

3 Programa Experimental

3.1 Considerações Iniciais

O programa experimental de ensaios estabelecido teve por objetivo principal investigar e identificar o efeito da adição dos aditivos (enzimas) nos solos estudados através de ensaios no equipamento LWT (Load Wheel Test). Para tal, foi desenvolvido um programa experimental dividido em três etapas.

Na primeira etapa foram realizados todos os ensaios de caracterização dos solos estudados.

Na segunda etapa foi realizado estudo das três amostras de solos lateríticos com as diferentes enzimas provenientes de três empresas distintas, onde todas foram ensaiadas para três diferentes dosagens de aplicação (1:20, 1:30 e 1:40), além de ensaios com o solo puro (sem enzima), totalizando 30 variáveis.

Na etapa seguinte, a melhor mistura ensaiada foi submetida a ensaios adicionais no LWT para diferentes tempos de cura (14, 28, 56 e 90 dias).

Os ensaios do programa experimental desta pesquisa foram realizados nos Laboratórios de Solos, Microscopia Eletrônica de Varredura e de Difração de Raios-X do Instituto Militar de Engenharia-IME, bem como nos Laboratórios de Geotecnia e Meio Ambiente, Estruturas e Materiais e Laboratório de Química da PUC-Rio.

3.2 Materiais Utilizados

Trabalhou-se com dois tipos de materiais distintos: solos e aditivos (enzimas), bem como as misturas decorrentes destes materiais com diferentes dosagens.

3.2.1 Solos

Os solos estudados são procedentes de uma jazida localizada no bairro Parque Capivari, no município de Duque de Caxias na região metropolitana da capital do Estado do Rio de Janeiro (Figura 3-1 e Figura 3-2).

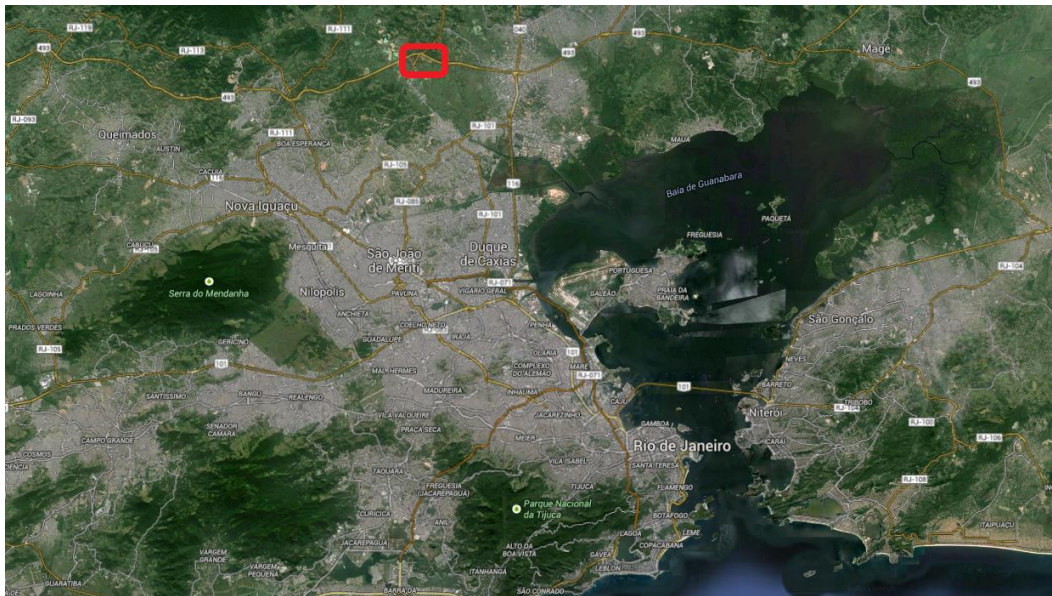


Figura 3-1 - Localização da jazida onde foram retirados os solos do presente estudo

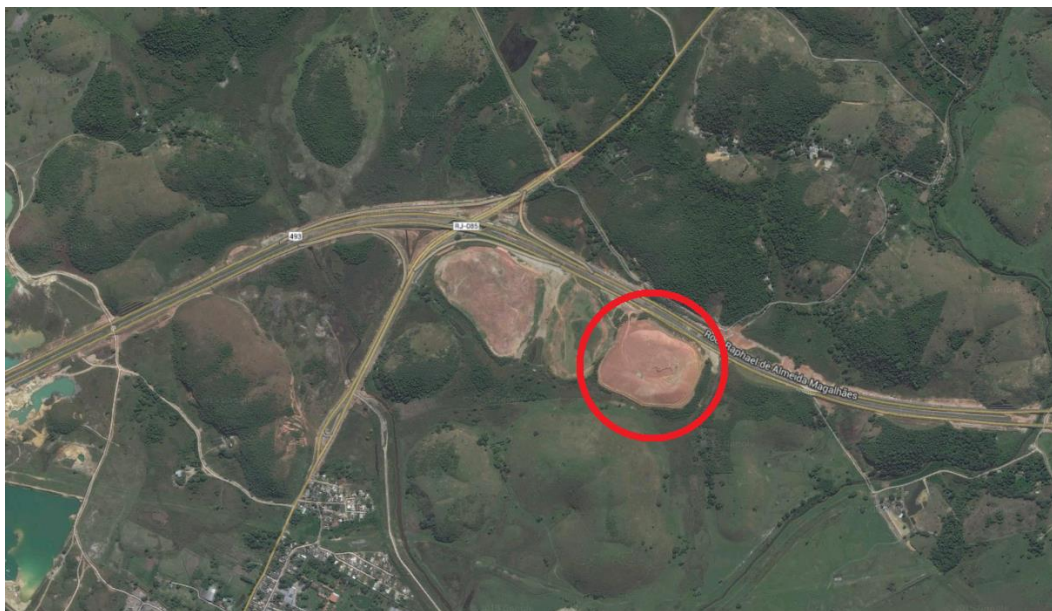


Figura 3-2 - Detalhe da jazida onde foram retirados os solos do presente estudo

Esta jazida foi utilizada para retirada de solos para a construção da Rodovia Raphael de Almeida Magalhães, conhecida como Arco Metropolitano do Rio de Janeiro (que pode ser identificado na Figura 3-2), importante obra rodoviária para

a cidade do Rio de Janeiro com a missão de desviar o intenso tráfego de veículos que atravessam o município, diminuindo assim os congestionamentos nas principais vias de acessos à cidade.

Pela jazida ter sido utilizada apenas para a obra do Arco Metropolitano, justifica-se sua escolha na presente pesquisa, visto que pode-se avaliar o comportamento de um material que estava justamente sendo utilizado em uma obra rodoviária.

Foram coletados três diferentes tipos de solo de um mesmo perfil como pode ser visto nas Figuras (Figura 3-3 e Figura 3-4).

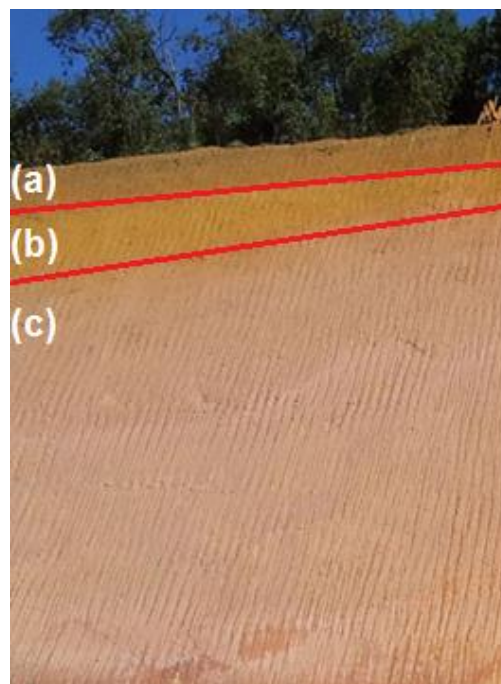


Figura 3-3 - Perfil com os três diferentes solos desta pesquisa
(a) solo preto (b) solo amarelo (c) solo vermelho

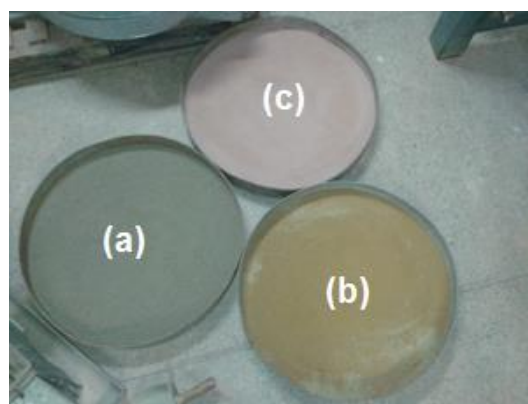


Figura 3-4 - Solos utilizados no presente estudo
(a) solo preto (b) solo amarelo (c) solo vermelho

Como pode ser observado, os três solos possuem diferentes cores, porém pertencem a um mesmo perfil geotécnico (Figura 3-3) e serão identificados a seguir para melhor compreensão do estudo.

O primeiro solo (Figura 3-5) é o mais superficial do perfil, têm uma coloração escura devido à presença de matéria orgânica. Por conta disso foi chamado ao longo da pesquisa de Solo Preto.



Figura 3-5 - Solo preto utilizado no presente estudo

O segundo solo (Figura 3-6) é intermediário no perfil, logo a baixo do Solo Preto, foi chamado de Solo Amarelo por conta da sua coloração.



Figura 3-6 - Solo amarelo utilizado no presente estudo

O terceiro e último solo utilizado no presente estudo (Figura 3-7) é o mais profundo dos três, como pode ser visto no perfil e devido à sua coloração avermelhada foi batizado de Solo Vermelho.



Figura 3-7 - Solo vermelho utilizado no presente estudo

De acordo com a carta de solos (apresentada no Anexo I) da EMPRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (2003), os solos desta pesquisa pertencem à classe do latossolo vermelho-amarelo distrófico típico (LVA) englobando os três tipos de solos estudados.

3.2.2 Enzimas

Os produtos enzimáticos utilizados na presente pesquisa, foram obtidos junto às empresas que os comercializam no Brasil, são produtos patenteados, comercializados sob a forma líquida. Foram utilizadas amostras das seguintes enzimas:

- TerraZyme – Optimal Soil Stabilizer – Nature-Plus Inc;
- PermaZyme – Pacific Enzymes;
- EMC – Earth Materials Catalyst – Soil Stabilization Company.

Para uma melhor identificação, serão utilizadas as siglas TZ, PZ e EMC respectivamente ao longo do trabalho. Na Figura 3-8 pode se visualizar solução de 3% (a ser explicado na primeira etapa do item 3.3.4.3.1) em volume de água das três enzimas utilizadas neste estudo.

3.2.3 Água

A água utilizada nos ensaios é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro. Já nos ensaios de caracterização física de limites de

Atterberg, análise granulométrica e massa específica real dos grãos, foi utilizada água destilada, conforme as normas aplicáveis.



Figura 3-8 - Enzimas em solução de 3% (em volume) em água utilizadas no presente estudo

3.2.4 Misturas

As misturas estudadas estão apresentadas na Tabela 3-1 e explicadas a seguir.

Buscou-se avaliar os três tipos de solos com os três tipos de enzimas em três dosagens diferentes, o que resultou em 30 diferentes misturas.

A justificativa pelo valor da dosagem é pelo fato dos fabricantes estipularem o valor médio de 1:30 no momento da aplicação, isto é, 1 litro de enzima líquida para cada 30m³ de solo tratado. Tendo este valor, assumiu-se valores acima e abaixo para avaliar seu comportamento, resultando em 1:20, 1:30 e 1:40.

Tabela 3-1 - Misturas solo-enzimas estudadas

	Enzima	Dosagem	
Solo preto	PURO		
	EMC	1:20	
		1:30	
		1:40	
	PZ	1:20	
		1:30	
		1:40	
	TZ	1:20	
		1:30	
		1:40	
	Solo amarelo	PURO	
		EMC	1:20
1:30			
1:40			
PZ		1:20	
		1:30	
		1:40	
TZ		1:20	
		1:30	
		1:40	
Solo vermelho		PURO	
		EMC	1:20
	1:30		
	1:40		
	PZ	1:20	
		1:30	
		1:40	
	TZ	1:20	
		1:30	
		1:40	

Para cada mistura, foram feitos no mínimo 3 corpos de prova, a fim de obter um valor médio de avaliação.

Os corpos de prova (CPs) possuem tamanho padrão de 380mm x 50mm x 10mm, e serão melhor explicados no item 3.3.4.3 – Ensaio Load Wheel Test (LWT).

Todos os corpos de prova para todas as misturas foram produzidos idênticos, ou seja, sob as mesmas condições de temperatura e umidade. Foram executados também corpos de prova no estado puro, para comparação dos resultados.

Alguns resultados podem ser influenciados pelo ambiente, mesmo tomando todos os cuidados para que os corpos de prova sejam produzidos idênticos. Isso ocorre pela enzima ser de origem biológica e possam a vir reagir com outras bactérias presentes no ar, por exemplo.

Essa influência pode ser até do próprio equipamento, ferramentas ou acessórios utilizados, pois estes não foram esterilizados para a fabricação de cada corpo de prova, podendo ficar resquícios microscópicos e influenciar em outros resultados.

3.3 Ensaio Realizados

3.3.1 Coleta e Preparação das Amostras

As amostras de solo foram coletadas com auxílio de ferramentas de mão para escavação, transportadas e armazenadas em sacos plásticos devidamente vedados, com todos os cuidados necessários, a fim de evitar a contaminação do solo e grandes alterações de umidade.

A preparação do solo para os ensaios envolveu procedimentos como a secagem em estufa a 60°C, para obtenção de maior homogeneidade em toda a amostra, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica, tais como estabelecidos pela NBR 6457/1986 (ABNT, 1986) e permaneceram acondicionadas no Laboratório de Solo do IME ao longo de toda a pesquisa.

3.3.2 Ensaio Físicos

Os ensaios de caracterização física dos solos envolveram os ensaios de análise granulométrica, densidade específica dos grãos, limites de Atterberg e determinação do teor de umidade natural. Como citado, os ensaios de caracterização foram executados no Laboratório de Solos do IME e seguiram os métodos estabelecidos pelas seguintes normas:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solo. Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica;
- NBR 6508/1984 – Solo – Determinação da Massa Específica dos Grãos;
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

3.3.2.1 Análise Granulométrica

Os ensaios de análise granulométrica, para os três tipos de solos, foram realizados considerando os procedimentos da NBR 7181/1984 (ABNT, 1984).

Tendo em vista que os materiais analisados são constituídos tanto por fração grossa, quanto fina, a análise granulométrica foi feita por granulometria conjunta, englobando as etapas de peneiramento e sedimentação, nesta última, tendo sido utilizado o defloculante hexametáfosfato de sódio.

O ensaio de sedimentação foi executado com 50g de solo passante na peneira 0,42mm (#40) colocado em 125ml de defloculante (hexametáfosfato de sódio). Esse material ficou em repouso por 24 horas e então foi submetido à dispersão mecânica. Em seguida foi colocado em uma proveta de 1000ml onde o restante do volume foi completado com água destilada para então serem realizadas as devidas leituras. Após as leituras o material foi colocado na peneira 0,075mm (#200) e submetido ao processo de lavagem com movimentos circulares e suaves. Por último, foi levado à estufa para secagem e pesagem.

3.3.2.2 Massa Específica dos Grãos

Para a determinação da massa específica dos grãos foi realizado o ensaio segundo a NBR 6508/1984 – Massa específica real dos grãos, utilizando amostras deformadas do solo.

Depois dos procedimentos para a preparação das amostras, como a secagem em estufa a 60°C, foi separado 10g de material para a realização do ensaio. Inicialmente, foram obtidos dois pesos, o picnômetro vazio (P1) e o picnômetro com a amostra em seu interior (P2), em “banho maria” visando expulsar todas as bolhas de ar e posteriormente resfriado à temperatura ambiente. O picnômetro foi cuidadosamente preenchido com água destilada e fechado, obtendo-se o terceiro peso, picnômetro com a amostra e água (P3). Em seguida, todo o material foi retirado do interior do equipamento, que foi lavado e a seguir enche-se o picnômetro completamente com água destilada, para, enfim, obter-se o último peso (P4). A partir destas medidas, foi possível determinar a massa específica dos grãos, como demonstrado pelas equações a seguir (Equação 3-1 e 3-2):

$$Dt = \frac{P2-P1}{(P4-P1)-(P3-P2)} \quad (3-1)$$

$$Gs = Dt \times k_{24} \quad (3-2)$$

Onde: Dt: Densidade real dos grãos a temperatura

k_{24} : razão entre a densidade relativa da água a temperatura t e a 20°C, tabelada na norma.

Gs: Massa específica real dos grãos

3.3.2.3 Limites de Atterberg

Os ensaios para determinação dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), foram realizados conforme as normas brasileiras NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 (ABNT, 1984).

Através dos resultados obtidos destes ensaios, pode ser determinado o Índice de Plasticidade (IP) dos materiais, conforme a Equação 3-3:

$$IP = LL - LP \quad (3-3)$$

3.3.2.4 Ensaio M.C.T. (Miniatura Compactada Tropical)

A metodologia MCT foi desenvolvida por Nogami e Villibor nos anos 1980 e 1981, com o objetivo de classificação de solos tropicais e principalmente diferenciar se o solo tem comportamento laterítico ou não-laterítico.

Para o ensaio de MCT o material tem que ser integralmente passante na peneira 10 (2,0 mm) ou apresentar uma fração retida nesta peneira que não seja significativa (<10%).

A Metodologia de Classificação MCT, baseada em propriedades mecânicas e hidráulicas obtidas em corpos de prova compactados em dimensões reduzidas foi desenvolvida especialmente para os solos finos tropicais e teve sua normalização regulamentada em 1994, pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1994).

A Metodologia MCT utiliza corpos de prova miniatura, compactados mediante procedimento especial. Para a obtenção de dados visando especificamente a classificação MCT de um solo utilizam-se dois dos ensaios da metodologia: o ensaio de Compactação e o ensaio de Perda de Massa por Imersão, que apresentam as características descritas a seguir (conforme ABPv, 2009):

1. Ensaio de Compactação:

Da amostra seca ao ar e passada na peneira de 2 mm separam-se pelo menos 5 porções colocando-as em diferentes umidades. Toma-se uma porção com determinada umidade (H1) e pesam-se 200g, introduzindo-a no molde que deve ser devidamente posicionado no equipamento de compactação, sendo utilizado junto do cilindro de compactação um espaçador. Dá-se o primeiro golpe (n=1) e mede-se a altura A1. Retira-se o espaçador e repetem-se as operações de medida de altura após o primeiro golpe, para n=2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, ..., n, ...4n, sendo finalizada a compactação quando:

- A diferença de altura entre leituras sucessivas for menor que 0,1 mm (em relação à primeira condição para finalização da compactação, a norma DNER-ME 258/94 (DNER, 1994) diz que se deve interromper a compactação quando a diferença entre leituras a4n - na, for menor que 2,0 mm);
- 4n golpes atingir 256 golpes;

- Houver nítida expulsão de água no CP.

Repetem-se as operações para os outros teores de umidade, H2, H3, H4, e assim sucessivamente.

São obtidos então 2 coeficientes (c' e d'), descritos a seguir (ABPV, 2009):

Curva de Deformabilidade (Mini-MCV) – Coeficiente c' :

Para cada teor de umidade traça-se a curva n_x ($a4n - na$) (número de golpes x diferença de altura) em escala monolog (\log_{10}) para n . Estas curvas de deformabilidade são denominadas curvas Mini-MCV, porque a partir delas pode-se determinar o valor da condição de umidade, tomando-se a curva correspondente a um determinado teor de umidade e procurando-se sua interseção com a reta de equação $a=2\text{mm}$, que foi adotada como referência para os CP da metodologia, determinando assim o valor de golpes B_i correspondente. Define-se Mini MCV para cada teor de umidade pela expressão:

$$\text{Mini MCV} = 10 \times \text{Log}_{10} (B_i) \quad (3-4)$$

O coeficiente c' é o coeficiente angular (sem sinal) da reta “assimilável” à curva Mini MCV igual a 10, a ser obtida diretamente ou por interpolação gráfica apropriada, visto que raramente se obtém uma com Mini-MCV igual a 10. Segundo Nogami e Villibor (1995) o coeficiente c' relaciona-se aproximadamente com a granulometria, de acordo com a

Tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Valores típicos de c' para diferentes granulometrias de solos (Nogami e Villibor, 1995)

Tipo de Solo	Coeficiente c'
Argilas e Solos Argilosos	Acima de 1,5 – Elevado
Solo de várias Granulometrias como Areia Argilosa, Argila Siltosa, etc	$1,5 > c' > 1,0$
Areia e Siltes não Plásticos ou Pouco Coesivos	Abaixo de 1,0 - Baixo

Curva de Compactação – Coeficiente d’:

Calculadas as massas específicas aparentes secas (MEAS), traça-se a família de curvas de compactação. O coeficiente d’ é definido como a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação correspondente expresso em %. Valores típicos de d’ estão apresentados na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 - Valores típicos de d’ para diferentes granulometrias de solos (Nogami e Villibor, 1995)

Tipo de Solo	Coeficiente d’
Argilas Lateríticas	Geralmente d’>20
Argilas não Lateríticas	Frequentemente possuem valores d’<10
Areias Puras	d’ baixo
Areias Finas Argilosas	d’ muito elevado (pode ultrapassar 100)
Siltosos, Micáceos e/ou Caulínicos	d’ muito pequeno, frequentemente d’<5

2. Ensaio de Perda de Massa por Imersão em Água (ABPv, 2009):

O ensaio de perda de massa por imersão foi desenvolvido com o objetivo específico de distinguir o comportamento laterítico do não laterítico, quando os mesmos possuem características similares no que se relaciona a:

- Inclinação do ramo seco da curva de compactação Mini-MCV, correspondente a 12 golpes, soquete leve (coeficiente d’);
- Inclinação da curva Mini-MCV (ou de deformabilidade), correspondente a condições padronizadas.

Para determinação do valor de perda de massa por imersão são utilizados os corpos de prova compactados segundo o procedimento Mini-MCV. Os CPs são parcialmente extraídos dos moldes de compactação, de maneira que fiquem com saliência de 10mm, e imersos em uma cuba preenchida com água, anotando-se o comportamento nas primeiras horas.

Após pelo menos 20 horas esgota-se a água e secam-se as cápsulas que contêm a parte desagregada para pesagem. Obtém-se o “Pi”, expresso pela

massa seca em percentagem da massa seca da parte do corpo de prova inicialmente saliente, para cada teor de umidade.

O fator de desprendimento é dado da seguinte forma:

- Desprendimento do solo em bloco coeso – 0,5 (diminui o efeito da perda de massa);
- Não desprendimento de solo – zero;
- Solo desprender esfarelado – 1,0.

O “Pi considerado” é o valor de “Pi” multiplicado pelo valor de desprendimento.

O valor de “Pi” a ser usado para fins classificatórios é obtido por interpolação gráfica, traçando-se a curva de variação das percentagens acima obtidas, “Pi considerado” x Mini MCV, procurando-se o valor correspondente a Mini MCV 10 ou 15, conforme se trate de solo de baixa ou elevada massa específica aparente, conceito fixado de acordo com o seguinte: considera-se baixa MEAS quando a altura final do corpo de prova para Mini-MCV igual a 10 for igual ou maior que 48 mm e elevada MEAS quando não se obtiver a condição anterior.” A Figura 3-9 apresenta a perda por imersão de um dos solos estudados.

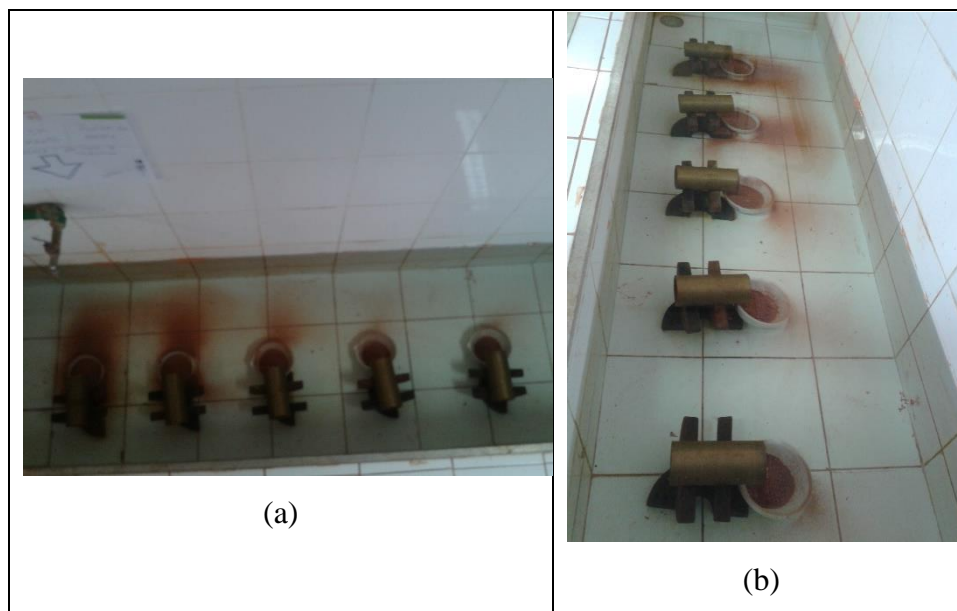


Figura 3-9 - Perda de massa por imersão do solo vermelho do presente estudo

3. Classificação Geotécnica MCT:

A classificação geotécnica MCT baseia-se na determinação de algumas propriedades mecânicas e hidráulicas em CPs de 50 mm de diâmetro.

Nessas condições, é apropriada apenas para solos de granulação fina, que passam integralmente na peneira de 2,0 mm ou que têm uma percentagem desprezível retida nesta peneira, ou que a sua influência nas propriedades do solo possa ser avaliada para que os resultados obtidos sejam devidamente corrigidos (Nogami e Villibor, 1995).

Os ensaios e dados a serem obtidos, em resumo, são:

- a) Ensaio de compactação – Procedimento Mini-MCV
 - Coeficiente c' ;
 - Curva Mini-MCV x Teor de Umidade (h);
 - Coeficiente d' .
- b) Ensaio de Perda de massa por imersão
 - Perda de massa “Pi”, correspondente a Mini-MCV 10 (MEAS baixa) ou Mini-MCV 15 (MEAS alta);
 - Curva “Pi” x Mini MCV, que pode ser necessária como critério auxiliar de decisão.
- c) Cálculo do índice e' pelo emprego da expressão

$$e' = \sqrt{\left(\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}\right)} \quad (3-5)$$

Onde:

d' = coeficiente angular do ramo seco da curva de compactação referente a energia de 12 golpes no ensaio Mini-MCV;

Pi = perda por imersão (em %).

A determinação do grupo classificatório se dá a partir do gráfico em que se tem no eixo das abscissas, o coeficiente c' e no eixo das ordenadas, o coeficiente e' . Este gráfico será mostrado no capítulo 4. O grupo é obtido diretamente no gráfico, exceto quando o ponto cai sobre uma das proximidades dos limites “L/N” (comportamento laterítico/não-laterítico), prevalecendo o seguinte critério (ABPv, 2009):

- Será considerado “L” quando o Pi decrescer tendendo a zero, no intervalo Mini-MCV de 10 a 20 e a curva Mini-MCV = f(h) apresentam concavidade para cima no intervalo Mini-MCV de 1 a 15;

- Será “N” quando o Pi variar de maneira diferente e a referida curva apresentar-se sensivelmente retilínea ou com concavidade para baixo;
- Será considerado transicional, representado por símbolo duplo dos grupos adjacentes quando as condições não correspondem às acima especificadas;
- Ponto cai longe dos limites porém não satisfaz as condições descritas para a identificação do comportamento “L” ou “N”. A interpretação dos grupos da classificação pode ficar prejudicada.

3.3.3

Ensaio Químicos

Os ensaios químicos realizados consistiram na determinação da matéria orgânica dos solos estudados, da composição química dos solos e da composição química das melhores misturas encontradas nos ensaios mecânicos.

Estes ensaios foram feitos no Laboratório de Solos do IME e no Laboratório de Química da PUC-Rio e seguiram os métodos estabelecidos pela seguinte norma:

- NBR 13.600/1996 - Determinação do teor de Matéria Orgânica por Queima à 440°C.

3.3.3.1

Teor de Matéria Orgânica

Inicialmente, pequena quantidade de cada um dos solos foi depositada em um cadinho de massa conhecida e verificada a massa do conjunto (cadinho + mistura + água + matéria orgânica). Em seguida, este conjunto foi colocado em estufa, com temperatura entre 105 e 110°C, para a retirada da umidade, por 24 horas. Após este período, o conjunto (cadinho + mistura + matéria orgânica) teve a massa novamente, verificada. E, finalmente, o material foi submetido à temperatura de 440°C, por um período de 12 horas, na mufla, para queima total da matéria orgânica. Posteriormente, a massa da situação final do conjunto (cadinho+mistura) é verificada e, então, a partir da Equação 3-6, o teor de matéria orgânica pode ser determinado:

$$MO = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \times 100 \quad (3-6)$$

Onde:

MO: Teor de matéria orgânica (%)

A: massa da amostra seca em estufa, à temperatura de 105 a 110°C (g)

B: massa da amostra queimada em mufla, à temperatura de 440°C (g)

3.3.3.2

Composição Química

Os ensaios de composição química foram realizados junto ao departamento de Engenharia Química da PUC-Rio, mediante a técnica de espectrometria de fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDX). O EDX é um instrumento que determina qualitativa 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.

Foram realizados ensaios nos três solos no estado puro e nas melhores amostras encontradas após a realização dos ensaios mecânicos.

3.3.4

Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados foram os seguintes: ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia (ISC), compressão simples e LWT (Load Wheel Test). Foram adotados os procedimentos das seguintes normas para a execução destes ensaios, algumas porém, foram apenas baseadas, pois o ensaio foi modificado para o plano de trabalho proposto:

- NBR 7182/1986 – Ensaio de Compactação;
- NBR 9895/1987 - Índice de Suporte Califórnia - Método de ensaio;
- DNER-ME 201/94 – IPR - Solo-cimento - compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos (Adaptado para solo-enzima).
- NBR 14841/2002: Microrrevestimentos a frio - Determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT (Adaptado para solo-enzima).

Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios do Instituto Militar de Engenharia-IME.

3.3.4.1 Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação, para os três solos, foram realizados de acordo com as diretrizes da NBR 7182/1986 (ABNT, 1986), utilizando-se a energia de compactação Proctor Modificada com reuso de material.

Após secar o material ao ar até se obter um teor suficientemente baixo de umidade para destorroá-lo, segundo a norma NBR 6457/86 (preparação com secagem prévia até a umidade higroscópica). Adicionou-se uma determinada quantidade de água ao material, até que este ficou com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima, que pode ser estimada à priori pelo conhecimento do limite de plasticidade, cujo valor pode ser próximo à umidade ótima. Homogeneizou-se bem a mistura e deixou-se na câmara úmida por um tempo de 24 horas.

Retirou-se a amostra da câmara úmida e colou-se uma porção dela dentro do molde cilíndrico. Aplicou-se 26 golpes com um soquete. A porção do solo compactado deve ocupar cerca de um quinto da altura total do molde. O material é escarificado para conseguir uma melhor aderência entre as camadas. A segunda camada é colocada e o procedimento é repetido. Quando se completam cinco camadas, atinge-se uma altura maior do que a do molde. Isto é possível porque o molde possui um colarinho, que é removido ao final do ensaio, e permite então, retirar o excesso e acertar o volume em relação à altura do molde. O cilindro é pesado junto com o solo. Assim, com o peso total do corpo de prova e o volume é possível calcular a sua massa específica úmida. Tirando três amostras do seu interior (na parte média), determina-se sua umidade. Com estes dois índices físicos, calcula-se a massa específica seca.

Outro corpo de prova é preparado, com uma quantidade maior de água (para aumentar a sua umidade em uns 2% aproximadamente). Uma nova compactação é feita e um novo par de valores umidade (w) e massa específica seca (γ_d) é obtido. O procedimento se repete até que a densidade seca máxima obtida nos ensaios prévios reduza duas ou três vezes.

Com todos os pontos obtidos, plota-se um gráfico de massa específica seca versus umidade, e com eles, desenha-se a curva de compactação.

Os valores de $w_{ótima}$ e $\gamma_{dmáx}$ da curva de compactação foram usados para moldar os corpos de prova para os ensaios de índice de suporte califórnia, e dos ensaios no LWT.

3.3.4.2 Índice de Suporte Califórnia

O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR - California Bearing Ratio), é a relação, em percentagem, entre a pressão exercida por um pistão de diâmetro padronizado necessária à penetração no solo até determinado ponto (0,1” e 0,2”) e a pressão necessária para que o mesmo pistão penetre a mesma quantidade em solo-padrão de brita graduada. Os ensaios foram feitos com o reuso de material.

As etapas do ensaio são: compactação, imersão em água, medida da expansão e da resistência à penetração após 96 horas. Através do ensaio de CBR é possível conhecer qual será a expansão de um solo sob um pavimento quando este estiver saturado, e fornece indicações, de caráter empírico, da perda de resistência do solo com a saturação.

O Ensaio consta de duas etapas, segundo o procedimento a seguir conforme NBR 9895 (ABNT, 1987):

1. Expansão:

- Coloca-se o disco espaçador no cilindro de diâmetro = 152 mm; altura total = 177,8 mm, cobrindo-o com papel filtro;
- Compacta-se o corpo de prova à umidade ótima e energia modificada, invertendo-se o cilindro, substitui-se o disco espaçador pelo prato perfurado com haste de expansão e pesos, colocando papel-filtro entre o prato e o solo. Esse peso ou sobrecarga corresponderá ao do pavimento;
- Imerge-se o cilindro com o corpo de prova e sobrecarga no tanque durante 96 horas, de tal forma que a água banhe o material tanto pelo topo quanto pela base;
- Realizam-se leituras de deformação (expansão ou recalque) com aproximação de 0,01mm. à cada 24h.

2. Penetração:

- Instala-se o conjunto, molde cilíndrico com corpo de prova e sobrecarga, na prensa;
- Assenta-se o pistão da prensa na superfície do topo do corpo de prova, zerando-se em seguida os extensômetros;
- Aplica-se o carregamento com velocidade de 1,27 mm/min, anotando-se a carga e a penetração a cada 30 segundos até decorridos o tempo de 10 minutos.

Com os pares de valores da fase de penetração, traça-se o gráfico que relaciona a carga, em ordenadas, às penetrações, nas abscissas. Do gráfico obtém-se, por interpolação, as cargas associadas às penetrações de 2,5 e 5,0mm, as quais serão convertidas a valores de pressão, dividindo-as pela área do pistão. O CBR se obtém mediante a Equação 3-7:

$$ISC = \left(\frac{\text{pressão calculada no ensaio}}{\text{pressão padrão}} \right) \times 100 \quad (3-7)$$

O resultado final para o CBR determinado será o maior dos dois valores encontrados correspondentes às penetrações de 2,5 e 5,0mm.

3.3.4.3 Ensaio Load Wheel Test (LWT)

O LWT (Figura 3-10) é um simulador de tráfego, que simula em laboratório o esforço de tráfego em amostras ou corpos de prova de microrevestimentos asfálticos. Com essa ação pode-se determinar deformações e estabelecer o limite máximo do teor de asfalto da mistura objetivando-se minimizar deslocamentos laterais e verticais. O ensaio prescrito pela NBR 14841/2002 verifica o excesso na quantidade de asfalto via o uso de areia, a qual penetra e adere ao corpo de prova forçada pelo vai e vem da carga padrão sobreposta à roda. A massa de areia aderida é então quantificada e correlacionada com o teor de asfalto.

O sistema mecânico do LWT possui os ciclos controlados, garantindo um ensaio uniforme e preciso nas condições em que os corpos de prova são submetidos na simulação de tráfego. O equipamento tem uma massa de aproximadamente 96 kg e dimensões em torno de 410 x 430 x 1430 mm (largura x altura x comprimento).

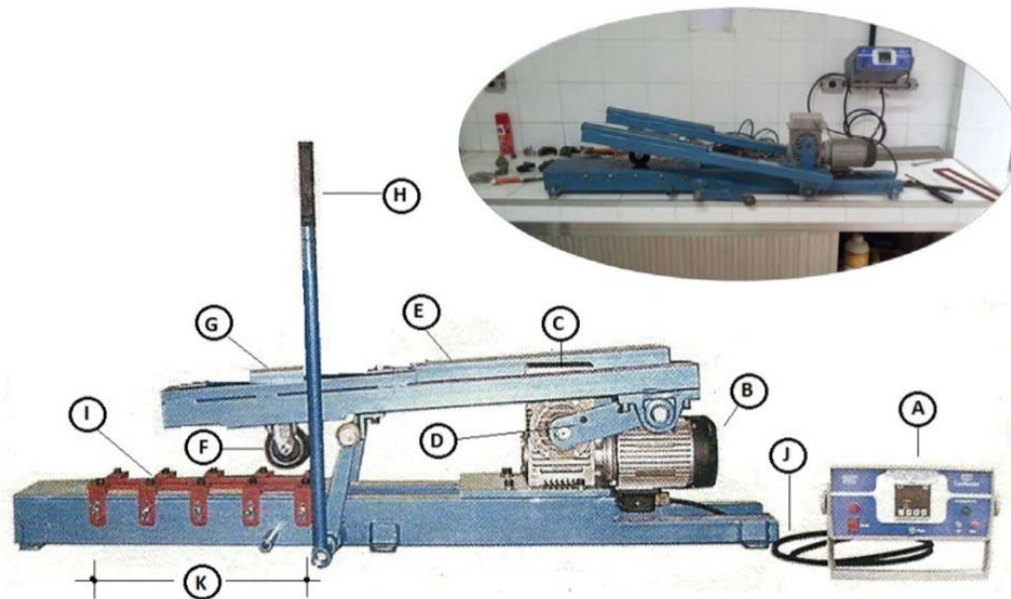


Figura 3-10 - Equipamento LWT - detalhes.

A - Controlador digital (liga/desliga, reseta, exibe ciclos no visor, etc.); B - Motor elétrico; C - Caixa redutora de rotação com uma chave contadora dos ciclos; D - Braço rotativo; E - Braço horizontal; F - Roda de tráfego; G - Local para acomodar a carga (56 kg max); H - Alavanca para levantar o braço e a carga; I - Local de posicionamento (pista) do corpo de prova e os grampos que seguram seu suporte; J - Cabo elétrico do motor e da chave contadora de ciclos; K - Espaço da pista (30 cm) percorrido pela roda (Brazetti *et al*, 2013).

O sistema mecânico do LWT é composto de um motor elétrico (B) acoplado a uma caixa redutora de rotação (C) de onde parte um eixo onde está fixado um braço rotativo (D) que por sua vez impulsiona outro braço horizontal (E) que se apoia em uma roda (F). Cada ciclo que o braço rotativo completa, que equivale a um vai e vem de duas passadas de aproximadamente 30 cm cada (K) da roda padrão (3,0 pol x 1,0 pol) na amostra, demora cerca de 0,73 segundos, ou seja, temos 44 ciclos ou 88 passadas por minuto atingindo 5.280 passadas por hora, tudo registrado pela controladora digital (A). Esse tipo de equipamento simula o trânsito de cerca de um milhão de veículos em menos de 25 minutos quando carregado com a carga máxima preconizada de 56 kg (Brazetti *et al*, 2013).

O simulador de tráfego LWT foi concebido para estudos de micro-revestimentos asfálticos, porém, adaptou-se o equipamento para o estudo de corpos de prova de solos a fim de se verificar o efeito dos aditivos no desempenho das propriedades de uma massa de solo compactado e sujeita à ação das cargas geradas pelo equipamento, simulando assim o tráfego de veículos.

Desta forma, o ensaio efetuado com materiais asfálticos através do LWT pode ser facilmente adaptado, consistindo basicamente na substituição do material

preconizado pelo solo tratado com enzimas e submetido à ação do movimento de vai e vem da roda padrão sob condições de carga e de número de ciclos fixados, simulando o que ocorre em campo e fornecendo condições de avaliar o desempenho de solos tratados.

Toda a metodologia de adaptação do equipamento e criação de novas ferramentas que permitiram avaliar o comportamento de solos tratados com aditivos foi proposta por Brazetti *et al* (2013) e será detalhado a seguir.

3.3.4.3.1

LWT - Procedimento para Preparação dos Corpos de Prova e Ruptura (Adaptado para Solos)

O procedimento a seguir descreve detalhadamente o processo para a produção e ruptura de um corpo de prova de solo utilizando o simulador de tráfego LWT.

O procedimento é dividido nas seguintes etapas:

Etapa 1: Preparo da Amostra;

Etapa 2: Compactação;

Etapa 3: Cura;

Etapa 4: Ruptura.

- Etapa 1: Preparo da Amostra

Para esta etapa serão utilizados os materiais e ferramentas apresentados na Figura 3-11.

1. Becker;
2. Potes plásticos para acondicionar as amostras;
3. Bacia de alumínio;
4. Enzimas;
5. Concha;
6. Espátula;
7. Seringa com escala em mililitros (ml).



Figura 3-11 - Materiais e ferramentas utilizados no preparo da amostra para o corpo de prova – etapa 1

Após a coleta de solos (Figura 3-12a) em campo e todo procedimento de preparo de amostras conforme NBR 6457/1986 (ANBT, 1986), o solo é passado na peneira 2mm (Figura 3-12b). Utilizando a concha e a bacia de alumínio, pesa-se (Figura 3-12c) quantidade necessária para a fabricação dos corpos de prova, levando em seguida para estufa a 60°C por 24h (Figura 3-12d)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312925/CA

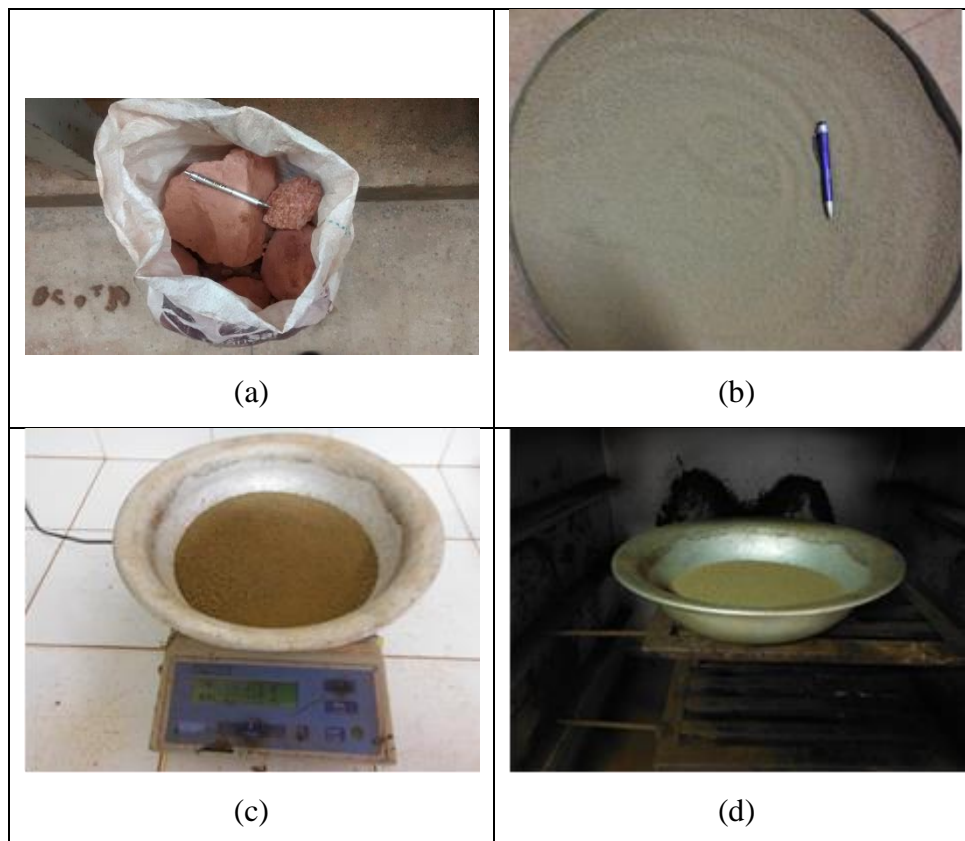


Figura 3-12 - Preparo da amostra de solo para corpos de prova

Após 24h, deve ser medida a umidade higroscópica da amostra, podendo assim calcular a quantidade de água a ser adicionada para a compactação. A quantidade de água a ser adicionada dependerá da umidade ótima do solo, que deve ser conhecida anteriormente através de ensaios de compactação.

A enzima será misturada com a água da umidade ótima, misturando-as e aplicando na amostra. Para a adição da enzima (Figura 3-13) deverá ser feito uma solução de 3% em água utilizando uma seringa ou similar com escala de mililitros (ml) (Figura 3-13a). Essa solução deve ser feita devido ao fato da quantidade de enzima ser muito reduzida, na proporção de 1 litro de enzima para 30m³ de solo, conforme fabricantes, e para a presente pesquisa adotou-se também dosagens de 1:20 e 1:40 (Figura 3-13b).

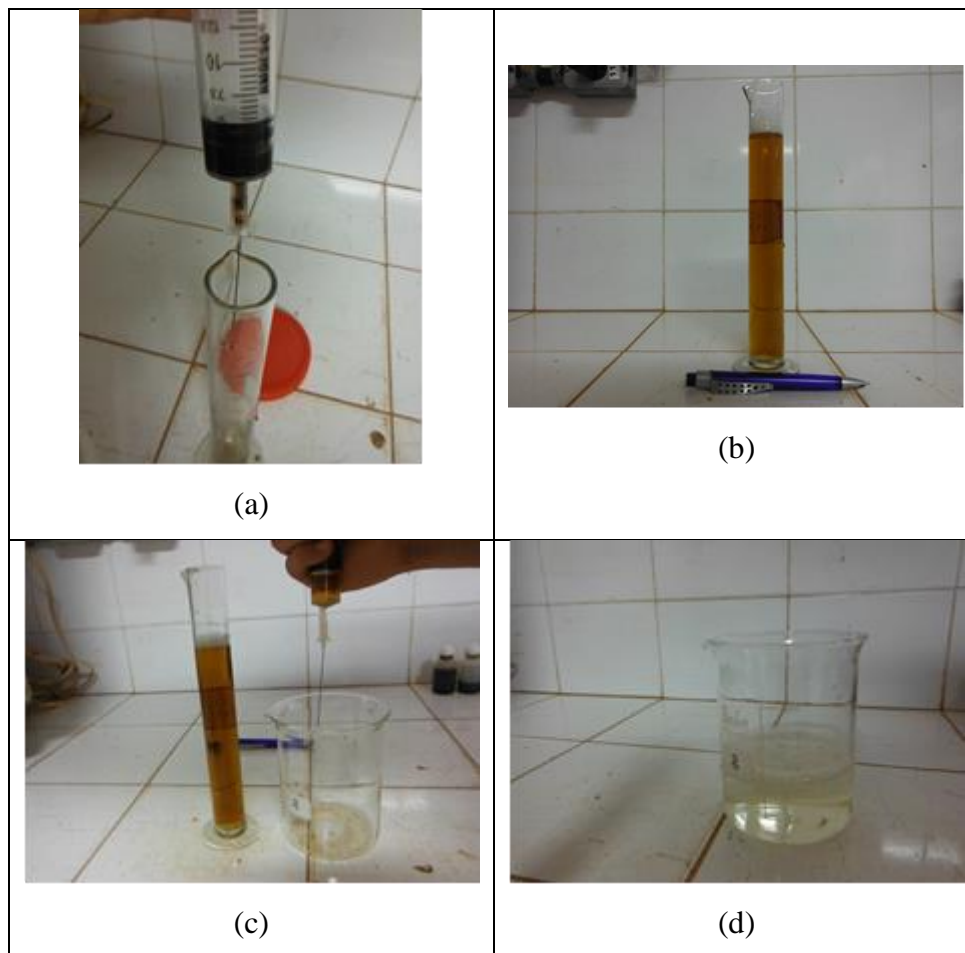


Figura 3-13 - Preparo da solução com a enzima

Após feita a solução (Figura 3-13b), adiciona-se quantidade necessária desta solução em um Becker (Figura 3-13c) e completa-se com água até atingir o valor necessário para umedecer o solo na umidade ótima (Figura 3-13d). Essa quantidade deve obedecer ao número de corpos de prova que serão executados.

Retirado o solo da estufa, segue-se com a etapa de adicionar a água ao solo (Figura 3-14). Umedece-se o solo com a mistura água-enzima (Figura 3-13a) e mistura-se com a ajuda de uma espátula, de modo que todos os grãos sejam umedecidos aparentando boa homogeneização (Figura 3-13b).

Acondiciona-se o solo-enzima em potes plásticos, cada um com quantidade suficiente para produzir um corpo de prova (Figura 3-13c e Figura 3-13d) e leva-se os potes fechados para a câmara úmida por 24h para que haja uma melhor homogeneização da mistura e manter a umidade do solo.

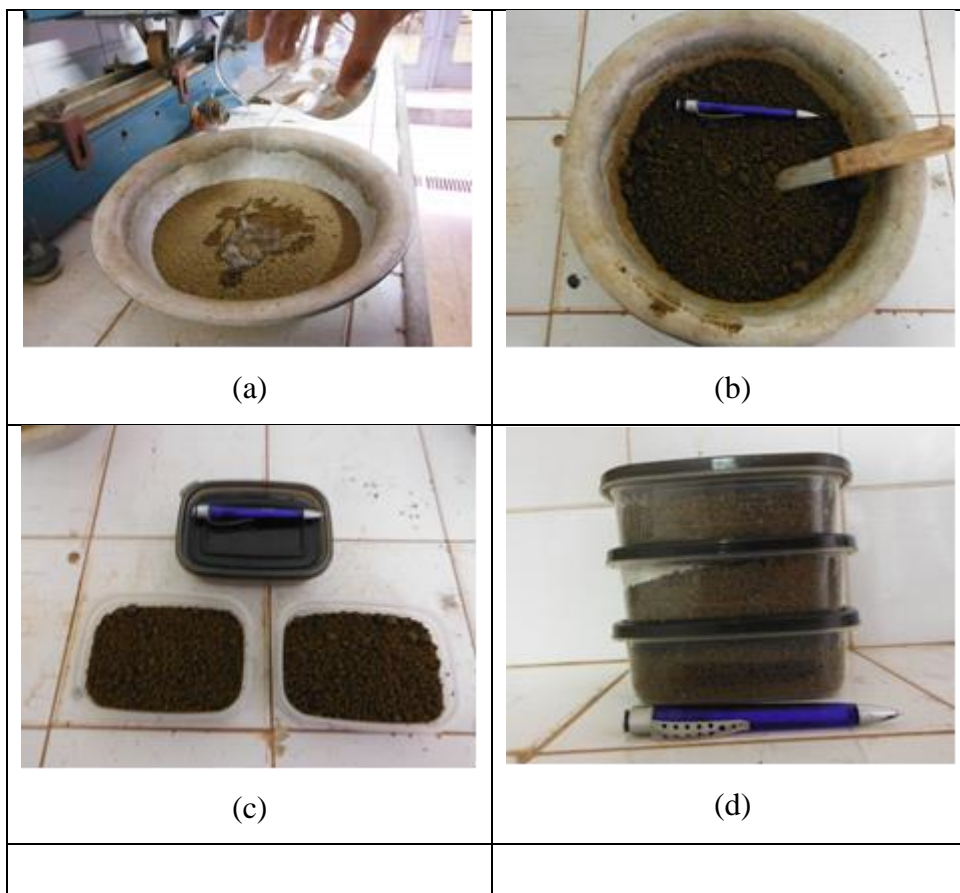


Figura 3-14 - Mistura do solo com água-enzima

- Etapa 2: Parte 1 – Compactação Manual

Para esta etapa serão utilizados os materiais e ferramentas, apresentados na Figura 3-15 e descritos na Tabela 3-4.

Tabela 3-4 - Equipamento e ferramentas utilizados no preparo da amostra - etapa 2- parte 1

1. Potes com solos acondicionados após 24h na câmara úmida	7. Caixa de Aço para Montagem do Corpo de Prova
2. Funil Plástico	8. Espaçador de aço (10mm)
3. Espátula	9. Fundo de regularização de aço
4. Concha	10. Moldes
5. Espaçador de Madeira	11. Chave de boca
6. Fixadores	12. Batedor de Bife (simula rolo pé de carneiro)

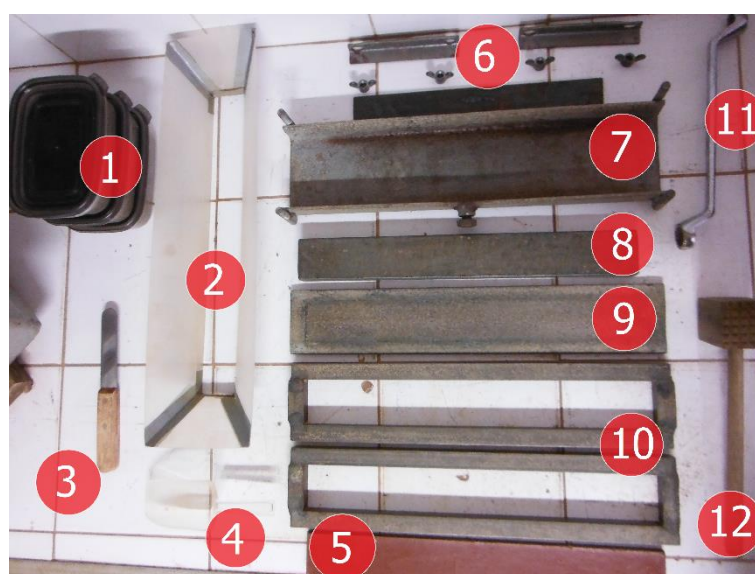


Figura 3-15 - Equipamento e ferramentas utilizados no preparo da amostra - etapa 2 - parte 1

Para a montagem da caixa que servirá como molde para o corpo de prova, prepara-se a caixa de aço (Figura 3-16a), coloca-se o fundo de regularização devido a caixa ser curva nas suas bordas internas (Figura 3-16b). Coloca-se o primeiro espaçador de aço (Figura 3-16c) e logo após o espaçador de madeira no fundo (Figura 3-16d).

O espaçador de madeira tem o objetivo de delimitar a espessura final do corpo de prova, pois quanto maior for sua espessura, menor ficará a altura interna e menor será a espessura final do corpo de prova. Portanto em casos de optar em fazer corpos de prova mais resistentes, conseqüentemente mais espessos, deve-se colocar um espaçador de madeira com uma espessura cada vez menor.

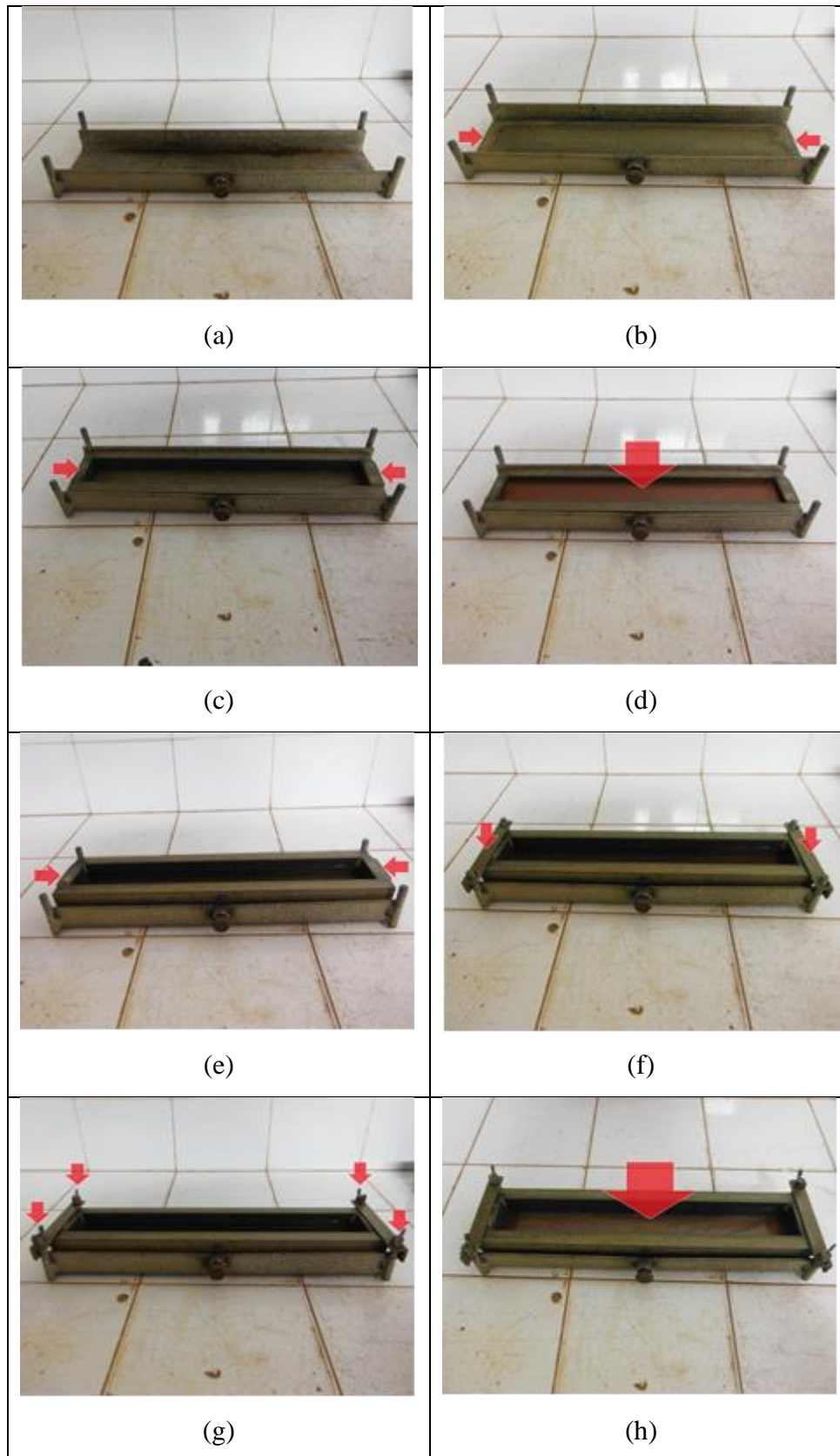


Figura 3-16- Preparação do molde para preparação do corpo de prova

Após o espaçador de madeiras, coloca-se o segundo molde de aço sobre o primeiro (Figura 3-16e), prende-se as laterais com os fixadores (Figura 3-16f) e

com as porcas-borboletas (Figura 3-16g), apertando-as bem para evitar que os espaçadores se abram durante a compactação.

A fim de se evitar que o solo grude no fundo da caixa (no espaçador de madeira) coloca-se um papel filtro ou filme plástico para evitar tal dado no momento da desforma (Figura 3-16h).

Coloca-se o espaçador vertical (Figura 3-17a) e aperta-se a porca externa com a chave de boca (Figura 3-17b). Esse espaçador impede que a caixa abra no momento de aplicar a carga vertical para compactação (Figura 3-17c).

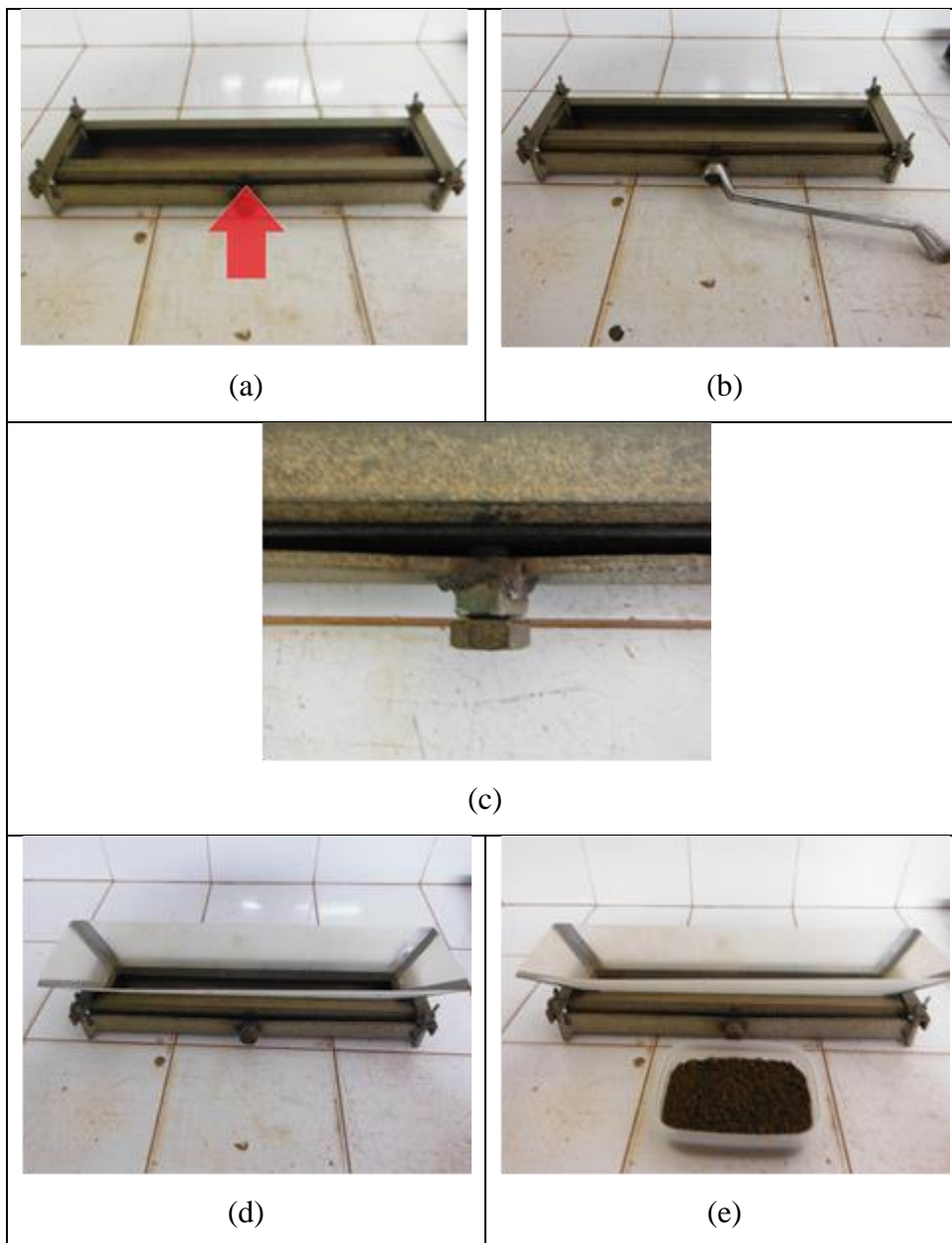


Figura 3-17 - Preparação do molde para preparação do corpo de prova (continuação)

Para evitar perda de solo, coloca-se o funil de plástico (Figura 3-17d) e separa-se a amostra que será compactada (Figura 3-17e).

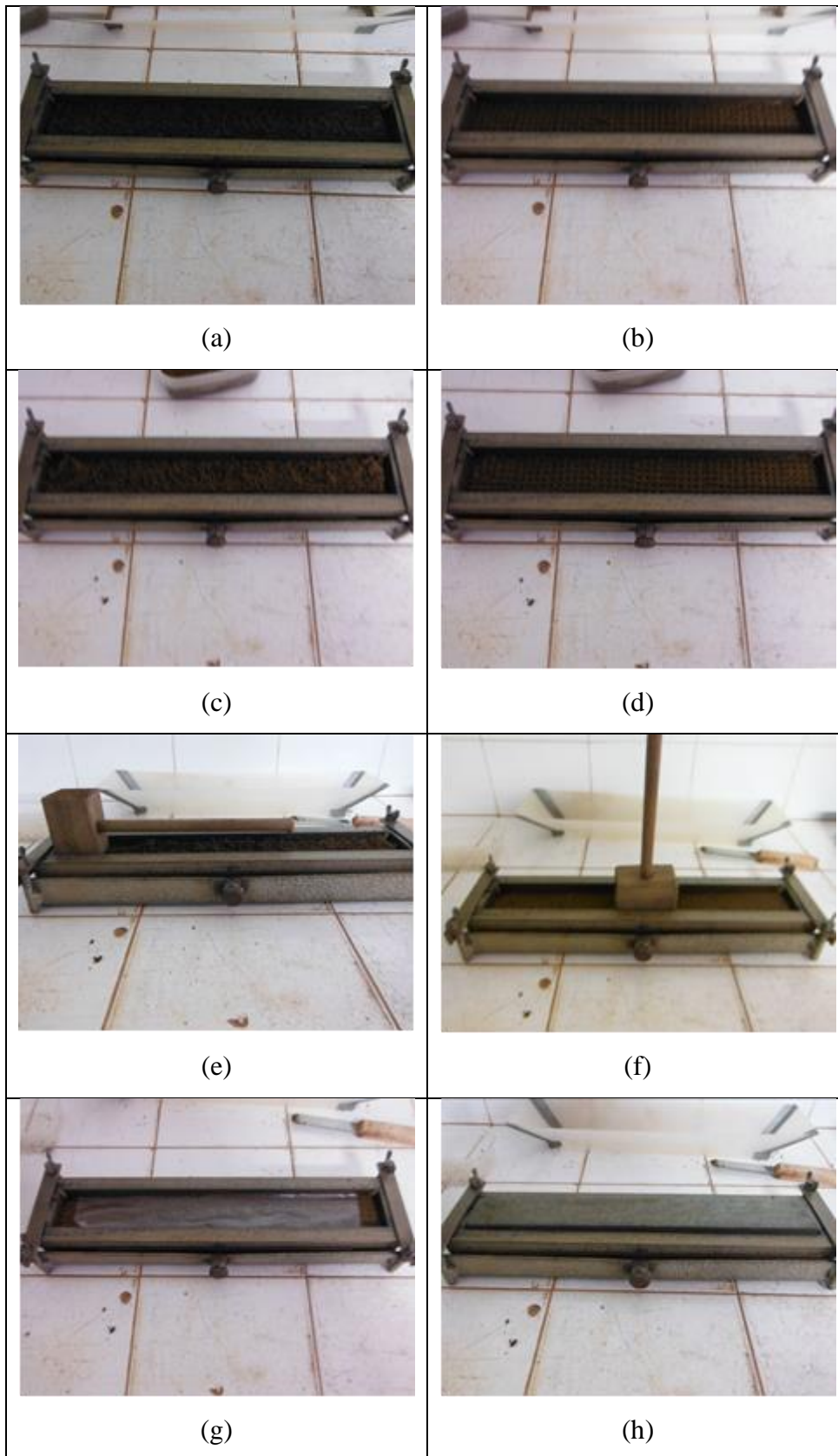


Figura 3-18 - Preparação do corpo de prova - compactação manual

Com o funil colocado, espalha-se dentro do molde de maneira uniforme, aproximadamente 1/3 da amostra (Figura 3-18a), formando assim a primeira camada. Em seguida compactar utilizando o batedor de bifes que simula a condição do rolo pé-de-carneiro em campo (Figura 3-18b). Coloca-se o funil novamente, espalha-se a segunda camada (Figura 3-18c) e compacta-se com o batedor de bifes (Figura 3-18d).

Repete-se o processo para a terceira e última camada (Figura 3-18e), porém, com a parte lisa do batedor de bifes compacta-se ao final para deixar a superfície lisa (Figura 3-18f).

Coloca-se novamente outro papel filme para que o solo não grude no espaçador (Figura 3-18g) e por fim sobre o papel filme adiciona o espaçador de 10mm de aço (Figura 3-18h) finalizando a etapa de compactação manual.

- Etapa 2: Parte 2 – Compactação com a Prensa

Para esta etapa serão utilizados os seguintes materiais e ferramentas apresentados na Figura 3-19.

1. Caixa de aço com solo compactado manualmente conforme Etapa 2 – Parte 1.
2. Espaçador de alumínio para compactação;
3. Espaçadores de aço;
4. Base de aço para prensa de compactação;
5. Extrator do corpo de prova;
6. Prensa Manual de 15 toneladas.

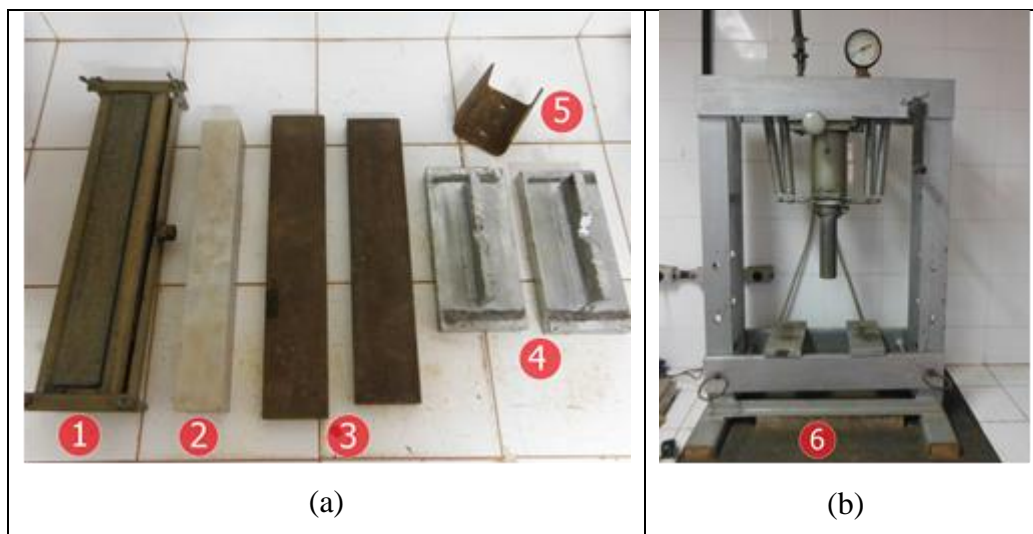


Figura 3-19 - Ferramentas e equipamento utilizados no preparo da amostra - etapa 2- parte 2

Na prensa de compactação (Figura 3-20a), coloca-se duas peças da base (Figura 3-20b) e os espaçadores de aço (Figura 3-20c). Sobre um dos espaçadores, coloque a caixa de montagem com o solo a ser compactado (Figura 3-20d) e o outro espaçador é colocado sobre a caixa. Ficarão um espaço entre o espaçador e a caixa, esse espaço terá que sumir após aplicada a carga de compactação (Figura 3-20e).

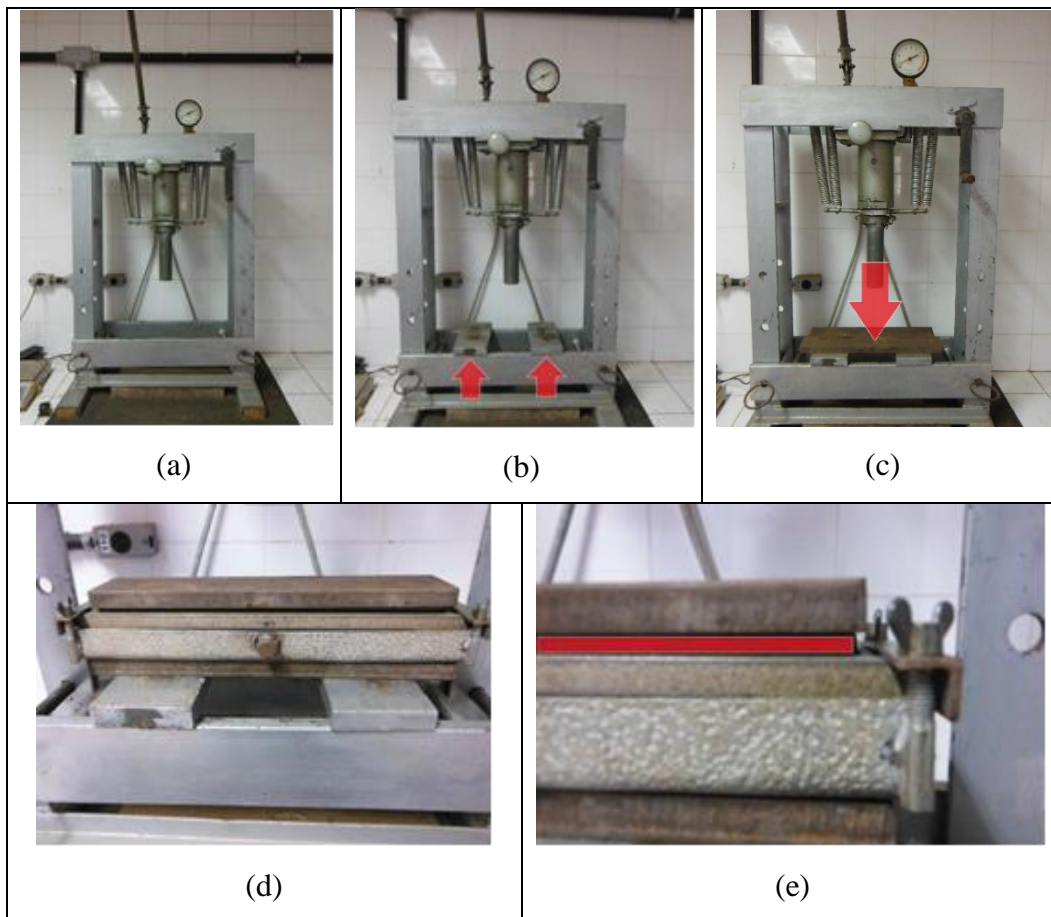


Figura 3-20 - Compactação do corpo de prova na prensa

Coloca-se o espaçador de alumínio sobre a caixa e o espaçador (Figura 3-21a), com o manômetro zerado (Figura 3-21b), aplica-se uma carga entre 10 e 12 toneladas (Figura 3-21c).

A carga aplicada (Figura 3-21d) fará pressão distribuída uniformemente (Figura 3-21e) sobre o corpo de prova que estará dentro da caixa de montagem, fazendo com que este fique bem compactado.

Libera-se a prensa e retira-se a caixa de aço para iniciar o processo de extração do corpo de prova (Figura 3-21f).

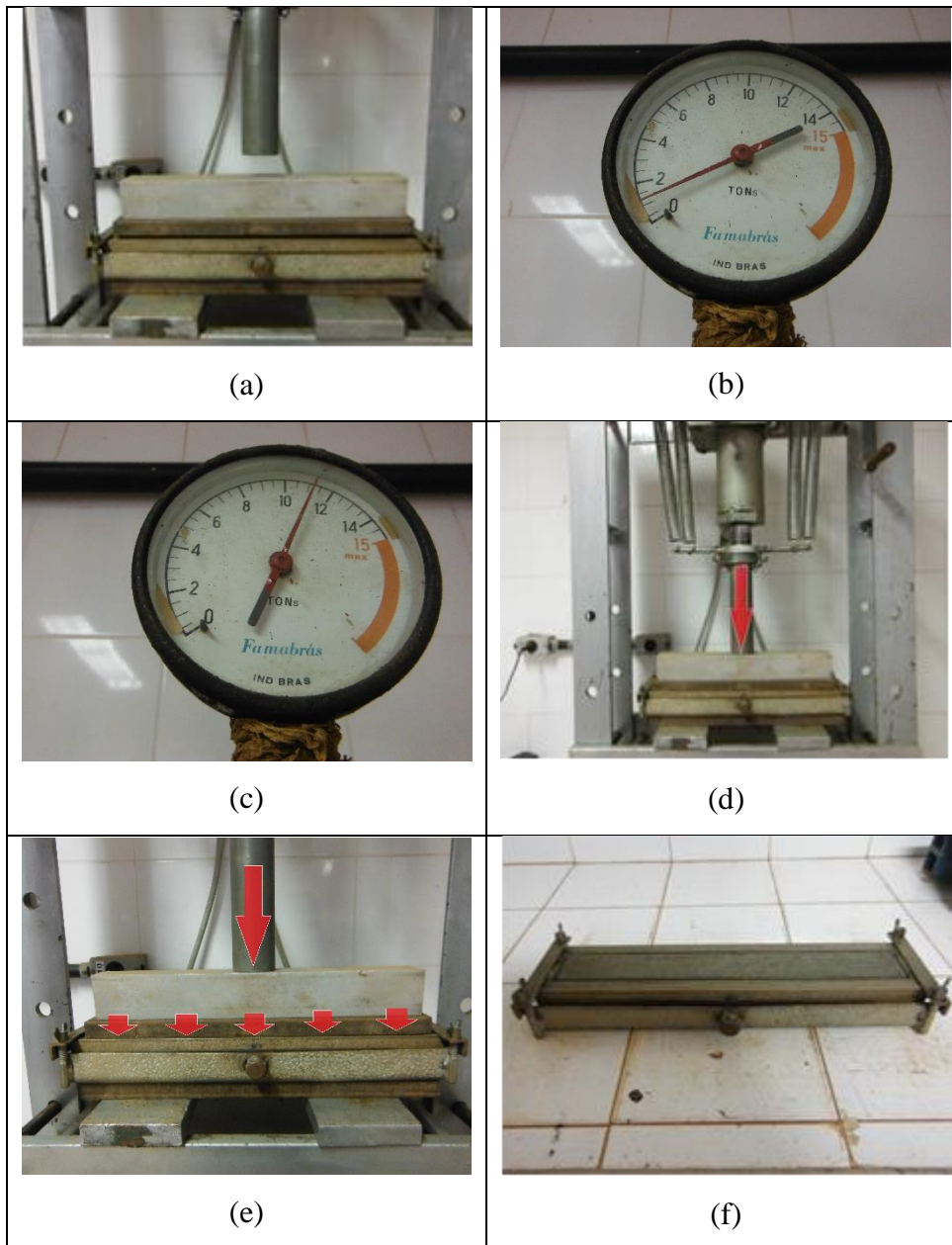


Figura 3-21 - Compactação do corpo de prova na prensa (continuação)

Após finalizada a compactação na prensa, retira-se toda a caixa e solta-se a porca lateral com a chave de boca (Figura 3-22a) e os fixadores laterais (porcas borboletas) (Figura 3-22b). Retira-se o primeiro molde de cima, após o papel filtro (filme plástico) (Figura 3-22c) e por fim o espaçador.

O resultado será o corpo de prova compactado dentro do molde (Figura 3-22d). Para extrai-lo, precisa-se de um extrator de madeira (Figura 3-22e) que será utilizado juntamente com a prensa

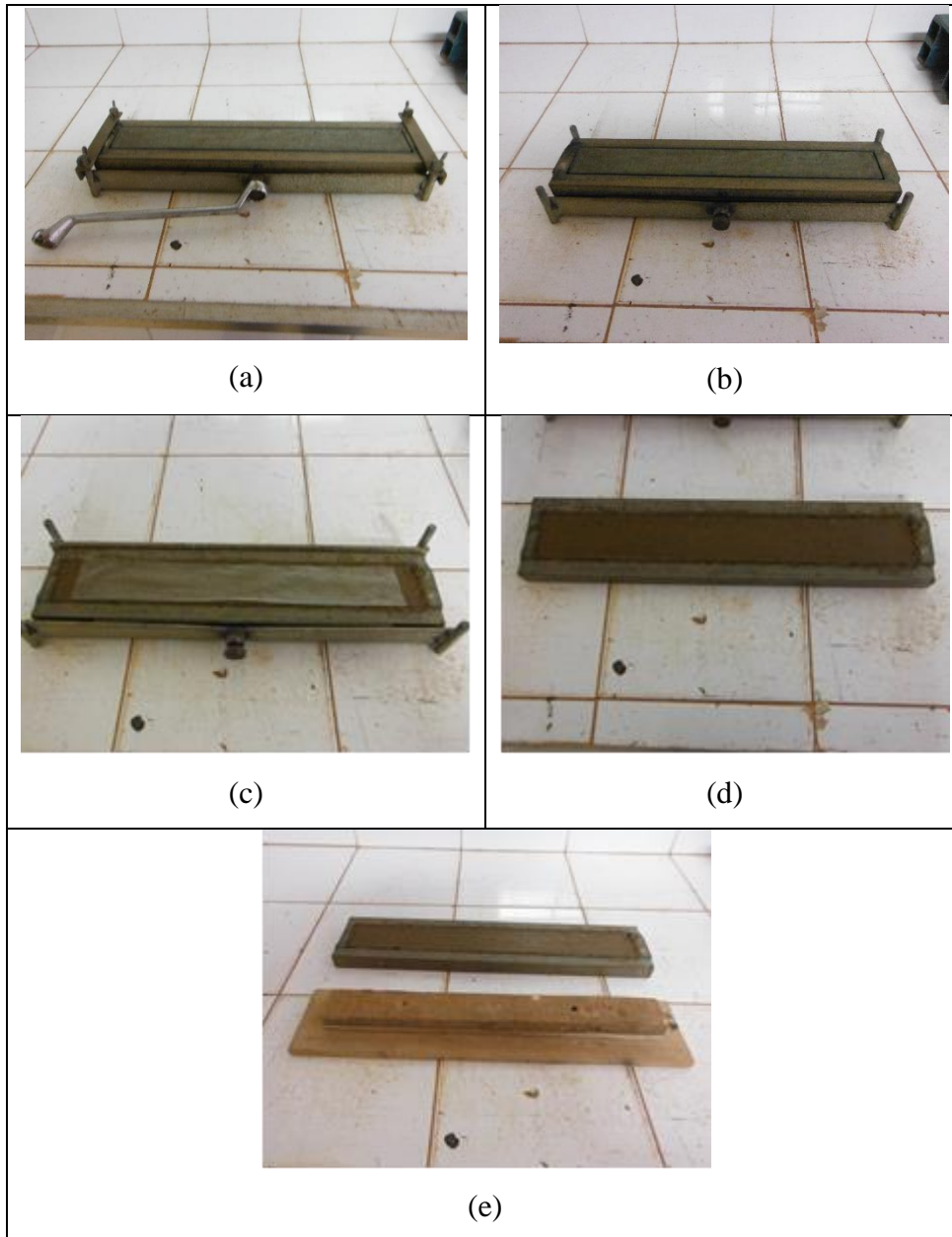


Figura 3-22 - Extração do corpo de prova do molde

O extrator de madeira é colocado na base sob o molde e corpo de prova (Figura 3-23a). Acima do molde é colocado um espaçador de aço, assim que aplicada a carga fará com que o molde desça e o corpo de prova fique no lugar (Figura 3-23b). Uma pequena carga é aplicada na prensa, fazendo com que o molde desça (Figura 3-23c), ficando apenas o corpo de prova sobre o extrator de madeira (Figura 3-23d). Por fim, tem-se o corpo de prova intacto extraído do interior do molde (Figura 3-23e).

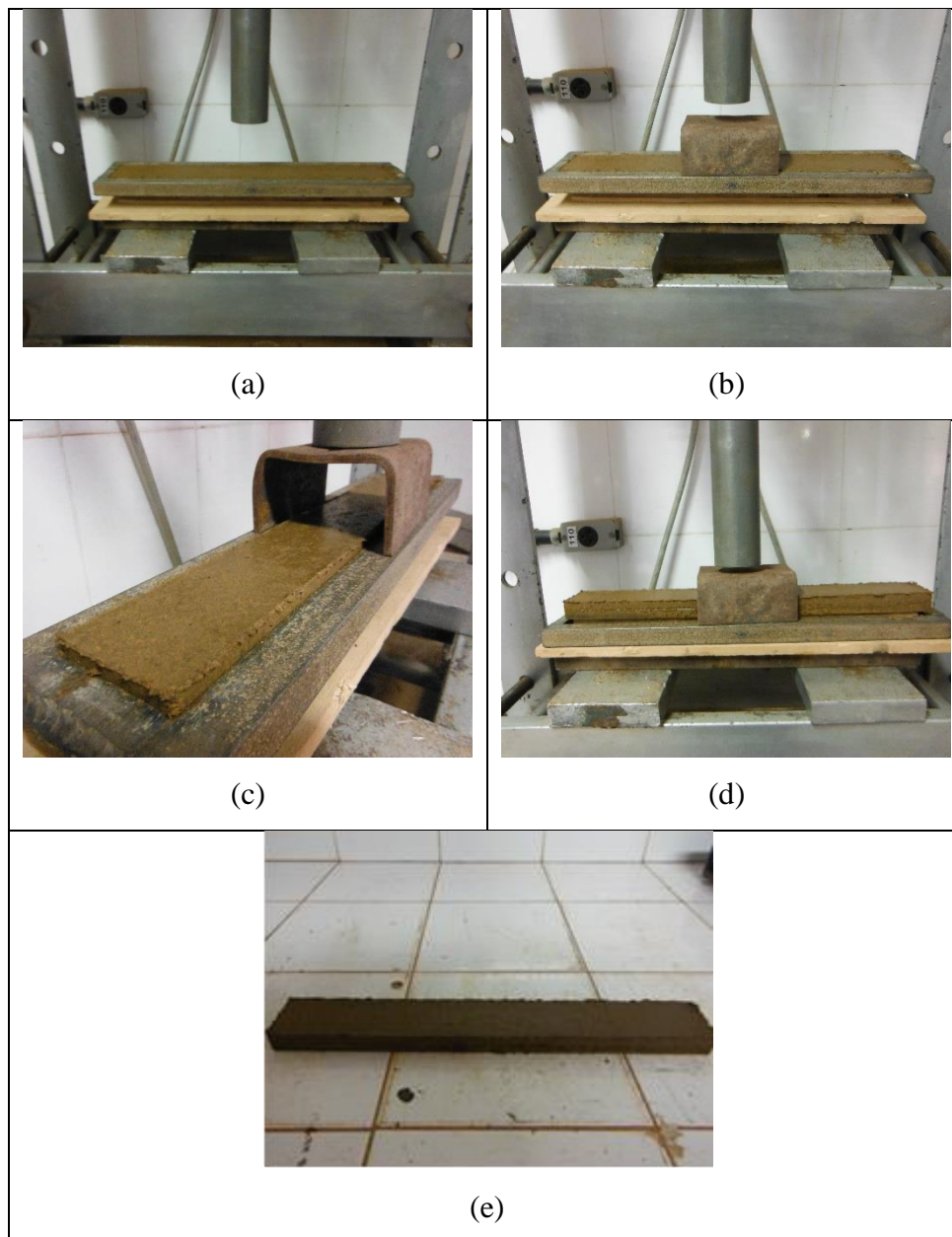


Figura 3-23 - Extração do corpo de prova (continuação)

- Etapa 3: Cura

A cura é o procedimento mais simples de todo o ensaio, após a compactação o corpo de prova é colocado sobre uma grade de acrílico, que permite o ar circular livremente acima e abaixo do corpo de prova (Figura 3-24). É colocado um espaçador sob a grade para permitir um melhor escoamento do ar. O período de cura é de sete dias ao ar livre à temperatura ambiente, porém para a presente pesquisa também foram estudados tempos de cura maiores como 14, 28, 56 e 90 dias para os corpos de prova que apresentaram os melhores resultados.

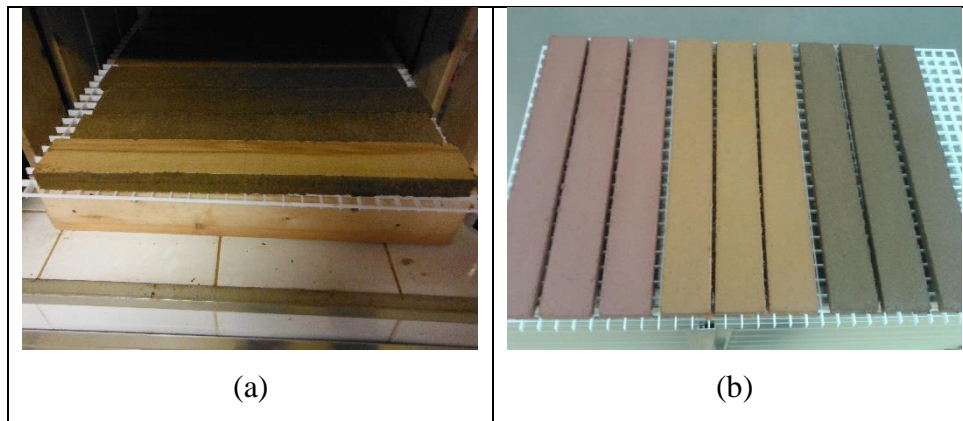


Figura 3-24 - Procedimento de cura dos corpos de prova

- Etapa 4: Ruptura

Por fim, a última etapa consiste na ruptura do corpo de prova. Nesta etapa, serão utilizados os seguintes equipamentos e ferramentas (Figura 3-25):

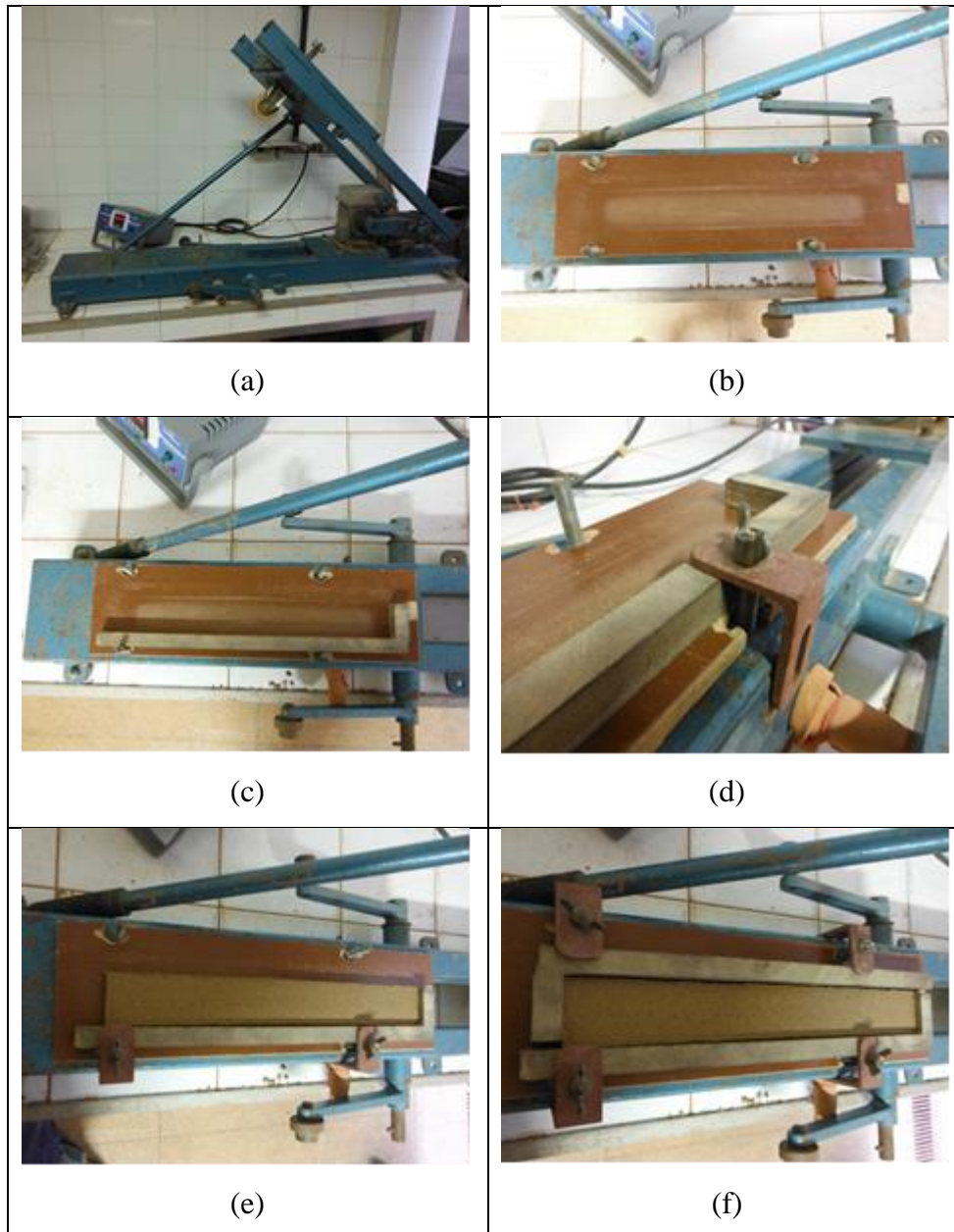
1. Base de madeira para regularização;
2. Moldes para fixação do corpo de prova;
3. Fixadores;
4. Pesos diversos para aumento de carga do equipamento;
5. Equipamento LWT (Load Wheel Test).



Figura 3-25 - Equipamento e ferramentas utilizadas durante a etapa de ruptura do corpo de prova

Para a execução do ensaio, ergue-se o braço de alavanca permitindo acesso à pista de teste (Figura 3-26a). É colocado uma base de madeira na pista de teste para manter uniforme e regularizada a base onde será colocado o corpo de prova (Figura 3-26b), sobre a base de madeira é colocada a primeira parte do molde que segura o corpo de prova em sua posição no momento do teste, evitando que o mesmo se movimente para trás e para frente (Figura 3-26c) e prende-se com os fixadores para

garantir que o molde fique no lugar (Figura 3-26d). Coloca-se sobre a base de madeira o corpo de prova que estava curando por 7 dias na grade de acrílico (Figura 3-26e) e o outro lado do molde é preso com os fixadores de modo a garantir que os moldes fiquem fixos e o corpo de prova sem qualquer tipo de movimento (Figura 3-26f).



Apoia-se o braço de alavanca encostando a roda-teste no corpo de prova para iniciar o ensaio (Figura 3-27a e Figura 3-27b). O contador é zerado em 500 ciclos, (Figura 3-27c) que correspondem a 1000 passadas de roda sobre o corpo de prova (500 vai e 500 vem) (Figura 3-27d).

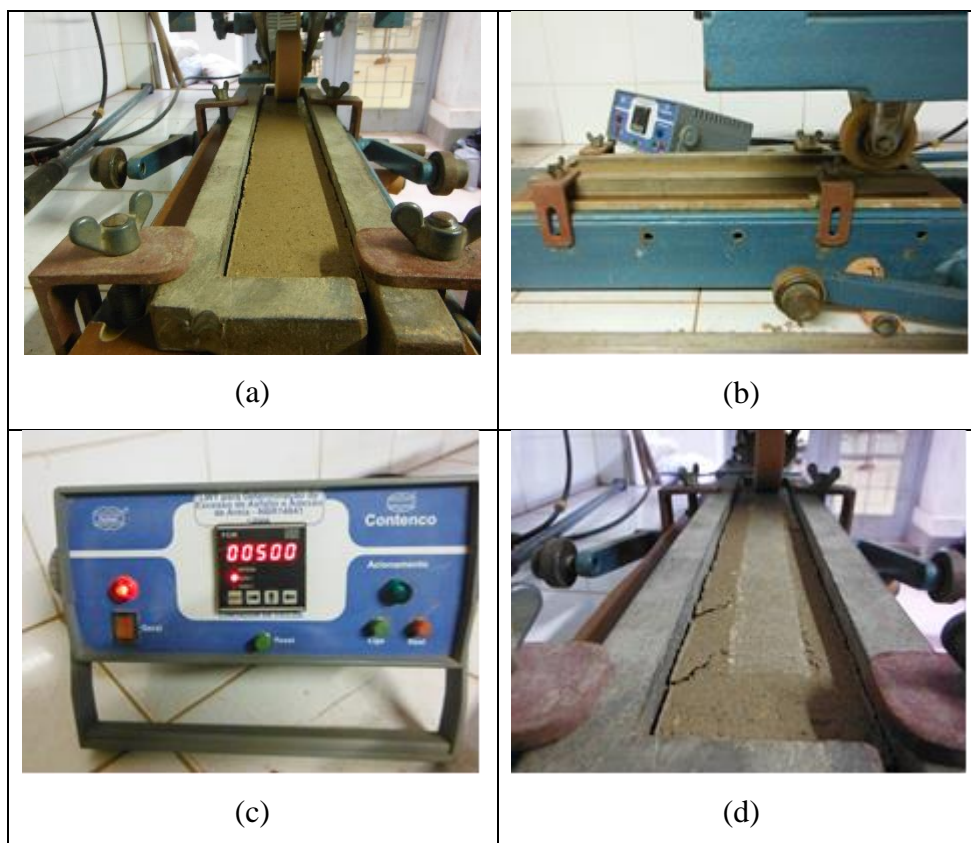


Figura 3-27 - Ruptura do corpo de prova

Após 500 ciclos, se não houver ruptura do corpo de prova (Figura 3-28a), são colocados mais pesos sobre o equipamento e repetidos os 500 ciclos e assim sucessivamente (Figura 3-28b, Figura 3-28c e Figura 3-28d) até a ruptura do corpo de prova (Figura 3-28e e Figura 3-28f). Todos os corpos de prova foram ensaiados dessa forma.

Devido a carga do simulador aumentar a cada 1000 passadas sem ruptura, conseqüentemente há um acréscimo da carga passado ao corpo de prova, esses acréscimos são detalhados na Tabela 3-5.

Tabela 3-5 – Cargas sobre o corpo de prova a cada 1000 passadas

Etapa	Peso ensaiado (Kg)
De 0 a 1000 passadas	20,8
De 1001 a 2000 passadas	33,0
De 2001 a 3000 passadas	45,2
De 3001 a 4000 passadas	54,2

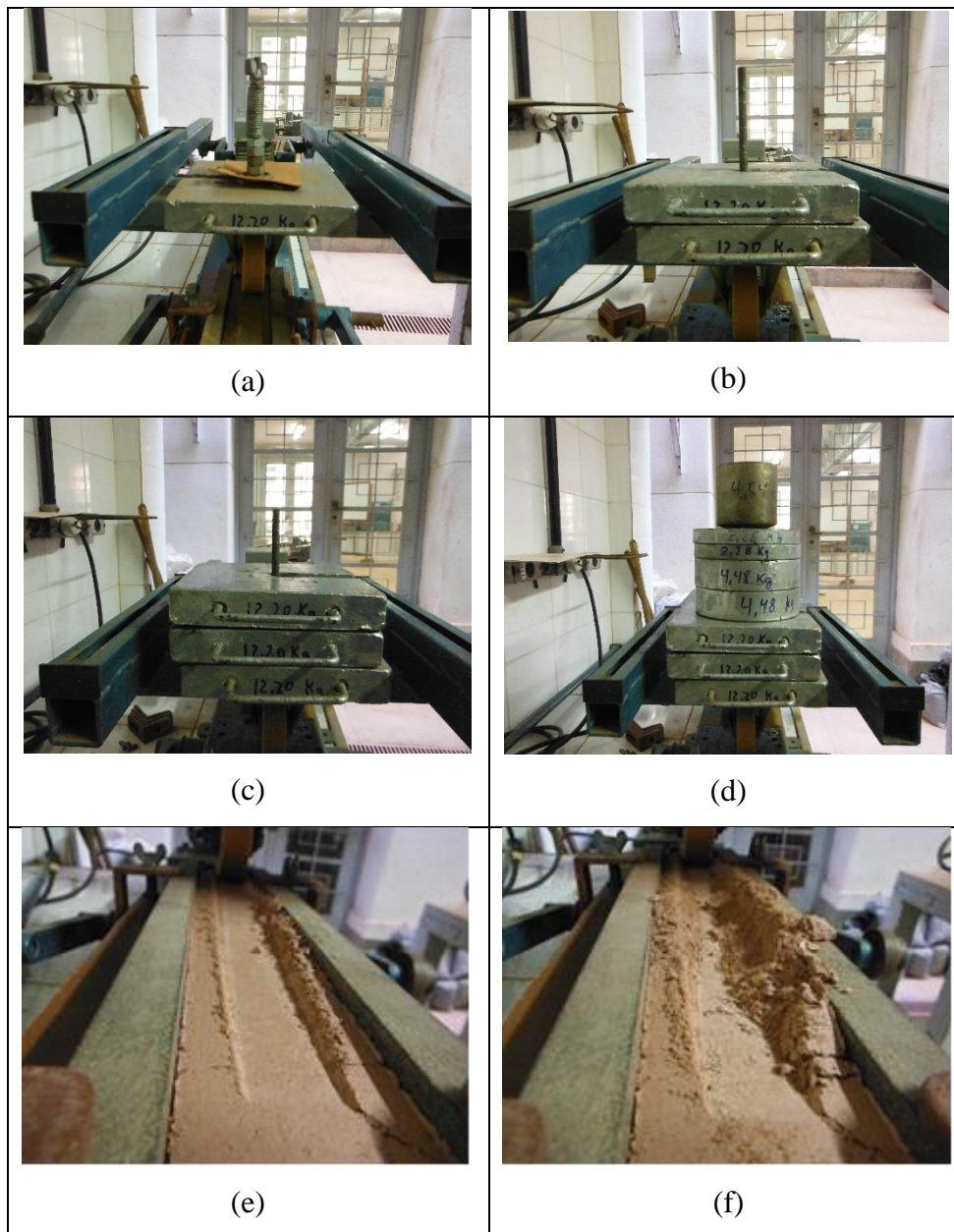


Figura 3-28 – Ruptura do corpo de prova (continuação)

3.3.4.3.2

Considerações sobre o Ensaio LWT para o presente estudo

Todos os corpos de prova foram executados no tamanho padrão de 380mm x 50mm x 10mm. As duas primeiras medidas (380mm e 50mm) são padrões do equipamento e não podem ser alteradas. Já a espessura, pode ser modificada, tanto maior ou menos do que 10mm. Optou-se por 10mm por estes terem apresentados

resultados satisfatórios durante o desenvolvimento da metodologia utilizada por Brazetti *et al* (2013).

Ainda a respeito dos corpos de prova, todos foram executados na umidade ótima dos solos, respectivamente obedecendo aos ensaios de compactação executados e dimensionados, levando em conta o peso específico encontrado no ensaio de compactação.

3.3.4.4 Compressão Simples

Para o ensaio de compressão simples, foi utilizada a norma DNER-ME 201/94 – IPR - Solo-cimento - compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Foi optado em utilizar essa norma, pois não há normatização para ensaios de compressão simples com solos tratados com enzimas. Então seguiu-se a norma citada para realizar os ensaios.

Foram executados quatro corpos de prova:

- Dois no estado puro;
- Dois do estado tratado.

Feitos dessa forma a fim de se comparar o comportamento a compressão simples do solo após o tratamento com o solo no estado puro.

O tempo de cura foi de sete dias ao ar livre e não houve imersão em água antes da ruptura. Essas medidas foram tomadas para que o corpo de prova ficasse com as mesmas características dos corpos de prova ensaiados no equipamento LWT e também para o risco dos corpos de prova de desintegram quando imersos.

A Figura 3-29 mostra o equipamento utilizado para executar o ensaio:



Figura 3-29 - Equipamento utilizado para ruptura dos corpos de prova a compressão simples no laboratório de solos do IME

3.3.5 Micromorfologia e Mineralogia

As análises micromorfológica e mineralógica dos solos foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica, Varredura e Transmissão e no Laboratório de Difração de Raios-X do IME.

3.3.5.1 Micromorfologia - Microscopia Eletrônica de Varredura

Os objetivos principais da caracterização micromorfológica são os de observar o estado e as transformações sofridas pelo solo puro, a nível de organização de seus constituintes, sob as novas condições de tratamento a que foi submetido e, identificar se existem produtos organominerais formados, como se distribuem e qual sua relação com as partículas minerais originais do solo.

O estudo micromorfológico baseou-se na análise de uma prospecção microscópica nos materiais (Solo Puro e Solo Tratado) a três níveis de profundidade (100x, 200x, 200x), com algumas amostras tentou-se maiores aumentos como de até 100.000x.

3.3.5.2 Mineralogia - Difração de Raio-X

O objetivo da difração de Raio-X (DRX) na análise de solos, é identificar os picos apresentados nos gráficos e cruza-los com informações de bancos de dados existentes a fim de identificar a formação mineralógica da amostra em questão.

O objetivo da difração de Raio-X no presente trabalho não foi de identificar a mineralogia das amostras, mas sim, procurar por indícios de alterações na estrutura do solo, a fim de concluir se as enzimas alteram ou não quimicamente as amostras analisadas. Por isso, foram analisadas amostras no estado puro e amostras no estado tratado, permitindo cruzar as informações em busca desses indícios de alterações.