

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DO RCC EM CAMADAS
DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS**

PEDRO PAULO DOS REIS PASCOAL
ROBSON ROSSI SILVA DE MESQUITA

ORIENTADORA: CLÁUDIA MARCIA COUTINHO GURJÃO
CO-ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO

PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA – DF, DEZEMBRO DE 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DO RCC EM CAMADAS
DE COBERTURA DE ATERROSSANITÁRIOS**

**PEDRO PAULO DOS REIS PASCOAL
ROBSON ROSSI SILVA DE MESQUITA**

**TRABALHO DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADA POR:

**CLÁUDIA MARCIA COUTINHO GURJÃO, DSc (UnB)
(ORIENTADORA)**

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (UnB)
(CO-ORIENTADOR)**

**VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ELIANE KRAUS DE CASTRO, DSc (Engenheira)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 08 de dezembro de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

PASCOAL, PEDRO PAULO DOS REIS; MESQUITA, ROBSON ROSSI SILVA DE
Estudo de viabilidade do uso do RCC em camadas de cobertura de aterros sanitários.
[Distrito Federal] 2014.
ix, 87 p.(ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2014)
Trabalho de Projeto Final I - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Aterros Sanitários	2. <i>Liners</i>
3. Permeabilidade	4. Materiais Alternativos
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MESQUITA, R. R. S.; PASCHOAL, P. P. R.(2014). Estudo de viabilidade do uso de RCC em camadas de cobertura de aterros sanitários. Trabalho de Projeto Final, publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: PEDRO PAULO DOS REIS PASCOAL E ROBSON ROSSI
SILVA DE MESQUITA
TÍTULO DO TRABALHO DE PROJETO FINAL: Estudo de Viabilidade do Uso do RCC
em Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários
GRAU / ANO: Bacharéis em Engenharia Civil / 2014

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Pedro Paulo dos Reis Pascoal
QS 14 conjunto 03B casa 03
71.825.413 - Brasília/DF – Brasil

Robson Rossi Silva de Mesquita
QSE 17 casa 09 Taguatinga
70.025.170 - Brasília/DF – Brasil

RESUMO

Nas últimas décadas, através de várias conferências para tratar do meio ambiente tais como Rio 92, Rio +12 e a de Kioto, cada vez mais cobra-se dos governos, empresas e cidadãos que se tenha uma maior preocupação com os dejetos e rejeitos gerados pelas atividades econômicas e sociais. Segundo estudos de Chung e Lo(2003), os resíduos de construção civil (RCC) representam entre 20 a 30% do total de resíduos sólidos gerados pelas cidades dos países desenvolvidos, tornando-se assim um grande fator de preocupação em relação à forma de destinação que produza o menor impacto ambiental, mas também não seja uma solução muito sofisticada ou onerosa. Neste contexto propõe-se neste estudo avaliar a viabilidade técnica do uso de Resíduos de Construção Civil (RCC) misturados com solo na confecção de camadas impermeáveis de cobertura de aterros sanitários, os denominados *liners* de cobertura. Isso foi feito através de ensaios físicos e estruturais. São eles os ensaios de granulometria, limites de plasticidade e liquidez, identificação e descrição expedita (visual-táctil) de solos - MCT e ASTM e ensaio de resistência à compressão simples. Todos os ensaios foram realizados em amostras de solo e misturas de solo e RCC, nas proporções de 10%, 20% e 30% de RCC em massa. O objetivo dos ensaios foi determinar os parâmetros de misturas entre o solo do aterro sanitário e RCC com melhores propriedades físicas a ser implantado na confecção de *liners* de cobertura na região de Samambaia, no Distrito Federal, com o RCC beneficiado fornecido pela empresa Areia Bela Vista, proveniente de canteiros de obras de Brasília. Com os resultados obtidos nos ensaios, conclui-se que as características físicas tais como peso específico seco máximo e resistência à compressão simples aumentaram a medida que se adiciona RCC misturado a massa de solo, o que lhe confere maior resistência mecânica à camada de *liner* de aterros, chegando-se na proporção ótima de 30% de RCC em massa de solo. Se a mistura for utilizada para a confecção desta camada, obtendo-se a característica da redução da retração do solo.

SUMÁRIO

ITEM	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	3
1.2 OBJETIVOS DESTE ESTUDO	4
1.2.1 OBJETIVO GERAL	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 SOLOS	6
2.1.1 ESTRUTURA DO SOLO	6
2.1.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DOS SOLOS	7
2.1.3 O GRAU DE SATURAÇÃO	8
2.1.4 A PERCOLAÇÃO NOS SOLOS	8
2.2 O RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL	9
2.2.1 DEFINIÇÃO	9
2.2.2 CARACTERIZAÇÃO	10
2.2.3 DISPONIBILIDADE E GERAÇÃO	11
2.2.4 DESTINAÇÃO FINAL	12
2.3 ASPECTOS DA CONCEPÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO E O RCC	13
2.3.1 O PROBLEMA DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	13
2.3.1.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS BÁSICOS DE UM ATERRO SANITÁRIO	18
2.3.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL EM <i>LINERS</i> DE COBERTURA	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 MATERIAIS	24
3.1.1 SOLO	24
3.1.2 RCC	24
3.2 MÉTODOS	25
3.2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	26
3.2.2 ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE	26
3.2.3 IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO EXPEDITA (VISUAL-TACTIL) DE SOLOS - MCT E ASTM	26
3.2.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS	26

3.2.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	29
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	30
4.1.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	30
4.2	MASSA ESPECÍFICA DO SOLO E DO RCC	30
4.3	LIMITES DE ATTERBERG	31
4.4	IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO EXPEDITA (VISUAL-TACTIL) DE SOLOS - MCT E ASTM	32
4.5	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS	34
4.6	RESISTÊNCIA DO SOLO À COMPRESSÃO SIMPLES	37
5.	CONCLUSÃO	43
6.	SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
	ANEXOS	47
	ANEXO A: TABELAS GRANULOMETRIA	47
	ANEXO B: FIGURAS LIMITES DE LIQUIDEZ	67
	ANEXO C: IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO EXPEDITA (VISUAL-TACTIL) DE SOLOS	69
	ANEXO D: TABELAS E DADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	71
	ANEXO E: TABELAS E DADOS DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	76

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008 (IBGE, 2010)	17
Tabela 2.2 - Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2012 e 2013.	17
Tabela 4.1 – Massa específica dos grãos de solo.	30
Tabela 4.2 – Índices de consistência do solo natural e misturas.	31
Tabela 4.3 – Relação entre deformação e teor de RCC de ruptura ao longo do tempo.	41
Tabela 4.4 – - Aumento da resistência à compressão de cada teor de RCC ao longo do tempo.	41

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 – Composição da cadeia produtiva da engenharia civil	12
Figura 2.2 – Destinação final do RSU no Brasil em 2012 e 2013	15
Figura 2.3 – Elementos básicos de um aterro sanitário	22
Figura 3.1 – Equipamento utilizado na produção de RCC	24
Figura 3.2 - Agregados derivados do processo de reciclagem	25
Figura 3.3 – Curva de compactação do solo	27
Figura 4.1 – Ensaio de granulometria - Sedimentação	30
Figura 4.2 – Ensaio de Limites de Liquidez	31
Figura 4.3 – Localização dos pontos correspondentes aos pares de valores IP e LL do solo natural	32
Figura 4.4 – Pastilhas em processo de secagem e pastilhas umedecidas	33
Figura 4.5 – Compactação do solo puro	34
Figura 4.8 – Compactação do solo + 10% de RCC	35
Figura 4.9 – Compactação do solo + 20% de RCC	35
Figura 4.10 – Compactação do solo + 30% de RCC	36
Figura 4.11 – Corpo de prova rompido	38
Figura 4.10 – Resistência x Deformação (solo sem adição de RCC)	39
Figura 4.11 – Resistência x Deformação do Solo + 10% de RCC	39
Figura 4.12 – Resistência x Deformação do solo +20% de RCC	40
Figura 4.13 – Resistência x Deformação do solo + 30% de RCC	40
Figura 4.14 – Deformação x Porcentagem RCC	42
Figura 4.15 – Resistência x Porcentagem RCC	42

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo

- a - área interna do tubo de carga (cm²)
A - seção transversal da amostra (cm²)
A.A.S.H.O - American Association of State Highway Officials
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ATTR - área de transbordo, triagem e reciclagem
C – coeficiente de forma
c – sobrecarga
CBR - California Bearing Ratio
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
D – diâmetro dos grãos do solo
E - energia a ser aplicada na amostra de solo;
e – índice de vazios
H - altura de queda do soquete;
h0 - distância inicial do nível d'água para o reservatório inferior (cm)
h1 - distância para o tempo 1, do nível d'água para o reservatório inferior (cm)
i - imersão
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
L - altura do corpo de prova (cm)
MCT - Miniatura Compactado Tropical
Ms – massa do sólido
Mt – massa total da amostra
n - número de camadas a serem compactadas no cilindro de moldagem;
N - número de golpes aplicados por camada;
P - peso do soquete;
PEV - ponto de entrega voluntária
Ps – peso seco do sólido
Pt – peso total da amostra
RCC – Resíduos da Construção Civil
RIS – coeficiente empírico
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS – Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
t - intervalo de tempo para o nível d'água passar de h0 para h1 (cm)
V - volume do cilindro.

V_s – volume do sólido

V_t – volume total da amostra

W_L – Limite de Liquidez

W_p – Limite de Plasticidade

γ – peso específico do líquido

γ_w – peso específico da água

γ_s - peso específico aparente do solo

δ – densidade da partícula

μ – viscosidade do líquido

ρ_a – massa específica da água

ρ_s – massa específica aparente do solo

1. INTRODUÇÃO

A questão ambiental cada vez mais pauta as discussões mundiais em fóruns econômicos e sociais. Procura-se agora algo além do desenvolvimento econômico e humano: procura-se o desenvolvimento ambiental.

Várias ações são planejadas com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável, ou seja, crescer no âmbito econômico e em social, de forma que isso gere impactos mínimos ao meio-ambiente. O objetivo do desenvolvimento sustentável depende do desenvolvimento tecnológico como, por exemplo, investimento em reciclagem de materiais. Um dos grandes problemas das sociedades contemporâneas diz respeito a destinação final de lixo dos centros urbanos.

No cotidiano das cidades, a população não tem ideia de quanto lixo cada indivíduo produz em um dia. Segundo a ABRELPE (2013) a média da geração de lixo no país era de 1,041 quilogramas por habitante em um dia e a coleta foi estimada em 0,941 quilogramas por habitante em um dia. Como se vê, a quantidade de lixo produzido por habitante é bem elevada e tende a ser maior que o crescimento populacional, com resíduos cada vez mais diversos e complexos, acompanhando a evolução tecnológica e de consumo das populações.

O lixo é coletado pelos municípios brasileiros e sua destinação final se divide em vazadouros a céu aberto (lixões), aterros controlados e aterros sanitários.

O vazadouro a céu aberto (lixão) é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos, que se caracteriza pela simples descarga do lixo sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. No lixão não existe nenhum controle quanto aos tipos de resíduos depositados e quanto ao local de disposição dos mesmos. Os resíduos domiciliares e comerciais de baixa periculosidade são depositados juntamente com os industriais e hospitalares, de alto poder poluidor.

Existem, nesse sistema, outros problemas associados, como por exemplo a presença de animais (inclusive a criação de porcos), a presença de catadores (que na maioria dos casos residem no local), além de riscos de incêndios causados pelos gases gerados pela decomposição dos resíduos e de escorregamentos, quando da formação de pilhas muito íngremes, sem critérios técnicos.

Os aterros controlados foram desenvolvidos como alternativa para diminuir o impacto ambiental causado pela deposição do lixo a céu aberto, transformando o lixão em uma espécie de “lixão controlado”. Normalmente esta transformação se dá em áreas de deposição de lixo próximas ao lixão, que recebem cobertura de grama e argila, minimizando o mau cheiro e o impacto visual, além de evitar a proliferação de insetos e animais. No entanto, não há impermeabilização de base, medida que evitaria que o lixo contamine o solo e o lençol d’água. Também não há sistema de tratamento do chorume ou do biogás.

O aterro sanitário é a destinação final adequada do lixo. Nesse sistema tudo é pensado, preparado e operado de modo evitar danos à saúde pública e ao meio ambiente. O planejamento é feito desde a escolha da área até a preparação do terreno, operação, determinação de vida útil e recuperação da área após o seu encerramento. Quando se fala de aterro sanitário, tratamos de um projeto de engenharia.

Antes de iniciar a acomodação do lixo, o terreno é preparado com a impermeabilização do solo e o selamento da base com argila e mantas de PVC ou mantas geotécnicas. Esse processo é pensado para que o lençol freático e o solo não sejam contaminados pelo chorume. Há ainda o sistema de captação desse líquido para posterior tratamento, coletado por meio de drenos que encaminham o líquido para um poço de acumulação. O chorume acumulado é encaminhado para a estação de tratamento de efluentes. O gás metano formado pela acumulação e decomposição de matéria orgânica presente no lixo é armazenado ou queimado através de um sistema de dutos. O aterro sanitário também prevê a cobertura diária do lixo, evitando a proliferação de vetores, mau cheiro e poluição visual.

Nesse sistema de disposição dos resíduos sólidos, não há catadores em atividade no terreno e a quantidade de resíduos que entra é controlada. Ao final da vida útil do aterro sanitário, a empresa que o opera é responsável por efetuar o planejamento da recuperação do terreno.

A diferença entre lixões, aterros controlados e aterros sanitários vai além do tipo e complexidade dos sistemas. A diferença que determina a implantação e manutenção de cada uma dessas alternativas de disposições finais de resíduos sólidos urbanos (RSU) acaba sendo custo.

O aterro sanitário é a solução de maior complexidade e eficiência e por isso proporcionalmente mais onerosa e tende a ser mais utilizada em países com maior poder econômico. No Brasil, esta solução é implementada em municípios com maior população e consequente maior orçamento. Em países mais pobres e municípios com menor orçamento, é comum o uso de soluções mais imediatas e menos custosas como os lixões e aterros controlados, onde se misturam práticas de deposição do lixo, aterramento e queima dos resíduos, de modo nem sempre ordenado e sem controle de poluição do ar, do solo e do lençol freático.

O Brasil está gradativamente abandonando o uso dos tradicionais lixões e aterros controlados em detrimento dos aterros sanitários. Esta opção se mostra mais adequada aos propósitos do país em ascender como uma potência economicamente sustentável e é inegável as vantagens de uma destinação mais eficiente e responsável dos resíduos sólidos.

A eficiência do armazenamento de resíduos em um aterro está intimamente ligada a estanqueidade do sistema de aterro sanitário. Por isso, é necessária a instalação de sistemas de drenagem e impermeabilização eficientes, de modo a minimizar a infiltração de água superficial para dentro do aterro, no sistema de *liners* de cobertura, reduzindo percolação de líquidos nocivos e evitar a contaminação do solo e do lençol freático subjacente ao aterro (*liners* de base). Isto só é possível se os *liners* apresentem características como baixa condutividade hidráulica, alta resistência mecânica e às intempéries, durabilidade e compatibilidade com os resíduos a serem depositados.

Na etapa construtiva dos *liners*, normalmente são utilizados solos com alta plasticidade, em que as características de contração e expansão dependem da umidade e da temperatura, de modo a se atingir uma baixa condutividade hidráulica (baixa permeabilidade) no solo. Esta impermeabilidade pode ser afetada pelas baixas umidades relativas em determinadas épocas do ano, ocorrendo assim o ressecamento das camadas solo que compõem os *liners*, ocasionando o surgimento de fissuras que consequentemente provocam aumento da permeabilidade do solo.

1.1 MOTIVAÇÃO

A elevada e cada vez maior geração de resíduos sólidos na atualidade em contraste com as preocupações socioambientais cada vez mais presentes no planejamento estratégico de desenvolvimento econômico e humano das nações exigem soluções eficientes em relação

à disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU). A solução mais adequada nesse contexto acaba sendo a implantação de aterros sanitários e, considerando o risco de contaminação destes sistemas de disposição, a eficiência dos *liners* se torna um aspecto essencial para o sucesso da tecnologia de aterros sanitários.

Outro problema sanitário e ambiental é a destinação final dos resíduos de construção civil (RCC), produzidos cada vez em maior volume, principalmente nas nações emergentes que vivem grande expansão urbana. Assim, procura-se, neste estudo, apresentar uma proposta de utilização de resíduos de construção civil na recuperação de aterros sanitários, mais especificamente utilizando este material alternativo na camada superior que recobre os aterros sanitários, o chamado *liner* de cobertura.

1.2 OBJETIVOS DESTE ESTUDO

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa foi verificar a viabilidade técnica do uso de Resíduos de Construção Civil (RCC) misturados com solo na confecção de camadas impermeáveis de cobertura de aterros sanitários, os denominados *liners* de cobertura.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Coletaram-se amostras do solo da locação onde será implantado o aterro sanitário de Brasília, localizado em Samambaia e obter amostras de resíduo de construção civil, cedidos pela empresa Areia Bela Vista, que se dedicada à exploração e produção de areia natural para fabricação de concreto e argamassa e à reciclagem de RCC para a produção de areia utilizada em variadas aplicações na construção civil.

-Realizaram-se, segundo as normas correspondentes, ensaios de análise granulométrica, limite de liquidez e plasticidade, massa específica dos grãos, compactação dos solos, metodologia MCT e permeabilidade de carga variável no solo obtido do aterro, RCC beneficiado e misturas destes dois componentes nas proporções de 10, 20 e 30% de RCC em massa.

-Com base nos resultados dos ensaios, foi avaliado o comportamento mecânico de camadas impermeáveis, sempre comparando os valores encontrados nos parâmetros de cada ensaio com os exigidos pela legislação no que concerne a construção de um *liner* de cobertura de aterro sanitário.

-Após a análise, verificou-se a viabilidade técnica do emprego de mistura RCC e solo na confecção de *liners* de cobertura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS

Os solos têm sua origem na decomposição das rochas que formavam inicialmente a crosta terrestre. Esta decomposição ocorre devido a agentes físicos e químicos chamados de agentes de intemperismo. Os principais agentes que promovem a transformação da rocha matriz em solo são: as variações de temperatura, a água ao congelar e degelar, o vento ao fazer variar a umidade do solo, e a presença da fauna e da flora.

Além dos agentes de intemperismo, existem também os agentes erosivos que se diferem do primeiro por serem capazes de transportar o material desagregado. De um modo geral o principal agente erosivo é a água que atua na forma de chuva, rio, lagos, oceanos e geleiras. Nos climas áridos, no deserto por exemplo, o principal agente causador de erosão é o vento que dá origem à erosão eólica.

Desta forma temos dois grandes grupos de solos: os transportados e os não transportados. Os solos transportados sofrem o intemperismo em um local e são transportados e depositados em forma de sedimentos em distâncias variadas, um exemplo deste solo é o aluvião e o colúvio. Já os não transportados, decompõem-se e permanecem no mesmo local, guardando de certa forma, a estrutura da rocha matriz da qual foi originado, os solos residuais são solos não transportados.

O solo é composto por um grande número de partículas, com dimensões e formas variadas, que formam o seu esqueleto sólido. Esta estrutura não é maciça e por isso não ocupa todo o volume do solo, ela é porosa e portanto possui vazios. Esses vazios podem estar totalmente preenchidos por água, quando então dizemos que o solo está saturado, podem estar completamente ocupados pelo ar, o que significa que o solo está seco ou com ambos (ar e água) que é a forma mais comum na natureza. Por isso, de modo geral, dizemos que o solo é composto por três fases: sólidos, água e ar.

2.1.1 ESTRUTURA DO SOLO

A estrutura do solo representa a organização ou arranjo dos sólidos do solo. A disposição relativa dos grãos influencia na condutividade hidráulica (parâmetro que relaciona a velocidade de descarga de um fluido através de um meio poroso com um gradiente hidráulico da seguinte forma, seguindo a lei de Darcy:

$$V = K \times i$$

Onde:

V = Velocidade de descarga em (cm/s ou m/s)

K = Constante de permeabilidade (cm/s ou m/s)

i = Gradiente hidráulico

$i = h/L$, onde:

L = Altura da amostra (cm)

h = Carga hidráulica (cm)

A permeabilidade dos solos é um dos aspectos mais importantes quando se fala em *liners* de aterro sanitário.

Um exemplo da influência do arranjo dos solos em relação a condutividade hidráulica é o caso dos solos residuais, em virtude dos macroporos de sua estrutura, tendem a apresentar grandes permeabilidades.

Deve-se observar também características como a compactidade, a consistência e, ainda, se o solo encontra-se compactado ou em seu estado natural, observando que os solos compactados apresentam condutividade hidráulica menor do que em seu estado natural. Observa-se, também, que em um solo relativamente seco compactado, a disposição de suas partículas apresenta uma estrutura floculada e tende a apresentar uma condutividade hidráulica maior que se comparado a um solo compactado em umidade ótima, em que a estrutura encontra-se dispersa, mesmo que este possua mesmo índice de vazios (e) do primeiro solo.

É importante observar, em relação a estrutura dos solos, é que os solos não são isotrópicos em relação à condutividade hidráulica. A exemplo têm-se os solos sedimentares, que tendem a apresentar maiores coeficientes de permeabilidade na direção horizontal do que na direção vertical. Este fato ocorre por que as partículas do solo tendem a posicionar-se com suas maiores dimensões orientadas na direção horizontal.

2.1.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DOS SOLOS

A composição mineralógica dos solos influencia diretamente na condutividade hidráulica, pois os diferentes tipos de minerais adsorvem diferentes quantidades de água, fazendo com que o diâmetro efetivo dos poros varie. Assim, os tipos de minerais presentes

na composição de uma argila, por exemplo, podem influenciar a sua condutividade hidráulica em maior intensidade que o tamanho das partículas da mesma.

Em solos mais granulares, a influência da composição do solo sobre a condutividade hidráulica pode ser de pequena importância, excetuando-se a mica e composições com matéria orgânica.

2.1.3 O GRAU DE SATURAÇÃO

Em solos, a proporção na qual seus vazios são preenchidos com água é extremamente importante e resulta em significativa influência sobre sua condutividade hidráulica. Bolhas de ar podem bloquear os canais de percolação entre as partículas, reduzindo significativamente a condutividade hidráulica.

Em solos onde o grau de saturação é inferior a 85% , o ar é provavelmente contínuo ao invés de presença de bolhas isoladas, invalidando a lei de Darcy. É importante salientar que a lei de Darcy é válida para escoamento laminar que, por simplificação e com aproximação satisfatória, é o tipo de escoamento considerado na maioria dos solos naturais, aplicando-se assim a solos saturados.

Quando se trata de solos não saturados, a percolação da água não remove todo o ar presente em seus vazios e poros, de forma que as bolhas de ar nele permanecem sendo contidas pela tensão superficial da água, tornando-se um obstáculo para o fluxo d'água. Segundo PINTO (2000), o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado é menor do que ele apresentaria se estivesse saturado.

2.1.4 A PERCOLAÇÃO NOS SOLOS

TAYLOR (1948) apresenta uma equação que correlaciona o fluxo do líquido pelo à percolação d'água por um conjunto de tubos capilares, em associação com a lei de Darcy. Esta equação, segundo PINTO (2000), é apresentada a seguir:

$$k = D^2 * \frac{\gamma}{\mu} * \frac{e^3}{(1+e)} * C \quad (2.1)$$

Onde:

k - condutividade hidráulica de Darcy [L/T]

D – diâmetro efetivo das partículas [L]

γ – peso específico do fluido [F/L³]

μ – viscosidade do fluido [MT/L²]

e – índice de vazios

C – índice de forma

Observa-se, na equação, que o coeficiente de permeabilidade depende do peso específico (γ) e da viscosidade do líquido (μ). Estas duas propriedades da água variam com a temperatura. Com a variação da temperatura, a variação do peso específico é pequena, mas a variação da viscosidade é considerável, o que torna este um fator de efeito mais sensível.

Aumentando-se a temperatura da água, ocorre uma redução na viscosidade da mesma. A água torna-se mais “fluida”, afetando o valor da condutividade hidráulica medida. Com o objetivo de se obter uma uniformidade, foi adotado por convenção o coeficiente referido à água na temperatura de 20° C.

2.2 O RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL

2.2.1 DEFINIÇÃO

O crescimento consolidado do setor da construção civil está transformando a realidade dos canteiros de obras. Atualmente já se verifica um avanço na qualidade da construção civil, que passa a investir em tecnologias e qualificação como forma de aumentar a produtividade e reduzir os desperdícios.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública para que possam ser gerenciados adequadamente. Assim, a NBR 10.004/2004 define resíduos sólidos como “resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição...”.

Ainda que os resíduos oriundos das atividades da indústria da construção civil não estejam explicitamente citados, estes estão inclusos nas atividades industriais ou mesmo nas atividades de serviços. No entanto, há uma Resolução específica para os resíduos da construção civil, a Resolução 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, que dispõe sobre a gestão destes resíduos. Esta Resolução define claramente que os resíduos da construção civil “são os provenientes de construções,

reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.”

As causas da geração destes resíduos são diversas, mas podem-se destacar (LEITE, 2001):

- A falta de qualidade dos bens e serviços, podendo isto dar origem às perdas de materiais, que saem das obras na forma de entulho;
- A urbanização desordenada que faz com que as construções passem por adaptações e modificações gerando mais resíduos;
- O aumento do poder aquisitivo da população e as facilidades econômicas que impulsionam o desenvolvimento de novas construções e reformas;

De modo geral, os níveis tecnológicos da região e da própria construtora influenciam diretamente no volume de resíduos gerados, pois levam em consideração a qualidade dos materiais e componentes; a qualificação da mão-de-obra; existência de procedimentos operacionais e mecanismos de controle do processo construtivo.

Tendo em vista que grande parcela dos resíduos da construção civil é oriunda das atividades dos canteiros de obras e de serviços de demolição (PINTO, 1999), pode-se denominá-los genericamente de resíduos de construção e demolição – RCC.

2.2.2 CARACTERIZAÇÃO

A classificação dos resíduos sólidos pela NBR 10.004/2004 está relacionada com a atividade que lhes deu origem e com seus constituintes. Desta forma, os resíduos sólidos são classificados em:

A) Resíduos classe I

- Perigosos;

B) Resíduos classe II

- Não perigosos;
- resíduos classe II A – Não inertes.
- resíduos classe II B – Inertes.

Usualmente os resíduos da construção civil estão enquadrados na classe II B, composta pelos resíduos que “submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente [...], não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.”

Entretanto, a presença de tintas, solventes, óleos e outros derivados podem mudar a classificação do RCC para classe I ou classe II A. Uma classificação mais adequada é dada pela Resolução 307 do CONAMA como apresentado logo abaixo, a qual classifica os resíduos da construção civil em 4 classes. A resolução 348, de 16 de Agosto de 2004, e a Resolução 431, de 24 de maio de 2011, modificaram a classificação da Resolução 307, inserindo o amianto como material perigoso (classe D) e mudando a classificação do gesso, de Classe C para a Classe B, respectivamente.

Resolução Conama 307 (Artigo 3) : Art. 3º Os resíduos da construção civil deverão ser classificados, para efeito desta Resolução, da seguinte forma:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

IV - Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

2.2.3 DISPONIBILIDADE E GERAÇÃO

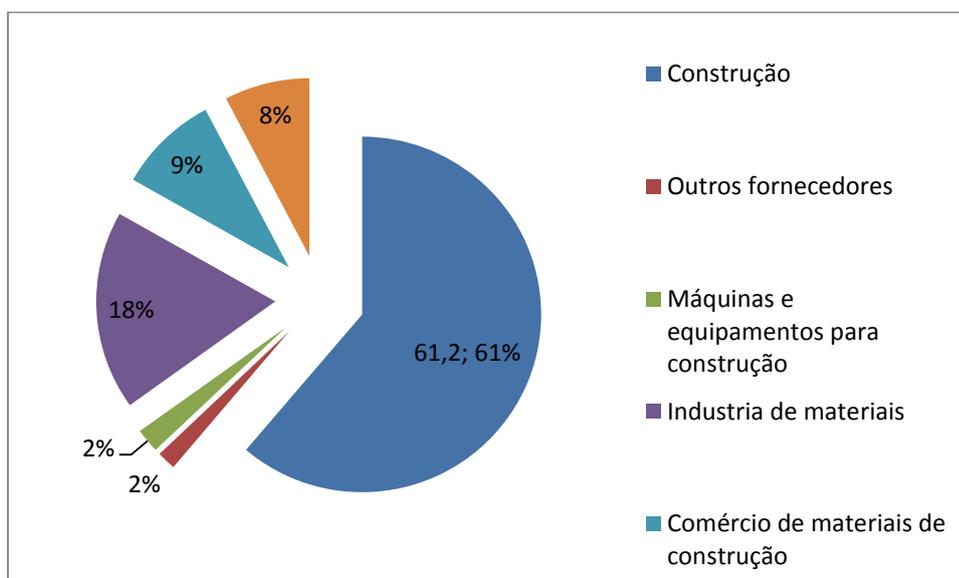
A cadeia produtiva da construção civil, também denominada *construbusiness*, engloba setores que vão desde a extração da matéria-prima e consequente produção dos materiais até

a execução da construção em si, sendo que o setor que mais se destaca pela geração de empregos, renda e pela dimensão é o da construção, conforme detalhado na Figura 2.1. Somente no ano de 2009, a construção correspondia a 61,2% de toda a cadeia produtiva.

Este macrocomplexo da indústria da construção civil é a principal geradora de resíduos da economia. Estima-se que o construbusiness seja responsável por cerca de 40% dos resíduos de toda a economia nacional (JOHN, 2001).

Ainda que os resíduos produzidos nas atividades de construção, manutenção e demolição tenham estimativa de geração muito variável, admite-se que os valores típicos encontram-se entre 0,40 e 0,50 t/hab.ano, valor igual ou superior à massa de lixo urbano (JOHN, 2001).

Figura 2.1 -Composição da cadeia produtiva da Engenharia Civil



Fonte: ABRELPE (2011)

2.2.4 DESTINAÇÃO FINAL

O Art. 10 da Resolução 307 do CONAMA indica que os RCC de Classe A devem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados. Em último caso, podem ser encaminhados para áreas de aterro de resíduos da construção civil.

Contudo, quanto aos resíduos das Classes B, C e D, a Resolução não especifica formas de reciclagem ou reutilização para cada tipo de resíduo, apenas indica que devem ser

armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Assim, a seguir estão dispostas algumas sugestões para a destinação final de componentes de obras:

- O entulho de concreto, se não passar por beneficiamento, pode ser utilizado na construção de estradas ou como material de aterro em áreas baixas. Caso passe por britagem e posterior separação em agregados de diferentes tamanhos, pode ser usado como agregado para produção de concreto asfáltico, de sub-bases de rodovias e de concreto com agregados reciclados; artefatos de concreto, como meio-fio, blocos de vedação, briquetes, etc.

- A madeira pode ser reutilizada na obra se não estiver suja e danificada. Caso não esteja reaproveitável na obra, pode ser triturada e usada na fabricação de papel e papelão ou pode ser usada como combustível;

- O papel, papelão e plástico de embalagens, bem como o metal podem ser doados para cooperativas de catadores;

- O vidro pode ser reciclado em novo vidro, em fibra de vidro, telha e bloco de pavimentação ou, ainda, como adição na fabricação de asfalto;

- O resíduo de alvenaria, incluindo tijolos, cerâmicas e pedras, pode ser utilizado na produção de concretos, embora possa haver redução na resistência à compressão, e de concretos especiais, como o concreto leve com alto poder de isolamento térmico. Pode ser utilizado também como massa na fabricação de tijolos, com o aproveitamento até da sua parte fina como material de enchimento, além de poder ser queimado e transformado em cinzas com reutilização na própria construção civil;

- Os sacos de cimento devem retornar à fábrica para utilização com combustível na produção do cimento;

- O gesso pode ser reutilizado para produzir o pó de gesso novamente ou pode ser usado como corretivo de solo;

- Resíduos perigosos devem ser incinerados ou aterrados com procedimentos específicos. Alguns resíduos como os de óleos, de tintas e solventes, agentes abrasivos e baterias podem ser reciclados.

2.3 ASPECTOS DA CONCEPÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO E O RCC

2.3.1 O PROBLEMA DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Com o advento da revolução industrial no século XVIII e, mais tarde, da produção de produtos em massa, é inegável o grande ganho de qualidade na vida da população mundial. Com o maior consumo de produtos duráveis e não duráveis produzidos em larga escala, passou-se a produzir cada vez mais resíduos sólidos.

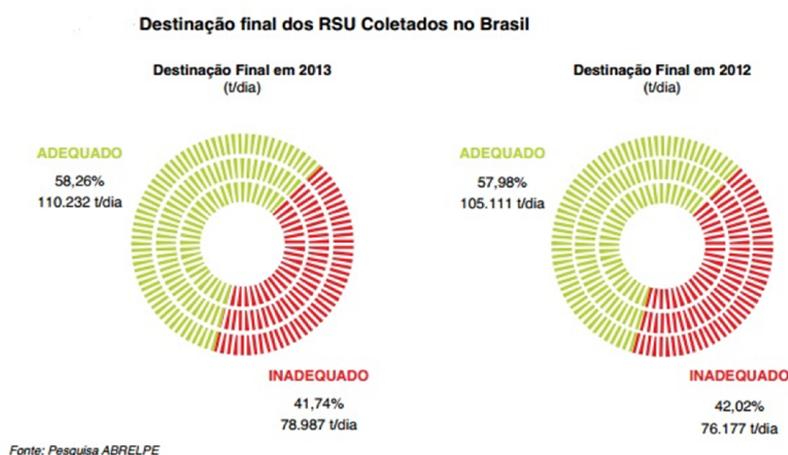
A relação entre desenvolvimento aliado ao aumento populacional e quantidade de resíduo produzido é evidente e isso se tornou, com o tempo, um grande problema urbano, no que diz respeito ao manejo e administração de tais rejeitos. O volume de resíduos produzidos é sempre crescente e assim faz-se necessário a implantação de tecnologias que permitam a captação, separação e tratamento adequado para cada um dos diversos tipos de resíduos, fazendo com que a gestão deles seja mais racional e tenha melhores resultados.

Em países de maior economia, o tratamento dos mais variados componentes dos resíduos sólidos está em um estágio mais avançado, se comparado aos países com economia mais modesta. Estes ainda usam de tecnologias obsoletas ou mesmo não usam de nenhum meio tecnológico para dar um fim aos seus resíduos sólidos.

Nos países de maior índice de desenvolvimento, o processo de destinação final dado aos resíduos começa já na coleta seletiva, em que a cultura da população aliada a tecnologia permite que os resíduos sejam separados em seus diversos tipos e naturezas e assim possam ser tratados separadamente, de forma a ter uma maior eficiência, menor impacto ambiental e até mesmo uma fonte de renda e qualificação profissional para a população mais pobre, geração de energia elétrica e produtos obtidos por meio da reciclagem e reutilização. Existe uma infinidade de exemplos de sucesso na reutilização de resíduos para confecção de produtos.

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013, elaborado pela ABRELPE, a destinação final do RSU é dividida em adequada (aterro sanitário e reciclagem) e inadequada (lixões, aterros controlados) e segue a seguinte distribuição nos anos de 2012 e 2013:

Figura 2.2 – Destinação final do RSU no Brasil em 2012 e 2013



Fonte: ABRELPE 2013

Seguindo a tendência mundial, o Brasil está cada vez mais investindo na construção de aterros sanitários através de investimentos públicos em nível federal, estadual e municipal e também na crescente participação da iniciativa privada, principalmente no centro-sul do país, além de endurecer a legislação que trata de gestão ambiental.

A legislação ambiental é abrangente e vai desde a constituição até as resoluções do CONAMA, passando por leis ambientais previstas em códigos específicos ao tema, que tratam, por exemplo, de responsabilidade pós-consumo e pós-venda.

A principal lei, neste âmbito, é a lei 12.305/2010 que contempla as normas básicas sobre a atuação do Poder Público e da sociedade na gestão dos resíduos sólidos e se inter-relaciona com a Lei 11.445/2007 (Lei do Saneamento Básico), que inclui os serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e a lei 7.802/1989 (Lei de Agrotóxicos), no que se refere à responsabilidade pós-consumo.

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012), os resíduos sólidos são classificados quanto à origem da seguinte forma:

- a) resíduos domiciliares: são resíduos originários das atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: são resíduos originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: quando compreendem os resíduos domiciliares e os resíduos de limpeza urbana;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: são resíduos gerados nessas atividades, excetuados os resíduos de limpeza urbana, os resíduos de serviços

públicos de saneamento básico, de serviço de saúde, serviços de transporte e de construção civil. Se os resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços forem caracterizados como não perigosos, os mesmos podem, em razão de sua natureza, composição ou volume, ser equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal.

e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: são resíduos gerados nessas atividades, excetuados os resíduos sólidos urbanos;

f) resíduos industriais: são resíduos gerados nos processos produtivos e instalações industriais;

g) resíduos de serviços de saúde: são resíduos gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;

h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;

i) resíduos agrossilvopastoris: são resíduos gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;

j) resíduos de serviços de transportes: são resíduos originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;

k) resíduos de mineração: são resíduos gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios e de defensivos agrícolas e suas embalagens;

Existem outras classificações que associam seu estado físico (gasoso, líquido e sólido), grau de periculosidade e fonte geradora.

Em economias de mercado e com grande consumo de produtos industrializados, como o caso dos países com maior renda *per capita*, os resíduos domésticos produzidos tendem a ser compostos de materiais de maior complexidade industrial como alumínio, plásticos, poliéster, elastano e outros materiais. Nos países com economia menos desenvolvida, a produção de resíduos tende a ser com maior predominância de matérias orgânicas. A Tabela 2.1 mostra a composição média dos RSU coletados no Brasil e as quantidades produzidas.

No Brasil, os tratamentos e disposição de resíduos sólidos mais comuns são a incineração, compostagem, aterros sanitários e reciclagem. Atualmente a solução de aterro sanitário tem se tornado popular e vem sendo adotada de forma crescente no país, como evidencia a Tabela 2.2.

Tabela 2.1 – Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
Material reciclável	31,9	58.527,40
Metais	2,9	5.293,50
Aço	2,3	4.213,70
Alumínio	0,6	1.079,90
Papel, papelão e tetrapak	13,1	23.997,40
Plástico total	13,5	24.847,90
Plástico filme	8,9	16.399,60
Plástico rígido	4,6	8.448,30
Vidro	2,4	4.388,60
Matéria orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
Total	100,0	183.481,50

Fonte: elaborado a partir de IBGE (2010b) e artigos diversos³

Tabela 2.2 – Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2012 e 2013.

Quantidade de Municípios por Tipo de Destinação Adotada – 2013

Destinação Final	2013 – Regiões e Brasil					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	BRASIL
Aterro Sanitário	92	453	161	817	703	2.226
Aterro Controlado	111	504	148	645	367	1.775
Lixão	247	837	158	206	121	1.569
BRASIL	450	1.794	467	1.668	1.191	5.570

Fonte: Pesquisa ABRELPE

Quantidade de Municípios por Tipo de Destinação Adotada – 2012

Destinação Final	2012 – Regiões e Brasil					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	BRASIL
Aterro Sanitário	90	450	157	814	702	2.213
Aterro Controlado	110	505	149	643	366	1.773
Lixão	249	839	160	211	120	1.579
BRASIL	449	1.794	466	1.668	1.188	5.565

Fonte: Pesquisa ABRELPE

Aterros sanitários têm vantagens e desvantagens. As vantagens do uso de aterros sanitários são muitas, como o recebimento de resíduos sólidos praticamente da forma como foi recolhido; disposição do lixo de maneira ambientalmente correta; captura e o tratamento do chorume; gerar gás metano que pode ser capturado e aproveitado; amortecimento da emissão do carbono, que fica distribuída no tempo (que no aterro equivale ao tempo médio de vida útil de 40 anos).

Entre as desvantagens, pode-se destacar a exigência de grandes áreas para implantação e topografia adequada com a impossibilidade do uso da área por muitos anos

após o fechamento do aterro; grande movimentações de terra e resíduos; gera menor quantidade de energia ao longo do tempo; após esgotar sua capacidade é necessário cuidado e manutenção por 30 anos.

Esgotada a capacidade de comportar resíduos, o aterro pode ser revitalizado na forma de espaço verde ou um parque de lazer, tomando-se o cuidado de cobri-lo com uma espessa camada de terra e o plantio de árvores, arbustos e grama que não tenham características de raízes muito profundas. As árvores de grande porte devem ficar em locais onde o terreno teve menos contato com dejetos e deve-se evitar espécies frutíferas para impedir que pássaros se alimentem de sementes contaminadas.

2.3.1.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS BÁSICOS DE UM ATERRO SANITÁRIO

Um aterro sanitário é um projeto de engenharia composto de vários sistemas interdependentes entre si que assim compõe o que se denomina de sistema integrado. Os seguintes elementos básicos componentes desses sistemas devem ser considerados no projeto e na operação de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, conforme a legislação vigente no Brasil:

Estudos Preliminares : Consistem no levantamento e consolidação de dados do cenário local, que auxiliam no desenvolvimento de estudos técnico-científicos para o levantamento dos parâmetros necessários à elaboração de uma estratégia para solução do problema.

Sistema de Tratamento dos Resíduos a serem Dispostos: Tem a função de orientar a concepção do projeto do aterro sanitário abordando os aspectos sanitários e de conservação ambiental. Deve garantir a qualidade da vida no entorno do aterro com impactos mínimos no meio ambiente. A concepção do sistema tem entre suas alternativas a adoção de tratamento aeróbio, anaeróbios tradicional ou com aproveitamento de gases, etc.

Sistema de Tratamento de Base (impermeabilização da fundação): Tem a função de proteger a fundação do aterro, evitando-se a contaminação do subsolo e aquíferos adjacentes pela percolação de líquidos nocivos e/ou dos gases, se não há condições naturais in situ favoráveis à estanqueidade do sistema. No caso em que as condições naturais são favoráveis e seguras ambientalmente, dispensa-se esse sistema em sua totalidade ou em partes. Este sistema deve apresentar estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica,

resistência às intempéries e compatibilidade físico-química-biológica com resíduos a serem aterrados.

Dentre os materiais que são normalmente adotados em tratamento de base de aterros, destacam-se as argilas compactadas e as membranas sintéticas (geomembranas). As camadas impermeabilizantes são executadas com controle tecnológico e devem ter características de baixa permeabilidade e mínimas espessuras, representando barreiras à migração de poluentes.

Sistema de Operação: Deve ter como norte os aspectos relacionados à otimização dos recursos humanos, materiais e financeiros, bem como a forma de gerenciamento. O processo de aterramento do lixo ou a formação das células de resíduos geralmente é executado sob três formas tradicionalmente empregadas, são elas: método da trincheira, método da rampa e método da área. A escolha de um método depende das características físicas e geográficas da área.

Os efluentes líquidos e gasosos, produtos da degradação dos resíduos dispostos no aterro, devem ser coletados e submetidos a processos de tratamento adequados às condições locais e à concepção do projeto de aterro sanitário adotado.

Sistema de Drenagem : Para evitar impactos ambientais no subsolo e lençol freático é recomendado projetar-se um sistema de drenagem de fundação para a coleta de águas naturais do subsolo sob o sistema de tratamento de base do aterro sanitário . Este sistema deve ter monitoramento ambiental do aterro, de forma a atestar as boas condições de desempenho do sistema de tratamento de base, durante a vida útil desse aterro e após o seu fechamento.

Sistema de Cobertura : Tem a função de proteger a superfície das células de resíduos e minimizar impactos ao meio ambiente, eliminando também a proliferação de vetores, diminuição da taxa de formação de percolados, redução da exalação de odores, impedir a atividade de catação, resistência suficiente para permitir o tráfego de veículos coletores sobre o aterro, eliminação da queima dos resíduos e da saída descontrolada dos gases. Além disso, o sistema de cobertura deve ser resistente a erosão e adequado à futura utilização da área. Os materiais componentes do sistema de cobertura final deverão ser especificados de maneira a atender os requisitos técnicos anteriores.

A garantia de bom desempenho depende de controle tecnológico durante a execução.

A implantação de proteção vegetal é feita procurando-se integrar a massa final ao meio ambiente local.

Sistema de Drenagem de Águas Pluviais : Tem a responsabilidade de interceptar e desviar o escoamento superficial das águas pluviais, durante a vida útil do aterro e depois que este é desativado, evitando a infiltração de líquidos na massa de resíduos. O dimensionamento da rede de drenagem depende da vazão a ser drenada. Os métodos de dimensionamentos seguem os mesmos princípios práticos da drenagem urbana, quando se tratando de bacias de pequena área de contribuição.

Nos aterros o sistema de drenagem de águas pluviais é constituído por estruturas drenantes de meias calhas de concreto associadas a escadas d'água (dissipador energético) e tubos de concreto.

Sistema de Captação e Drenagem de Líquidos Percolados: Devem coletar e conduzir o líquido que atravessa a massa do aterro (percolado) através de drenos internos, reduzindo as pressões atuantes dos líquidos na massa de resíduo e minimizando o potencial de migração do mesmo no subsolo.

O sistema pode ser projetado através de drenos de material inerte com ou sem tubo perfurado, conduzindo os percolados até o local de acumulação, onde serão destinados ao tratamento adequado. O conhecimento da vazão a ser drenada e das condicionantes geométricas da massa de resíduos são essenciais para o dimensionamento desse sistema de drenagem. O seu projeto depende da alternativa de tratamento adotado para o aterro sanitário em que pode, inclusive, estar associada ao sistema de drenagem de gases.

Sistema de Tratamento dos Líquidos Percolados : A coleta dos líquidos percolados deverá ser realizada através de drenos com materiais inertes com ou sem tubos que compõem o sistema de drenagem de percolado, os quais conduzirão os líquidos coletados até tanques, caixas ou lagoas de acumulação de onde serão enviados a um tratamento adequado, de forma a diminuir os impactos ambientais no sistema de aterro sanitário.

Sistema de Drenagem de Gases : Tem a função de controlar a migração de gases provenientes da digestão dos resíduos confinados através da execução de rede de drenagem, constituída por drenos verticais colocados em pontos estratégicos nas células. Os drenos atravessam toda a célula no sentido vertical, desde a camada de impermeabilização até as camadas superiores. Projetam-se drenos horizontais e subverticais associados aos drenos verticais, que facilitam a drenagem da massa de resíduos.

Sistema de Tratamento dos Gases : Embora muitos projetos que contemplam a exploração do gás metano de aterros sanitário estejam sendo estabelecidos nas últimas

décadas em vários países, o processo de tratamento mais usual tem sido a queima dos gases provenientes do aterro nos próprios drenos coletores de gases.

Análise da Estabilidade dos Maciços dos Resíduos Sólidos Dispostos :Devem ser analisada, a partir de parâmetros e métodos de análise adequados, a estabilidade dos maciços de terra, da fundação e da massa de resíduos sólidos dispostos nas células do aterro. O objetivo da análise de estabilidade é a definição de geometria estável do a terro e seus entorno, com critérios de segurança adequados para obras civis.

Sistema de Monitoramento : Tem a função de conhecer e avaliar o impacto causado pelo sistema de aterro sanitário através do monitoramento geotécnico e ambiental contínuo e sistemático.

O sistema de monitoramento geotécnico consiste basicamente em controle de deslocamentos horizontais e verticais, controle do nível de percolado e pressões de gases no corpo do aterro, controle da descarga de percolado através de drenos e programação de inspeções periódicas no local.

O sistema de monitoramento ambiental basicamente consiste em controle da qualidade das águas subterrâneas, controle da qualidade das águas superficiais, controle da qualidade do ar, controle da poluição do solo e controle dos vetores propagadores de doenças.

O monitoramento deve ser efetuado através de poços de monitoramento previstos no projeto construtivo, instalação de piezômetros, medidores de deslocamentos verticais, medidores de vazão, análises físico-químicas e análises biológicas.

Fechamento Final do Aterro : O projeto de aterro sanitário não só contempla sua construção e operação como também prevê o encerramento de suas atividades após o esgotamento de sua capacidade e assim planeja-se a recuperação da área utilizada e sua ocupação final.

O planejamento do fechamento do aterro sanitário depende do tipo de resíduo tratado neste e nas condições ambientais resultantes de sua vida útil. As drenagens que circundam a área aterrada, as vias de acesso e os sistemas de monitoramento deverão ser mantidos em funcionamento após o encerramento do aterro. Mesmo após o fechamento do aterro, os sistemas de drenagem e tratamento dos líquidos percolados e dos gases deverão ser mantidos em operação durante todo o tempo que os líquidos e gases apresentarem potencial poluidor.

A cobertura final de terra deve ser executada de modo evitar o surgimento de vetores de doenças e a percolação indevida de líquidos e gases. O monitoramento e as leituras de

parâmetros de controle devem ser realizadas periodicamente até a estabilização da massa de resíduos.

Figura 2.3 – Elementos básicos de um aterro sanitário.



Fonte: TGA Meio Ambiente

2.3.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL EM LINERS DE COBERTURA

Os resíduos de construção civil já são amplamente usados na confecção de blocos de concreto, argamassa para revestimentos, embase e sub-base de pavimentos, produção de concretos magros sem fins estruturais e muitas outras aplicações.

Apesar da grande gama de aplicação do resíduo de construção civil para vários fins, quando se trata de seu emprego na confecção de *liners* de cobertura de aterros sanitários, ainda não existem muitas publicações em literaturas técnicas ou estudos sobre o tema.

Segundo estudos publicados por KOERNER e DANIEL (1997), alguns tipos de materiais de construção e demolição podem ser usados no sistema de cobertura final, ressaltando-se, segundo eles, que para clima semiárido verifica-se que o agregado reciclado miúdo do RCC possui especificações e parâmetros que possibilitam a sua utilização como material alternativo e substituto ao da camada de superfície e ao material granular da barreira capilar, porém tomando-se o cuidado de que na camada de superfície deve ser feito o plantio de vegetações para conter a erosão.

De acordo com BARROS (2005) considerando a utilização do RCC beneficiado em *liner* de cobertura de aterros, o mesmo apresenta restrições em relação ao coeficiente de

permeabilidade (k), já que se espera que o material utilizado nesta camada desempenhe uma adequada retenção de água com capacidade de atenuar a infiltração de águas de chuvas para a camada de drenagem, apresentando valores de $k < 10^{-5}$ cm/s. Nos ensaios de condutividade hidráulica do estudo feito por BARROS, o RCC beneficiado apresentou valores para o coeficiente de permeabilidade na ordem de 10^{-5} cm/s, levando-o à conclusão de que o RCC não é adequado para sua utilização em *liners* de cobertura, a princípio. BARROS então viu a necessidade de efetuar um controle de compactação e, após esta intervenção, o RCC apresentou permeabilidade saturada entre 10^{-7} m/s e 10^{-6} m/s, um valor intermediário entre um dreno ($k > 10^{-5}$ m/s) e uma barreira ($k < 10^{-8}$ m/s).

Segundo Barbosa et al (2008), no aspecto de impacto ambiental potencial pela liberação de elementos potencialmente tóxicos, o agregado reciclado de RCC apresentou valores de alumínio e de fenóis ligeiramente acima dos limites admissíveis pela norma brasileira (Fernandes, 2004; Barros, 2005), porém com resultados semelhantes aos de amostras de concreto convencional na literatura. Salienta-se que o RCC pode variar muito suas propriedades, dependendo de sua composição física e química.

Tem-se assim que o RCC assemelha-se tecnicamente e quimicamente aos materiais que compõem um sistema de cobertura final de aterros do tipo convencional, possibilitando seu uso, desde que se tome alguns cuidados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 SOLO

O solo utilizado neste projeto foi coletado na região administrativa de Samambaia, localizada no Distrito Federal, onde existe um projeto para a implementação do novo aterro sanitário. A previsão é que o aterro tenha capacidade para 68 mil toneladas de lixo por mês e a construção de 8 áreas de transbordo, triagem e reciclagem de resíduos da construção civil. O local da coleta foi entre o córrego Melchior e a Rodovia DF 180 km 52, próximo a ETE de Samambaia.

3.1.2 RCC

A reciclagem do RCC foi feita em uma área onde ocorre recepção do entulho bruto, com equipamento e pessoal para separação do entulho não-reciclável. Em seguida, o material selecionado passa por correias transportadoras e elementos magnéticos para separar o aço. Então, os materiais sofrem trituração e peneiramento em equipamentos de diversos tipos, e dependendo da qualidade da composição do entulho utilizado, o agregado reciclado irá apresentar diferentes níveis de qualidade. Para o estudo foi escolhido um agregado de menor qualidade, pois ele apresenta menor custo de produção e caso seja utilizado em grande escala, o custo total da obra será reduzido e o emprego de misturas de solo natural com RCC será economicamente viável. A empresa fornecedora do RCC utilizado está localizada em Sobradinho, Distrito Federal. A Figura 3.1 mostra os equipamentos utilizados para reciclagem do entulho, e a Figura 3.2 mostra o armazenamento do RCC produzido.

Figura 3.1 – Equipamento utilizado na produção de RCC.



Figura 3.2 - Agregados derivados do processo de reciclagem.



3.2 MÉTODOS

Foram realizados ensaios para a caracterização dos parâmetros de desempenho físico e hidráulico do solo, obtido na locação do futuro aterro sanitário de Brasília, e do RCC fornecido pela empresa Areia Bela Vista. Como o projeto destina-se a avaliar a viabilidade de utilização de RCC misturado ao solo do aterro para o fim de confecção de *liner* de cobertura, foram ensaiadas misturas entre solo e RCC nas proporções de 10%, 20%, 30% de RCC em massa de solo.

A caracterização das amostras foram feitas através dos ensaios de granulometria, massa específica e limite de liquidez e plasticidade, realizadas por Lima e Sousa (2013) e Costa (2013), que fizeram parte do grupo de pesquisa montado na Universidade de Brasília para pesquisas com RCC.

As características de resistência física foram determinadas pelos ensaios de compressão e resistência à compressão simples.

A caracterização hidráulica das misturas foi feita através de ensaio de permeabilidade.

Antes de feitas as misturas, o solo natural foi submetido a secagem prévia, para que fosse utilizada a umidade higroscópica, para posterior correção da umidade e assim obter as condições ideais para realização dos ensaios.

3.2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

O ensaio de granulometria foi feito de acordo com o disposto na norma NBR 7181. Através dos resultados obtidos desse ensaio, foi possível a construção da curva de distribuição granulométrica e assim caracterizar as amostras com mistura de 10%, 20%, 30% de RCC em massa de solo.

3.2.2 ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE

O ensaio de limite de liquidez e plasticidade foi realizado de acordo com o disposto nas normas NBR 6459 e NBR 7180, para as amostras com mistura de 10%, 20%, 30% de RCC em massa de solo.

3.2.3 IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO EXPEDITA (VISUAL-TACTIL) DE SOLOS - MCT E ASTM

O ensaio de massa específica dos grãos foi realizado de acordo com a norma NBR 6508 para as amostras de solo mistura de 10%, 20%, 30% de RCC em massa de solo, utilizando-se do método expedito proposto por Nogami e Villibor (1994 e 1996), que é a simplificação do método MCT, onde é possível obter a identificação do grupo MCT por meio de um gráfico, implicando apenas saber o valor da contração diametral e o valor da penetração observado em pequenos corpos de provas, de formato cilíndrico de 5 mm de altura por 20 mm diâmetro.

3.2.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS

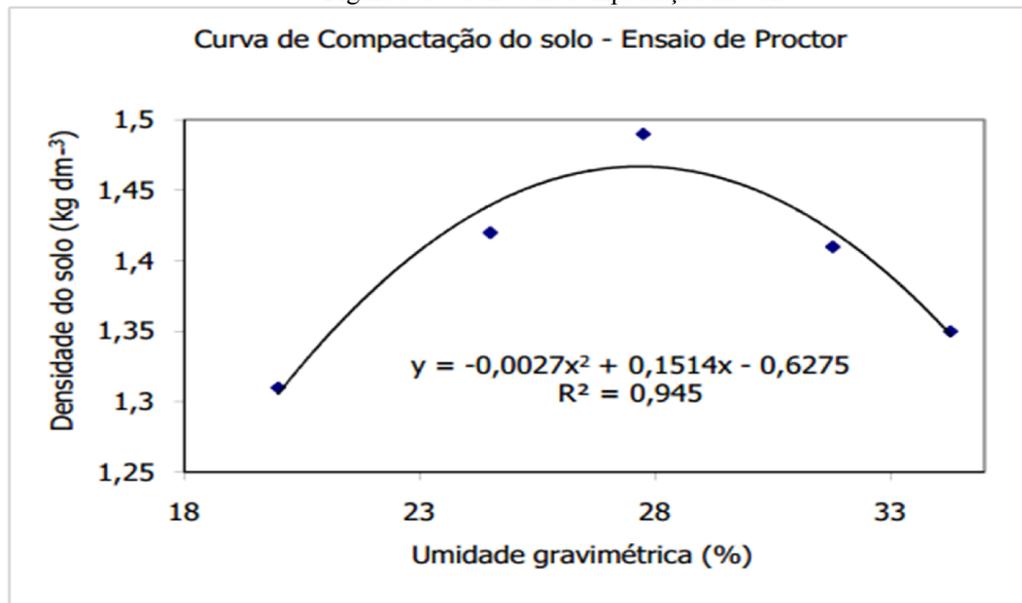
O ensaio de compactação de solos é normatizado pelas normas NBR 6457 e NBR 7182.

A compactação é um método de estabilização de solos que se dá por aplicação de alguma forma de energia (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica). Seu efeito confere ao solo um aumento de seu peso específico e resistência ao cisalhamento, e uma diminuição do índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade.

Através do ensaio de compactação é possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo quando compactado com determinada energia. O ensaio mais comum é o de Proctor (Normal, Intermediário ou Modificado), que é realizado através de sucessivos impactos de um soquete padronizado na amostra.

A compactação de um solo em laboratório tem a finalidade de determinar a curva de variação da densidade do solo em função da umidade, para uma dada energia de compactação, como mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Curva de compactação do solo



Em Mecânica dos solos o Ensaio de compactação Proctor é um dos mais importantes procedimentos de estudo e controle de qualidade de aterros de solo compactado. Através dele é possível obter a densidade máxima do maciço terroso, condição que otimiza algum empreendimento com relação ao custo e ao desempenho estrutural e hidráulico.

A metodologia foi desenvolvida pelo engenheiro Ralph Proctor em 1933, sendo normatizada nos Estados Unidos pela A.A.S.H.O - American Association of State Highway Officials e no Brasil sua execução segue a norma ABNT NBR 7182,1986 - Ensaio de Compactação.

Assim, deve-se compactar uma porção de solo em um cilindro com volume conhecido, fazendo-se variar a umidade de forma a obter o ponto de compactação máxima no qual obtém-se a umidade ótima de compactação.

A energia de compactação é dada então pela equação:

$$E = n \cdot N \cdot P \cdot H / V \quad (3.1)$$

Onde:

E - energia a ser aplicada na amostra de solo;
n - número de camadas a serem compactadas no cilindro de moldagem;
N - número de golpes aplicados por camada;
P - peso do soquete;
H - altura de queda do soquete;
V - volume do cilindro.

De acordo com o entendimento do que vem a ser a compactação citada acima e os procedimentos a serem seguidos de acordo com a NBR 7182, foi realizada corretamente a compactação do solo em 5 situações distintas:

- Solo puro;
- Solo + 10%;
- Solo + 20%;
- Solo + 30%;

Os ensaios foram realizados para avaliar a influência que as diferentes quantidades de RCCs conferem quando misturadas ao solo, sendo essa influência observada tanto no teor de umidade ótima, como na avaliação do peso específico.

A curva de compactação foi obtida a partir de 5 teores de umidades diferentes, assim, levando-se em consideração a correção que foi feita devido à umidade higroscópica, alcançou-se a umidade desejada.

Foi feita a homogeneização do RCC com o solo em suas devidas proporções e em seguida colocavam-se as misturas na câmara úmida para que as mesmas não perdessem umidade para o meio e assim, permaneciam na mesma por volta de 24 horas, sendo então realizadas as compactações.

Observando o traçado das curvas de compactação das diferentes misturas foi possível determinar a umidade ótima de compactação, parâmetro de fundamental importância para o campo da engenharia civil.

3.2.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de resistência à compressão simples foi feito de acordo com o especificado na norma NBR 12770.

Os corpos de prova moldados foram rompidos em dias diferentes, seguindo a seguinte logística: dois corpos rompidos imediatamente após a moldagem, dois corpos rompidos 15 dias depois da moldagem, dois corpos de prova rompidos 30 dias após a moldagem, dois corpos de prova rompidos 45 dias após a moldagem. Através deste procedimento, procurou-se determinar a influência do processo de cura das amostras.

Foram rompidos oito corpos de prova sendo dois corpos para cada idade de ruptura, moldados com solo puro (sem adição de RCC), solo + 10% de RCC em massa, solo + 20% de RCC em massa e solo + 30% de RCC em massa.

Os corpos de prova foram moldados calculando-se a massa necessária a ser colocada no cilindro de compactação. Para realizar compactação uniforme, dividiu-se o cilindro em cinco partes iguais que designamos de “camadas”. Cada camada continha 1/5 da massa de amostra total a ser colocada no cilindro e logo após isso se compactava a camada até a marca de limite da camada.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A Figura 4.1 mostra o detalhe do ensaio de sedimentação realizado no Laboratório de Geotecnia da UnB.

Figura 4.1 – Ensaio de granulometria - Sedimentação.



Com base nos ensaios realizados de granulometria pode-se observar as curvas granulométricas do solo e das misturas com e sem defloculante no Anexo A deste estudo.

Na granulometria do solo com defloculante observou-se predominância da fração areia fina (entre 0,06 e 0,2 milímetros) e na granulometria do solo sem defloculante observou-se a predominância da fração areia média (entre 0,2 e 0,6 milímetros), concluindo-se assim que o RCC misturado com o solo, na proporção que se aumenta a porcentagem do resíduo na mistura, a mesma tende a deixar a característica de solo argiloso e passa a apresentar granulometria de areia.

4.2 MASSA ESPECÍFICA DO SOLO E DO RCC

Com o auxílio do picnômetro, obteve-se a massa específica dos grãos de solo e do RCC.

A Tabela 4.1 apresenta os valores de massa específica dos grãos de solo.

Tabela 4.1 – Massa específica dos grãos de solo

	Solo	RCC
Gs (g/cm ³)	2,79	2,58

4.3 LIMITES DE ATTERBERG

O ensaio de distribuição granulométrica não caracteriza bem o comportamento dos solos. Assim, os ensaios de limites de Atterberg, limites de liquidez e plasticidade, baseiam-se no comportamento do solo na presença de água. Ou seja, quanto mais úmido ele se comporta como um líquido, quando perde parte de sua água, fica plástico, e quando mais seco fica quebradiço.

A Figura 4.3 mostra o ensaio de limite de liquidez. Os resultados encontram-se na Tabela 4.4.

Figura 4.2 – Ensaio de Limites de Liquidez. Lima e Sousa (2013).

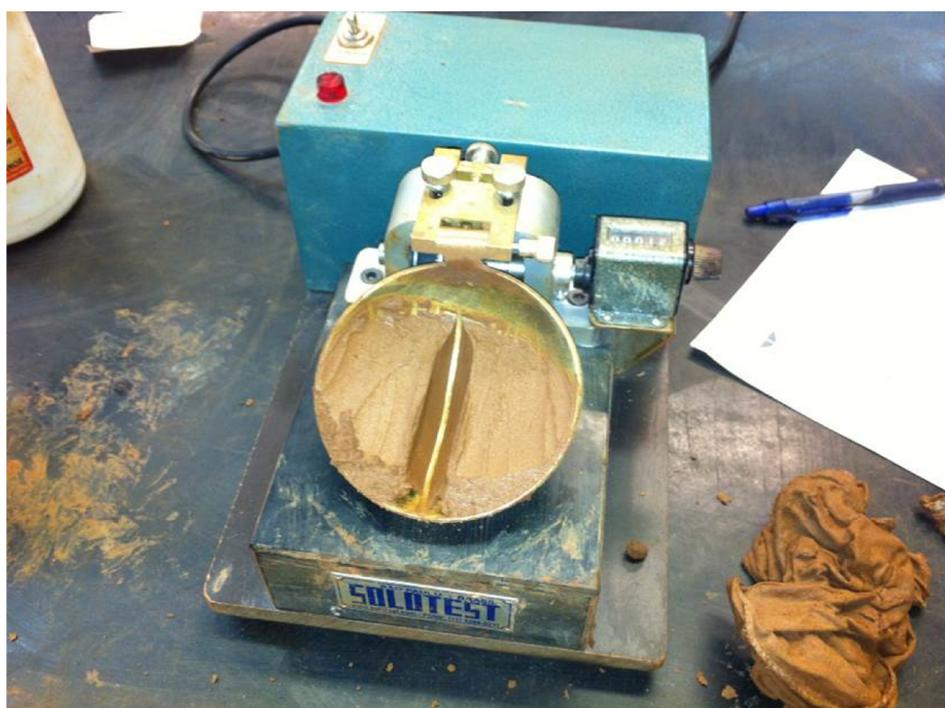


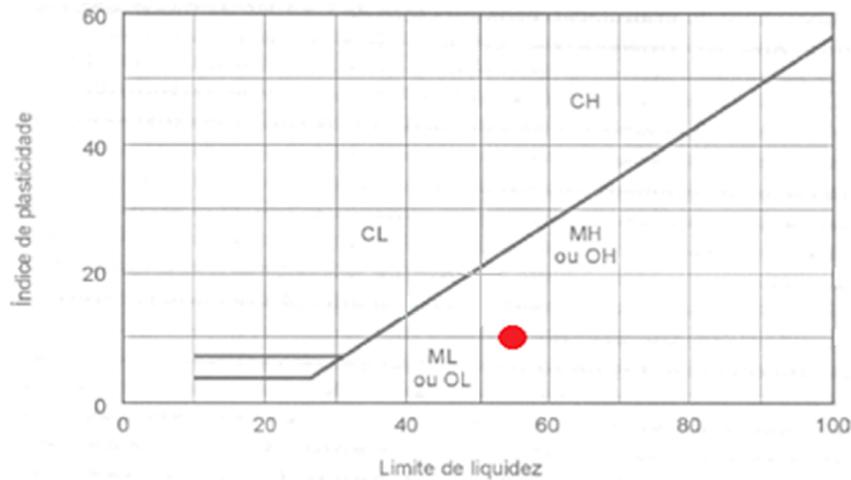
Tabela 4.2 – Índices de consistência do solo natural e misturas.

	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
Solo	54	44	10

Fonte: Lima e Sousa, 2013.

A Figura 4.4 apresenta a localização dos pontos correspondentes aos pontos de valores de LL e IP do solo natural.

Figura 4.3 – Localização dos pontos correspondentes aos pares de valores IP e LL do solo natural.



Fonte: Lima e Sousa, 2013.

Os gráficos referentes às misturas de solo com RCC estão no Anexo B.

Observou-se ligeira perda de plasticidade a medida que se aumenta o teor de RCC, combinado com progressiva e acentuada perda de umidade, principalmente na mistura de Solo + 30% de RCC.

4.4 IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO EXPEDITA (VISUAL-TACTIL) DE SOLOS - MCT E ASTM

Foi realizado o ensaio execução dos ensaios inicialmente utilizando-se uma pequena quantidade de amostra deformada do solo estudado, que foi passado pela peneira de abertura 2 mm (aproximadamente 50g) e pela peneira 0,42 mm, e logo após a amostra umedecida por um período aproximado de 8 horas. A amostra preparada foi espatulada para moldagem e secagem das pastilhas. Com as pastilhas moldadas e secas, foi medida a contração diametral de cada pastilha, com medidas em mm com aproximação de 0,1 mm. Finalmente, executou-se a etapa de embebição por 2 horas e, seguidamente, realizou-se a determinação da penetração. A penetração foi verificada por uma agulha padrão de um mini penetrômetro, expressa em mm, quando aplicada verticalmente na superfície da pastilha após a reabsorção de água efetuada sobre condições padronizadas (Fortes et al., 2002). A Figura 4.5 mostra parte das etapas do ensaio expedito MCT.

Figura 4.4 – Pastilhas em processo de secagem e pastilhas umedecidas.



Para a classificação do solo em relação a sua resistência a seco, moldou-se bolas de solo úmido com, aproximadamente, 1 cm de diâmetro. Em seguida, colocou-se essa amostra em uma estufa, a 50-60°C, por 8 horas. Retiradas da estufa, tentou-se realizar o esmagamento, com as mãos, da bola de solo. A partir do comportamento das amostras ao esmagamento, classificou-se o solo segundo a resistência a seco utilizando-se da tabela própria para classificar uma amostra de acordo com a resistência a seco. Realizou-se ainda ensaio para determinar a plasticidade fazendo-se rolinhos de 3mm e identificando a dificuldade de obtê-los sem que quebrassem, observou-se características da amostra de solo como o formato dos grãos, odor, cor e natureza mineralógica.

A tabela usada para classificar o solo neste ensaio está no Anexo C.

Em relação à metodologia ASTM, com as mãos se verificou a umidade natural do solo, resistência à compressão, dilatância e dureza. Os resultados obtidos foram:

✓ MCT

Granulometria volumétrica que caracteriza o solo como muito fino, alta plasticidade, resistência muito alta, formas dos grãos sub-angulosa, natureza mineralógica matéria orgânica, e finalmente grupo MCT do tipo LA' – LG', ou seja, o solo do aterro foi caracterizado como Arenoso laterítico – Argiloso Laterítico.

✓ ASTM

A classificação visual da umidade natural resultou em solo seco, fino, com resistência à compressão muito alta, dilatância rápida e plasticidade alta.

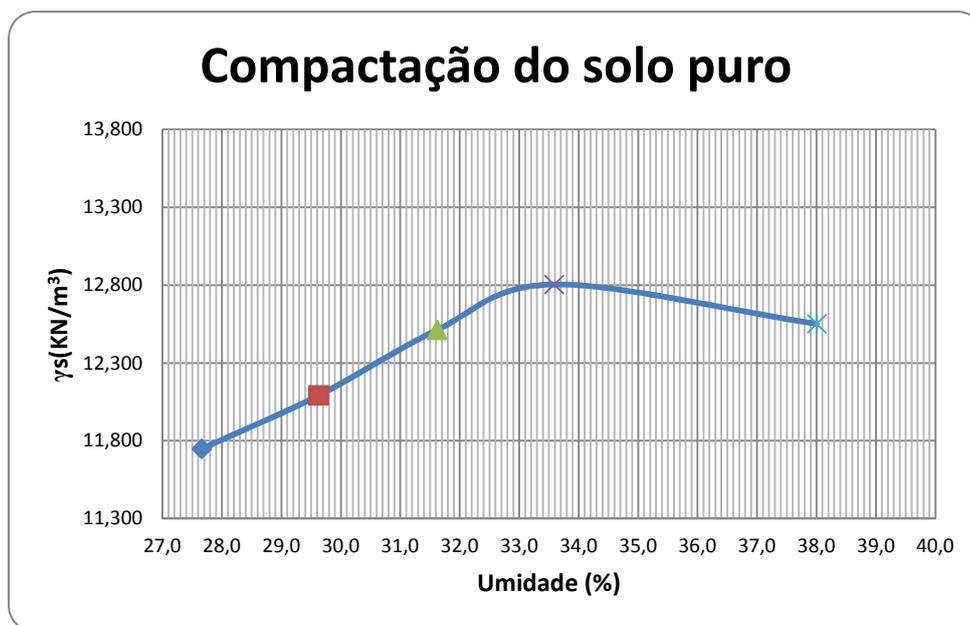
4.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS

Em um *liner* de um aterro é necessário a redução do índice de vazios e o aumento da densidade do solo que compõe esta camada, para que ocorra melhora de diversas propriedades do solo, entre elas a resistência e a permeabilidade. Isso é feito através de compactação do solo da camada.

Sabendo disso de foi necessária a realização do ensaio de compactação do solo, através da utilização da energia do tipo Proctor Normal em corpos de prova de solo puro, solo+10% de RCC, solo+10% de RCC, solo+20% de RCC e solo+30% de RCC.

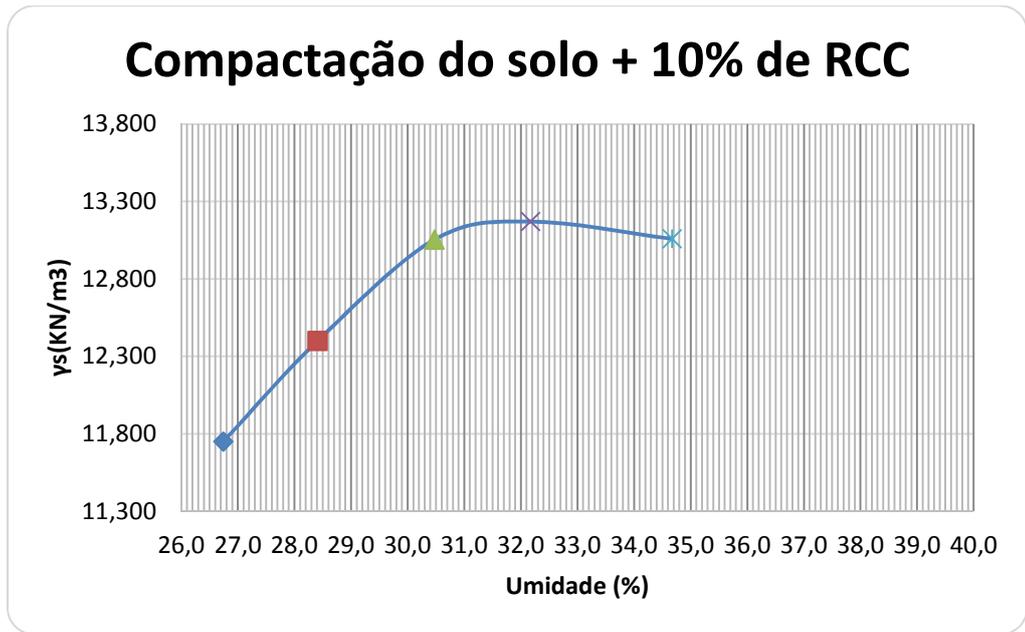
A figuras a seguir apresentam a curva de compactação do solo puro e as curva de compactação do solo misturado com o RCC:

Figura 4.5 – Compactação do solo puro



Fonte: Costa (2014)

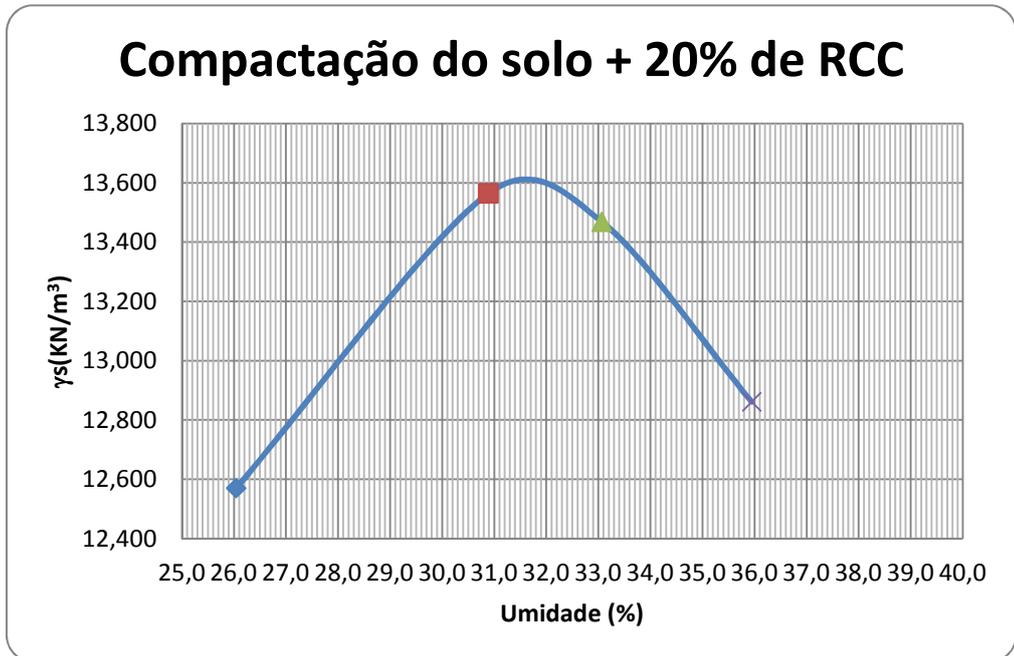
Figura 4.6 – Compactação do solo + 10% de RCC



Fonte – Costa (2014)

A Figura 4.7 mostra a curva de compactação do solo + 20% de RCC:

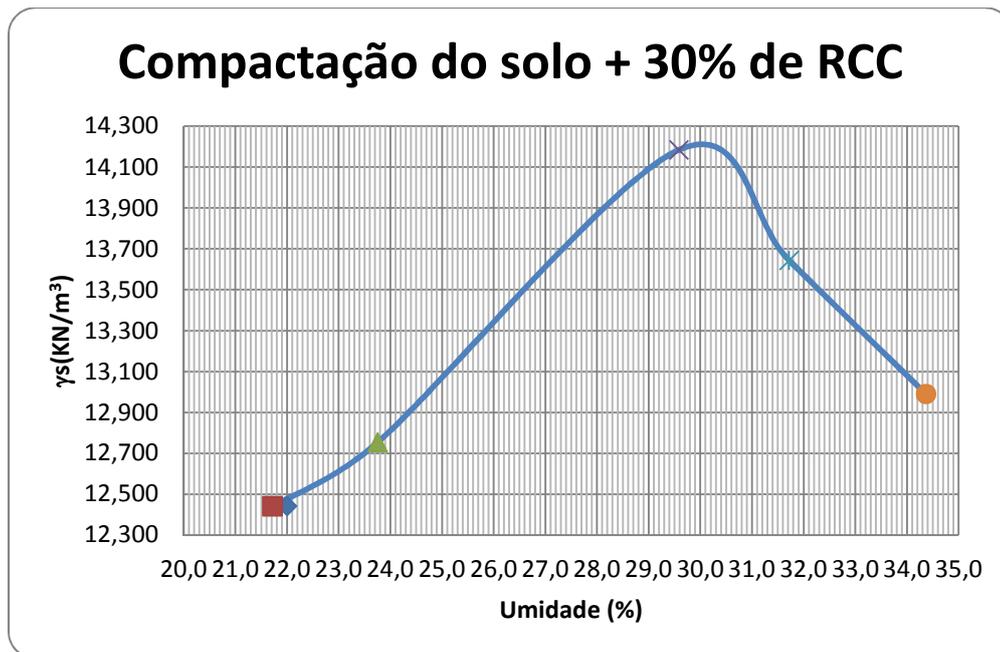
Figura 4.7 – Compactação do solo + 20% de RCC



Fonte – Costa (2014)

A Figura 4.8 mostra a curva de compactação do solo + 30% de RCC:

Figura 4.8 – Compactação do solo + 30% de RCC



Fonte – Costa (2014)

Como se observa na curva de compactação do solo, o valor de peso específico seco máximo foi de 12,80kN/m³ e umidade ótima se estabeleceu próxima de 34% . Assim os resultados obtido para o peso específico máximo ficou próximo do esperado para solos argilosos, que apresentam valores de pesos específicos secos máximos da ordem de 14 a 15 kN/m³, mas em relação a umidade ótima observa-se que ficou ligeiramente maior que a esperada para solos argilosos, que ficam entre 25% e 30%.

Ao adicionar RCC ao solo, as curvas de compactação mudaram de parâmetros, como esperado. O RCC aumenta o percentual de material arenoso na amostra, assim como aumenta a granulometria da mistura se comparado ao solo argiloso.

O aumento da granulometria resulta no aumento dos pesos específicos máximos e na diminuição das umidades ótimas das amostras, estas afetadas ainda mais dramaticamente possivelmente por reações de hidratação do material cimentício presente no RCC, ainda reativo.

Analisando a mistura com 10% de RCC percebe-se que o valor do peso específico seco máximo manteve-se pequeno aumento, obtendo-se 13,17 kN/m³. Em relação à umidade ótima, esta baixou e estabeleceu-se próxima de 31%. A pouca quantidade de RCC adicionada ao solo na amostra manteve o peso específico seco máximo ser praticamente inalterado se comparado com a amostra de solo sem adição de RCC.

Quando foi aumentado o teor de RCC ao solo, na proporção de 20% de RCC em massa, novamente a curva sofreu alteração de forma. Seguindo a tendência, o peso específico máximo aumentou e a umidade ótima diminuiu. A umidade ótima ficou praticamente inalterada,

no valor de 31,6%. Já o peso específico seco máximo teve ligeiro aumento chegando a um valor próximo de 13,57 kN/m³.

Na amostra de maior proporção de RCC, de 30% em massa, a curva de compactação seguiu a tendência de aumento do peso específico máximo e diminuição da umidade ótima, apresentando peso específico seco máximo próximo de 14,20 kN/m³ e 30%, a umidade ótima, esta que decresceu como esperado.

Salienta-se que a porcentagem de areia presente no RCC, está composta de grãos de maior diâmetro que os do solo argiloso, tendem a elevar os índices de pesos específicos máximos e a baixar os índices de umidades ótimas.

Uma tendência verificada é a de que ao aumentar o percentual de RCC na mistura com o solo, as curvas de compactação adquirem forma mais achatada, apresentando comportamento menos sensível da variação do peso específico seco máximo em relação a umidade. Este comportamento nada mais é a consequência do aumento de material arenoso e a propagação do comportamento de solos arenosos na mistura.

4.6 RESISTÊNCIA DO SOLO À COMPRESSÃO SIMPLES

Para execução do ensaio de compressão simples, moldaram-se 2 corpos de prova para cada porcentagem de RCC associada ao solo puro, registrando-se os valores para diferentes idades de rompimento dos mesmos, seguindo a seguinte ordem de rompimento: no dia, 15 dias, 30 e 45 dias.

As porcentagens da mistura do RCC + solo estão listas abaixo:

- Solo puro (0%);
- Solo + 10%;
- Solo + 20%;
- Solo + 30%;

Figura 4.9 – Corpo de prova rompido



Os gráficos ilustrados abaixo nas Figuras de 4.10 a 4.11 mostram o comportamento da relação entre as tensões aplicadas nos corpos de provas cilíndricos e as respectivas deformações para cada teor de RCC, bem como, para cada idade.

É interessante observar que para as porcentagens de mistura de RCC de 10% a 30%, o comportamento do gráfico após a ruptura, é de imediata queda na resistência à compressão, sem apresentar um patamar de estabilização, já no caso do solo sem adição de RCC, ainda que não muito intenso, é possível observar um trecho de estabilização da resistência após atingir a ruptura dos CP (principalmente para 30 e 45 dias). Podendo significar então, que a adição de RCC à amostra, apesar de conferir uma maior resistência à ruptura, pode por outro lado, torná-lo mais frágil.

Outro aspecto visível a partir desses gráficos é o ganho de resistência do solo à medida que se decorrem os dias. Logo, para a idade de 45 dias, em todas as porcentagens de RCC, a resistência dos CPs foram maiores que quando rompidas anteriormente.

Figura 4.10 – Resistencia x Deformação (solo sem adição de RCC)

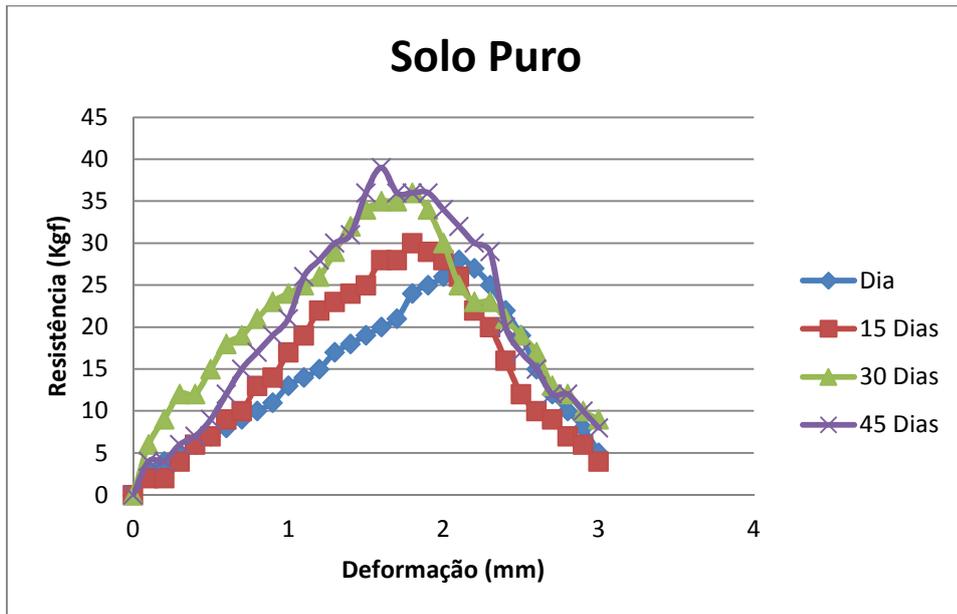


Figura 4.11 – Resistencia x Deformação do Solo + 10% de RCC

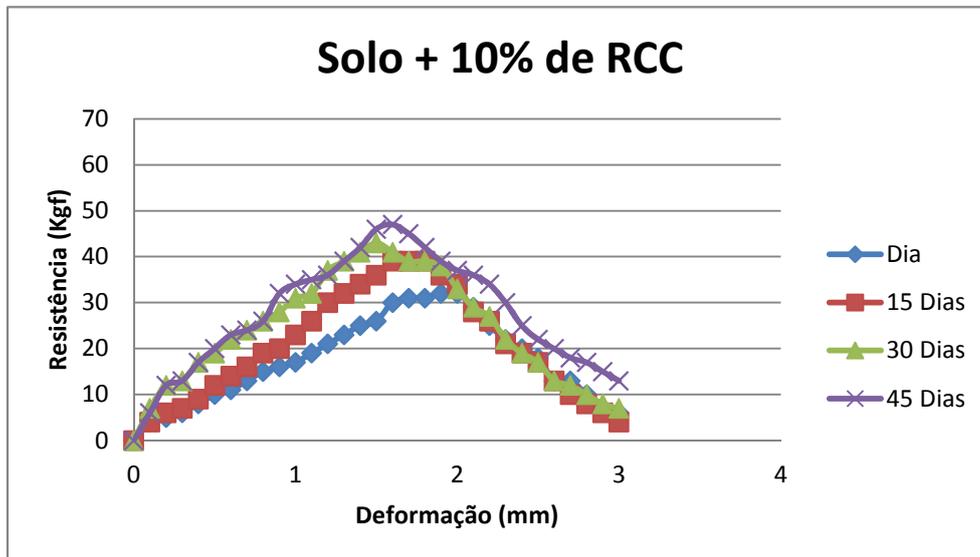


Figura 4.12 – Resistencia x Deformação do solo +20% de RCC

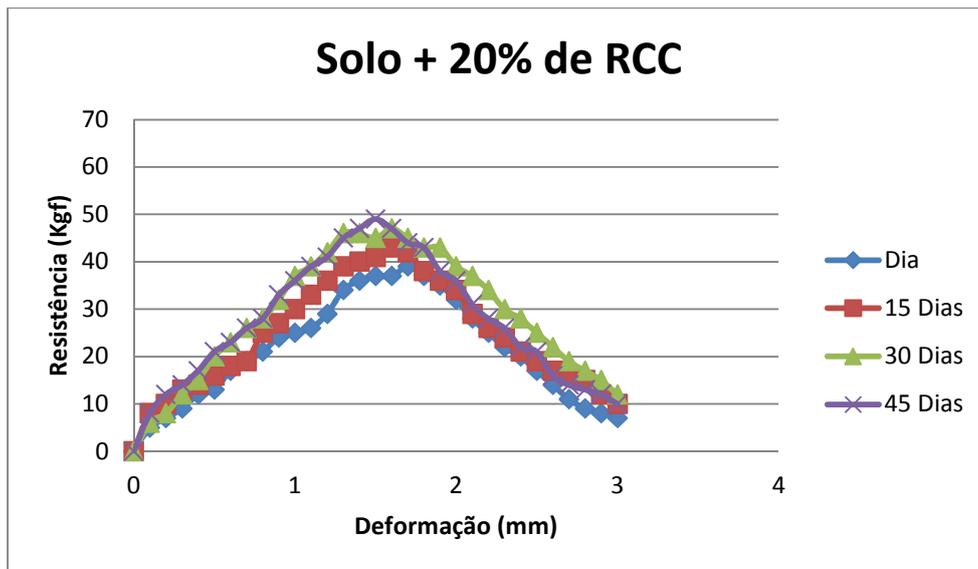
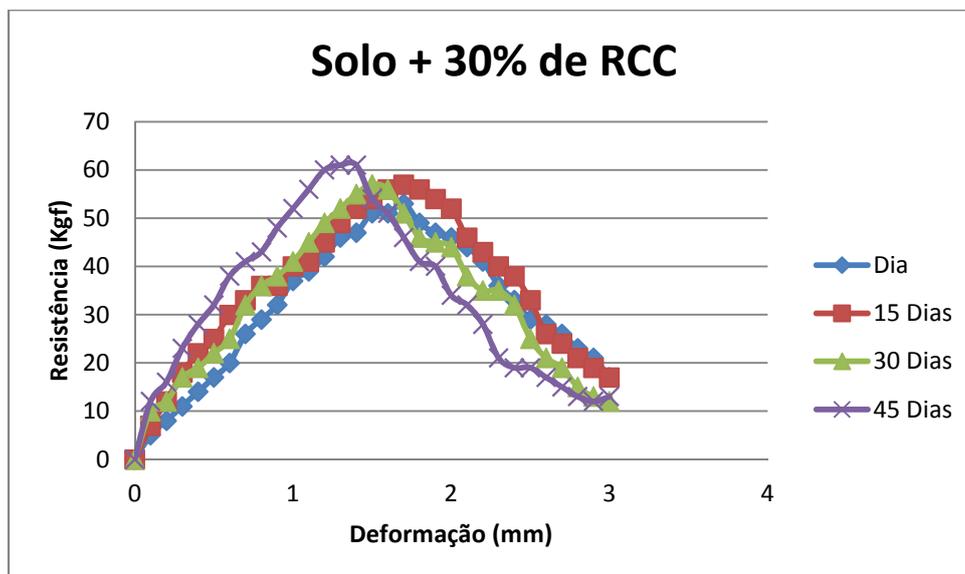


Figura 4.13 – Resistencia x Deformação do solo + 30% de RCC



Visando estabelecer um comparativo entre o comportamento da deformação e da tensão nos corpos de provas à medida que se aumenta o teor de RCC e a idade, serão ilustrados os gráficos e as tabelas relacionadas à eles.

A Tabela 4.3 mostra as informações referentes aos corpos de prova, relacionando as deformações em milímetros, com as porcentagens da mistura de RCC, e a evolução dessas deformações com as idades de rompimento.

A partir do gráfico da Figura 4.14 é possível verificar que o aumento do teor de RCC conduz a uma menor deformação da amostra na tensão de ruptura. E associada a essa redução na deformação, tem-se ainda, a idade de rompimento dos CP, que com seu aumento, também

contribuiu para reduzir a deformação em todos os teores de RCC. Assim, tanto o passar do tempo, quanto o aumento do teor de RCC, contribuem para a estabilização do solo estudado.

É possível inferir então, que a adição de RCC ao solo reduziu o comportamento supostamente elástico linear do solo, tornando-o mais rígido.

Esse fato pode ser explicado, levando-se em consideração que o RCC, diferente do solo puro, é um material mais próximo do granular, e portanto, espera-se uma coesão inexistente (ou pequena), com uma parcela cimentícia no lugar dessa parcela de coesão. Essa pode ser uma hipótese válida para explicação da redução desse comportamento.

A Tabela 4.3 traz as informações da evolução da resistência de ruptura com o aumento do teor de RCC na mistura e também, o aumento da mesma com o passar dos dias.

O gráfico da Figura 4.15 (Tabela 4.4), evidencia o aumento da resistência com o aumento do teor de RCC, relacionando também a idade de rompimento das amostras.

Assim, para a maior idade (45 dias) e maior teor de RCC(30%), a máxima resistência foi de 61 Kgf. Logo, quando comparado esse maior teor, com o menor teor de RCC (solo puro) a essa mesma idade de rompimento (39kgf), percebe-se um ganho significativo de 22 Kgf, valor consideravelmente importante para observação do comportamento do solo.

Portanto, conclui-se que o aumento do teor de RCC para uma mesma idade, conduz a um ganho intenso e considerável de resistência da amostra.

Tabela 4.3 –Deformação e teor de RCC de ruptura ao longo do tempo.

	0% de RCC	10% de RCC	20% de RCC	30% de RCC
Idade	2.15 mm	1.85 mm	1.7 mm	1.6 mm
15 dias	1.9 mm	1.75 mm	1.6 mm	1.75 mm
30 dias	1.8 mm	1.85 mm	1.45 mm	1.55 mm
45 dias	1.75 mm	1.6 mm	1.45 mm	1.3 mm

Tabela 4.4 - Aumento da resistência à compressão de cada teor de RCC ao longo do tempo.

	0% de RCC	10% de RCC	20% de RCC	30% de RCC
Idade	28 kgf	32 kgf	39 kgf	53 kgf
15 dias	30 kgf	39 kgf	43 kgf	57 kgf
30 dias	36 kgf	43 kgf	47 kgf	57 kgf
45 dias	39 kgf	47 kgf	49 kgf	61 kgf

Figura 4.14 – Deformação x Porcentagem RCC

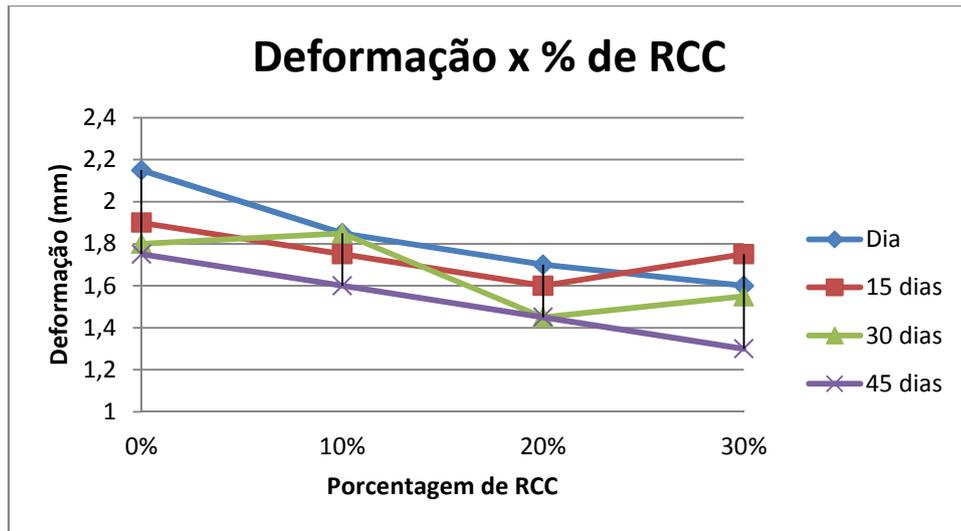
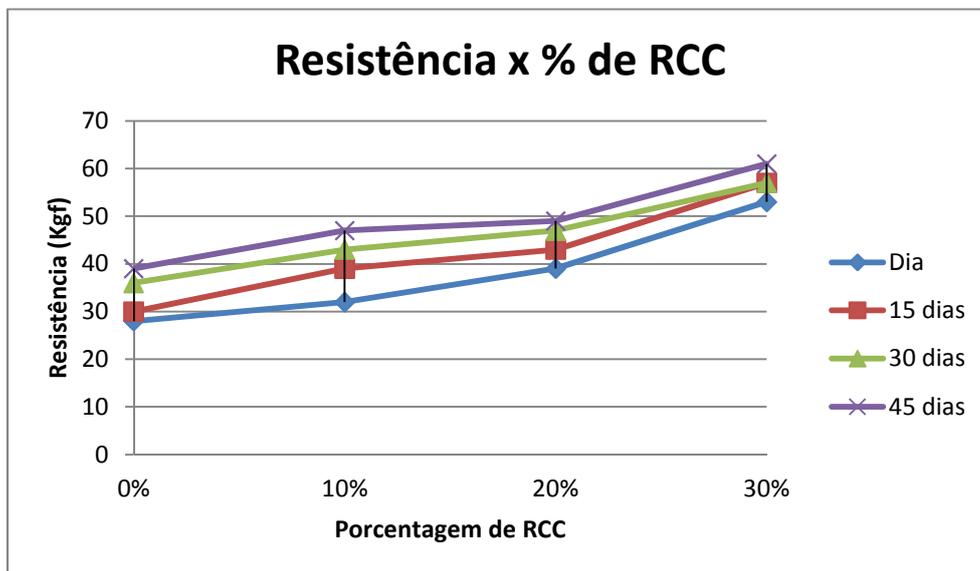


Figura 4.15 – Resistência x Porcentagem RCC



5. CONCLUSÃO

A necessidade de estabilização em solos é desde sempre um assunto de grande interesse por parte de pesquisadores nas mais diversas áreas de atuação. No presente trabalho restringiu-se a análise a aspectos relacionados às propriedades de relevância no campo da engenharia civil.

Estabilização de um solo significa qualquer modificação artificial introduzida em seu comportamento, para que o mesmo possa ser utilizado em obras de engenharia e afins. Esta pode ser obtida através de diferentes métodos, como por exemplo, compactação (rearranjo das partículas); correção granulométrica; adição de substâncias cimentíceas e aglutinantes.

Sua importância maior se deve em conferir ao solo maior resistência estável às cargas de trânsito, ao desgaste e à erosão.

A partir desses e outros conceitos citados ao longo do trabalho, e com os dados obtidos experimentalmente transcritos nos gráficos, observou-se uma grande melhoria das propriedades (resistência e deformação) do solo partindo da compactação e adição do RCC ao solo puro.

A adição do RCC em quantidades diferentes misturadas com o solo resultou em um ganho de resistência da ordem de até 57% (39-61kgf) quando comparada ao solo puro para a idade de rompimento de 45 dias. Portanto, para o caso do aterro em estudo, seria interessante combinar o RCC com o solo para um melhor comportamento do mesmo.

Outro aspecto analisado no trabalho foi a deformação do solo com o aumento do teor de RCC, onde se observou que a medida que se aumentava essa porcentagem, a deformação se reduzia, ou seja, o aumento do teor de resíduo trouxe como consequência um aumento na rigidez do solo misturado. Pode-se então levantar duas hipóteses acerca desse fenômeno, a primeira relacionando essa menor deformação a uma redução no índice de vazios da mistura (solo + RCC), e a segunda, associando essa redução às propriedades cimentantes do RCC. E claro, ambas essas hipóteses podem ter acontecido simultaneamente, o que não pôde ficar muito claro, uma vez que necessitaria de uma análise mais profunda e mais experimentos para se obter essas respostas.

Todos os valores de deformação se reduziram com o aumento da idade do solo, já a resistência aumentou, ficando claro que para as idades estudadas, o comportamento do solo foi bastante melhorado com o passar dos dias, obtendo os resultados mais esperados na idade de 45 dias. Pode-se analisar separadamente essa melhoria nas propriedades do solo, deixando claro que independente do teor de RCC na mistura, o solo apresentou menores deformações com o envelhecimento dos corpos de prova até a idade de 45 dias.

De acordo com os resultados e o exposto neste trabalho, conclui-se que com a mistura de 30% de RCC em massa com o solo obtém-se os melhores resultados de resistência.

6. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

Tendo em vista a variabilidade do resíduo de construção civil (RCC), que depende da proveniência do resíduo (o resíduo resultante de uma demolição de um estádio de futebol tem características muito diferentes do resíduo proveniente de uma demolição de um edifício residencial), faz-se necessário a caracterização química dos mais diferentes tipos de resíduos.

Parâmetros como reatividade do resíduo (e possível efeito de hidratação e aumento de resistência) por conta do material cimentício residual do RCC pode ter efeito direto sobre as características físicas como resistência e permeabilidade, bem como há de se estudar se a alcalinidade do resíduo pode contaminar o solo.

Sugere-se também a realização de estudos de permeabilidade nas amostras com proporções tratadas neste estudo como também em proporções diferentes (tais como 40% e 50% de RCC na mistura com o solo), para melhor avaliar a viabilidade do uso de RCC na confecção de liners de aterros sanitários levando em conta a resistência mecânica e a permeabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRELPE , *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011*. Publicação, 2011. p.44-45
- ANGULO, S.C. et al. *Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição*. In: VI Seminário de Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção Civil. IBRACON CT-206. São Paulo, 2003.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Análise Granulométrica: NBR 7181/1984. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Ensaio de compactação: NBR 7182/1986. Rio de Janeiro, 1986.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Classificação dos Resíduos. NBR 10004/2004. Rio de Janeiro, 2004.
- BARBOSA, M. C., AFFONSO, F. J. A. e BARROS, M. C. *Caracterização de agregados reciclados de RCDs para uso em coberturas e sistemas de drenagem de aterros de resíduos*, Anais XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG) 2008, Búzios, RJ, Brasil, pp.1111-1118.
- BARROS, M. C. *Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- COSTA, Conceição de Maria C., MSc (IFB).
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução Nº 275, de 25 abril 2001. Brasília, 2001.
- FORTES, R.M. MERIGHI, J.V.; ZUPPOLINI NETO, A. (2002). Método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais. In: Congresso Rodoviário Português, 2002, Lisboa. Anais do Congresso Rodoviário Português, 2002.
- http://www.ifgoiano.edu.br/ipora/images/stories/coordenacao/Renato/Aula_Pratica_-_Ensaio_de_Proctor_Normal.pdf
- IBGE. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*, Publicação, 2010. p90
- KOERNER, R. M. and DANIEL, D. E. *Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps*, 1 ed. New York, ASCE PRESS, 1997.
- LEI Nº 11.445, DE 5 DE JANEIRO DE 2007
- LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010
- LEI Nº 7.802, DE 11 DE JULHO DE 1989.

LEITE, Mônica Batista. *Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. 2001. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIMA, GUSTAVO HENRIQUE DIAS DE; SOUSA, ÍCARO MATOS DE. *Avaliação do Comportamento Hidromecânico de Liners Executados com Materiais Alternativos*. 2013. Tese (Graduação) – Universidade de Brasília – UnB, Brasília, Distrito Federal.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE, *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Publicação, 2011. P.07-52

NOGAMI, J. S; VILLIBOR, D. F. (1994). Identificação Expedita Dos Grupos de Classificação MCT Para Solos Tropicais. Anais do 10º COBRAMSEG – Foz do Iguaçu. Vol.4. 1293-1300, ABMS, São Paulo.

PINTO, C. Souza. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

PINTO, T. P. *Metodologia para gestão diferenciada resíduos sólidos da construção urbana*. São Paulo, 1999, 189 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

TAYLOR, D. *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1948.

ANEXOS

ANEXO A: TABELAS GRANULOMETRIA

Este anexo contém todas as tabelas relativas à composição, ao peneiramento fino, ao peneiramento grosso e à sedimentação dos ensaios de granulometria com e sem defloculante realizados com o solo e com as misturas com RCC.

➤ Solo

- Com defloculante

Tabela A.1 – Composição granulométrica do solo com defloculante.

MATERIAL*	% do material
20,0<Pedregulho grosso<60,0	0,0
6,0<Pedregulho médio<20,0	0,0
2,0<Pedregulho fino<6,0	0,1
0,6<Areia grossa<2,0	6,6
0,2<Areia média<0,6	8,0
0,06< Areia fina <0,2	40,2
0,002 < Silte < 0,06	16,1
Argila < 0,002	29,1

Tabela A.2 – Peneiramento Grosso e Fino do Solo com defloculante.

Peneiramento Grosso				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
2 1/2"	76,2	0,00	0,00	100,0000
2"	50,8	0,00	0,00	100,0000
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,0000
1"	25,4	0,00	0,00	100,0000
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0000
3/8"	9,5	0,00	0,00	100,0000
4	4,76	0,00	0,00	100,0000
10	2,00	0,54	0,54	99,9429

Peneiramento Fino				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
16	1,19	1,69	1,69	97,4
30	0,59	2,74	4,43	93,3
40	0,42	1,63	6,06	90,8
60	0,25	2,15	8,21	87,5
100	0,149	3,01	11,22	83,0
200	0,074	2,21	13,43	79,7

Fonte: Lima e Sousa (2013)

Tabela A.3 – Sedimentação do Solo com defloculante.

SEDIMENTAÇÃO							
Massa do material úmido submetido à sedimentação M_h (g) =					70	Densímetro n°:	77200/09
tempo	tempo (s)	temp. (°C)	L (g/cm ³)	Ld (g/cm ³)	a (cm)	QS (%)	d (mm)
30 s	30	26,0	1,0220	1,0028	12,6	45,3	0,0613
1 min.	60	26,0	1,0210	1,0028	12,7	43,0	0,0437
2 min.	120	26,0	1,0205	1,0028	12,8	41,8	0,0310
4 min.	240	26,0	1,0200	1,0028	12,2	40,6	0,0214
8 min.	480	26,0	1,0195	1,0028	12,3	39,4	0,0152
15 min.	900	26,0	1,0190	1,0028	12,4	38,2	0,0111
30 min.	1800	26,0	1,0180	1,0028	12,5	35,9	0,0079
1 h	3600	26,2	1,0175	1,0027	12,6	34,8	0,0056
2 h	7200	26,2	1,0165	1,0027	12,8	32,4	0,0040
4 h	14400	26,5	1,0150	1,0027	13,0	29,1	0,0028
8 h	28800	26,5	1,0150	1,0027	13,0	29,1	0,0020
24 h	86400	25,6	1,0130	1,0029	13,3	23,9	0,0012

Fonte: Lima e Sousa (2013)

Tabela A.5 – Peneiramento Grosso e Fino do Solo sem defloculante.

Peneiramento Grosso				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
2" 1/2	76,2	0,00	0,00	100,0000
2"	50,8	0,00	0,00	100,0000
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,0000
1"	25,4	0,00	0,00	100,0000
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0000
3/8"	9,5	0,00	0,00	100,0000
4	4,76	0,00	0,00	100,0000
10	2,00	0,54	0,54	99,9429

Peneiramento Fino				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
16	1,19	6,25	6,25	90,5
30	0,59	11,64	17,89	72,9
40	0,42	9,16	27,05	59,1
60	0,25	13,80	40,85	38,2
100	0,149	9,20	50,05	24,3
200	0,074	6,47	56,52	14,6

Fonte: Lima e Sousa (2013)

Tabela A.6 – Sedimentação do Solo sem defloculante.

SEDIMENTAÇÃO							
Massa do material úmido submetido à sedimentação M_h (g) =					70	Densímetro nº:	77200/09
tempo	tempo (s)	temp. (°C)	L (g/cm ³)	Ld (g/cm ³)	a (cm)	QS (%)	d (mm)
30 s	30	25,6	1,0025	0,9959	15,8	11,3	0,0338
1 min.	60	25,6	1,0015	0,9959	16,0	9,6	0,0240
2 min.	120	25,6	1,0010	0,9959	16,0	8,8	0,0170
4 min.	240	25,6	1,0000	0,9959	15,5	7,0	0,0118
8 min.	480	25,6	0,9990	0,9959	15,7	5,3	0,0084
15 min.	900	25,6	0,9990	0,9959	15,7	5,3	0,0061
30 min.	1800	25,6	0,9985	0,9959	15,7	4,5	0,0044
1 h	3600	25,8	0,9985	0,9958	15,7	4,5	0,0031
2 h	7200	26,2	0,9985	0,9958	15,7	4,7	0,0022
4 h	14400	26,5	0,9985	0,9957	15,7	4,8	0,0015
8 h	28800	26,5	0,9975	0,9957	15,9	3,1	0,0011
24 h	86400	25,6	0,9970	0,9959	16,0	1,9	0,0006

Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura A.2 – Curva granulométrica do solo sem defloculante. Fonte: Lima e Sousa (2013)

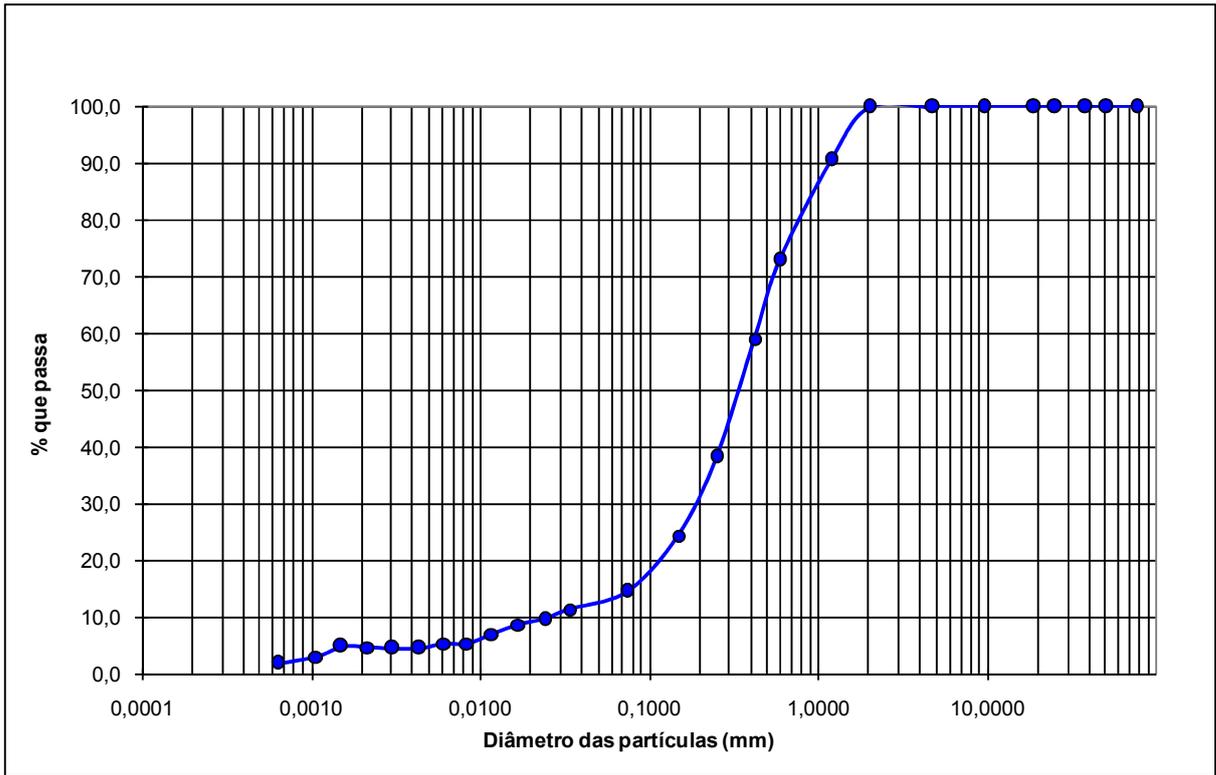
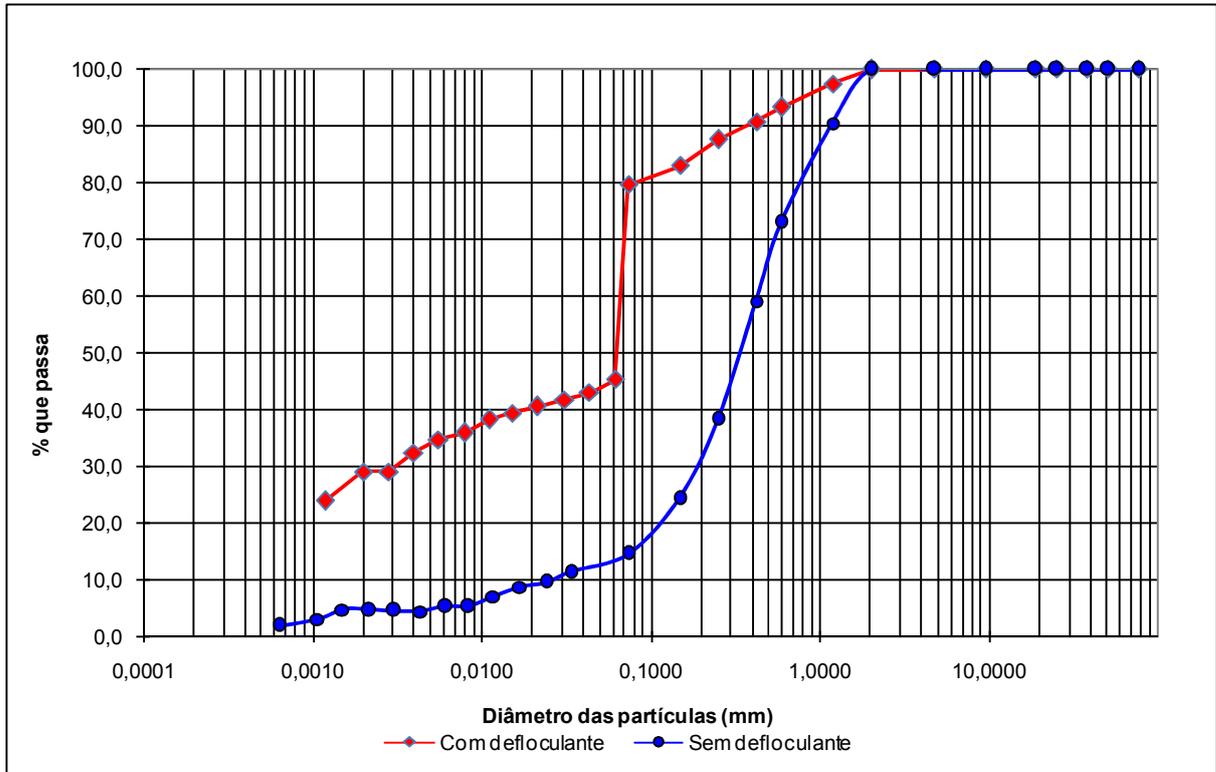


Figura A.3 – Curva granulométrica do solo com e sem defloculante. Fonte: Lima e Sousa (2013)



➤ Mistura Solo + 10% de RCC

- Com defloculante

Tabela A.7 – Composição granulométrica da mistura solo + 10% RCC com defloculante.

MATERIAL*	% do material
20,0<Pedregulho grosso<60,0	0,0
6,0<Pedregulho médio<20,0	0,0
2,0<Pedregulho fino<6,0	0,4
0,6<Areia grossa<2,0	2,8
0,2<Areia média<0,6	9,1
0,06< Areia fina <0,2	16,6
0,002 < Silte < 0,06	16,1
Argila < 0,002	55,0

Tabela A.8 – Peneiramento Grosso e Fino da mistura solo + 10% de RCC com defloculante.

Peneiramento Grosso				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
2 1/2"	76,2	0,00	0,00	100,0000
2"	50,8	0,00	0,00	100,0000
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,0000
1"	25,4	0,00	0,00	100,0000
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0000
3/8"	9,5	0,00	0,00	100,0000
4	4,76	0,15	0,15	99,9847
10	2,00	3,44	3,59	99,6340

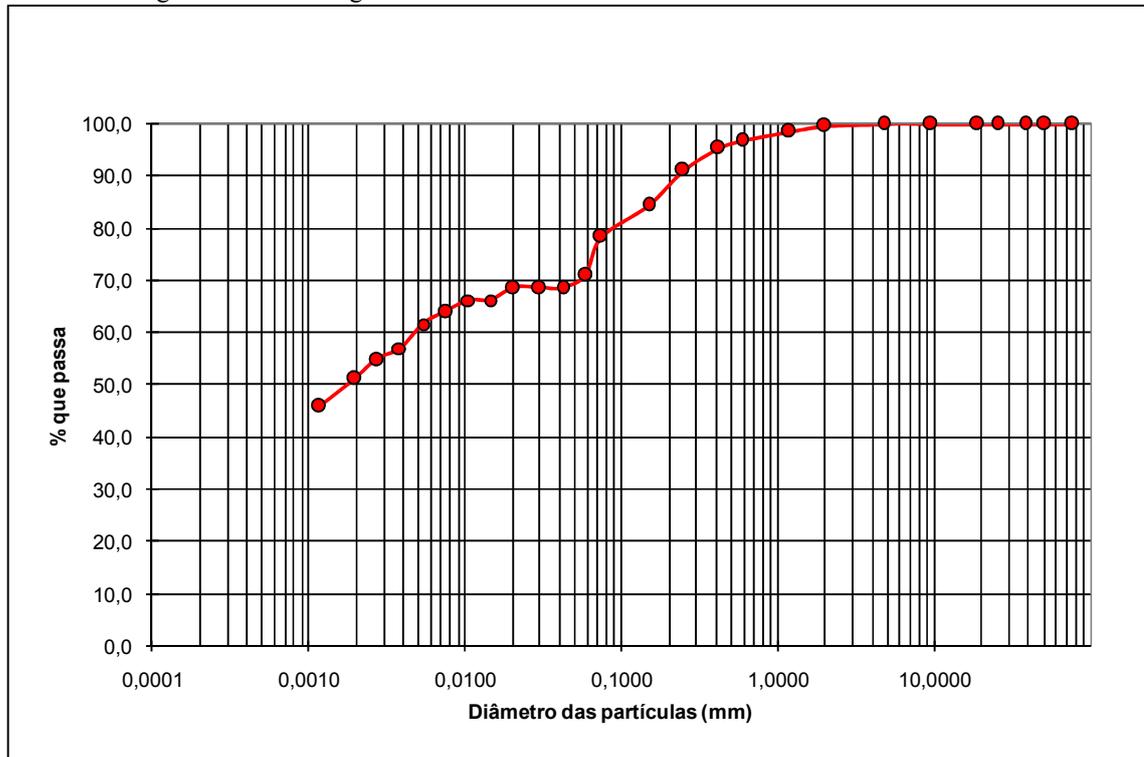
Peneiramento Fino				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
16	1,19	0,73	0,73	98,6
30	0,59	1,25	1,98	96,8
40	0,42	1,03	3,01	95,3
60	0,25	2,90	5,91	91,1
100	0,149	4,65	10,56	84,3
200	0,074	4,11	14,67	78,3

Tabela A.9 – Sedimentação da mistura solo + 10% de RCC com defloculante.

Massa do material úmido submetido à sedimentação M_h (g) =					70	Densímetro n°:	77200/09
tempo	tempo (s)	temp. (°C)	L (g/cm ³)	Ld (g/cm ³)	a (cm)	QS (%)	d (mm)
30 s	30	26,4	1,0330	1,0027	10,7	71,0	0,0591
1 min.	60	26,4	1,0320	1,0027	10,9	68,6	0,0421
2 min.	120	26,4	1,0320	1,0027	10,9	68,6	0,0298
4 min.	240	26,4	1,0320	1,0027	10,2	68,6	0,0204
8 min.	480	26,4	1,0310	1,0027	10,4	66,3	0,0145
15 min.	900	26,4	1,0310	1,0027	10,4	66,3	0,0106
30 min.	1800	26,6	1,0300	1,0027	10,5	64,0	0,0075
1 h	3600	26,6	1,0290	1,0027	10,7	61,7	0,0054
2 h	7200	26,6	1,0270	1,0027	11,0	57,0	0,0039
4 h	14400	27,0	1,0260	1,0026	11,2	54,9	0,0027
8 h	28800	26,6	1,0245	1,0027	11,4	51,2	0,0020
24 h	86400	25,5	1,0225	1,0029	11,8	46,0	0,0012

Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura A.4 – Curva granulométrica da mistura solo + 10% RCC com defloculante.



Fonte: Lima e Sousa (2013)

- **Sem defloculante**

Tabela A.10 – Composição granulométrica da mistura solo + 10% RCC sem defloculante.

MATERIAL*	% do material
20,0<Pedregulho grosso<60,0	0,0
6,0<Pedregulho médio<20,0	0,0
2,0<Pedregulho fino<6,0	0,4
0,6<Areia grossa<2,0	27,1
0,2<Areia média<0,6	43,6
0,06< Areia fina <0,2	23,0
0,002 < Silte < 0,06	4,4
Argila < 0,002	1,5

Tabela A.11 – Peneiramento Grosso e Fino da mistura solo + 10% de RCC sem defloculante.

Peneiramento Grosso				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
2" 1/2	76,2	0,00	0,00	100,0000
2"	50,8	0,00	0,00	100,0000
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,0000
1"	25,4	0,00	0,00	100,0000
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0000
3/8"	9,5	0,00	0,00	100,0000
4	4,76	0,15	0,15	99,9847
10	2,00	3,44	3,59	99,6340
Peneiramento Fino				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
16	1,19	6,10	6,10	90,8
30	0,59	12,81	18,91	72,2
40	0,42	11,01	29,92	56,2
60	0,25	14,03	43,95	35,9
100	0,149	9,72	53,67	21,8
200	0,074	7,07	60,74	11,5

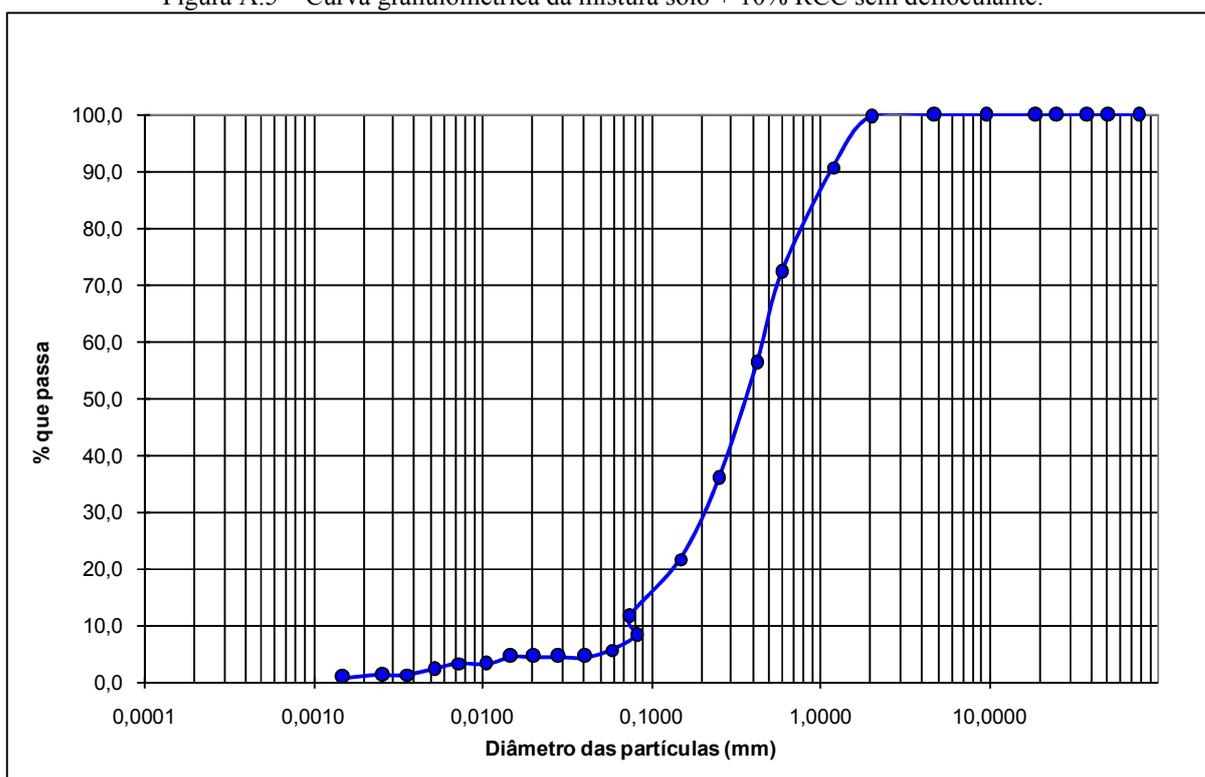
Fonte: Lima e Sousa (2013)

Tabela A.12 – Sedimentação da mistura solo + 10% de RCC sem defloculante.

SEDIMENTAÇÃO							
Massa do material úmido submetido à sedimentação M_h (g) =					70	Densímetro n°:	77200/09
tempo	tempo (s)	temp. (°C)	L (g/cm ³)	Ld (g/cm ³)	a (cm)	QS (%)	d (mm)
30 s	30	25,2	1,0000	0,9968	16,2	8,3	0,0822
1 min.	60	25,2	0,9990	0,9968	16,4	5,7	0,0584
2 min.	120	25,2	0,9985	0,9968	16,4	4,4	0,0414
4 min.	240	25,2	0,9985	0,9968	15,7	4,4	0,0286
8 min.	480	25,2	0,9985	0,9968	15,7	4,4	0,0203
15 min.	900	25,2	0,9985	0,9968	15,7	4,4	0,0148
30 min.	1800	25,2	0,9980	0,9968	15,8	3,2	0,0105
1 h	3600	25,6	0,9980	0,9967	15,8	3,4	0,0074
2 h	7200	26,0	0,9975	0,9966	15,9	2,3	0,0052
4 h	14400	26,8	0,9970	0,9964	16,0	1,4	0,0037
8 h	28800	26,5	0,9970	0,9965	16,0	1,3	0,0026
24 h	86400	25,6	0,9970	0,9967	16,0	0,8	0,0015

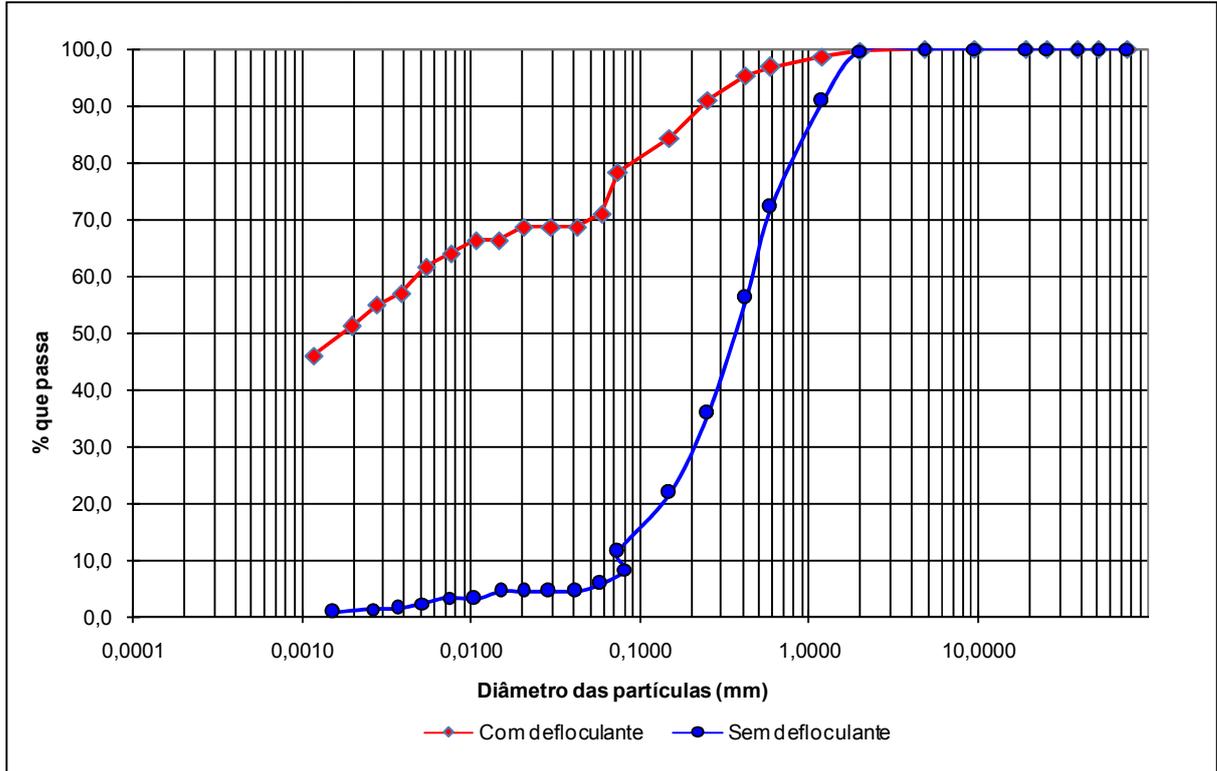
Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura A.5 – Curva granulométrica da mistura solo + 10% RCC sem defloculante.



Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura A.6 – Curva granulométrica da mistura solo + 10% RCC com e sem defloculante.



Fonte: Lima e Sousa (2013)

➤ Mistura Solo + 20% de RCC

- Com defloculante

Tabela A.13 – Composição granulométrica da mistura solo + 20% RCC com defloculante.

MATERIAL*	% do material
20,0<Pedregulho grosso<60,0	0,0
6,0<Pedregulho médio<20,0	0,1
2,0<Pedregulho fino<6,0	0,7
0,6<Areia grossa<2,0	6,7
0,2<Areia média<0,6	20,0
0,06< Areia fina <0,2	19,7
0,002 < Silte < 0,06	16,4
Argila < 0,002	36,5

Tabela A.14 – Peneiramento Grosso e Fino da mistura solo + 20% de RCC com defloculante.

Peneiramento Grosso				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
2 1/2"	76,2	0,00	0,00	100,0000
2"	50,8	0,00	0,00	100,0000
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,0000
1"	25,4	0,00	0,00	100,0000
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0000
3/8"	9,5	0,00	0,00	100,0000
4	4,76	1,26	1,26	99,8683
10	2,00	6,08	7,34	99,2326
Peneiramento Fino				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
16	1,19	1,88	1,88	96,4
30	0,59	2,65	4,53	92,5
40	0,42	2,36	6,89	89,0
60	0,25	5,76	12,65	80,5
100	0,149	10,80	23,45	64,5
200	0,074	9,78	33,23	50,0

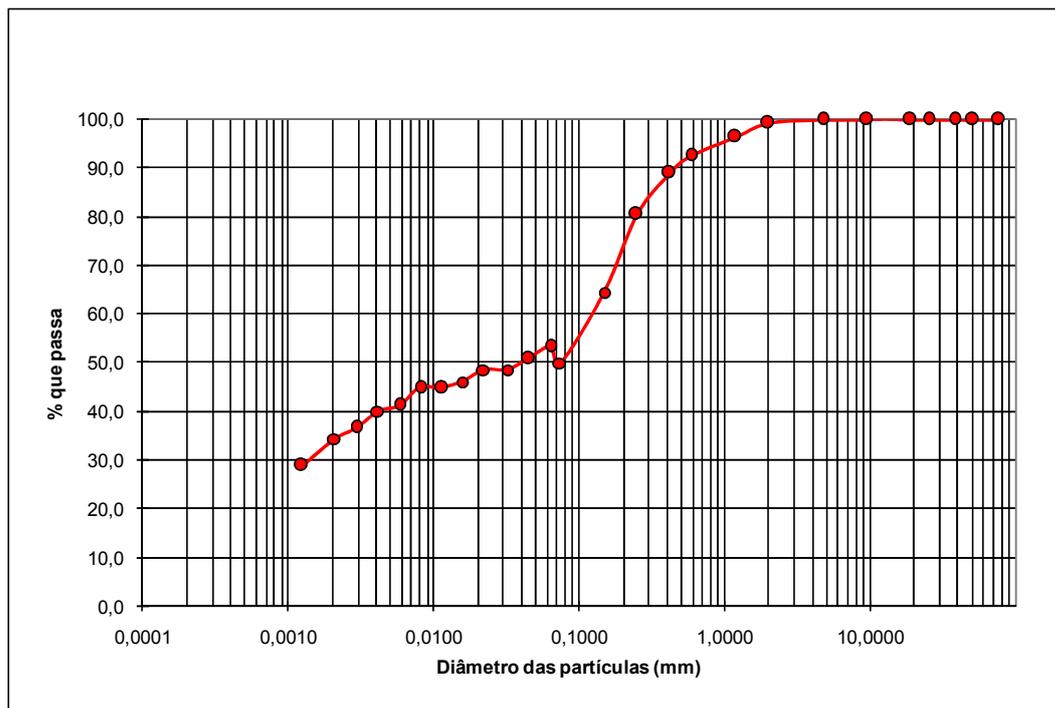
Fonte: Lima e Sousa (2013)

Tabela A.15 – Sedimentação da mistura solo + 20% de RCC com defloculante.

SEDIMENTAÇÃO							
Massa do material úmido submetido à sedimentação M_h (g) =					70	Densímetro n°:	77200/09
tempo	tempo (s)	temp. (°C)	L (g/cm ³)	Ld (g/cm ³)	a (cm)	QS (%)	d (mm)
30 s	30	25,8	1,0250	1,0028	12,1	53,4	0,0635
1 min.	60	25,8	1,0240	1,0028	12,2	51,0	0,0452
2 min.	120	25,8	1,0230	1,0028	12,4	48,6	0,0322
4 min.	240	25,8	1,0230	1,0028	11,7	48,6	0,0221
8 min.	480	25,8	1,0220	1,0028	11,9	46,1	0,0157
15 min.	900	25,8	1,0215	1,0028	11,9	44,9	0,0115
30 min.	1800	25,8	1,0215	1,0028	11,9	44,9	0,0082
1 h	3600	25,8	1,0200	1,0028	12,2	41,3	0,0058
2 h	7200	25,8	1,0195	1,0028	12,3	40,1	0,0041
4 h	14400	26,2	1,0180	1,0027	12,5	36,7	0,0029
8 h	28800	26,5	1,0170	1,0027	12,7	34,5	0,0021
24 h	86400	25,2	1,0150	1,0029	13,0	29,0	0,0012

Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura A.7 – Curva granulométrica da mistura solo + 20% RCC com defloculante.



Fonte: Lima e Sousa (2013)

- **Sem defloculante**

Tabela A.16 – Composição granulométrica da mistura solo + 20% RCC sem defloculante.

MATERIAL*	% do material
20,0<Pedregulho grosso<60,0	0,0
6,0<Pedregulho médio<20,0	0,1
2,0<Pedregulho fino<6,0	0,7
0,6<Areia grossa<2,0	10,5
0,2<Areia média<0,6	38,9
0,06< Areia fina <0,2	29,8
0,002 < Silte < 0,06	14,2
Argila < 0,002	5,9

Tabela A.17 – Peneiramento Grosso e Fino da mistura solo + 20% de RCC sem defloculante.

Peneiramento Grosso				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
2" 1/2	76,2	0,00	0,00	100,0000
2"	50,8	0,00	0,00	100,0000
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,0000
1"	25,4	0,00	0,00	100,0000
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0000
3/8"	9,5	0,00	0,00	100,0000
4	4,76	1,26	1,26	99,8683
10	2,00	6,08	7,34	99,2326

Peneiramento Fino				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
16	1,19	1,54	1,54	96,9
30	0,59	5,63	7,17	88,6
40	0,42	6,61	13,78	78,8
60	0,25	12,57	26,35	60,2
100	0,149	14,00	40,35	39,4
200	0,074	14,66	55,01	17,7

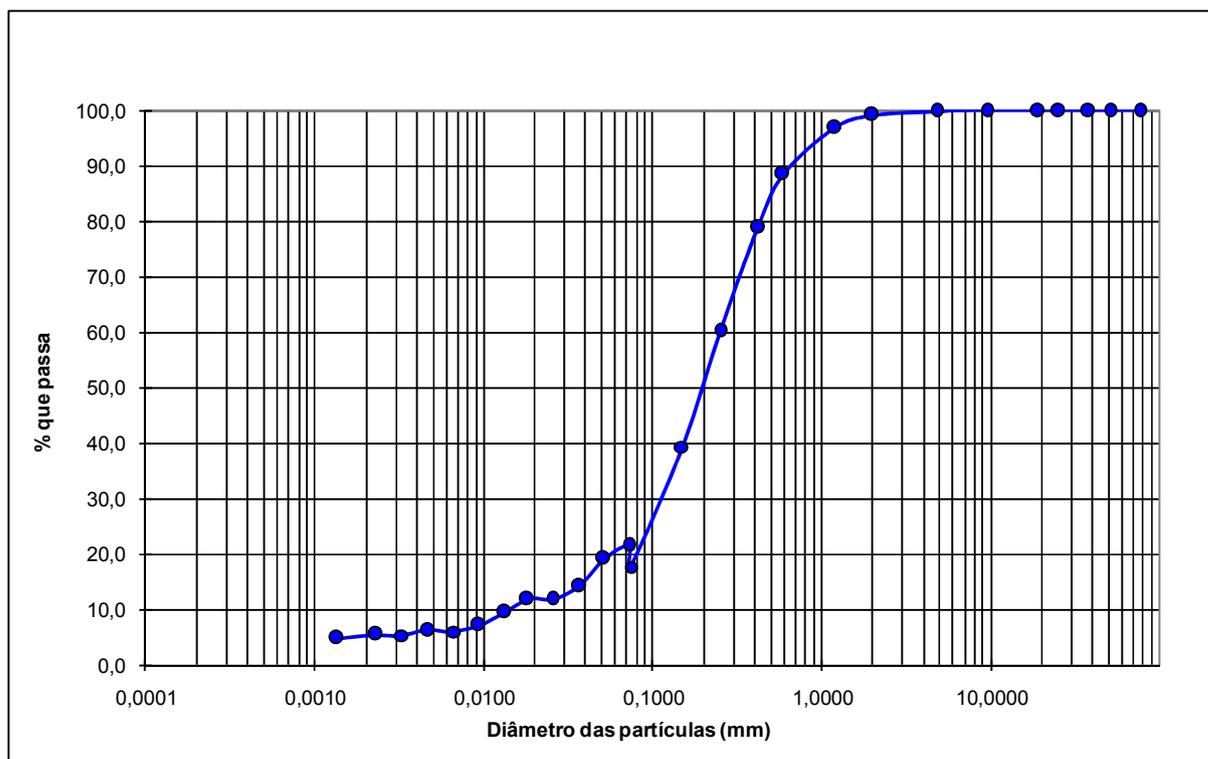
Fonte: Lima e Sousa (2013)

Tabela A.18 – Sedimentação da mistura solo + 20% de RCC sem defloculante.

SEDIMENTAÇÃO							
Massa do material úmido submetido à sedimentação M_h (g) =					70	Densímetro n°:	77200/09
tempo	tempo (s)	temp. (°C)	L (g/cm ³)	Ld (g/cm ³)	a (cm)	QS (%)	d (mm)
30 s	30	24,8	1,0050	0,9960	15,4	21,5	0,0725
1 min.	60	24,8	1,0040	0,9960	15,5	19,1	0,0516
2 min.	120	24,8	1,0020	0,9960	15,9	14,3	0,0368
4 min.	240	24,8	1,0010	0,9960	15,3	11,9	0,0256
8 min.	480	24,8	1,0010	0,9960	15,3	11,9	0,0181
15 min.	900	24,8	1,0000	0,9960	15,5	9,5	0,0133
30 min.	1800	25,0	0,9990	0,9960	15,7	7,2	0,0094
1 h	3600	25,0	0,9985	0,9960	15,7	6,0	0,0067
2 h	7200	25,6	0,9985	0,9959	15,7	6,3	0,0047
4 h	14400	26,2	0,9980	0,9958	15,8	5,4	0,0033
8 h	28800	26,5	0,9980	0,9957	15,8	5,5	0,0023
24 h	86400	25,2	0,9980	0,9960	15,8	4,9	0,0014

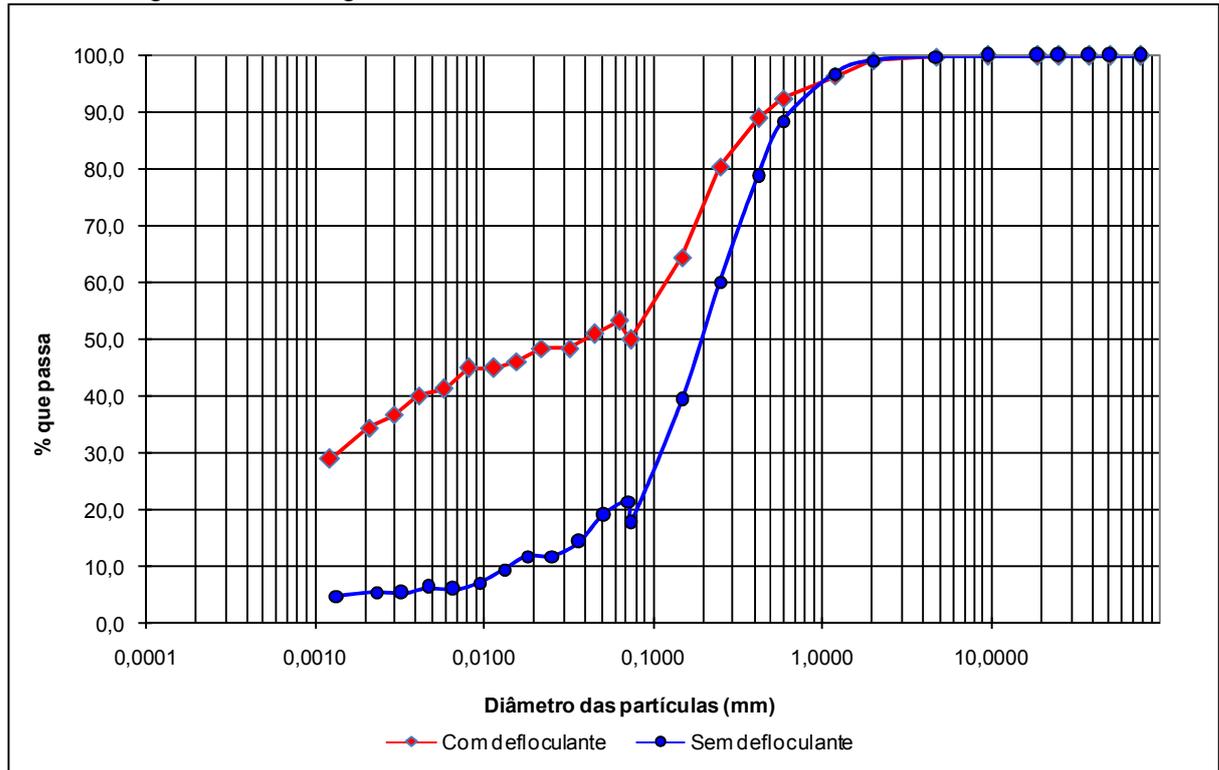
Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura A.8 – Curva granulométrica da mistura solo + 20% RCC sem defloculante. Fonte:



Lima e Sousa (2013)

Figura A.9 – Curva granulométrica da mistura solo + 20% RCC com e sem defloculante.



Fonte: Lima e Sousa (2013)

➤ Mistura Solo + 30% de RCC

• Com defloculante

Tabela A.19 – Composição granulométrica da mistura solo + 30% RCC com defloculante.

MATERIAL*	% do material
20,0 < Pedregulho grosso < 60,0	0,0
6,0 < Pedregulho médio < 20,0	0,2
2,0 < Pedregulho fino < 6,0	0,9
0,6 < Areia grossa < 2,0	2,4
0,2 < Areia média < 0,6	12,5
0,06 < Areia fina < 0,2	16,3
0,002 < Silte < 0,06	15,6
Argila < 0,002	52,2

Tabela A.20 – Peneiramento Grosso e Fino da mistura solo + 30% de RCC com defloculante.

Peneiramento Grosso				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
2 1/2"	76,2	0,00	0,00	100,0000
2"	50,8	0,00	0,00	100,0000
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,0000
1"	25,4	0,00	0,00	100,0000
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0000
3/8"	9,5	1,36	1,36	99,8585
4	4,76	1,08	2,44	99,7461
10	2,00	8,05	10,49	98,9085

Peneiramento Fino				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
16	1,19	0,38	0,38	98,3
30	0,59	1,30	1,68	96,4
40	0,42	1,27	2,95	94,6
60	0,25	3,54	6,49	89,4
100	0,149	7,36	13,85	78,5
200	0,074	7,03	20,88	68,2

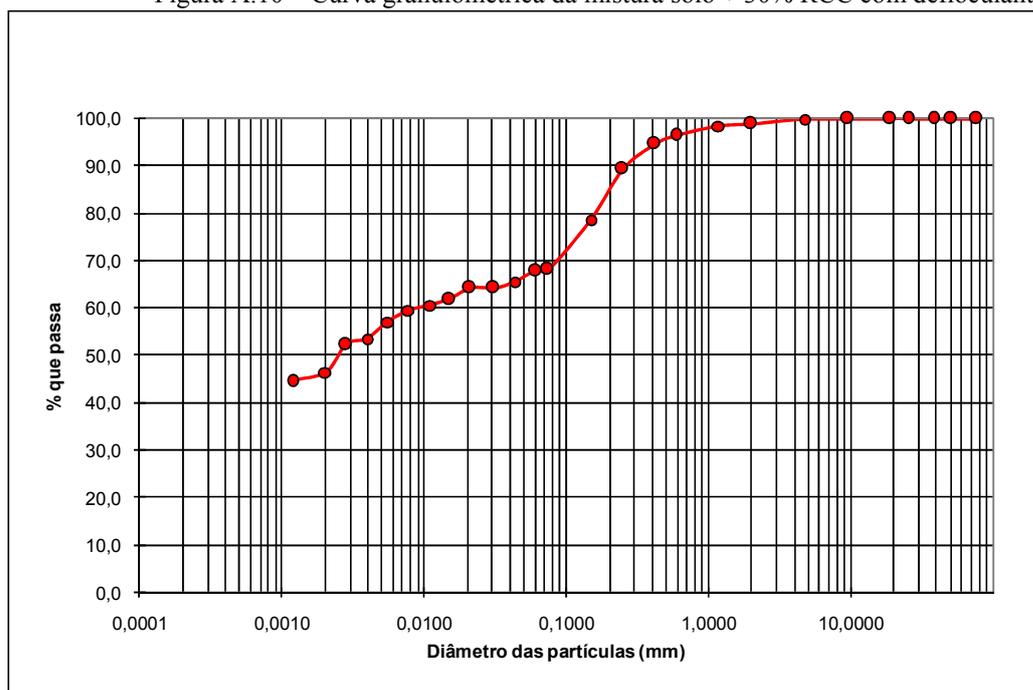
Fonte: Lima e Sousa (2013)

Tabela A.21 – Sedimentação da mistura solo + 30% de RCC com defloculante.

SEDIMENTAÇÃO							
Massa do material úmido submetido à sedimentação M_h (g) =					70	Densímetro n°:	77200/09
tempo	tempo (s)	temp. (°C)	L (g/cm ³)	Ld (g/cm ³)	a (cm)	QS (%)	d (mm)
30 s	30	26,2	1,0310	1,0027	11,1	67,9	0,0611
1 min.	60	26,2	1,0300	1,0027	11,2	65,5	0,0435
2 min.	120	26,2	1,0295	1,0027	11,3	64,3	0,0309
4 min.	240	26,2	1,0295	1,0027	10,6	64,3	0,0211
8 min.	480	26,2	1,0285	1,0027	10,8	61,9	0,0151
15 min.	900	26,0	1,0280	1,0028	10,9	60,6	0,0111
30 min.	1800	26,2	1,0275	1,0027	10,9	59,5	0,0078
1 h	3600	26,2	1,0265	1,0027	11,1	57,1	0,0056
2 h	7200	26,2	1,0250	1,0027	11,4	53,5	0,0040
4 h	14400	26,4	1,0245	1,0027	11,4	52,4	0,0028
8 h	28800	26,7	1,0220	1,0026	11,9	46,5	0,0020
24 h	86400	25,3	1,0215	1,0029	11,9	44,6	0,0012

Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura A.10 – Curva granulométrica da mistura solo + 30% RCC com defloculante.



Fonte: Lima e Sousa (2013)

- **Sem defloculante**

Tabela A.22 – Composição granulométrica da mistura solo + 30% RCC sem defloculante.

MATERIAL*	% do material
20,0<Pedregulho grosso<60,0	0,0
6,0<Pedregulho médio<20,0	0,2
2,0<Pedregulho fino<6,0	0,9
0,6<Areia grossa<2,0	16,0
0,2<Areia média<0,6	42,7
0,06< Areia fina <0,2	31,5
0,002 < Silte < 0,06	5,3
Argila < 0,002	3,4

Tabela A.23 – Peneiramento Grosso e Fino da mistura solo + 30% de RCC sem defloculante.

Peneiramento Grosso				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
2" 1/2	76,2	0,00	0,00	100,0000
2"	50,8	0,00	0,00	100,0000
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,0000
1"	25,4	0,00	0,00	100,0000
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0000
3/8"	9,5	1,36	1,36	99,8585
4	4,76	1,08	2,44	99,7461
10	2,00	8,05	10,49	98,9085

Peneiramento Fino				
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
16	1,19	3,89	3,89	93,2
30	0,59	7,09	10,98	82,8
40	0,42	7,54	18,52	71,7
60	0,25	13,70	32,22	51,5
100	0,149	15,55	47,77	28,6
200	0,074	13,50	61,27	8,8

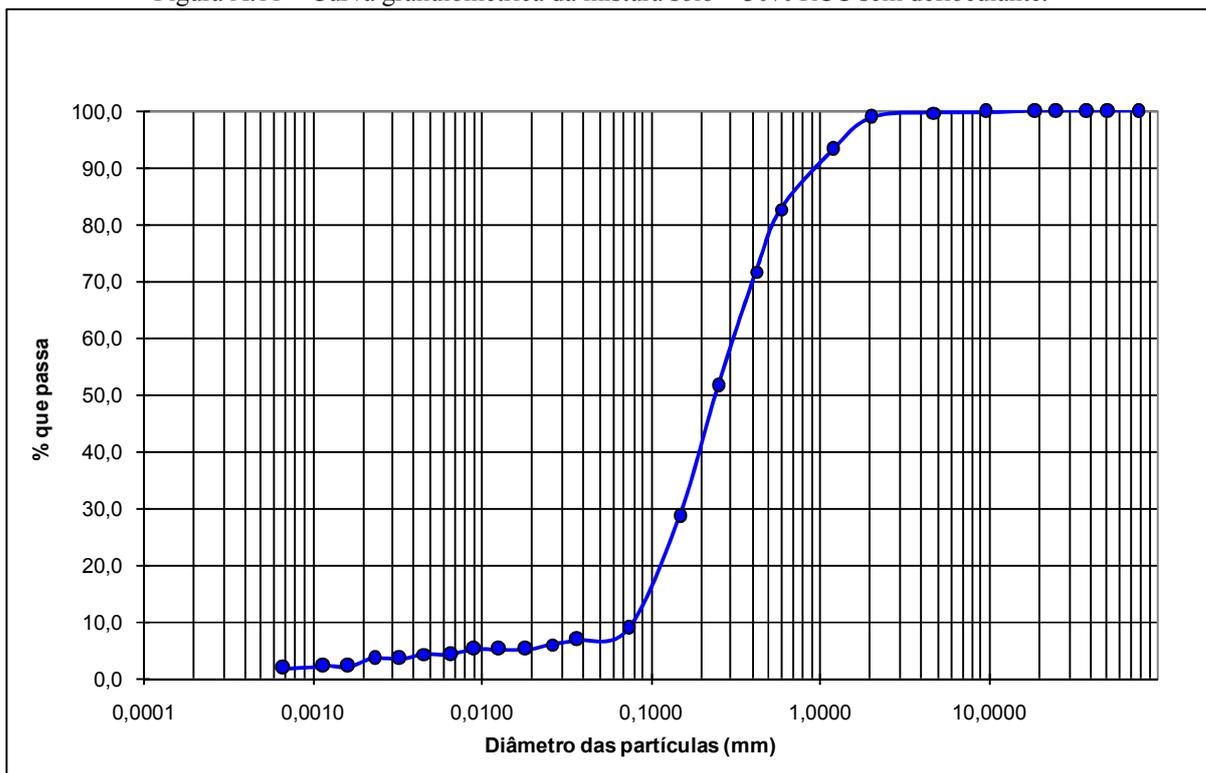
Fonte: Lima e Sousa (2013)

Tabela A.24 – Sedimentação da mistura solo + 30% de RCC sem defloculante.

SEDIMENTAÇÃO							
Massa do material úmido submetido à sedimentação M_h (g) =					70	Densímetro n°:	77200/09
tempo	tempo (s)	temp. (°C)	L (g/cm ³)	Ld (g/cm ³)	a (cm)	QS (%)	d (mm)
30 s	30	25,2	1,0000	0,9960	16,2	6,8	0,0367
1 min.	60	25,2	0,9995	0,9960	16,3	6,0	0,0260
2 min.	120	25,2	0,9990	0,9960	16,4	5,1	0,0185
4 min.	240	25,2	0,9990	0,9960	15,7	5,1	0,0128
8 min.	480	25,2	0,9990	0,9960	15,7	5,1	0,0090
15 min.	900	25,2	0,9985	0,9960	15,7	4,3	0,0066
30 min.	1800	25,4	0,9985	0,9959	15,7	4,4	0,0047
1 h	3600	25,6	0,9980	0,9959	15,8	3,6	0,0033
2 h	7200	25,8	0,9980	0,9958	15,8	3,6	0,0023
4 h	14400	26,4	0,9970	0,9957	16,0	2,2	0,0016
8 h	28800	26,6	0,9970	0,9957	16,0	2,2	0,0012
24 h	86400	25,3	0,9970	0,9959	16,0	1,8	0,0007

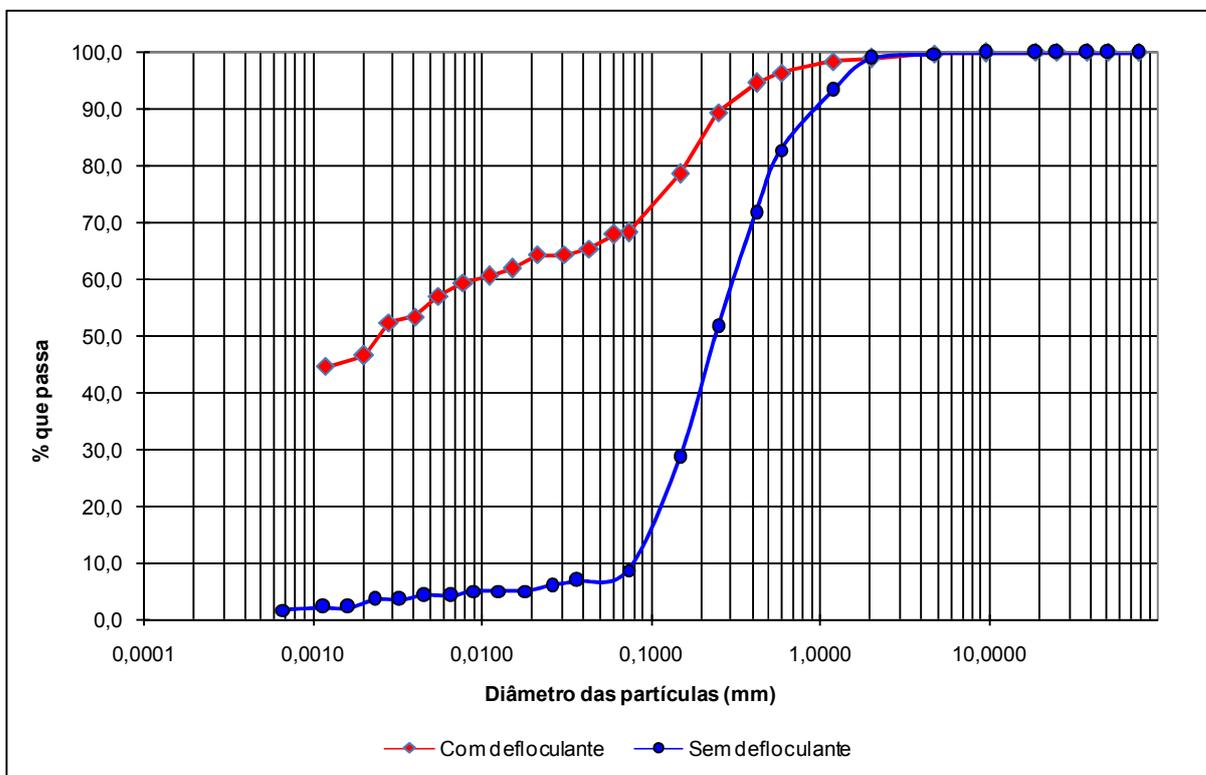
Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura A.11 – Curva granulométrica da mistura solo + 30% RCC sem defloculante.



Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura A.12 – Curva granulométrica da mistura solo + 30% RCC com e sem defloculante.

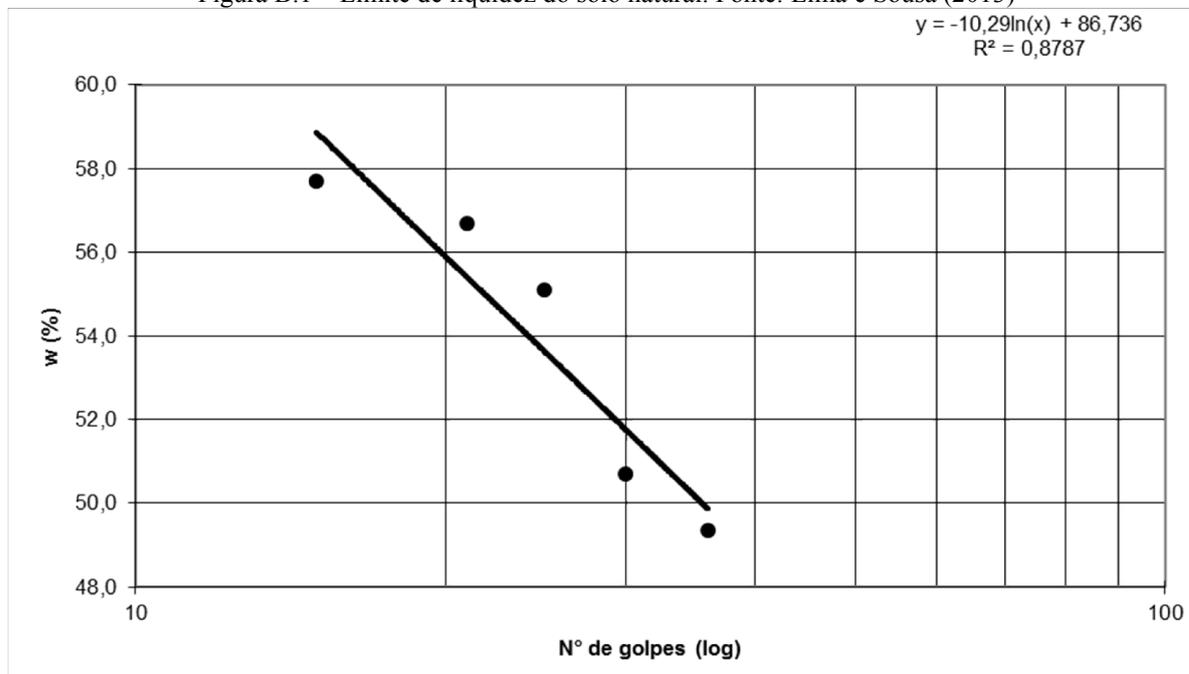


Fonte: Lima e Sousa (2013)

ANEXO B: FIGURAS LIMITES DE LIQUIDEZ

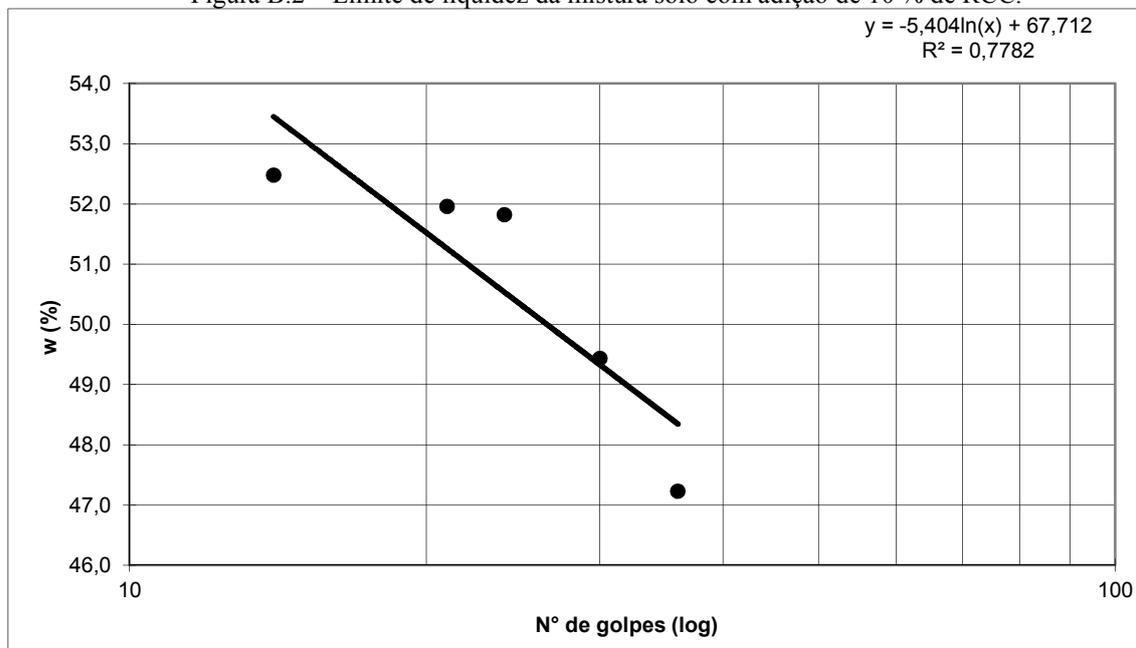
Este anexo contém todos os gráficos dos ensaios de limite de liquidez realizados com o solo e com as misturas com RCC.

Figura B.1 – Limite de liquidez do solo natural. Fonte: Lima e Sousa (2013)



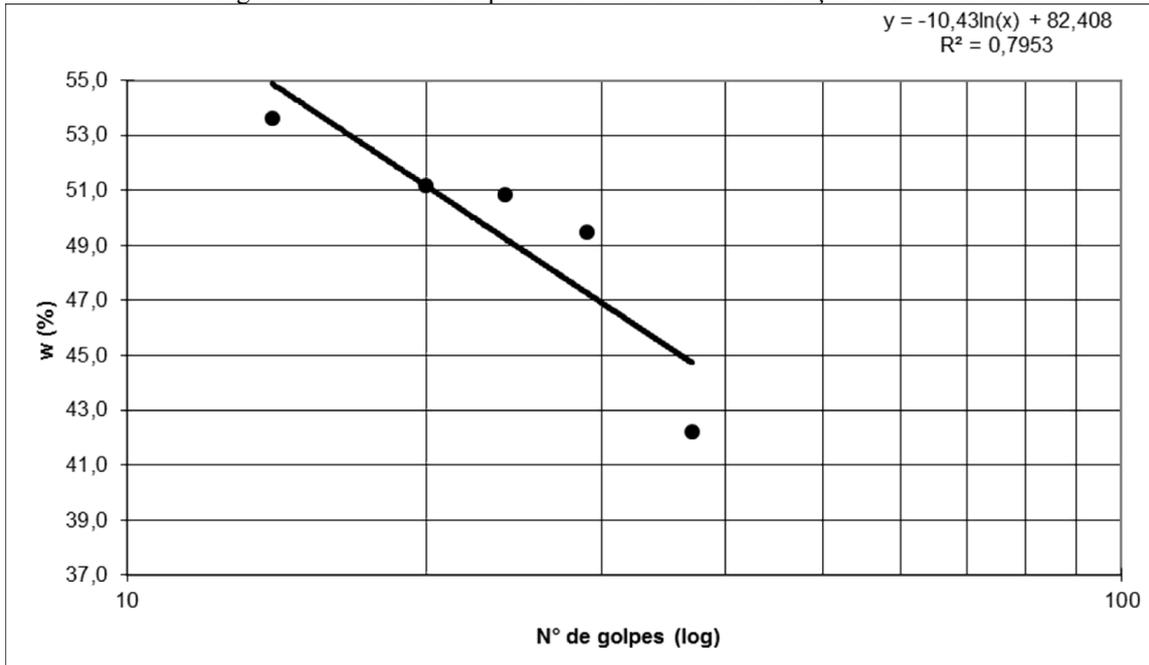
Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura B.2 – Limite de liquidez da mistura solo com adição de 10 % de RCC.



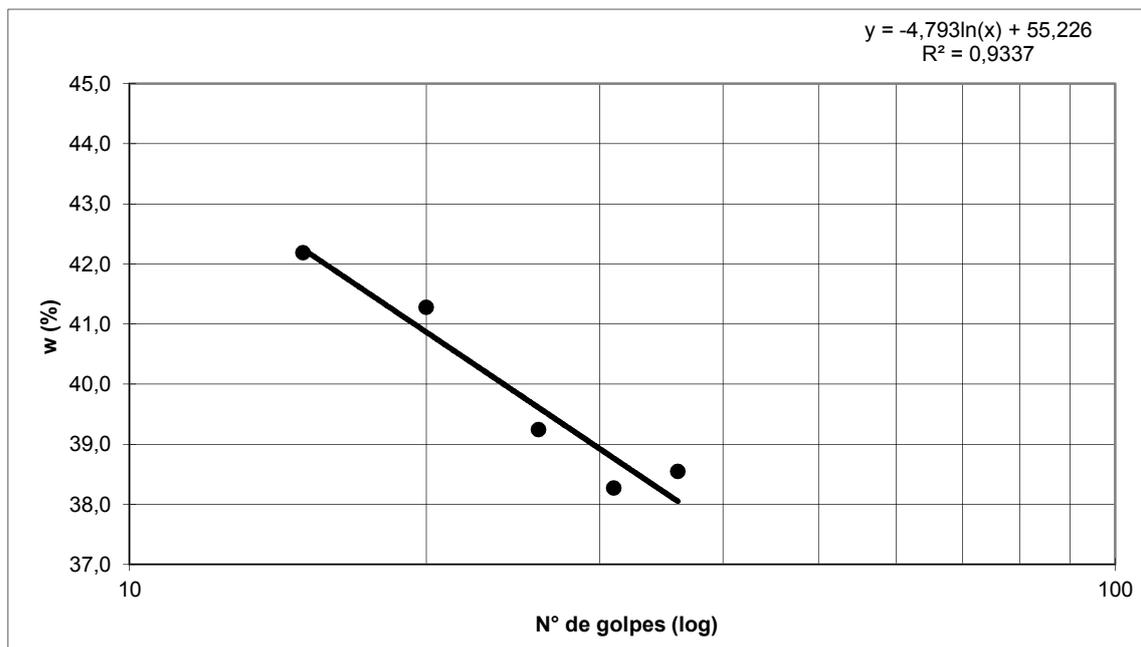
Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura B.3 – Limite de liquidez da mistura solo com adição de 20 % de RCC.



Fonte: Lima e Sousa (2013)

Figura B.4 – Limite de liquidez da mistura solo com adição de 30 % de RCC



Fonte: Lima e Sousa (2013)

ANEXO C: IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO EXPEDITA (VISUAL-TACTIL) DE SOLOS

➤ METODOLOGIA MCT

Amostra:	1			Local: Instalações do futuro aterro sanitário de Brasília - Samambaia	
Furo:	Cota:	7,00m	Operador:	Robson / Pedro	Data: 14/05/2014
Granulometria volumétrica					
		Volume: 250ml	Massa: 240,36g		
	Volume (ml)	Porcentagens(%)		Classificação	
ret. entre fundo e # 0,42mm		0	P 0,42/0 > 90%		muito fino (mf)
retido entre # 0,42 e 2,0	235	94	P 0,42/0 + P2/0,42 > 90%		fino (fi)
retido entre # 2,0 e 4,76	5	2			fino (fi)
retido entre # 4,76 e 19,	10	3	P 4/2 + P19/4 +		Pedregulho
retido entre # 19,6 e 50,	0	0	P50/19 > 50%		(Pe)
retido na # 50,0mm	0	0			grosso (gr)
Plasticidade					
Não se consegue obter rolinhos com diâmetro inferior a 3 mm					Não plástico (np)
Obtém-se com muita dificuldade rolinhos com diâmetro de 3 mm, que se rompem facilmente					baixa plást.. (bp)
obtém-se facilmente rolinhos com diâmetro de 3 mm, mas os mesmos rompem-se facilmente ao serem dobrados					media plasticidade (mp)
obtém-se facilmente rolinhos com diâmetro de 3 mm, e os mesmos podem ser facilmente dobrados e remoldados					alta plasticidade (ap)
Medidas dos anéis					
Anel N°	Contração (mm)	Penetração (mm)	Tempo de ascensão d'água	Peculiaridades da amostra	
1	1,416	0	8'30"		
2	1,496	0	10'33"		
3	1,276	0	9'08"		
Umidade de moldagem, obtido dos anéis (%) :			26	= umidade das bolinhas	
Cálculo de c'					
Contração ct de 0,1 a 0,5 mm - $c' = (\log_{10}ct + 1)/0,904$				xmedio=1,687	
Contração ct > 0,6 mm - $c' = (\log_{10}ct + 0,7)/0,5$					
Resistência ao esmagamento da bola seca					
bola esmaga ao manuseio					Sem (sm)
esmaga fácil com pressão dos dedos					Baixa (bx)
esmaga com dificuldade com pressão dos dedos					Media (md)
não esmagavel com pressão dos dedos, esmagavel com pressão do dedão sobre a bola contra uma placa dura					Alta (at)
não esmaga mesmo com pressão do dedão sobre a bola contra uma placa dura					muito alta (ma)
Umidade de moldagem, obtido das bolinhas (%) :			w = 25,74%		
Forma dos grão					
Angulosa (an)	Sub-angulosa (sg)			Arredondada (ar)	
Natureza mineralógica					
Matéria orgânica (Or)	Micas (Mi)	Feldspatos (Fd)	Concreções Lateríticas (Lt)		Sulfetos (Su)
Fragmentos de Rocha (especificar a rocha, ex:granito (Gr), Diabásio (Db):			Magnetita ou ilmenita (Mg)		

Determinação do Grupo MCT			
c'	penetração (mm)	Grupo MCT	
< 0,5	< 3,0	LA	
	3,1 a 3,9	NA	
	>=4,0	NA / NS'	
0,6 a 0,9	< 2,0	LA - LA'	
	2,1 a 3,9	NA' - NS'	
	>=4,0	NS' - NA'	
1,0 a 1,3	< 2,0	LA'	
	2,1 a 3,9	NA'	
	>=4,0	NS'	
1,4 a 1,7	< 2,0	LA' - LG'	Arenoso laterítico - Argiloso laterítico
	2,1 a 3,9	NA' / NG' - NS'	
	>=4,0	NS' - NG'	
>= 1,8	< 2,0	LG'	
	2,1 a 3,9	NG'	
	>=4,0	NG'	
- separa	Significado de - e / opção	equivalente	
/ separa	opção	decrecente	

NA = Areia não laterítica
NA' = Arenoso não laterítico
NS' = Siltoso não laterítico
NG = Argila não laterítica
LA = Areia laterítica
LA' = Arenoso laterítico
LG' = Argiloso laterítico

Umidade das bolinhas			
Capsula N	6012	11	113
tara + SH (11,59	11,53	11,46
tara + SS (9,18	9,17	9,15
Umidade	26,25	25,73	25,24
			w = 25,74%

Medidas da contrações (mm)

Medidas	Anel 01	Pastilha 01	Resultado
1	20,62	19,43	1,19
2	20,65	19,29	1,36
3	20,89	19,19	1,7
		Média:	1,416mm

Medidas	Anel 02	Pastilha 02	Resultado
1	20,89	19,09	1,8
2	20,5	19,29	1,21
3	20,55	19,07	1,48
		Média:	1,496mm

Medidas	Anel 03	Pastilha 03	Resultado
1	20,58	19,26	1,32
2	20,55	19,15	1,4
3	20,23	19,12	1,11
		Média:	1,276mm

➤ IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS SOLOS - ASTM D2488-84

Amostra:	1			Local: Em frente à colina
Furo:	Cota: 25 cm		Operador: Grupo 2	Data: 12/11/2012
CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SOLOS				
Cor: 5/8 25YR	Odor:	Inorgânico	Estrutura:	Subangulosa
Umidade Natural				
Descrição		Solo		
Água não é visível nem sensível ao tato		Seco		
Água não é visível, mas sensível ao tato		Umido		
Água está visível		Molhado		
Grupo em que se enquadra o solo				
<input type="checkbox"/> 1. SOLOS GROSSOS - mais de 50% , em massa, de suas partículas visíveis a olho nú.				
<input checked="" type="checkbox"/> 2. SOLOS FINOS - mais de 50% , em massa, de suas partículas passando através da peneira n° 200.				
IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS FINOS				
Resistência a compressão		Dilatância		
	Pressão	Resultado	Resistência	Descrição da ocorrência durante
polegar - indicador	leve	corpo de prova se esfarela	Nenhuma	Vibração compressão
	média	quebra em pedaços	Baixa	Aparecimento
	alta		Média	Desaparecimento
polegar - superfície dura	muito alta	nada acontece	Alta	Rápido
				Rápido
				Lento
				Lento ou não ocorre
				Não há mudança visível
				Nenhuma
Dureza				
Pressão de rolamento		Condições do bastone e torrão		Dureza
leve		moles e frágeis		Baixa
média		mediamente rijos		Média
alta		altamente rijos		Alta
Plasticidade				
Descrição do comportamento				Plasticidade
Bastonete não consegue atingir 3mm, com qualquer teor de umidade				N.P
Bastonete pode ser, apenas rolado, mas, para $w < W_p$ torrão não é formado				Baixa
Bastonete facilmente rolado e o W_p é alcançado rapidamente; para $w < W_p$ o bastonete não será rolado e o torrão se quebrará				Média
Necessário um tempo maior, rolando e amassando o bastonete, para atingir o W_p ; o bastonete poderá ser rolado e o torrão formado mesmo para $w < W_p$				Alta

ANEXO D: TABELAS E DADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

* **Resistência média.** Os valores numéricos da primeira coluna representa deformação, em mm e os valores das demais colunas representam a resistência medida, em Kgf.

➤ SOLO PURO

	Solo Puro			
	Dia	15 dias	30 dias	45 dias
0	0	0	0	0
0,1	3	2	6	4
0,2	4	2	9	4
0,3	5	4	12	6
0,4	6	6	12	7
0,5	7	7	15	9
0,6	8	9	18	12
0,7	9	10	19	15
0,8	10	13	21	17
0,9	11	14	23	19
1	13	17	24	21
1,1	14	19	25	26
1,2	15	22	26	28
1,3	17	23	29	30
1,4	18	24	32	31
1,5	19	25	34	36
1,6	20	28	35	39
1,7	21	28	35	36
1,8	24	30	36	36
1,9	25	29	34	36
2	26	28	30	34
2,1	28	26	25	32
2,2	27	22	23	30
2,3	25	20	23	29
2,4	22	16	21	20
2,5	19	12	19	17
2,6	15	10	17	15
2,7	12	9	13	12
2,8	10	7	12	12
2,9	8	6	10	10
3	5	4	9	8

➤ **SOLO + 10% de RCC**

	Solo +10% RCC			
	Dia	15 dias	30 dias	45 dias
0	0	0	0	0
0,1	4	4	7	6
0,2	5	6	12	12
0,3	6	7	13	13
0,4	8	9	17	17
0,5	10	12	19	20
0,6	11	14	22	23
0,7	13	16	24	24
0,8	15	19	26	26
0,9	16	20	28	32
1	17	23	31	34
1,1	19	26	32	35
1,2	21	30	37	36
1,3	23	32	39	39
1,4	25	34	41	42
1,5	26	36	43	46
1,6	30	39	41	47
1,7	31	39	39	45
1,8	31	39	39	42
1,9	32	36	38	39
2	32	34	33	37
2,1	29	28	29	36
2,2	25	26	27	34
2,3	22	21	22	30
2,4	20	19	19	25
2,5	18	17	17	22
2,6	13	13	13	20
2,7	13	10	12	18
2,8	10	8	10	17
2,9	7	6	8	15
3	6	4	7	13

➤ **SOLO + 20% de RCC**

	Solo +20% RCC			
	Dia	15 dias	30 dias	45 dias
0	0	0	0	0
0,1	5	8	6	8
0,2	7	10	8	12
0,3	9	13	12	14
0,4	12	14	15	17
0,5	13	16	20	21
0,6	17	18	23	23
0,7	19	19	26	26
0,8	21	25	28	28
0,9	24	27	32	33
1	25	30	37	36
1,1	26	33	39	39
1,2	29	36	42	41
1,3	34	39	46	45
1,4	36	40	46	47
1,5	37	41	45	49
1,6	37	43	47	47
1,7	39	42	45	44
1,8	37	38	43	43
1,9	35	36	43	38
2	32	34	39	36
2,1	28	29	37	31
2,2	25	26	34	28
2,3	22	24	30	26
2,4	20	21	28	22
2,5	17	19	25	21
2,6	14	17	22	16
2,7	11	16	19	14
2,8	9	15	17	13
2,9	8	12	15	12
3	7	10	12	10

➤ **SOLO + 30% de RCC**

	Solo +30% RCC			
	Dia	15 dias	30 dias	45 dias
0	0	0	0	0
0,1	5	7	10	12
0,2	8	12	12	16
0,3	11	18	17	23
0,4	14	22	19	28
0,5	17	25	22	32
0,6	20	30	25	38
0,7	26	33	32	41
0,8	29	36	36	43
0,9	32	36	38	48
1	37	40	41	52
1,1	39	41	45	56
1,2	42	45	49	60
1,3	46	49	52	61
1,4	47	52	55	61
1,5	51	54	57	54
1,6	51	56	56	51
1,7	53	57	51	46
1,8	49	56	46	41
1,9	47	54	45	40
2	46	52	44	34
2,1	44	46	38	32
2,2	41	43	35	28
2,3	36	40	35	21
2,4	33	38	32	19
2,5	29	33	25	19
2,6	28	26	21	17
2,7	26	24	19	15
2,8	23	21	15	13
2,9	21	19	13	12
3	17	17	12	13

ANEXO E: TABELAS E DADOS DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

➤ SOLO PURO

Nº Cilindro	Massa Cilindro + amostra compactada (g)	Determinação Umidade					Umidade Média (%)	γ _s (kN/m ³)
		Capsula N°	Massa Cápsula (g)	Massa Cápsula + Solo Úmido (g)	Massa Cápsula + Solo Seco (g)	Umidade(%)		
1	3855,2	3	9,88	30,08	25,70	28%	27,66	11,748
		8	9,67	26,98	23,23	28%		
		42	11,42	31,37	27,05	28%		
2	3922,7	31	8,91	31,85	26,60	30%	29,63	12,092
		32	10,22	26,30	22,62	30%		
		33	9,68	23,50	20,35	30%		
3	4002,1	4025	10,00	28,83	24,34	-	31,62	12,513
		4097	10,80	30,55	25,80	32%		
		5008	9,43	32,60	27,04	32%		
4	4065,5	5015	11,02	31,74	26,53	34%	33,59	12,804
		5022	10,26	34,80	28,65	-		
		5029	9,02	26,88	22,39	34%		
5	4087,2	5016	9,98	27,76	22,87	38%	38,01	12,552
		t004	10,96	29,38	24,30	38%		
		r22	10,47	28,70	23,68	38%		

➤ SOLO + 10% de RCC

Nº Cilindro	Massa Cilindro + amostra compactada (g)	Determinação Umidade					Umidade Média (%)	γ _s (kN/m ³)
		Capsula N°	Massa Cápsula (g)	Massa Cápsula + Solo Úmido (g)	Massa Cápsula + Solo Seco (g)	Umidade(%)		
1	3849,2	5006	10,43	37,44	31,73	27%	26,74	11,750
		5010	10,36	37,05	31,42	27%		
		5011	10,23	35,01	29,79	27%		
2	3952,4	4020	11,47	35,18	29,92	29%	28,41	12,400
		4021	10,18	34,65	29,23	28%		
		4026	10,52	36,34	30,65	28%		
3	4063,6	5016	9,97	33,90	28,33	30%	30,48	13,055
		5021	10,81	41,26	34,08	31%		
		5025	9,55	31,95	26,75	30%		
4	4101,1	5008	9,40	34,49	28,37	32%	32,17	13,170
		5003	10,09	41,10	33,56	32%		
		5012	10,24	38,66	31,75	32%		
5	4119,1	32	10,20	40,65	32,96	34%	34,67	13,059
		33	9,67	39,49	31,80	35%		
		38	10,92	37,04	30,20	35%		

➤ SOLO + 20% de RCC

Nº Cilindro	Massa Cilindro + amostra compactada (g)	Determinação Umidade					Umidade Média (%)	γ _s (kN/m ³)
		Capsula N°	Massa Cápsula (g)	Massa Cápsula + Solo Úmido (g)	Massa Cápsula + Solo Seco (g)	Umidade(%)		
1	3906,5	4002	10,67	28,30	24,66	26%	26,04	12,570
		4009	10,10	31,54	27,11	26%		
		4014	10,31	24,53	21,59	26%		
2	4097,3	5013	11,33	35,29	29,62	31%	30,89	13,565
		5014	10,08	28,81	24,38	31%		
		5018	10,53	37,19	30,93	31%		
3	4114	5004	10,56	33,72	27,97	33%	33,07	13,468
		6000	12,04	28,51	24,42	33%		
		6010	12,11	34,69	29,07	33%		
4	4070,3	11	11,20	36,32	29,71	36%	35,94	12,861
		17	11,83	39,60	32,23	36%		
		19	10,41	39,20	31,58	36%		
-		28	10,34			0%	0,00	
		R22	10,45			0%		
		113	10,40			0%		

➤ SOLO + 30% de RCC

Nº Cilindro	Massa Cilindro + amostra compactada (g)	Determinação Umidade					Umidade Média (%)	γ_s (kN/m ³)
		Capsula Nº	Massa Cápsula (g)	Massa Cápsula + Solo Úmido (g)	Massa Cápsula + Solo Seco (g)	Umidade(%)		
1	3800,7	3	9,88	44,16	38,47	20%	19,90	12,017
		t004	10,97	44,00	38,56	20%		
		4025	9,99	41,40	36,15	20%		
2	3874,4	33	9,69	38,74	33,52	22%	21,72	12,442
		5015	11,02	36,30	31,81	22%		
		5029	9,01	35,42	30,72	22%		
3	3938,5	4097	10,80	34,07	29,62	24%	23,76	12,754
		8	9,67	32,49	28,11	24%		
		31	8,91	30,24	26,13	24%		
4	4198,5	32	10,18	29,96	25,49	29%	29,59	14,184
		38	10,93	33,35	28,21	30%		
		r22	10,48	35,95	30,10	30%		
5	4157,5	42	11,42	31,34	26,54	32%	31,72	13,643
		5016	9,98	33,09	27,56	31%		
		5022	10,29	29,12	24,56	32%		
6	4101,3	7	10,08	36,43	29,66	35%	34,37	12,956
		4018	10,13	32,24	26,57	34%		
		24	10,64	30,17	25,21	34%		