos de preparação utilizados para cada um destes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

a) Preparação do corpo de prova para o solo argiloso:

Para confecção dos corpos de prova do solo argiloso e misturas com este solo nos teores de cinza mencionados, inicialmente, compactou-se um corpo de prova cilíndrico, na energia Proctor Normal, umidade ótima e massa específica seca máxima, obtidas por meio do ensaio de compactação. Devido às dimensões da caixa utilizada no equipamento de cisalhamento direto, que mede aproximadamente 10,2 cm x 10,2 cm (lado x lado), e 2,0 cm de altura, a compactação do corpo de prova inicial foi realizada no cilindro grande, de dimensões 15,08 cm x 17,78 cm (diâmetro x altura), utilizando-se o soquete grande (4,53 kg) e ajustando-se o número de golpes para que a energia de compactação seja igualada à aplicada no cilindro pequeno. A compactação foi realizada no cilindro grande para que fosse possível, posteriormente, realizar a moldagem dos corpos de prova para ensaio.

Obtido o material compactado, os corpos de prova foram moldados para o ensaio de cisalhamento direto. O procedimento de moldagem consiste na cravação de um anel metálico, com aproximadamente as mesmas dimensões da caixa de cisalhamento, no material compactado, de forma uniforme e escavando-se as laterais para alívio de tensões quando o material apresentar resistência à cravação do anel. É importante untar as laterais com materiais tipo vaselina, para que o corpo de prova não seja danificado quando transferido para o equipamento. Após cravagem completa no anel, as bases do corpo de prova quadrado foram niveladas, para, então, transferi-lo ao equipamento. Com a ajuda de um *cap* de acrílico, o material foi pressionado e o corpo de prova, transferido para a caixa de cisalhamento.

A Figura 13 apresenta as etapas de moldagem dos corpos de prova para ensaio a partir do material compactado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

		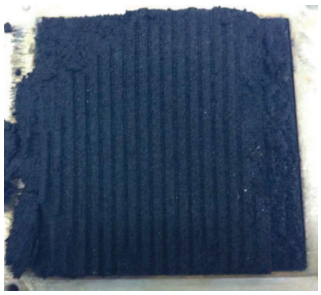
1. Material compactado para posterior moldagem dos corpos de prova.	2. Moldagem do corpo de prova do solo com a cravação do anel.	3. Corpo de prova de solo com cinza de casca de arroz utilizado para ensaio.

Figura 13 Moldagem dos corpos de prova do solo puro e solo-cinza - casca de arroz para ensaio

b) Preparação do corpo de prova para a areia:

Para confecção dos corpos de prova de areia e misturas com tal solo para os diversos teores de cinza, a compactação do material foi realizada diretamente na caixa de cisalhamento, pelo fato de a areia ser um material não coesivo e não ser possível moldá-la fora do equipamento. Esta compactação foi realizada manualmente, de maneira uniforme, de modo a que a areia não ficasse muito densa. A umidade ótima e massa específica seca máxima, adotadas, foram de 10% e 1,5 g/cm³, respectivamente. Estes parâmetros de compactação foram definidos baseados em estudos feitos por Casagrande (2005) que realizou ensaios triaxiais e *ring shear*, em areia. Estes valores correspondem a uma densidade relativa de 50% e índice de vazios de 0,75.

Para garantir que o material ficasse com todas as propriedades adequadas, calculou-se a quantidade certa de material seco, que deveria ser adicionado à caixa de cisalhamento. Em seguida, foram realizadas as misturas com a quantidade de água e, posteriormente, com as porcentagens de cinzas definidas. Com o auxílio de um gabarito, para altura adequada do material, no equipamento, foi feito seu ajuste.

Para realização do ensaio, os corpos de prova de ambos os materiais foram colocados na caixa de cisalhamento metálica. A caixa é dividida, horizontalmente, em duas metades e a força normal é aplicada a partir do topo da caixa de cisalhamento no corpo de prova. A força de cisalhamento é aplicada, movendo-se uma metade da caixa em relação à outra para provocar a ruptura. As caixas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

superior e inferior são distanciadas 5,0 mm antes de se dar início à fase de cisalhamento do ensaio, para que possa haver o deslocamento relativo entre elas. Acima e abaixo do corpo de prova, são colocadas placas ranhuradas que fornecem atrito ao solo, impedindo que este deslize quando aplicada a força horizontal. Papéis-filtro são usados para impedir o carreamento de partículas e pedras porosas, a fim de que a drenagem, estando o corpo de prova completo ou parcialmente saturado, possa ocorrer livremente.

c) Cálculo da Velocidade de Cisalhamento:

O ensaio de cisalhamento direto realizado ocorreu com o controle da deformação, em que uma taxa constante de deslocamento cisalhante foi aplicada na metade superior da caixa, por um motor, que atua por meio de engrenagens, a uma velocidade determinada por um fator que vai de acordo com a carga aplicada verticalmente. Essa velocidade é calculada por meio dos dados da fase inicial do ensaio, a chamada fase de adensamento, em que o corpo de prova é submetido somente à tensão vertical. Mede-se a variação de altura com o tempo, até que esta se estabilize.

Por meio de um gráfico de deslocamento vertical *versus* raiz do tempo (t), obtém-se o valor de t_{100}, correspondente a 100% do adensamento, e calcula-se a velocidade a ser adotada na fase de cisalhamento. Para o solo argiloso, o tempo de adensamento foi estipulado em 24h, já para o solo arenoso, o adensamento é praticamente imediato, tendo sido adotado o tempo de 30 minutos, para melhor estipulação da velocidade de ensaio a ser adotada.

Na fase de cisalhamento, a ruptura sofrida pelo corpo de prova ocorre ao longo do plano de divisão da caixa. O deslocamento horizontal da metade superior da caixa é medido por um LVDT (L*inear Variable Differential Transformer*) horizontal, que funciona como um sensor para medição de deslocamento linear. As variações da altura do corpo de prova, ou seja, as variações do volume deste, ao longo do ensaio, são obtidas por meio das leituras no LVDT vertical. O anel de carga mede a força horizontal variável à qual o corpo de prova está sendo submetido.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

d) Realização do Ensaio de Cisalhamento Direto:

Os ensaios foram repetidos em corpos de prova similares, para cada solo e mistura. Adotaram-se os valores de 50, 150 e 300 kPa para as tensões normais aplicadas. Por meio do gráfico da Tensão Cisalhante Máxima, que indica o momento da ruptura, *versus* Tensão Normal, pré-definida, determinam-se as envoltórias de ruptura e os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

A Figura 14 ilustra o material na caixa de cisalhamento, antes e após a realização do ensaio. A Figura 15 ilustra o equipamento de cisalhamento direto, utilizado na presente pesquisa.

1. Preparação da mistura solo-cinza de bagaço de cana, na caixa de cisalhamento.	2. Corpo de prova na caixa de cisalhamento, após ensaio.

Figura 14 Caixa de cisalhamento direto

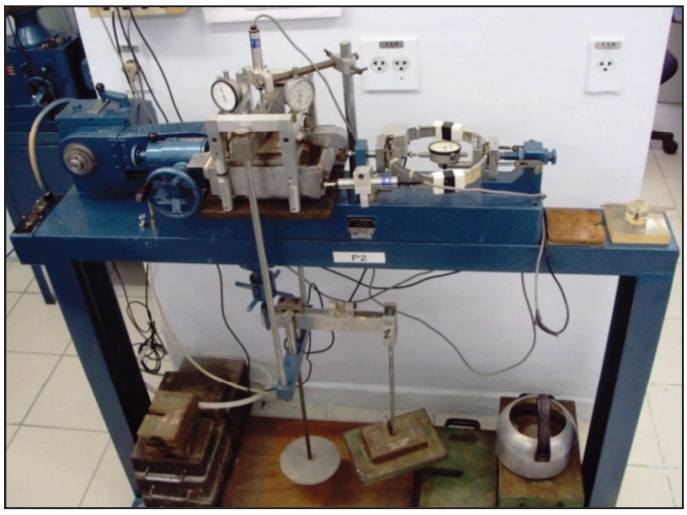

Figura 15 Prensa utilizada para a realização do ensaio de cisalhamento direto. Laboratório de Geotecnia/PUC-Rio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA

Para a gravação dos dados, obtidos por intermédio dos transdutores, foi utilizado o sistema de aquisição de dados, composto pelo *hardware* QuantumX, de oito canais, da empresa alemã HBM e pelo *software* CatmanEasy. Este sistema permite o monitoramento contínuo de todos os dados e do comportamento dos corpos de prova, durante todas as etapas do ensaio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221717/CA