

3

Programa Experimental

O programa de ensaios estabelecido tem como objetivo principal avaliar o efeito da adição de cinzas de Resíduo Sólido Urbano (RSU) nas propriedades mecânicas de um solo coluvionar.

As etapas do programa experimental proposto são detalhadamente descritas neste capítulo, bem como a descrição dos materiais utilizados na pesquisa, os métodos utilizados na preparação das amostras, detalhes de execução dos ensaios e equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório.

Os ensaios do programa experimental desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente e no Laboratório de Química ambos, na PUC-Rio.

3.1.

Materiais

3.1.1.

Solo

A argila utilizada neste trabalho é um solo coluvionar, argilo-arenoso, não saturado (Soares, 2005 apud Ramirez, 2012). Este solo 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 3.1. O material foi retirado até 2 m de profundidade, desde a superfície da encosta.

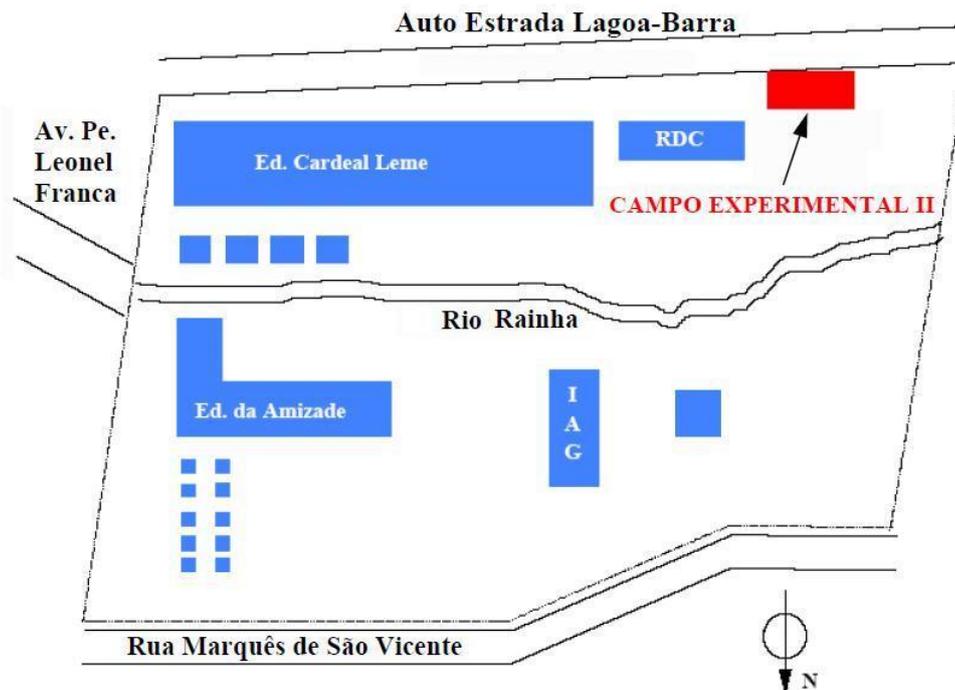


Figura 3.1 - Localização do Campo Experimental II PUC-Rio (Soares 2005).

Este solo possui características de tonalidade vermelha amarelada, textura micro-granular e com 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 gnaiss (Soares, 2005 apud Ramirez, 2012). A Figura 3.2 apresenta uma foto do solo coluvionar utilizado.

As características geotécnicas físicas deste material são apresentadas e analisadas no item 4.1.

O material foi retirado manualmente e depositado em baldes cilíndricos de plástico, em um dia ensolarado. Aproximadamente 100 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.

Este tipo de solo já foi utilizado anteriormente em outras pesquisas desenvolvidas na PUC-Rio (Sertã, 1986; Marinho, 1986; Lins, 1991; Dylac, 1994; Beneveli, 2002; Soares, 2005). 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. A grande quantidade de informação disponível foi um dos motivos pelos quais foi escolhido este material para a presente pesquisa,



Figura 3.2 – Argila utilizada - solo coluvionar.

Segundo o perfil morfológico feito por Dylac (1994) apresentado na Figura 3.3, o solo utilizado está situado na camada superior do perfil, conformada por colúvio. No lugar da coleta, se observou presença de alguns pedregulhos de quartzo. No processo de preparação do solo para os ensaios (destorroamento), se retiraram as raízes presentes no material.

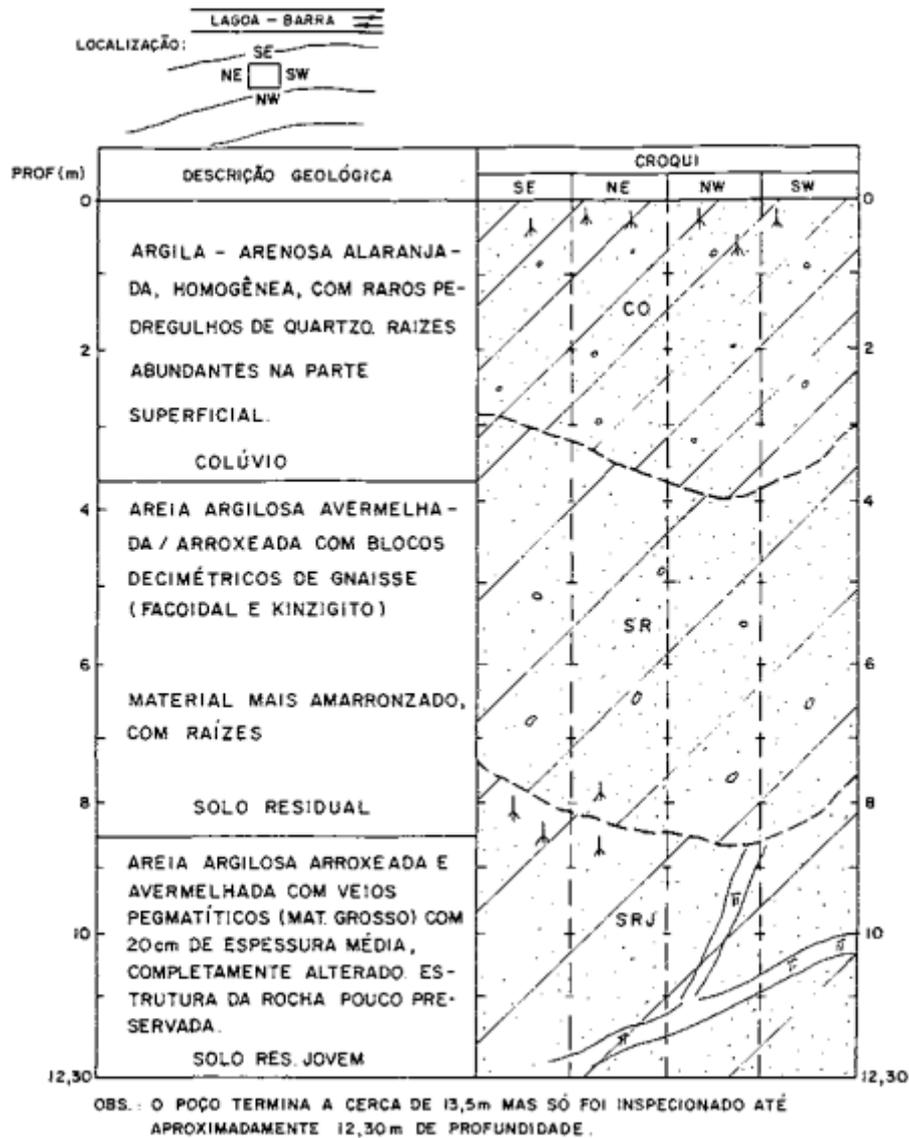


Figura 3.3 - Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II da PUC-Rio (Dylac, 1994)

Sertã (1986) fez uma análise mineralógica do solo presente no Campo Experimental II. A Tabela 3.1, elaborada por Dylac (1994), resume os resultados obtidos por Sertã para amostras retiradas entre 3,00 m e 3,50 m de profundidade. A presença imperante de certos minerais como a caulinita, a gibsita e a goetita, e o perfil morfológico apresentado anteriormente sugerem que o solo tem um alto grau de intemperismo.

Tabela 3.1 - Análise mineralógica (Sertã, 1986) do colúvio (3,0 -3,5 m.)

Fração do solo	Mineral	Quantidade / observações
Pedregulho	Quartzo	grãos arestados de coloração transparente a leitosos
	Granada alterada	alguns fragmentos
Areia	Quartzo	grãos arestados
	Granda muito alterada	correspondem a aproximadamente 5% da amostra total
	Agregados Ferruginosos	
	Magnetita	pequenos traços
Silte	Quartzo	presença
	Caulinita	presença
	Goetita	presença
Argila	Caulinita	presença marcante
	Goetita	alguns traços

3.1.2. Cinza Volante e Cinza de Fundo

A cinza volante e a cinza de fundo são provenientes da incineração do Resíduo Sólido Urbano (RSU) na Usina Verde, que fica localizada na Ilha do Fundão – Rio de Janeiro.

A incineração e coleta foram realizadas no mês de Janeiro/2012 para a cinza volante e Maio/2012 para a cinza de fundo, onde a quantidade total de cada tipo de cinza usado para os ensaios de caracterização física, química e mecânica foi 25 kg. As Figuras 3.4 e 3.5 ilustram a cinza volante e a cinza de fundo de RSU, respectivamente, onde é possível perceber que a cinza volante apresenta uma uniformidade de textura, mas a cinza de fundo apresenta diversos compostos residuais como pequenas peças de azulejo, vidro, fios de ferro, etc.



Figura 3.4 – Cinza Volante de RSU



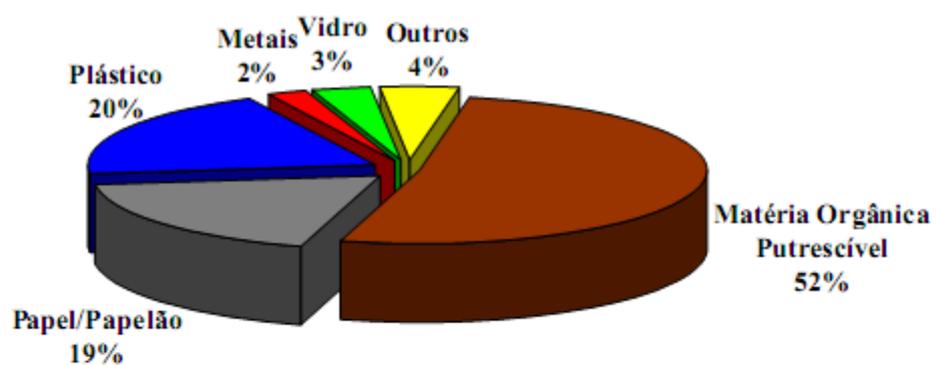
Figura 3.5 – Cinza de Fundo de RSU

3.1.2.1. Produção das Cinzas de RSU

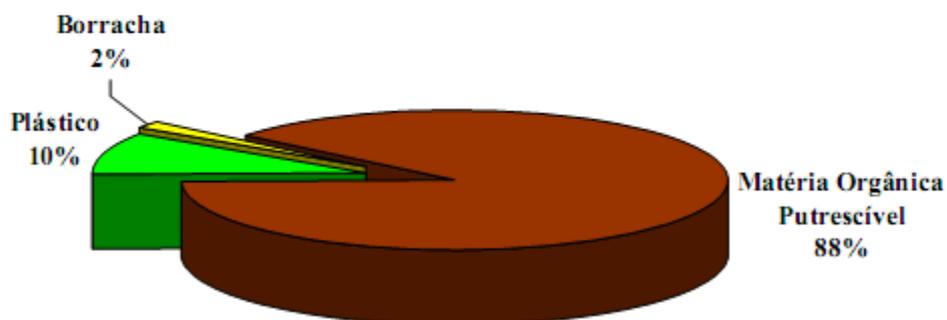
A Usina Verde é uma empresa de capital privado situada na Cidade Universitária da UFRJ - Ilha do Fundão, e tem como objetivo apresentar soluções ambientais para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos, através do processo de incineração com co-geração de energia. Atualmente, a Usina Verde vem tratando o Resíduo Sólido Urbano (RSU), e procura através o processo de

incineração, propiciar o aproveitamento racional do lixo, convertendo-o, se possível, em insumos (Vizcarra, 2010).

O RSU utilizado na Usina Verde vem já pré-tratado da Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (Comlurb), provenientes do aterro sanitário da Comlurb, no bairro Cajú/RJ. Todavia, ao chegar à usina, passa por uma nova triagem. A composição do RSU após processo de reciclagem da Comlurb e da Usina Verde se encontra na Figura 3.6. Em funcionamento desde 2004, a Usina recebe diariamente 30 toneladas de resíduos sólidos (Vizcarra, 2010).



(a) COMLURB



(b) Usina Verde

Figura 3.6 – Composição do RSU da COMLURB e da Usina Verde (FONTES, 2008)

3.1.2.2. Processo de Incineração

Esta descrição está baseada em Fontes (2008), que estudou estes resíduos para uso em concreto de cimento Portland para construção civil.

“O RSU, após a etapa de pesagem, passa pelo processo de triagem, como dito anteriormente, onde os materiais recicláveis são segregados manualmente e com o auxílio de detectores de metais localizados nas duas esteiras, por onde os resíduos são conduzidos. Após a segunda esteira, o RSU é triturado e o material fino separado com o auxílio de peneira rotativa e encaminhado para secagem, visando a redução do teor de umidade. Em seguida, o RSU triturado passa por nova moagem, em moinho de facas, e é depositado em um silo Combustível Derivado do Resíduo (CDR). Estes resíduos (matéria orgânica e resíduos combustíveis não recicláveis) são encaminhados para o forno de incineração, que opera a uma temperatura de 950°C. Durante o processo de combustão, são produzidas duas cinzas: cinza de fundo e cinza volante. A cinza de fundo (*bottom-ash*) é depositada no fundo da câmara de pós-combustão, encaminhada ao tanque de decantação e disposta em caçambas. Os gases quentes e a cinza volante (*fly-ash*) são exauridos da câmara de pós-combustão e aspirados para a caldeira de recuperação onde ocorre o aproveitamento energético (co-geração de energia). Há uma geração efetiva de 0,6MW de energia elétrica por tonelada de lixo tratado, o que é suficiente para abastecer cerca de 2300 residências com consumo médio de 200 KW/mês. Posteriormente, os gases são neutralizados em um conjunto de lavadores e, em seguida, os gases limpos são aspirados e descarregados na atmosfera. A solução de lavagem é então recolhida nos tanques de decantação onde ocorre a neutralização com as cinzas do próprio processo e hidróxido de cálcio, o que ocasiona a mineralização (decantação dos sais), sendo esta solução posteriormente reaproveitada no processo de lavagem (recirculação). Em seguida, a cinza volante é encaminhada para os tanques de decantação onde periodicamente é retirada e armazenada em caçambas. Ao final do processo de incineração para cada tonelada de RSU que entra no forno, se obtém 120 kg das duas cinzas, que representam cerca de 80% de cinza pesada e 20% de cinza volante (dados fornecidos pela Usina Verde S/A). A cinza de fundo está sendo testada, em substituição à areia, na fabricação de tijolos e pisos. As cinzas não

utilizadas são encaminhadas ao Aterro metropolitano Jardim Gramacho, localizado em Duque de Caxias/RJ”.

As Figuras 3.7 até 3.9 apresentam as etapas do processo de incineração, as quais são submetidos os Resíduos para a geração de energia elétrica na Usina Verde (Vizcarra, 2010).

Fontes (2008) conclui no seu estudo que a argamassa testada contendo cinza volante do resíduo sólido urbano apresentou resultados mecânicos, físicos e de durabilidade superiores à referência. A presença da cinza, provavelmente, promoveu o acréscimo destes parâmetros através da ação física de refinamento dos poros. A distribuição de poros mostrou a redução dos grandes capilares, proporcionando o acréscimo no volume dos médios e pequenos capilares num concreto de alto desempenho.

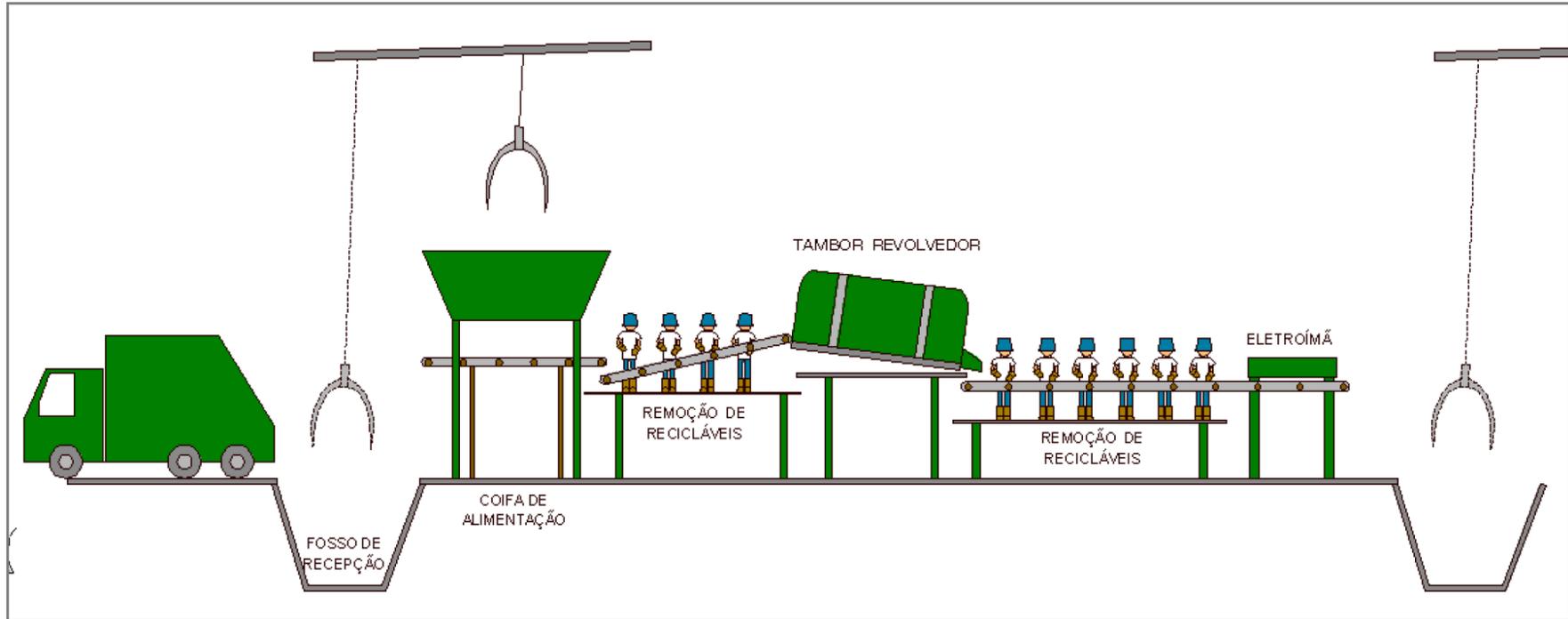


Figura 3.7 – Segregação de materiais para reciclagem na Usina Verde (USINA VERDE, 2009)

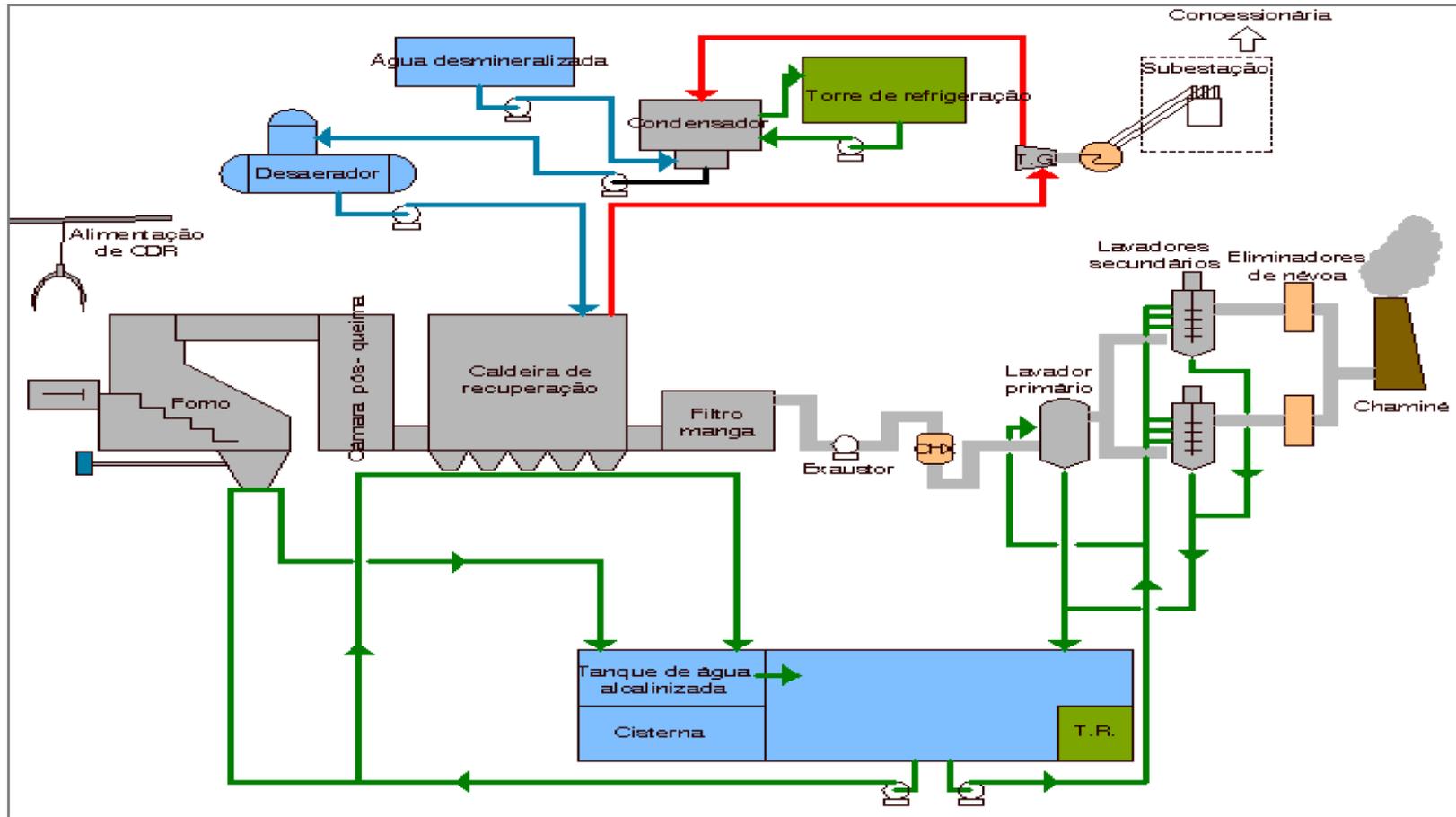


Figura 3.8 – Processo de geração de energia elétrica na Usina Verde (USINA VERDE, 2009)



(a) Pesagem do RSU



(b) Processo de triagem



(c) Câmara de pós combustão



(d) Sistema de lavagem dos gases



(e) Cinza de fundo



(f) Cinza volante

Figura 3.9 – Etapas do processo de incineração de RSU na Usina Verde S/A
(Fontes, 2008)

3.1.3. Misturas Solo-Cinza

O solo foi preparado como descrito no item 3.1.1 e as cinzas foram secadas na estufa a 60°C até atingir uma umidade constante. Depois foram preparadas as misturas calculadas em relação à massa total do solo seco. Após a mistura a seco foi adicionada água em função da umidade ótima obtida nos ensaios de Compactação Proctor Normal. As misturas utilizadas foram 20%, 30% e 40% de cinza volante e cinza de fundo, calculados em relação ao peso do solo seco. No início da pesquisa só foram analisadas misturas com 20% e 40% das cinzas volante e cinzas de fundo, considerando como referência os ensaios feitos por Vizcarra (2010) que avaliou a influência das cinzas de RSU sob carregamento dinâmico, mas depois das análises foi necessário fazer ensaios com 30% da cinza volante e da cinza de fundo, para se ter certeza de como evolui os parâmetros de resistência em função dos teores de cinzas.

A Tabela 3.2 apresenta as siglas utilizadas para descrever cada tipo de solo e as misturas.

Tabela 3.2 - Siglas utilizadas para o solo, cinzas e as misturas

Material / Mistura	Solo (%)	Cinza Volante (%)	Cinza de Fundo (%)	Siglas
Solo	100	0	0	SP
Cinza Volante	0	100	0	CV
Cinza de Fundo	0	0	100	CF
Mistura 1	80	20	0	SP80CV20
Mistura 2	70	30	0	SP70CV30
Mistura 3	60	40	0	SP60CV40
Mistura 4	80	0	20	SP80CF20
Mistura 5	70	0	30	SP70CF30
Mistura 6	60	0	40	SP60CF40

Para as misturas com tempos de cura de 30 e 60 dias foram adicionadas as siglas T30d e T60d, respectivamente.

3.2. Quantidade e Cronograma de ensaios

Neste item se apresenta a quantidade de ensaios de caracterização física, química e mecânicos realizados e o cronograma dos ensaios de Compactação com

energia Proctor Normal e Ensaios Triaxiais tipo Adensado Isotropicamente Drenado (CID) sem tempo de cura e com tempo de cura de 30 e 60 dias.

3.2.1. Quantidade de ensaios

Os ensaios foram divididos em 3 etapas, que são: caracterização física, caracterização química e ambiental e resistência mecânica e são apresentados na Tabela 3.3.

Um dos objetivos referentes a este estudo foi a influência do tempo de cura no parâmetro de resistência mecânica. Cada mistura de solo-cinza foi submetido a ensaios sem tempo de cura e com tempo de cura de 30 e 60 dias, mas as misturas de SP70CV30 e SP70CF30 foram ensaiadas sem tempo de cura e com tempo de cura de 30 dias, pois não houve tempo para realizar os ensaios com tempo de cura de 60 dias.

Na Tabela 3.3 se apresenta a quantidade de ensaios que não apresentaram problemas, mas a quantidade total de ensaios foram superiores devido que em todo estudo experimental ocorre diferentes tipos de problemas. A maioria de problemas apresentados foram nos ensaios de caracterização mecânica (Proctor Normal e Triaxiais CID).

Nos ensaios Proctor Normal se repetia o ensaio cada vez que a mistura solo-cinza apresentava um comportamento diferente no apresentado com outras misturas com outro teor de cinza. Este tipo de comportamento era devido que o material apresentava uma pequena umidade inicial ou porque não se realizou o ensaio corretamente.

Nos ensaios triaxiais CID os tipos de problemas foram variáveis, no começo no moldagem dos corpos de prova onde muitas vezes se perdia estes corpos de prova (por rotura ou má moldagem) e se tinha que repetir o ensaio Proctor Normal. Outros tipos de problemas eram quando a membrana utilizada apresentava um furo no momento do ensaio triaxial e os resultados eram incorretos, o equipamento triaxial apresentava vazamentos nos condutos de água, as leituras estavam erradas ou os dados não foram salvadas devidamente no computador. No total a quantidade final de ensaios triaxiais realizados foram **65**

dos quais 51 não apresentaram problemas e os resultados são apresentados neste trabalho.

Tabela 3.3 – Quantidade de ensaios

Ensaio Siglas	Etapas									
	Caracterização Física				Caracterização Química e Ambiental				Resistência Mecânica	
	Gs	LL	LP	Granulometria	Composição Química	Teor de Matéria Orgânica	Lixiviação	Solubilização	Compactação Normal	Ensaio Triaxial CID
SP	Oau	Oau	Oau	Oau	Oau	1			1	3
CV	Oau			Oau	Oau	Oau	Oau	Oau		
CF	Oau			Oau	Oau	Oau	Oau	Oau		
SP80CV20 T0d	1	1	1	1	1	1			1	3
SP80CV20 T30d										3
SP80CV20 T60d										3
SP70CV30 T0d	1	1	1	1	1	1			1	3
SP70CV30 T30d										3
SP60CV40 T0d	1	1	1	1	1	1			1	3
SP60CV40 T30d										3
SP60CV40 T60d										3
SP80CF20 T0d	1	1	1	1	1	1			1	3
SP80CF20 T30d										3
SP80CF20 T60d										3
SP70CF30 T0d	1	1	1	1	1	1			1	3
SP70CF30 T30d										3
SP60CF40 T0d	1	1	1	1	1	1			1	3
SP60CF40 T30d										3
SP60CF40 T60d										3
Total	6	6	6	6	6	7	0	0	7	51

*Oau=Ensaio feito por outros autores e resultados tomados neste trabalho.

** Os espaços em branco são ensaios que foram impossíveis de realizar pela condição de material ou não se precisava realizar.

Os ensaios de Compactação com energia Proctor Normal foram realizados um dia antes do ensaio triaxial CID, para os ensaios sem tempo de cura e ao mesmo tempo foram preparados os corpos de prova compactados para tempo de cura de 30 e 60 dias.

3.3. Métodos e Procedimentos de Ensaio

Neste item serão apresentados as metodologias e procedimentos utilizados para as análises físicas e químicas do solo, das cinzas e suas misturas.

O objetivo da realização deste programa experimental foi a caracterização do solo e do solo-cinza, no intuito de conhecer seu comportamento logo após os

ensaios mecânicos (ensaios de compactação Proctor Normal e ensaios Triaxiais Drenados) além de conhecer seus parâmetros de resistência e ter uma ideia de como a cinza (volante e de fundo) pode atuar como estabilizante no solo.

3.3.1. Ensaios de Caracterização Física

Para determinar as propriedades índice das amostras de solo e das misturas solo-cinza, foram executados ensaios de caracterização física no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. O solo foi preparado segundo recomendado nas normas técnicas brasileiras (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT). Os ensaios realizados foram feitos seguindo as normas:

- NBR 6457/1986;
- NBR 7181/1984;
- NBR 6508/1984;
- NBR 6459/1984;
- NBR 7180/1984.

3.3.1.1. Densidade Real dos Grãos

A densidade real dos grãos das misturas solo-cinza, foi determinada utilizando o material que passou na peneira #40 (0,425 mm), seguindo a norma NBR 6508/1984 da ABNT.

3.3.1.2. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg, limite de liquidez e limite de plasticidade, foram determinados utilizando-se o material passante na peneira #40 (0,425 mm). O material usado foi ensaiado à temperatura ambiente segundo as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 da ABNT.

3.3.1.3. Análise Granulométrica

Para a determinação da curva granulométrica do solo, peneirou-se 1000 gramas do material na peneira #40 (0,425 mm), seguindo as normas NBR 7181/1984 e NBR 5735 da ABNT.

3.3.2. Ensaio Químico

Estes ensaios foram feitos para conhecer as características químicas das cinzas e das misturas solo-cinza, porque é a maior preocupação com relação à sua classificação como resíduo perigoso ou não perigoso e a escolha do tipo de disposição final que deveria ter.

3.3.2.1. Composição Química

A composição química do solo foi obtida de estudos anteriores realizados por Duarte (2004) e por Sertã (1986), que também ressaltaram uma análise mineralógica do material.

A composição química total das amostras de cinza foi obtida mediante a técnica “*Espectrometria de fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDX)*”. As amostras de cinza pura foram submetidas à análise por EDX em um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva, modelo EDX-720, marca Shimadzu no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ. O ensaio foi desenvolvido por Vizcarra (2010).

A composição química das misturas solo-cinza foram realizadas neste trabalho submetidas à análise por EDX em um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva, modelo EDX-700 no Laboratório de Química da PUC-Rio.

O Espectrômetro de fluorescência de raios-X é um instrumento que determina qualitativamente e semi-quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra. Isto é possível através da aplicação de raios-X na superfície da amostra e a posterior análise dos fluorescentes raios-X emitidos. É uma técnica não-destrutiva para todos os tipos de amostras, incluindo sólidos,

líquidos ou pós, sendo por esta razão interessante para a caracterização dos materiais. O ensaio foi desenvolvido por Vizcarra (2010) e o equipamento está ilustrado na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Equipamento de EDX do LABEST da COPPE/UFRJ (Vizcarra, 2010)

3.3.2.2. Teor de Matéria Orgânica

Para o solo, cinza volante e cinza de fundo, o teor de carbono orgânico é determinado por oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, usando o sulfato de prata como catalizador, sendo o excesso de dicromato após a oxidação, dosado por titulação com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal, utilizando difenilamina como indicador (DIAS e LIMA, 2004). Os ensaios para cinza volante e de fundo de RSU foram realizados por Vizcarra (2010) e do solo foi desenvolvido neste trabalho; todos no Laboratório de Geotecnia/Química de solos da COPPE/UFRJ.

O teor de carbono assim obtido é multiplicado por 1,724 obtendo-se o teor de matéria orgânica. Este fator é utilizado em virtude de se admitir que, na composição média do húmus, o carbono participa com 58%. (EMBRAPA, 1997).

Para as misturas solo-cinza, os ensaios foram feitos no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, de acordo com a Norma ABNT NBR 13600/1996. Utilizou-se uma mufla de 440°C apresentada na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Mufla de 440 °C usada para as misturas solo-cinza do laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

3.3.2.3. Solubilização e Lixiviação

O ensaio de solubilização foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., segundo a Norma ABNT NBR 10006/2004 com a finalidade de classificar o resíduo. Para esta classificação foi utilizada a listagem da Norma ABNT NBR 10004/2004 – anexo G. Esta listagem fornece os valores máximos permitidos para extratos solubilizados. Portanto, quando a análise dos elementos químicos do extrato solubilizado apresenta algum valor superior ao da referida listagem, o resíduo é classificado como não inerte, caso contrário, este é classificado como resíduo inerte de acordo com as definições apresentadas na norma NBR 10004/2004 para resíduos sólidos. O ensaio de solubilização é realizado em duplicata e foi realizado por Vizcarra (2010).

O ensaio de lixiviação também foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., segundo a Norma ABNT NBR 10005/2004, realizado por Vizcarra (2010).

3.3.3. Ensaio de Caracterização Mecânica

Os ensaios foram feitos para conhecer como se comporta o solo e as misturas solo-cinza ao efeito dos ensaios de Compactação Proctor Normal e ensaios Triaxiais Adensados Isotropicamente Drenados.

3.3.3.1. Ensaio de Compactação Proctor Normal

Os ensaios de compactação foram realizados para o solo argiloso e nas misturas solo-cinza, com o intuito de se determinar a umidade ótima de compactação ($w_{ótima}$) e o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) dos materiais e das misturas. Estes ensaios foram realizados segundo as diretrizes da norma NBR 7182 da ABNT, utilizando-se a energia de compactação Proctor Normal e com reuso de material.

Após secagem do solo em estufa a 60°C, iniciou-se o processo de destorroamento deste, passando-o posteriormente pela peneira #4, adotando-se o procedimento descrito pela norma NBR 6457 (ABNT, 1986) - preparação com secagem prévia depois se deixou na estufa de 60°C de um dia para outro. No dia seguinte se retirou o material da estufa e se deixou resfriar até chegar a temperatura ambiente. Em seguida, adicionou-se uma determinada quantidade de água ao material, a fim de que este ficasse com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima. Este valor pode ser estimado inicialmente através do limite de plasticidade, cujo valor pode se aproximar ao da umidade ótima, isto foi feito tanto para o solo argiloso como para as misturas solo-cinza. Após mistura do solo argiloso (puro e com as diversas porcentagens de cinza volante e de fundo) com o volume de água calculado, homogeneizou-se bem a mistura.

Os valores de $\gamma_{dmáx}$ e $w_{ótima}$ obtidos da curva de compactação foram utilizados para moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais CID. Todo o processo foi repetido cinco vezes como mínimo para cada mistura, sendo pelo menos dois no ramo seco e dois no ramo úmido da curva de compactação.

3.3.3.2. Ensaio Triaxiais

As obras geotécnicas, como barragens e estruturas de fundações têm se validado de resultados de ensaios triaxiais para a avaliação do desempenho destes materiais pois são obras que são solicitadas na maior parte da sua vida útil por carregamentos estáticos. Destaca-se que o ensaio triaxial estático permite a simulação de condições de campo variadas e a determinação do comportamento mecânico dos solos segundo diferentes níveis de tensões.

Os ensaios de laboratório visam reproduzir nos corpos de prova as solicitações que o maciço de solo poderá ser submetido no campo. Objetiva-se, com isso, a obtenção de parâmetros mecânicos de resistência e deformabilidade, que possam representar o comportamento do material em métodos de análise.

Segundo Bishop e Henkel (1962), os corpos de prova devem ter uma relação altura/diâmetro igual a 2,0, podendo variar entre 1,5 e 2,5. Estes limites visam minimizar os efeitos de atrito nas extremidades do corpo de prova, mantendo uma condição adequada de esbeltes.

Os cálculos de tensão desviadora ($\sigma_a - \sigma_c$), devem ser efetuados supondo que o corpo de prova, ao se deformar, mantém o formato de um cilindro reto.

3.3.3.3. Ensaio Triaxiais CID

Os ensaios triaxiais realizados no presente trabalho são do tipo Adensado Isotropicamente Drenado (CID). Todos os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Descreve-se a seguir os equipamentos utilizados nestes ensaios, bem como as metodologias empregadas, na preparação dos corpos de prova, processo de saturação e cisalhamento.

3.3.3.3.1. Equipamento utilizado

A prensa utilizada é da marca Wykeham-Ferrance, de velocidade de deslocamento controlada, com capacidade de 10 toneladas. O ajuste das velocidades de deslocamento do pistão é determinado mediante a seleção adequada de pares de engrenagens e a respectiva marcha (Ramírez, 2012).

A câmara triaxial empregada é própria para corpos de prova com diâmetro de 1,5". A câmara possui um corpo de acrílico que suporta uma pressão confinante máxima de 1000 kPa (Ramírez, 2012).

A célula de carga utilizada é do fabricante ELE International Ltd. com capacidade máxima de 5000 kN e prensas de 0,1 kN. Para a obtenção dos deslocamentos foram utilizados LVDT's da marca Wykwham Farrance, com cursos de 25 mm e resolução de precisão de 0,01 mm. O transdutores usado na medida das pressões na câmara, no medidor de variação de volume e das poropressões são da marca Schaevitz, com variações de $\pm 2,0$ kPa e capacidade máxima de 1700 kPa (Ramírez, 2012).

As variações de volume são obtidas através de medidores de variação volumétrica (MVV), fabricados na PUC-Rio, segundo o modelo do Imperial College. Todas as partes do equipamento são apresentadas na Figura 3.12.

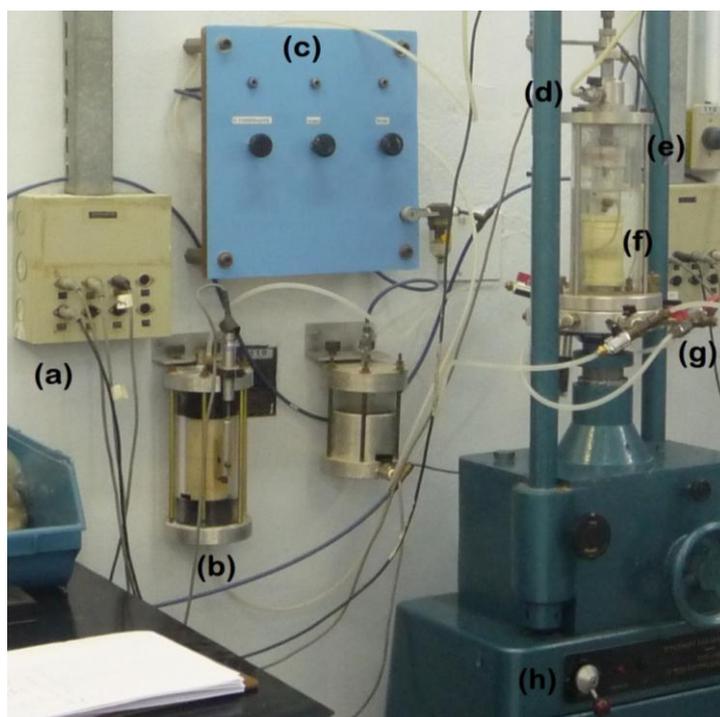


Figura 3.12 -(a) Caixa leitora de dados; (b) Medidor de Variação de Volume tipo Imperial College; (c) Painel de controle das Pressões; (d) Aplicação de Pressão confinante; (e) Cilindro de Acrílico; (f) Corpo-de-prova; (g) Válvulas da câmara Triaxial; (h) Controle para início do cisalhamento

Para a gravação dos dados, obtidos por intermédio do transdutor, foi utilizado o sistema de aquisição de dados composto pelo hardware QuantumX de

oito canais da empresa alemã HBM e pelo software CatmanEasy (Ramirez, 2012) (Figura 3.13)

Com todo este equipamento, o hardware e software utilizado se conseguiram realizar e monitorar em tempo real todas as etapas do ensaio.

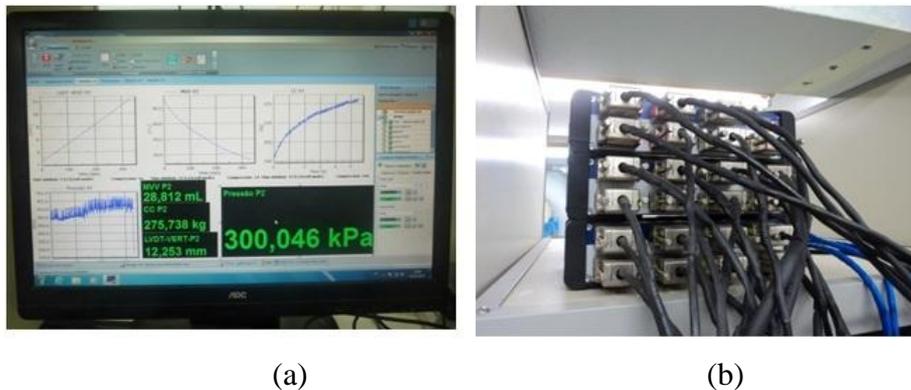


Figura 3.13 – (a) Software CatmanEasy na etapa de cisalhamento, (b) Sistema de aquisição de dados (Ramirez; 2012).

3.3.3.3.2. Preparação dos corpos de prova

Para a confecção dos corpos de prova do solo argiloso puro e as misturas solo-cinza, inicialmente compactou-se um corpo cilíndrico, na energia Proctor Normal, utilizando a umidade ótima e massa específica seca máxima obtida para cada tipo de mistura e o solo puro (descrição apresentada no item 3.2.3.1).

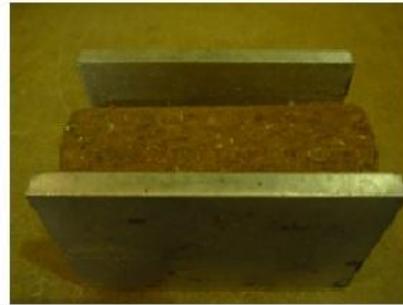


Figura 3.14 - Corpo cilíndrico compactado

Obtido o material compactado (Figura 3.14), molda-se o corpo-de-prova utilizando um aparelho de fabricação própria do laboratório, as dimensões destes corpos de prova são 78.2 mm de altura e 38.0 mm de diâmetro (Figura 3.15). Retira-se 3 pequenos corpos-de-prova, de cada corpo compactado, para assim ter as mesmas condições para cada ensaio.



(a)



(b)

Figura 3.15 – (a) Corpo de prova após moldagem; (b) Corpo de prova após aplainadas a base e a topo

No momento da moldagem retiram-se 3 cápsulas com o solo ou mistura do solo-cinza (Figura 3.16), depois pesar e deixar na estufa de 105°C por 24h para conhecer sua umidade inicial.



Figura 3.16 – Cápsulas com mistura de solo-cinza tirados do moldagem

Antes de fazer a montagem testa-se a membrana (com ajuda de um molde de aço) para ter a certeza que não esteja furada e possa vaziar água dentro dela (é

recomendável não reutilizar as membranas depois de cada ensaio) (Figura 3.17), pesar o corpo de prova consertado para ter seu peso inicial e verificar o correto funcionamento de cada válvula do equipamento triaxial (Figuras 3.18)



Figura 3.17 – Teste de membrana



(a)



(b)

Figura 3.18 – (a) Pesagem do corpo-de-prova para montar na prensa triaxial; (b) Verificação da prensa antes do ensaio

No momento da montagem, deve-se colocar um papel filtro na base do equipamento triaxial (ver se a prensa apresenta ou não uma pedra porosa na base, se não, colocar uma antes do papel filtro) (Figura 3.19). Em seguida colocar o corpo de prova cuidadosamente, coloca-se a membrana com ajuda do molde de aço (Figura 3.20),



Figura 3.19 – Colocação do papel filtro.



(a)

(b)

Figura 3.20 – (a) Colocação do corpo-de-prova no equipamento triaxial; (b) Colocação da membrana com ajuda do molde de aço.

Uma vez que corpo de prova esteja fixo junto com a membrana, coloca-se mais um papel filtro e uma pedra porosa no topo do corpo de prova nessa ordem (Figura 3.21).



Figura 3.21 – Colocação do papel filtro e a pedra porosa no topo do corpo-de-prova

Para finalizar coloca-se o *cap* no topo, seguida da membrana, fixa-se com 2 o-rings na base e outros 2 no topo e se tira o molde de aço. Depois pode-se encerrar o corpo de prova dentro da câmara triaxial, segurar, encher com água e colocar a mangueira de pressão confinante na parte superior da câmara para começar a etapa de saturação que vamos ver no seguinte item (Figura 3.22).



(a)

(b)

(c)

Figura 3.22 – (a) Fixação da membrana ao corpo de prova com os o-rings; (b) Preenchimento da câmara triaxial com água; (c) Colocação da conexão de pressão confinante.

3.3.3.3.

Procedimento de saturação dos corpos de prova

As técnicas de saturação utilizadas para os corpos de prova de solo argiloso e misturas solo-cinza, foram de saturação por percolação de água através da amostra e de saturação por contrapressão. No caso da percolação a diferença de pressão entre a base e o topo utilizado foi de 7 kPa, sendo que a água fluía da base para o topo do corpo-de-prova. Na saturação por contrapressão, a pressão confinante aplicada ao corpo-de-prova excedia a contrapressão em 10 kPa, onde o fluxo de água era permitido pelo topo e base. Além de medir o parâmetro B era monitorada a quantidade de água que percolava através da amostra, considerando-se saturada quando se atingia um volume percolado de duas vezes o volume de vazios do corpo de prova.

Para verificar se o grau de saturação apresentava nível satisfatório, calculava-se o parâmetro B de Skempton, por meio da seguinte equação:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Δu : excesso de poropressão gerado,

$\Delta \sigma_c$: acréscimo de tensão confinante aplicado.

Para as amostras de solo e misturas de solo-cinza foram considerados valores de B aceitáveis maiores ou iguais a 0,95.

Para os corpos de prova de mistura solo-cinza o tempo de saturação foi variável mas a maioria deles atingia a saturação depois de 24h, foram poucos os que precisaram de 2 dias para atingir a saturação, isto aconteceu com os corpos de prova que foram deixados com um tempo de cura de 30 ou 60 dias.

3.3.3.3.4.

Adensamento e Cálculo do t_{100}

Após a saturação do corpo de prova, iniciava-se a fase de adensamento. Durante 24 horas foram coletados dados de variação de volume.

Com estes dados se traçava o gráfico variação de volume (ml) x raiz do tempo ($\text{min}^{0,5}$). Segundo a recomendação de Head (1986), prologava-se o trecho retilíneo inicial até encontrar a prolongação horizontal do trecho final. Este último trecho corresponde à estabilização das variações de volume. O ponto de interseção destas duas linhas prolongadas fornecia a raiz de t_{100} ($\text{min}^{0,5}$) no eixo das abscissas. Logo com o valor de t_{100} (min) se calculava a velocidade de cisalhamento.

3.3.3.3.5. Cálculo da velocidade de cisalhamento e etapa de Cisalhamento

Como os ensaios triaxiais foram drenados, a expressão utilizada (Head, 1986) foi a seguinte:

$$v = \frac{\epsilon_f \cdot L}{100 \cdot t_f} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

v: velocidade máxima de cisalhamento em mm/min,

L: altura do corpo de prova em mm,

ϵ_f : deformação axial estimada na ruptura em %,

t_f : tempo mínimo de ruptura em minutos.

Onde o t_f para o ensaio triaxial (CID) é:

$$t_f = 8,5 * t_{100} \quad \text{Equação 3}$$

Head (1986) aponta que: “se o valor calculado de t_f é menor que 120 minutos (2 horas) o atual tempo de ruptura não deveria ser menor que 2 horas”, então se adota $t_f = 120$ porque todos os ensaios (de solo argiloso e misturas solo-cinza) tiveram um tempo de ruptura menor do que 120 minutos,

O objetivo de definir uma velocidade suficientemente lenta para a aplicação da compressão axial é permitir a total drenagem da água do corpo de prova sem gerar excesso de poropressão.

Para os corpos de prova realizados com o solo argiloso e misturas solo-cinza se definiu que a ruptura ocorreria para uma deformação axial de 5%. Assim, a velocidade máxima (v) calculada foi a mesma para todos, sendo a velocidade adotada igual a 0,030 mm/min.

Com a velocidade de cisalhamento definida, procedia-se a colocação de um par de engrenagens na prensa, que define a velocidade desejada. Para os cálculos foi adotado 15% de deformação axial como deformação máxima para todos os ensaios.

Para os ensaios triaxiais, os variantes de tensão q (tensão de desvio) e p' (tensão efetiva média normal) foram calculados com as formulações de Lambe, para os parâmetros de resistência do solo utilizou-se os valores da envoltória de resistência (α') e da coesão (a') obtida no espaço $p':q$, para calcular os parâmetros de resistência no espaço Mohr Coulomb ($\varphi' - c'$). As formulações de Lambe e os parâmetros definem-se como:

$$q = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \quad \text{Equação 4}$$

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \quad \text{Equação 5}$$

$$\tan(\alpha') = \text{sen}(\varphi') \quad \text{Equação 6}$$

$$a' = c' \cdot \cos(\varphi') \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

α' : inclinação da envoltória de resistência no plano $p':q$.

a' : intercepto com o eixo q da envoltória de resistência no espaço $p':q$.

φ' : inclinação da envoltória de resistência do plano $\sigma:\tau$ (Mohr Coulomb).

c' : intercepto da envoltória de resistência do plano $\sigma:\tau$ (Mohr Coulomb).

3.3.3.3.6. Análises de Resistência

Para obter a tensão de ruptura pode-se analisar o pico das curvas tensão versus deformação traçadas em função da diferença de tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) ou da relação σ_1/σ_3 dependendo da finalidade do ensaio. De acordo com Head (1986), a relação σ_1/σ_3 é preferencialmente utilizada nas argilas, em ensaios não drenados, em que a tensão desviatória continua a aumentar para grandes deformações. Head (1986) ressalta que outras “opções de ruptura” podem ser escolhidas, como a resistência residual ou a resistência obtida para cisalhamento a volume constante, ou seja, na condição de estado crítico, ou ainda definida a partir das deformações máximas permissíveis no projeto em questão. A Figura 3.23 apresenta os critérios para determinação de ruptura.

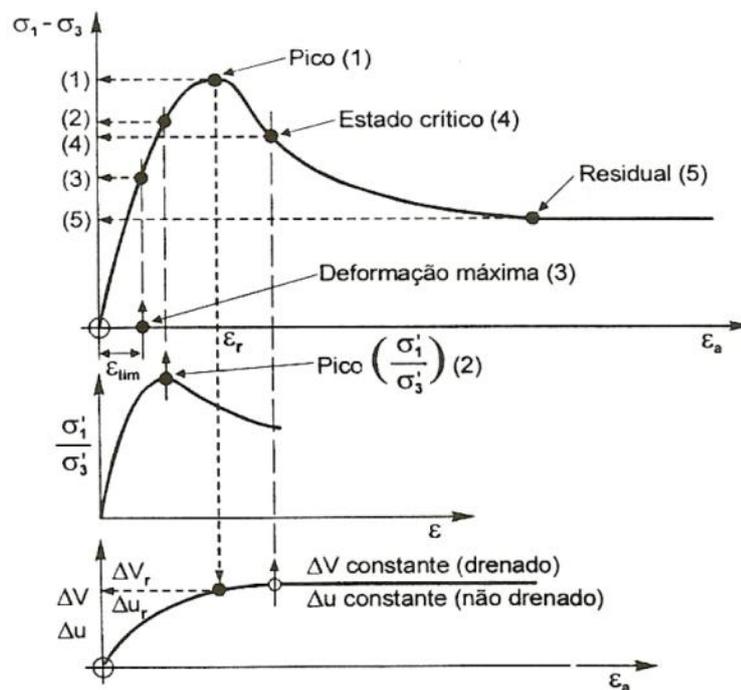


Figura 3.23 – Diferentes critérios para definição de ruptura. (Head, 1986 apud Dias, 2007)

A resistência ao cisalhamento dos solos é afetada por diversos fenômenos entre os quais podemos destacar tensão de confinamento, o atrito e a coesão.

A resistência por atrito é função da tensão normal no plano de deslizamento relativo de cada partícula. Segundo Terzaghi, em sua “Teoria Adesiva do Atrito”,

a superfície de contato real entre dois corpos constitui apenas uma parcela da superfície aparente de contato, dado que em um nível microscópico as superfícies dos materiais são efetivamente rugosas. Considerando que o coeficiente de atrito deve ser governado pelo que ocorre nos pontos reais de contato, as características de rugosidade e de adsorção da superfície da partícula serão relevantes para controlar a resistência que se desenvolve. A rugosidade governa o tamanho das protuberâncias superficiais, que em geral são diferentes quer se consideram partículas grossas ou partículas finas. Por outro lado, a adsorção de água e outras substâncias tende a afetar a natureza e tamanho da área de contato entre partículas. (Dias, 2007)

Segundo Dias (2007), a coesão consiste na parcela de resistência de um solo que existe independentemente de qualquer tensão aplicada, além disso, existe várias origens da coesão nos solos, por exemplo a cimentação entre partículas proporcionada por carbonatos, sílica, óxidos de ferro e responde muitas vezes por altos valores de coesão; outras são as forças de atração e repulsão causadas pelos fenômenos eletrostáticos e eletromagnéticos.

De acordo com Dias (2007) existe um tipo de coesão que não tem ligação com cimentação ou com atrações químicas, essa coesão, chamada de aparente, ocorre em solos não saturados através da adsorção provocada pela pressão neutra negativa.