

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

**ANÁLISE DO PROCESSO DE RESSECAMENTO EM
MISTURAS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)
E BENTONITA PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE
COBERTURA DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

DIDIER ANTONIO GUTIÉRREZ RESTREPO

ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-255/2015

BRASÍLIA (DF), 21 DE SETEMBRO DE 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DO PROCESSO DE RESSECAMENTO EM MISTURAS DE
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) E BENTONITA PARA
APLICAÇÃO EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS DE
RESÍDUOS SÓLIDOS**

DIDIER ANTONIO GUTIERREZ RESTREPO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA,
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM GEOTECNIA.**

APROVADA POR:

**LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**CONCEIÇÃO DEMARIA CARDOSO COSTA, DSc (IFB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**CLAUDIA MARCIA COUTINHO GURJÃO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 21 DE SETEMBRO DE 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

GUTIERREZ, RESTREPO DIDIER ANTONIO

Análise do Processo de Ressecamento em Misturas de Resíduos de Construção Civil (RCC) e Bentonita para Aplicação em Camadas de Cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos. [Distrito Federal] 2015.

xv, 114 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2015).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| 1. Camada de cobertura | 2. Fissuração |
| 3. Ressecamento | 4. Mistura RCC-bentonita |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GUTIERREZ, D. A. R. (2015). Análise do Processo de Ressecamento em Misturas de Resíduos de Construção Civil (RCC) e Bentonita para Aplicação em Camadas de Coberturas de Aterros de Resíduos Sólidos. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM 255/15, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 114 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Didier Antonio Gutierrez Restrepo.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise do Processo de Ressecamento em Misturas de Resíduos de Construção Civil (RCC) e Bentonita para Aplicação em Camadas de Cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos.

GRAU / ANO: Mestre / 2015

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

DIDIER ANTONIO GUTIERREZ RESTREPO.
CL 54 N 80-56 AP 502 Medellín - Colômbia
dagutierr@gmail.com

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus filhos, Johan Manuel e Martín pelo seu amor e compreensão; a minha esposa Yudy por me esperar todo este tempo e lutar com a solidão; a meu adorado pai Abelardo (em memória) porque sou só uma parte de seu reflexo; aos meus amigos todos pela muito agradável companhia e aos bons professores que tive até hoje pela sorte de tê-los tido.

Agradecimentos

À Deus pela vida e pela saúde que deu para mim e para a minha família durante todo este tempo.

À Yudy Sabogal, por me acompanhar nesta travessia e cuidar dos nossos filhos com dedicação e esmero.

Ao meu orientador, o professor Luís Fernando Martins Ribeiro pela sua confiança, orientação, apoio, compreensão, paciência e pelos ensinamentos que me deu.

Ao professor Hernán Carvajal, pelo seu apoio, pela confiança depositada em mim, pela sua amizade e todos e cada um dos muitos ensinamentos que me deu para a minha formação pessoal e profissional.

Aos colegas do programa de Geotecnia da UNB pelo seu apoio, companhia e amizade sincera.

Aos meus amigos do CAFIS pela sua sinceridade marcante, pelas conversas preciosas e pelos muitos momentos memoráveis vividos; Tulio, Caio, Mateus, Ramón, Leonardo, Joao, Luís, Camacho e todos os demais parceiros que sempre vou lembrar e levarei no meu coração pela minha vida toda... ¡Obrigado por me permitir ganhar e perder muitas vezes!

Aos professores de Geotecnia, pela sua paciência, colaboração e ensinamentos preciosos.

Ao pessoal todo da UNB, por todo seu apoio a través da realização dos seus trabalhos que me permitiram terminar o meu.

Aos meus amigos Adriana, Gustavo e Astrid por cuidar a minha família durante a minha ausência.

Enfim, gostaria de agradecer a todos que pensaram e agiram de forma positiva para a realização deste objetivo. ¡Obrigado!

Resumo

ANÁLISE DO PROCESSO DE RESSECAMENTO EM MISTURAS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) E BENTONITA PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS.

Autor: Didier Antonio Gutiérrez Restrepo.

Orientador: Prof. PhD. Luís Fernando Martins Ribeiro

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Brasília, Setembro de 2015.

O crescente aumento na população mundial e a consequente geração de resíduos sólidos urbanos levam a preocupação por sua correta disposição e tratamento, na busca por soluções que otimizem as condições de destinação atuais. Os aterros sanitários são a alternativa considerada mais viável até o momento, na sua concepção básica, as camadas de impermeabilização constituem um dos componentes mais críticos destes sistemas de armazenamento de resíduos, sendo suas características hidromecânicas afetadas por processos de fissuração dos materiais argilosos que normalmente as compõem. A utilização de materiais alternativos neste tipo de camada tem mostrado uma importante aplicabilidade, principalmente pela existência dos mesmos no próprio aterro. Neste sentido, o resíduo de construção civil (RCC) apresenta um excelente potencial de aplicação. Contudo, sua característica essencialmente granular pode acarretar problemas relacionados à impermeabilidade destas camadas. Neste sentido, a proposta desta pesquisa é avaliar o efeito da adição de bentonita ao RCC de forma a avaliar suas propriedades hidromecânicas, com ênfase ao processo de fissuração e condutividade hidráulica. A mistura RCC-Bentonita compactada empregada em camadas impermeáveis para retenção de contaminantes em aterros sanitários e avaliada nesta pesquisa tende a representar uma solução viável ao problema da disposição destes resíduos, bem como do seu reaproveitamento de forma sustentável. Neste trabalho são apresentados resultados de ensaios de compressão, compactação, condutividade hidráulica, resistência à compressão simples, difração de raios x, pH e uma análise de imagens para o estudo da fissuração dos materiais. Além do RCC como material base do estudo, foram utilizadas misturas RCC-bentonita em vários teores visando à obtenção da porcentagem mais adequada para cumprir com os requisitos mínimos de utilização como cobertura de aterros sanitários. As misturas (RCC-Bentonita) ensaiadas apresentaram um comportamento predominantemente granular para os quais, os valores de condutividade hidráulica diminuíram com o acréscimo do teor de bentonita, somente o RCC+14% apresentou uma redução da condutividade hidráulica de 10^{-6} para 10^{-9} m/s, compatível com a recomendada para camadas de cobertura de aterros sanitários. A utilização do software de distribuição livre *ImageJ* mostrou ser uma ferramenta útil na análise do processo de fissuração, visando a identificação dos mecanismos que a produzem. A mistura com melhor comportamento em quanto à fissuração foi também o RCC+14%, no que tem a ver com o começo da fissuração, atraso no tempo de propagação da fissuração e taxa de fissuração.

Palavras-chave: Camada de cobertura, condutividade hidráulica, fissuração, ressecamento, mistura RCC-bentonita.

Abstract

ANALYSES OF THE DRYNESS PROCESS IN MIXTURES OF CIVIL CONSTRUCTION WASTES (RCC) AND BENTONITE TO BE USED AS A COVER LINER FOR SOLID WASTES LANDFILLS.

Autor: Didier Antonio Gutiérrez Restrepo.

Advisor: Prof. PhD. Luís Fernando Martins Ribeiro

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Brasília, September of 2015.

The increasing world population and the consequent solid urban waste generation lead to concern for its correct disposal and treatment, through the search for solutions that optimize the current disposal conditions. In general, landfills are the alternative, until now, considered more viable and in its basic design, the waterproofing layers constitute one of the most critical components in these waste storage systems, since the hydro-mechanical characteristics are affected by cracking processes on the clay materials that normally make up it. The use of alternative materials in this type of layer is shown an important application of these materials, especially by the existence of them in the landfills. In this sense, usability of construction waste (RCC) has shown great potential for application. However, its characteristic, essentially granular, many times can cause a problem with respect to impermeability of these layers. For this reason, the purpose of this research is to evaluate the effect of adding bentonite to the RCC in order to evaluate it assessed its hydro-mechanical properties, with emphasis on cracking and hydraulic conductivity process. The RCC- bentonite compacted mixture used in waterproof layers to retain contaminants in landfills evaluated in this research tends to represent a viable and sustainable solution to the problem of disposal of this waste and its reuse. This thesis presents results of simple compression, compaction, hydraulic conductivity, X-ray diffraction and acidity testes, as well as an image analysis to study the cracking of materials. In addition to the RCC as base material of the study, RCC-bentonite mixtures were used at various tenors in order to obtain the most appropriate percentage to meet the minimum requirements for use as landfill cover. Residues (RCC) tested showed predominantly granular behavior for which the hydraulic conductivity values decreased with the addition of bentonite content, only for the RCC+14% the hydraulic conductivity presented a reduction from 10^{-6} to 10^{-9} m/s compatible with the normative magnitude required for waste landfills cover layers. The use of the free distribution software *ImageJ* proved to be a useful tool in the analysis of the cracking process for the identification of the mechanisms that produce it. The mixture with the best performance was also RCC+14%, in that have to be with the start of cracking, the delay time of cracking and crack propagation rate.

Key words: Cover layer, hydraulic conductivity, cracking, dryness, mixture RCC-bentonite.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	4
1.2	OBJETIVO.....	6
1.3	ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	FORMAS DE DISPOSIÇÃO DE RSU	7
2.2	PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM ATERRO SANITÁRIO.....	8
2.2.1	CAMADA DE IMPERMEABILIZAÇÃO INFERIOR	8
2.2.2	SISTEMA DE COLETA DO LIXIVIADO.....	9
2.2.3	SISTEMA DE CAPTAÇÃO DOS GASES.....	9
2.2.4	CAMADA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE COBERTURA	10
2.2.5	ESTAÇÃO PARA TRATAMENTO DO LIXIVIADO	11
2.2.6	SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E LENÇÓIS FREÁTICOS.....	11
2.2.7	SISTEMA DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS	11
2.2.8	CAMADA VEGETAL	11
2.3	ESPECIFICAÇÕES PARA A CAMADA DE COBERTURA	12
2.4	PANORAMA DOS RCC COMO COMPÓSITO GRANULAR.....	12
2.5	USO DE MISTURAS ALTERNATIVAS PARA COBERTURAS DE ATERROS SANITÁRIOS	13
2.6	RESSECAMENTO E FISSURAÇÃO DE SOLOS	14
2.6.1	ESTUDOS DA MORFOLOGIA E EVOLUÇÃO DE FISSURAS.....	15

2.6.2	ESTUDOS DE FISSURAÇÃO ASSOCIADOS A PROBLEMAS LOCAIS ESPECÍFICOS.....	16
2.6.3	VARIÁVEIS INDIVIDUAIS ENVOLVIDAS NA FISSURAÇÃO DOS SOLOS 17	
2.6.4	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DOS SOLOS	18
2.6.5	TENACIDADE À FRATURA	21
2.6.6	MODELOS DE INÍCIO, PROPAGAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE FISSURAS.....	22
2.6.7	ESTUDOS DO COMPORTAMENTO DE SOLOS FISSURADOS.....	23
2.6.8	O PADRÃO HIERÁRQUICO DA FISSURAÇÃO	25
2.6.9	HIERARQUIA ESPECÍFICA NA FISSURAÇÃO DO SOLO	26
2.6.10	ÂNGULO DE INTERSEÇÃO DAS FISSURAS.....	28
2.6.11	FORMAÇÃO DAS JUNTAS DURANTE A FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO.....	28
2.6.12	FISSURAS POR CONTRAÇÃO: RESSECAMENTO OU SINÉRESE?.....	29
2.7	METODOLOGIA PARA DEFINIR CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DE SOLOS PARA CAMADAS DE COBERTURAS	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	MATERIAIS SELECIONADOS PARA PESQUISA	33
3.1.1	RCC.....	33
3.1.2	BENTONITA.....	33
3.2	METODOLOGIA	34
3.2.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	36
3.2.2	ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	41
3.2.3	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA	42
3.2.5	ANÁLISE DE IMAGENS.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51

4.1	ANÁLISE MICRÓSCÓPICA DO RCC E MISTURA	51
4.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	55
4.2.1	LIMITES DE ATTEMBERG E ATIVIDADE.....	55
4.2.2	DENSIDADE ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	57
4.2.3	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA.....	58
4.2.4	CLASSIFICAÇÃO SUCS E AASHTO DAS AMOSTRAS.....	66
4.2.5	ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA-COMPACTAÇÃO	67
4.2.6	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA - pH	75
4.2.7	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	77
4.3	CARACTERÍSTICAS HIDRO-MECÂNICAS	81
4.3.1	ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	81
4.3.2	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	82
4.4	ANÁLISE DA FISSURAÇÃO	83
5	CONCLUSÕES.....	101
6	TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Resumo do estado do conhecimento sobre fissuração dos solos (ÁVILA, 2004)	24
Tabela 3.1 Resumo normas ABNT usadas nos ensaios	35
Tabela 3.2 Valores típicos de atividade para vários minerais argilosos (MITCHELL, 1993).....	37
Tabela 3.3 Especificações para a realização do ensaio de compactação. (NBR 7182-ABNT/1986) ..	40
Tabela 4.1 Densidade específica dos sólidos das amostras	55
Tabela 4.1 Densidade específica dos sólidos das amostras	57
Tabela 4.2 Granulométrica da bentonita sódica escala ABNT (1983).....	60
Tabela 4.3 Análise da curva granulométrica do RCC com e sem defloculante.....	60
Tabela 4.4. Análise da curva granulométrica do RCC+4% com e sem defloculante.	62
Tabela 4.5 Análise da curva granulométrica do RCC+8% com e sem defloculante.....	62
Tabela 4.6 Resultados da análise granulométrica conjunta das amostras.....	66
Tabela 4.7 Classificação das amostras segundo os Sistemas SUCS e AASHTO.....	66
Tabela 4.8. Resultados dos ensaios de compactação.....	74
Tabela 4.9 Resultados da determinação de pH.....	75
Tabela 4.10 Resultados da determinação de pH	76
Tabela 4.11 Composição das amostras segundo os resultados DRX.....	77
Tabela 4.12 Resultados do ensaio de compressão simples.....	82
Tabela 4.13 Tempos comparativos de começo e propagação da fissuração nos materiais	90
Tabela 4.14 Resumo das principais etapas no processo de ressecamento dos materiais	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Evolução do crescimento da população mundial	1
Figura 2.1 Configuração típica de um aterro sanitário.....	8
Figura 2.2 Geração de RSU no Brasil	2
Figura 2.3 Geração de RCD no Brasil.....	2
Figura 2.4 Diferentes estados de tensão: a) Tensão isotrópica de tração, b) Tração uniaxial, c) Coesão aparente.....	19
Figura 2.5 Esquema dos três estados da água no solo não saturado e da tensão de tração de acordo com a curva de retenção (LU, WU e TAN, 2007).....	20
Figura 2.6 Modos de fissuração: a) Modo i; b) Modo ii; c) Modo iii (BROEK, 1986).....	22
Figura 2.7a) Histograma do número de lados (preto) e o número de vizinhos (branco) de domínios em um padrão de fissuração cerâmico; b) Célula de seis lados em espuma; c) Célula de quatro lados em um padrão de fissuração (LAKSHMIKANTHA, 2009).....	26
Figura 2.8 Fissuração final de uma amostra. (LAKSHMIKANTHA, 2009).	27
Figura 2.9 Evolução temporal da área delimitada pela área delimitada na Figura 2.8 (LAKSHMIKANTHA, 2009).	28
Figura 2.10 Três fissuras formadas de um mesmo ponto de partida (LAKSHMIKANTHA, 2009)...	29
Figura 2.11 Metodologia para definir critérios de aceitação de solos para camadas de coberturas (BENSON e DANIEL, 1990)	31
Figura 3.1 Esquema dos ensaios de laboratório.....	35
Figura 3.2 Equipamento para o ensaio de ressecamento adaptado de LAKSHMIKANTA (2009). ...	44
Figura 3.3 Sequência de passos para a medição das áreas fissuradas em uma região específica selecionada da imagem inicial.....	47
Figura 3.4 Exemplo da criação de um macro em <i>Imagej</i>	48
Figura 3.5 Janela do macro criado.	49
Figura 3.6 Janela do processador em lote.	50
Figura 3.7 Janela de resultados de <i>Imagej</i>	50
Figura 4.1 Imagem geral dos materiais componentes RCC, bentonita e das misturas 4%, 8%, 14%, 16% e 18% (100X).....	52

Figura 4.2 Imagem geral dos materiais componentes RCC, bentonita e das misturas 4%, 8%, 14%, 16% e 18% (200X).....	53
Figura 4.3 Imagem geral dos materiais componentes RCC, bentonita e das misturas 4%, 8%, 14%, 16% e 18% (400X).....	54
Figura 4.4 Densidade específica média dos sólidos das amostras.	58
Figura 4.5 Granulometria da bentonita sódica (Soleminas)	59
Figura 4.6 Granulometria RCC-areia rosa.	61
Figura 4.7 Granulometria RCC+4% bentonita.	62
Figura 4.8 Granulometria RCC+8% bentonita.	63
Figura 4.9 Granulometria RCC+14% bentonita.	64
Figura 4.10 Granulometria RCC+16% bentonita.....	65
Figura 4.11 Granulometria RCC+18% bentonita.....	65
Figura 4.12 Carta de plasticidade das misturas com adição de 14%, 16% e 18%.	67
Figura 4.13 Resultados do ensaio de compactação RCC.	68
Figura 4.14 Resultados do ensaio de compactação da bentonita.....	69
Figura 4.15 Resultados do ensaio de compactação RCC+4%.	69
Figura 4.16 Resultados do ensaio de compactação RCC+8%.	70
Figura 4.17 Resultados do ensaio de compactação RCC+14%.....	71
Figura 4.18 Resultados do ensaio de compactação RCC+16%.....	72
Figura 4.19 Resultados do ensaio de compactação RCC+18%.....	73
Figura 4.20 Resultados comparativos do ensaio de compactação.	74
Figura 4.21 Resultados da determinação de pH.....	76
Figura 4.22 Resultados DRX RCC	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.23 Resultados DRX bentonita	78
Figura 4.24 Resultados DRX RCC+4%	78
Figura 4.25 Resultados DRX RCC+8%	79
Figura 4.26 Resultados RCC+14%.	79

Figura 4.27 Resultados DRX RCC+16%.....	80
Figura 4.28 Resultados DRX RCC+18%.....	80
Figura 4.29 Condutividade hidráulica das amostras.....	81
Figura 4.30 Resultados do ensaio de compressão simples.....	82
Figura 4.31 a) Ângulo de propagação da fissura, b) hierarquia retangular na bentonita e c) máxima área fissurada no segundo ciclo de ressecamento.....	85
Figura 4.32 a) Início da fissuração no primeiro ciclo, b) Ângulo de propagação da fissura no primeiro ciclo, c) Início da fissuração no segundo ciclo d) máxima área fissurada no segundo ciclo RCC+4%87	87
Figura 4.33 a) Início da fissuração no primeiro ciclo, b) ângulo de propagação da fissura no primeiro ciclo, c) máxima área fissurada no primeiro ciclo, d) estabilização da massa no segundo ciclo e) máxima área fissurada no segundo ciclo RCC+14%.....	88
Figura 4.34 a) Início da fissuração no primeiro ciclo, b) ângulo de propagação da fissura no primeiro ciclo, c) máxima área fissurada no primeiro ciclo, d) umedecimento e cicatrização, e) estabilização da massa no segundo ciclo, f) máxima área fissurada no segundo ciclo RCC+18%.....	90
Figura 4.35 Ensaio de fissuração nos materiais e misturas no ciclo 1, a) Início do ensaio, b) Início da fissuração, c) estabilização da massa, d) Máxima fissuração.....	93
Figura 4.36 Ensaio de fissuração nos materiais e misturas no ciclo 2, a) Início do ensaio, b) Início da fissuração, c) estabilização da massa, d) Máxima fissuração.....	94
Figura 4.37 Comparação do começo da fissuração para cada ciclo e material.....	95
Figura 4.38 Comparação do começo da propagação da fissuração para cada ciclo e material.....	95
Figura 4.39 Comparação da máxima fissuração para cada ciclo e material.....	95
Figura 4.40 Comparação da velocidade média de ressecamento para cada ciclo e material.....	96
Figura 4.41 Comparação da taxa média de fissuração para cada ciclo e material.....	96
Figura 4.42 Variação da umidade das amostras durante os ciclos de ressecamento para cada material.....	97
Figura 4.43 Variação da umidade ambiente durante os ciclos de ressecamento.....	98
Figura 4.44 Evolução da temperatura ambiente durante os ciclos de ressecamento.....	99
Figura 4.45 Variação da taxa de fissuração das amostras.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ASDE - Sociedade Americana de Engenharia Civil

CONAMA –Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONDER - Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia

DETCG - Departamento de Engenharia de Terras e Geociências

DRX – Difração de Raio X

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

MFLE - Estudos da Mecânica da Fratura Elástica Linear

NL – Não apresentando limite de liquidez

NP – Não apresentando limite de Plasticidade

ONFPA - Fundo de População das Nações Unidas

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PROSAB - Programa de Pesquisas em Saneamento Básico

RCC - Resíduos da Construção Civil

RCD-R - Resíduos De Construção e Demolição Reciclados

RGB – Vermelho, Verde e Azul

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UnB – Universidade de Brasília

UPC – Universidade Politécnica de Catalunha

USP – Universidade de São Paulo

1 INTRODUÇÃO

A crescente produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), principalmente nas grandes cidades, tem despertado o interesse e a preocupação da área técnica na busca por soluções tecnológicas adequadas para o tratamento e a disposição destes resíduos. Esta preocupação, voltada para as repercussões que esses resíduos podem ter sobre a saúde humana e sobre a qualidade do meio ambiente, tem como premissa básica a minimização da contaminação do solo e da água pela utilização de sistemas de cobertura e impermeabilização da base em sistemas de disposição de resíduos industriais, urbanos e de mineração. Surgem então as perguntas: como ocorre o crescimento da população? Qual a sua relação com a geração de resíduos? Como é enfrentado o problema da disposição desses resíduos?

A Figura 1.1 mostra a evolução do crescimento da população mundial. Em 1802 a população mundial atingiu 1 bilhão de habitantes, passando-se 125 anos para que ela atingisse 2 bilhões de habitantes. Após 34 anos, em 1961, ela já chegava a 3 bilhões. Em 1974, 13 anos depois, a população chegou a 4 bilhões de pessoas. Mais 13 anos, em 1987, ela atingiu os 5 bilhões. Em 1999, após 12 anos, a população mundial chegou aos 6 bilhões. Em 2012 atingiu os 7 bilhões e continua aumentando a uma taxa, quase constante, de 1 bilhão de habitantes por cada período de 13 anos (ONFPA, 2011; WORLDOMETERS, 2015).

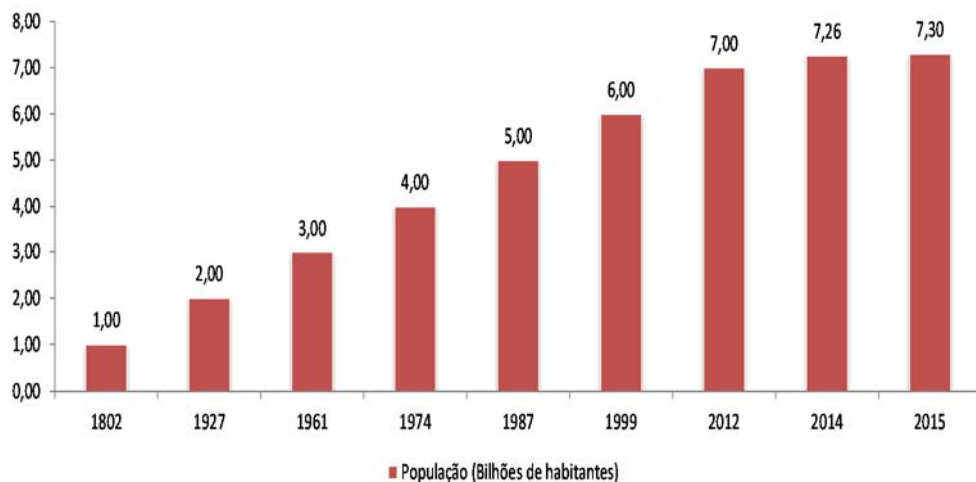


Figura 1.1 Evolução do crescimento da população mundial
Fonte: (ONFPA, 2011 e WORLDOMETERS, 2015)

O crescimento da população mundial vem acompanhado do crescimento na geração de resíduos sólidos urbanos - RSU, a Figura 1.2 mostra a evolução da geração de RSU no Brasil.

Observa-se que nos últimos 6 anos o crescimento passou de 53 para 76 milhões de t/ano.



Figura 1.2 Geração de RSU no Brasil
Fonte: ABRELPE, (2013)

A Figura 1.3 mostra a geração de RSU per capita no Brasil, mostrando que quantidade de resíduo gerado passou de 337 kg/hab/ano em 2008 para 385 kg/hab/ano em 2013. Com base nestes dados estima-se uma produção de aproximadamente 1 kg/hab/dia.

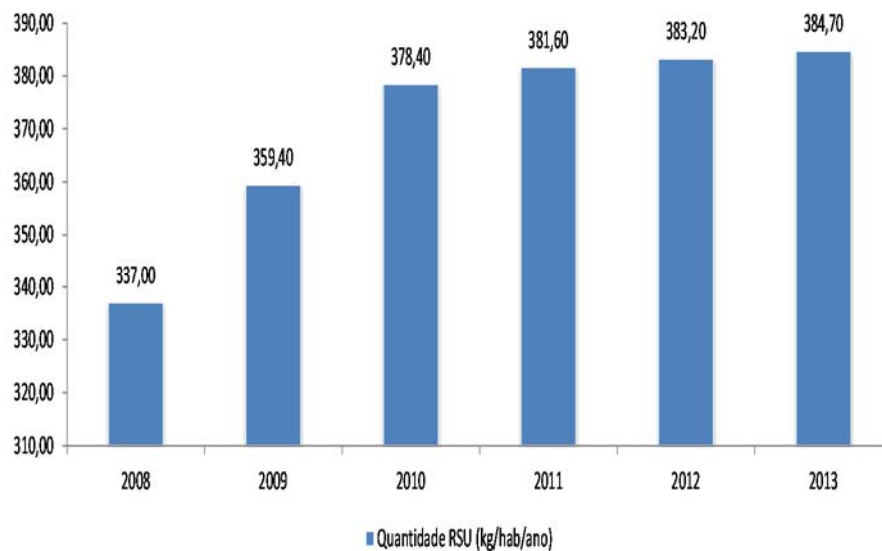


Figura 1.3 Geração de RSU no Brasil
Fonte: ABRELPE, (2013)

Este problema tem sido confrontado de várias maneiras. Em alguns países em desenvolvimento como o Brasil, a disposição em aterros sanitários é, e ainda será por muito

tempo, a técnica mais viável por demandar menos recursos tecnológicos e menor custo de implantação e operação, quando comparada às plantas de incineração, sendo, portanto, considerada uma destinação final segura e adequada tanto do ponto de vista econômico como ambiental (SANTOS 2011; DIAS, 2011).

Nos aterros sanitários, os sistemas de impermeabilização constituem um componente essencial na proteção do meio ambiente, atuando de duas formas distintas: como sistemas de cobertura, para controlar a infiltração de águas pluviais para o interior do aterro, além de controlar a saída de gases e como sistemas de impermeabilização da base para a redução do fluxo e atenuação dos efeitos químicos do lixiviado no lençol freático. A baixa condutividade hidráulica, a durabilidade e a alta resistência mecânica e às intempéries são características técnicas que devem apresentar estas duas camadas.

Uma baixa condutividade hidráulica pode-se conseguir utilizando solos argilosos com alta plasticidade, os quais apresentam características de contração e expansão, que dependem das condições de umidade e temperatura do ambiente. No entanto, durante as estações mais secas do ano, o ressecamento das camadas pode ocasionar o surgimento de fissuras e criar caminhos preferenciais para o transporte de fluídos provocando aumento considerável da condutividade hidráulica e a perda da função impermeabilizante nas camadas.

Algumas associações com diferentes materiais têm sido propostas no sentido de melhorar as condições de impermeabilidade e resistência destas camadas, bem como reduzir o uso de solos naturais e os impactos associados à sua extração pela possibilidade de se utilizar materiais alternativos, como resíduos industriais e de mineração.

Neste sentido, tem-se mostrado também viável a utilização de Resíduos da Construção Civil (RCC) reciclado e com granulometria equivalente a uma areia fina como adição ao solo argiloso. Costa (2015) apresenta alguns resultados iniciais dentro desta proposta já demonstrando que a adição de 20% de RCC a um solo argiloso do Distrito Federal, manteve a condutividade hidráulica da mistura dentro da mesma ordem de grandeza do solo natural (10^{-8} m/s), atendendo aos critérios estabelecidos para os materiais de cobertura (DANIEL e WU, 1993).

Ainda, para promover a recuperação das fissuras durante os ciclos de ressecamento das camadas, uma alternativa que vem sendo utilizada é a adição de bentonita ao solo argiloso ou arenoso, tendo em vista suas características expansivas e sua baixa condutividade, aliando materiais com maior trabalhabilidade a outro capaz de reduzir a condutividade hidráulica.

Segundo Heineck (2002), a adição de bentonita em um solo tipicamente arenoso resultou em uma redução significativa da condutividade hidráulica, passando de 3×10^{-5} m/s para 5×10^{-10} m/s, reduzindo o resultado em cinco ordens de magnitude.

Segundo alguns autores, a substituição de certa porcentagem de argila constituinte do “*liner*” por um material arenoso, originaria uma mistura com propriedades melhoradas, tais como menor tendência à contração do que argilas puras e siltes, redução do índice de vazios, estabilidade climática e maior facilidade de construção (GRAHAM *et al.*, 1989; YAN REE *et al.*, 1992; HAN, 1996; ALSTON *et al.*, 1997).

As vantagens do “*liner*” de materiais arenosos com bentonita são: i) Apesar da molhagem inicial ser bastante rápida, é necessário um longo período de tempo para que a frente de saturação atravesse o “*liner*”; ii) A condutividade hidráulica do “*liner*” irá diminuir com a carga ou tensão confinante, reduzindo a taxa de infiltração; iii) Irá ocasionar uma redução significativa na concentração do líquido permeante, como consequência da dispersão, difusão e absorção dentro da matriz (KOZICKI *et al.*, 1994).

Fundamentado nestes resultados e tendo em vista a possibilidade de maior utilização do RCC reciclado como material alternativo para cobertura de aterros sanitários, esta pesquisa propõe-se avaliar a viabilidade de utilização de misturas de RCC-Bentonita.

1.1 MOTIVAÇÃO

Ao longo da história o homem tem enfrentado vários desafios para satisfazer as suas necessidades e fornecer soluções para os diferentes problemas que são apresentados e que, na maioria dos casos, é produto da sua própria ação. Um destes problemas é o crescimento desenfreado da população mundial e a consequente produção de RSU, implicando em grandes custos relacionados à sua coleta, disposição e tratamento.

Segundo a pesquisa sobre os diferentes métodos de disposição de RSU, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), 50,8% dos municípios brasileiros pesquisados ainda adotam para a destinação final de seus resíduos sólidos os lixões a céu aberto, 22,5% usam aterros controlados, 26,5% usam aterros sanitários e os restantes usam outras formas de destinação como as plantas de incineração, compostagem e verme-compostagem. Destas alternativas, os aterros sanitários apresentam algumas vantagens e desvantagens a serem consideradas.

De uma forma geral, a implementação e operação de aterros sanitários, embora seja de

alto custo, dentre as opções de tratamento disponíveis ainda é a mais viável quando são considerados aspectos geotécnicos, econômicos, sociais, ambientais e de reutilização dos locais de disposição (LUKIANCHUKI, 2007; DIAS, 2011; COSTA, 2015).

Na concepção destes aterros é necessária a confecção de camadas de proteção cujos parâmetros de resistência e drenabilidade devem ser plenamente atingidos. Neste sentido, é de fundamental importância a adoção de materiais que atendam às especificações de projeto e garantam a segurança destes aterros. Algumas pesquisas têm sido realizadas utilizando materiais alternativos como: solos lateríticos (BOSCOV, 1997), solo arenoso misturado com bentonita (LUKIANCHUKI, 2007), solo areno-siltoso com adição de bentonita (HUSE, 2007), resíduos da construção civil (AFFONSO, 2005; BARROS, 2005; SANTOS, 2007; COSTA, 2015), areia de fundição descartada (QUISSINI, 2009), solo com adição de fibras PET reciclado (COSTA, 2015), as quais demonstram a viabilidade desses materiais como compósitos para execução de camadas de cobertura para aterros sanitários, os quais além de serem uma alternativa para a redução da quantidade de resíduos dispostos em aterros podem representar uma proposta sustentável de destinação, aliando vantagens técnicas, econômicas e ambientais.

A construção de camadas de cobertura pode ser usada também para melhorar as condições técnicas de lixões existentes, a Figura 1.1 mostra um exemplo deste processo de recuperação, o Jardim Moravia na cidade de Medellín (Colômbia), o que começou como um lixão a céu aberto se transformou em um problema social envolvendo poluição, contaminação e invasão dos locais de disposição até chegar a se converter em conjuntos habitacionais que requereram a relocação dos moradores com o correspondente custo associado e ainda mais, com a responsabilidade do Governo de recuperar ambientalmente o local envolvendo altos custos.



Figura 1.4 Recuperação do lixão Moravia

1.2 OBJETIVO

Esta pesquisa propõe avaliar a utilização de materiais alternativos, como resíduos de construção civil (RCC) misturados com bentonita para a execução de “liners” de cobertura e analisar os efeitos do processo de ressecamento, considerando principalmente o risco de formação de fissuras nestes revestimentos.

Espera-se com esta pesquisa avaliara porcentagem de bentonita que viabilize o uso da mistura RCC-bentonita pela identificação das fases mais relevantes da formação de fissuras decorrentes no processo de ressecamento com base na análise de imagens dos sistemas de cobertura de aterros de resíduos sólidos construídos com estes materiais com a utilização do software de distribuição gratuita *ImageJ*, com o intuito de contribuir ao entendimento do processo de fissuração.

1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo foi estruturado nos capítulos que seguem:

O Capítulo 1 corresponde com a Introdução, apresenta a descrição do problema de disposição de resíduos sólidos urbanos, algumas alternativas de solução adotadas na atualidade, a motivação para realização da pesquisa e os objetivos.

O Capítulo 2 mostra a fundamentação teórica com os principais conceitos referentes à disposição de RSU como, formas de disposição, especificações gerais de disposição, algumas estatísticas para a descrição do problema e o estado da arte no estudo da fissuração como problema associado com a proteção dos locais de disposição.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados na pesquisa com ênfase nos ensaios realizados e a avaliação da fissuração.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões dos resultados obtidos durante a pesquisa.

Finalmente, os Capítulos 5 e 6 apresentam as conclusões e as propostas para a realização de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FORMAS DE DISPOSIÇÃO DE RSU

Existem diversas formas de disposição e tratamento do Resíduo Sólido Urbano - RSU. No lançamento a céu aberto os resíduos são descarregados diretamente no solo, sem proteção alguma à saúde pública e ao meio ambiente. Com esta configuração é mais fácil ocorrer à proliferação de vetores como: moscas, mosquitos, baratas, ratos, maus odores, além da contaminação das águas superficiais e subterrâneas. Infelizmente, este tipo de disposição ainda representa a solução para 50,8% dos municípios brasileiros (IBGE, 2010).

Uma outra forma de disposição é o aterro controlado que adota algumas medidas de carácter tecnológico são tomadas durante a operação do aterro, como o cobrimento dos resíduos com argila, geralmente sem compactação, aumentando a segurança das instalações e minimizando o risco de impacto sobre o ambiente e a saúde pública. Esta opção é adotada, no Brasil, como solução para aproximadamente 22,5% dos municípios (IBGE, 2010).

Segundo a “*American Society of Civil Engineering*” - ASCE, um aterro sanitário é um método de disposição que minimiza os danos à saúde pública e proporciona maior segurança por aplicar princípios de engenharia para confinar o lixo no menor volume possível e depois é coberto com uma camada de solo, normalmente argila compactada em níveis satisfatórios ao final de cada dia, ou mais frequentemente, se necessário. É adotada, no Brasil, como solução para aproximadamente 26,5% dos municípios (IBGE, 2010). Conta também com sistemas de drenagem superficial e periféricos para remoção das águas pluviais e a coleta do lixiviado, sistema de tratamento e drenagem de lixiviados, e com sistemas de drenagem e tratamento dos gases gerados durante o processo de bioestabilização da matéria orgânica.

Existem outras formas de disposição como as plantas de compostagem que oferecem uma alternativa de tratamento dos resíduos orgânicos mediante um processo de fermentação anaeróbica. Paralelamente para o tratamento dos mesmos resíduos orgânicos tem-se as plantas de vermicompostagem com a utilização de minhocas no processo. Estes mesmos resíduos e os biológicos, considerados como perigosos, são tratados em plantas de incineração. Estes métodos representam uma solução para somente 0,2% dos municípios (IBGE, 2010).

2.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM ATERRO SANITÁRIO

Para o correto funcionamento de um aterro é necessária a execução de alguns elementos estruturais. A Figura 2.1 mostra a configuração típica de um aterro sanitário com seus componentes.

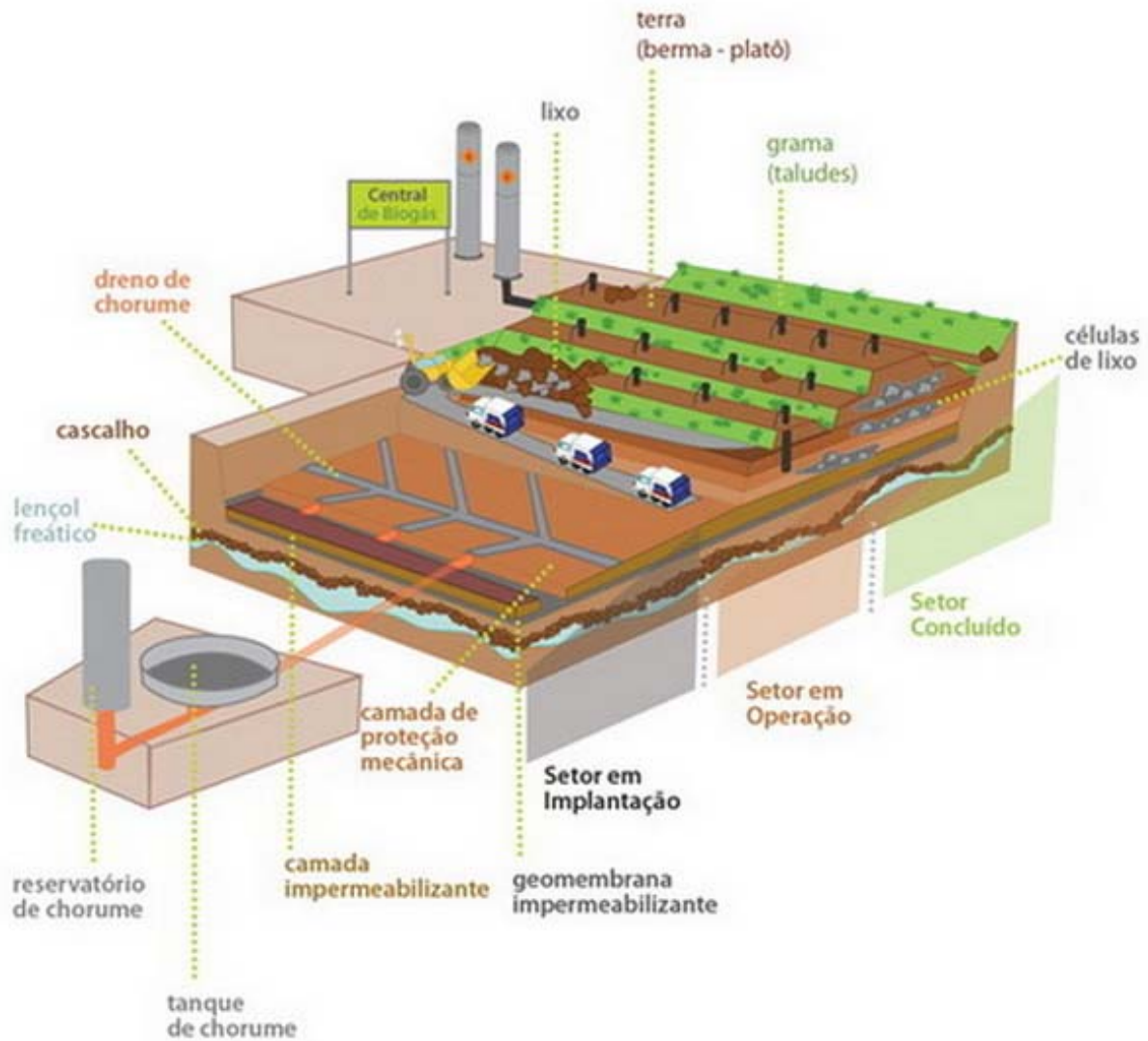


Figura 2.1 Configuração típica de um aterro sanitário

Fonte: Disponível em http://www.urbam.com.br/porta1/php/hora_e_agora.php. Acesso em 28 de Julho de 2015.

2.2.1 CAMADA DE IMPERMEABILIZAÇÃO INFERIOR

Esta camada é construída a fim de prevenir e/ou reduzir a contaminação do solo e dos aquíferos subjacentes e no perímetro do aterro. Inicialmente é colocada uma camada de argila

compactada de baixa permeabilidade na base do aterro, geralmente em seguida é colocada uma manta impermeável, polímero plástico ou polietileno de alta densidade e no final uma camada de argila para a proteção da manta.

2.2.2 SISTEMA DE COLETA DO LIXIVIADO

Este sistema é projetado para evitar que o lixiviado atinja o nível freático; diminuir as possibilidades de acumulação de lixiviado nas células aumentando a instabilidade do aterro e permitir o seu encaminhamento para uma planta de tratamento de lixiviados.

Para o descarte e a coleta do lixiviado dentro das células do aterro é instalada, acima do fundo da camada de vedação, na parte inferior da célula, uma camada chamada colchão drenante formada basicamente por brita, que permitirá a condução do lixiviado produzido durante a decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos. Para cada nova camada de resíduos que é depositada adiciona-se uma camada de cascalho ou brita para formar um colchão novo, as sucessivas camadas são interligadas para levar o lixiviado até o sistema de tratamento.

A utilização de tubos de concreto com furos, para a entrada do lixiviado, instalados nas trincheiras permite a captação dos líquidos percolados das células. Estes tubos conduzem o lixiviado para a parte externa do maciço do aterro até a estação de tratamento.

2.2.3 SISTEMA DE CAPTAÇÃO DOS GASES

Este sistema tem a função de capturar os gases formados no processo de decomposição da matéria orgânica e assim evitar a formação de bolsas de gás no maciço do aterro, envolvendo sua estabilidade geológica, permitindo que eles sejam tratados corretamente, em vez de serem lançados diretamente na atmosfera.

À medida que as camadas de resíduos vão formando as células, são construídas redes de drenos horizontais e verticais interligados para a drenagem dos gases gerados, direcionando-os para a parte superior da célula. Os drenos verticais têm uma camada de cascalho ao redor dos tubos para coletar o gás e uma malha metálica que serve para facilitar e reduzir o possível bloqueio pelos detritos depositados no aterro, criando assim uma rota de fuga para o biogás e a saída do lixiviado para a parte inferior interna da célula para logo ser coletado (CONDER, 2014).

2.2.4 CAMADA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE COBERTURA

Esta camada evita a exposição dos resíduos e também a reação de decomposição com a atmosfera, evitando a proliferação de insetos e outros animais que são vetores de várias doenças. Ela também impede a liberação total para a atmosfera do biogás produzido durante a decomposição, permitindo que este seja capturado e tratado. Durante a ocorrência de chuvas na região do aterro, sua função é impedir a entrada de água e o excesso de umidade no interior das células do aterro para reduzir a quantidade de lixiviado produzido.

Existem dois tipos de cobertura superior. Uma primeira é feita diariamente, após o fim das operações diárias com camadas de argila a fim de evitar e/ou reduzir vetores como ratos, insetos, aves e que os resíduos se espalhem na ocorrência de fortes chuvas e ventos. A segunda é a cobertura final, que é aplicada quando a capacidade total do aterro é atingida, naquele local e não irá mais receber resíduos. Esta cobertura, na maioria dos casos, se constitui, de baixo para cima, de uma camada bem mais espessa de argila de baixa permeabilidade e, geralmente é colocada depois, uma manta impermeável que após o recobrimento com solo, deverá ser plantada com grama e espécies nativas nos taludes definitivos e platôs para que sirva de proteção extra contra erosão (CONDER, 2014). A Figura 2.2 mostra a conformação típica desta camada.

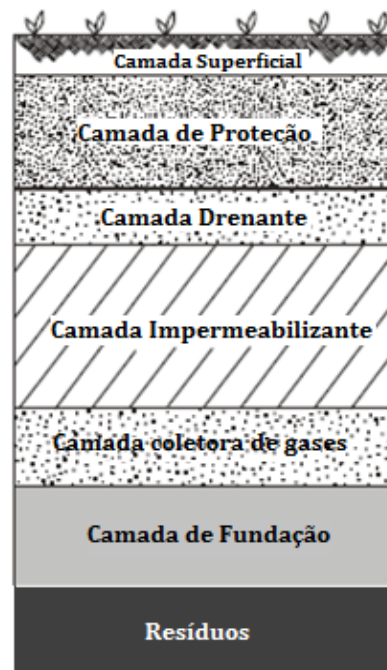


Figura 2.2 Componentes típicos de uma camada de cobertura
Modificada de US. EPA, 2004

2.2.5 ESTAÇÃO PARA TRATAMENTO DO LIXIVIADO

Esta estação tem a função de atenuar ou eliminar os impactos ambientais que podem ser causados pelo lixiviado que tem um elevado potencial poluente e é altamente tóxico se lança do diretamente no ambiente (CONDER, 2014).

As técnicas aplicadas no tratamento dos lixiviados são semelhantes às usadas nas águas residuais: lagoas anaeróbias, facultativas, reatores, digestores, etc. Para os aterros, são usadas com mais frequência lagoas anaeróbias, onde a eliminação da carga orgânica do lixiviado consegue-se pela ação de micro-organismos, fungos ou bactérias. Depois de retido o líquido na lagoa (tempo de detenção) deve ser capaz de ser lançado para os corpos d'água, reduzindo drasticamente o seu potencial de poluição.

2.2.6 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E LENÇÓIS FREÁTICOS

Este sistema destina-se a manter a qualidade dos corpos de água localizados na área de influência do aterro. Este sistema irá garantir que durante o período de operação, e também após seu encerramento, seja possível realizar o monitoramento da qualidade da água de todos os córregos em torno do aterro e das águas subterrâneas que estão sob o aterro (CONDER, 2014).

2.2.7 SISTEMA DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

Este sistema serve para permitir a drenagem apropriada da água de chuva, que se não fosse descartado corretamente, infiltraria nas células do aterro e aumentaria a produção de lixiviado, aumentando também a instabilidade do maciço de resíduos devido à grande quantidade de água retida.

2.2.8 CAMADA VEGETAL

Esta última camada tem a função de promover uma boa condição estética e também minimizar os efeitos da erosão causada pela chuva e o vento, permitindo o crescimento da vegetação e facilitando a evapotranspiração, é geralmente constituída por gramado e vegetação de pequeno porte (COSTA, 2015).

2.3 ESPECIFICAÇÕES PARA A CAMADA DE COBERTURA

Os tipos mais comuns de “liners” de cobertura são construídos com solo natural com significativo teor de argila e, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos, classificado como: CL, CH, SC ou OH, segundo Daniel (1993), os requisitos recomendados para alcançar uma condutividade hidráulica adequada ($\leq 10^{-9}$ m/s) são:

- Porcentagem de finos $\geq 20\%$, ideal $\geq 30\%$;
- Porcentagem de pedregulhos $\leq 30\%$;
- Índice de plasticidade $\geq 7\%$, ideal $\geq 10\%$;
- Tamanho máximo de partícula: ≤ 50 mm, idealmente ≤ 25 mm;
- $W_L \geq 30\%$;
- $\text{pH} \geq 7$.

Se essas características não correspondem ao solo local, os materiais podem ser compostos com argilas comerciais como a bentonita (PROSAB, 2003).

2.4 PANORAMA DOS RCC COMO COMPÓSITO GRANULAR

No que diz respeito à disponibilidade dos RCC, observa-se que a quantidade deste tipo de resíduos cresce a cada dia. De acordo com a última pesquisa da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013), a coleta de RCC no Brasil está acima dos 42,86 milhões est/ano, com um índice de coleta de 0,584 kg/hab./dia. Destaca-se que esse estudo só considera os resíduos coletados pelos municípios, isto é gerado pelas obras de sua responsabilidade e os lançados em logradouros públicos. Embora estes registros sejam confiáveis do ponto de vista da produção dos municípios, eles não representam o total de RCC gerado. A comparação entre os dados de RCC coletado em 2012 e 2013 resulta na constatação de um aumento de mais de 4,6% (Figura 2.3).

Analisando as características físicas de um agregado reciclado miúdo proveniente do beneficiamento do entulho da cidade do Rio de Janeiro, Barros (2005) verificou que este resíduo apresentou um comportamento típico de um solo granular com: $\gamma_{dm\acute{a}x}=1,93\text{g/cm}^3$, $w_{\acute{o}t}=13,5\%$, índice de vazios (e) 0,39; ângulo de atrito (ϕ) de 26° a 47° ; coeficiente de permeabilidade saturada (k_{sat}) na ordem de 10^{-7} m/s, podendo atingir 10^{-14} m/s na condição não saturada para uma sucção de 200 kPa. O autor concluiu que o material era erodível e facilmente desagregável como resultado do ensaio de desagregação e não dispersivo, como resultado do

ensaio de “*Crumb Test*”. Observou ainda que este material tende a apresentar um potencial de aplicação nas diferentes camadas de cobertura de aterros de resíduos, principalmente nas regiões de clima árido e semi-árido.

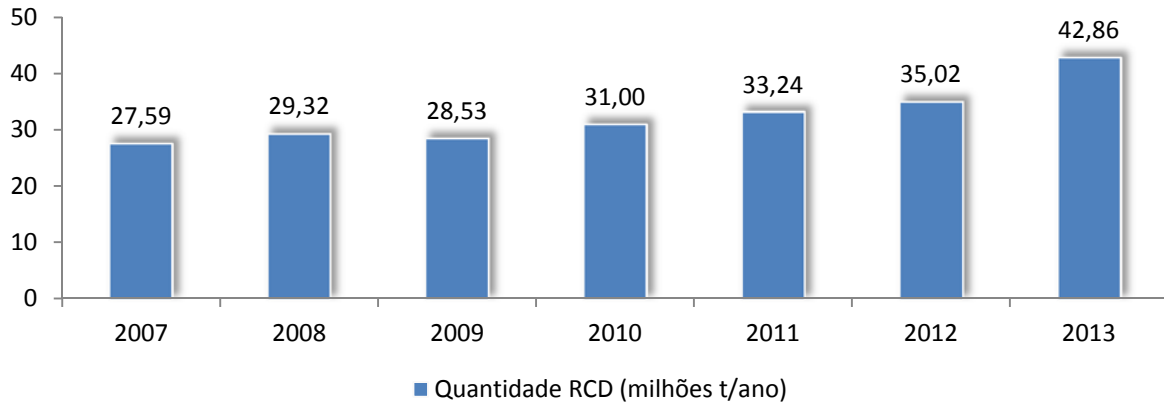


Figura 2.3 Coleta de RCC no Brasil
Fonte: ABRELPE, (2013)

Affonso (2005), utilizando agregados reciclados de granulometria nas faixas de brita de 1 a 4, realizou a caracterização destes RCC com vistas ao seu reaproveitamento como material de construção de camadas drenantes, especialmente em aterros sanitários. O programa experimental constou de ensaios de granulometria, permeabilidade horizontal e vertical e ensaio de compressão confinada. A permeabilidade vertical média à água foi da ordem de $8,0 \times 10^{-2}$ m/s, e a horizontal da ordem de $2,5 \times 10^{-2}$ m/s. O ensaio mecânico mostrou que este material tem um módulo médio de $E = 8,9 \times 10^4$ kPa 10 vezes menor do que o valor obtido para brita Nº 1 ($E = 8,3 \times 10^5$ kPa). Comparativamente, este valor indica uma deformação aproximada 12% em um aterro com 100 metros de altura sem alterar significativamente o valor da permeabilidade.

2.5 USO DE MISTURAS ALTERNATIVAS PARA COBERTURAS DE ATERROS SANITÁRIOS

Lukiantchuki (2007) realizou ensaios de condutividade hidráulica e resistência ao cisalhamento em misturas de um solo areno-argiloso com porcentagens de bentonita de 3%, 5%, 7%, as quais apresentaram valores dentro dos especificados para a construção de barreiras impermeáveis para as porcentagens de 5% e 7%. Além disso, este autor cita que, em acordo

com o trabalho de Rowe (2000), a proporção ótima de bentonita adicionada para este tipo de uso encontra-se entre 4% e 10%.

Heineck (2002), em ensaios realizados com misturas de areia e dois tipos de bentonita, concluiu que a resistência ao cisalhamento das misturas areia-bentonita sódica é aproximadamente a metade da resistência quando comparadas com as misturas areia-bentonita cálcica, encontrando interceptos coesivos de 6 kPa e 5,8 kPa e ângulos de atrito 12° e 21°, respectivamente.

Segundo Brandl (1992), citado por Lukiantchuki (2007), são observadas maiores alterações físico-químicas e mineralógicas devidas à percolação de fluidos químicos na montmorilonita sódica, decrescendo para a bentonita cálcica, illita e caulinita.

Na pesquisa feita por Khera (1995), citada por Lukiantchuki (2007), foi observado que a expansão livre da bentonita é afetada fortemente pelo pH, principalmente para a bentonita sódica; o maior potencial de expansão desta argila encontra-se em um meio com pH de 8; a redução da expansão, ocasionada pela redução do pH, indica também uma redução da dupla camada de íons, o que por sua vez, aumenta a condutividade hidráulica. Assim, considerando que o pH em um meio contaminado pode variar muito, a possibilidade do aumento da condutividade hidráulica em aterros contendo bentonita sódica é muito grande.

2.6 RESSECAMENTO E FISSURAÇÃO DE SOLOS

A formação de fissuras por ressecamento na superfície de uma cobertura é um fenômeno natural causado pela perda de umidade que pode afetar significativamente suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Devido à complexidade dos materiais presentes nos aterros, o fenômeno é influenciado por muitas variáveis como: composição mineralógica, sucção, umidade relativa e temperatura do ar, espessura das camadas, as condições de contorno, entre outras (TANG *et al.*, 2011).

Num solo submetido a condições de ressecamento, a resistência à tração determina o início da fissuração. Desta forma, quando as forças de tensão excedem a resistência à tração do solo, a propagação das fissuras é regida por sua capacidade de dissipar as energias e pelo estado de tensão existente no interior do solo. Essa resistência depende do teor de umidade do solo e das condições de sucção (LAKSHMIKANTHA, 2009).

2.6.1 ESTUDOS DA MORFOLOGIA E EVOLUÇÃO DE FISSURAS

Este tipo de estudo visa descrever as características geométricas ou morfológicas das fissuras presentes no solo, tais como o seu comprimento, profundidade, inclinação, abertura, quebra de padrão observado em planta e em profundidade, fendas por atrito, etc. Também é para identificar a evolução de tais características morfológicas.

Em conformidade com a escala de avaliação pode-se distinguir quatro tipos de estudos: Na escala macro são feitos estudos de identificação das fissuras *in-situ*, algumas delas de tipo regional, incluindo a caracterização das fissuras com comprimentos de até vários quilômetros (HOLZER, 1984; TREJO e MARTÍNEZ, 1991) ou estudos mais pontoais em fissuras na ordem dos metros ou dezenas de metros (por exemplo: JUAREZ e RICO, 1969; BLIGHT, 1971; OROZCO e FIGUEROA, 1991; MURILLO *et al.*, 1991). A caracterização morfológica das fissuras é usada para propor hipóteses sobre as causas e a evolução do problema.

Os estudos em nível intermediário correspondem aos campos de teste de solo natural, nos quais a instrumentação é instalada para controlar as variáveis meteorológicas como as condições de umidade, a sucção e a deformação que estão ocorrendo no solo. Este tipo de estudo permite conhecer as condições de início da fissuração e os processos de avanço da mesma em um local específico de interesse (KONRAD e AYAD, 1997; FUJIYASU *et al.*, 2000).

Na escala de maior detalhe encontram-se os estudos em lixões ou tanques devidamente instrumentados (DRUMM *et al.*, 1997; MILLER *et al.*, 1998; YESILLER *et al.*, 2000; RODRIGUEZ, 2002) e ensaios de laboratório em amostras que passam por dessecação, onde além da morfologia das fissuras superficiais são avaliados os efeitos das condições de fluxo das fissuras através do solo (LAKSHMIKANTHA, 2009; COSTA, 2015).

No nível microscópico, existem diversas investigações sobre a estrutura e a fábrica de argilas (COLLINS e MCGOWN, 1974; GRABOWSCA-OLSZEWSKA *et al.*, 1984; MITCHELL, 1993; ROMERO, 1999). Sobre a micro fissuração produzida pela fissuração devido a dessecação do solo há poucas referências. Os principais estudos encontrados são aqueles de Ávila (2004) e Lakshmikantha (2009), embora haja também outros estudos sobre micro fissuração de argilas induzidas por deformação por cisalhamento (MORGENSTERN e TCHALENKO, 1967) e vários estudos de micro fissuração em outros materiais como concreto, aço e outras misturas (BISSCHOP e VAN MIER, 1999; BROEK, 1986). Deve ser dito que a

pesquisa sobre micro fissuração de lama por desidratação é considerada de grande importância para compreender o fenômeno para outras escalas (CUADRADO, 2013).

As causas que produzem as fissuras e os seus mecanismos são muito complexos devido à interação de inúmeros fatores, mas é um aspecto importante, deve-se então, caracterizar ou encontrar as semelhanças entre o que aparenta ser aleatório, mas o que na verdade pode constituir um padrão único de fissuração.

Caracterizar os padrões de fissuração tem muita importância em diferentes campos da ciência e da tecnologia. Na mecânica dos solos, seu tamanho, forma e rugosidade evidenciam tensões e deformações impostas ao solo, que são levadas em consideração em estudos de estabilidade. Na agricultura, por exemplo, o estudo dos padrões de fissuração ajuda a determinar diferentes tratamentos do solo com consequências nas colheitas.

Os padrões de fissuração agem como um indicador do estado da estrutura dos solos. Neste sentido, se os padrões de fissuras diferem entre os diferentes tratamentos do solo, significa que outras propriedades do solo são provavelmente suscetíveis de mudar.

A observação de padrões de fissuração em materiais diferentes tende a indicar aparente semelhança geométrica entre estes padrões sobre uma vasta gama de escalas, desde a micro até a quilométrica. Essas semelhanças sugerem que há algum mecanismo universal de fissuração e, conseqüentemente, que os detalhes microscópicos podem não ser de vital importância.

Existe uma relação entre parâmetros macroscópicos de um padrão típico de fissuração como largura, profundidade e espessura da trinca do solo ressecado. A espessura e o tamanho da fissura parecem aumentar com a espessura na área do solo que é seca (CORTE e HIGASHI, 1960; CUADRADO, 2013). Curiosamente, um fenômeno similar foi publicado em grande escala por Vogt (1974), o qual mostrou que as distâncias entre as fraturas na litosfera da terra causam os vulcões, e elas são praticamente igual à espessura da camada da litosfera (LAKSHMIKANTHA, 2009).

2.6.2 ESTUDOS DE FISSURAÇÃO ASSOCIADOS A PROBLEMAS LOCAIS ESPECÍFICOS

Nestes casos, as fissuras são estudadas como um efeito colateral associado com um problema específico do local. Dentre os estudos desta natureza podem ser considerados os produzidos pela subsidência da terra, aqueles produzidos pelo efeito do crescimento das árvores (raízes) e aqueles gerados por eventos sísmicos ou vulcânicos. No caso da fissuração produzida

pela subsidência, a principal causa é a dessecação por extração de águas subterrâneas, mas também em algumas ocasiões a presença de estruturas geológicas profundas tais como contatos litológicos em áreas que sofrem de subsidência, gerando deformação não uniforme que aparece superficialmente como descontinuidades, passos e fissuras ou falhas. Estudos sobre este assunto estão intimamente relacionados com a avaliação morfológica de fissuras a nível regional (CUADRADO, 2013).

Os estudos de deformação e fissuração do solo produzido pela presença de árvores são relativamente abundantes, principalmente pelos danos dispendiosos e comuns que ocorrem em estruturas vizinhas a eles. Os tipos de estudos incluem padrões de dessecação nas proximidades de árvores (BIDDLE, 1983), características de evapotranspiração de algumas espécies e seus efeitos sobre as deformações (WILLIAMS e PIDGEON, 1983; RAVINA, 1983), as relações entre a presença de árvores e a deterioro das estruturas dos solos (DRISCOLL, 1983; HOLTZ, 1983; RICHARDS *et al.*, 1983; ALONSO e LLORET, 1995).

As fissuras causadas por terremotos foram relatadas em muitos casos, seu estudo é usado para avaliar as características e a intensidade dos eventos, sendo um tema de interesse em engenharia sísmica. As fissuras causadas por eventos vulcânicos também tem sido causa de estudo, porque eles dão a indicação das características dos fluxos e materiais que os compõem, também é essencial considerá-los em mapas de risco vulcânico. Suas dimensões são variáveis, por exemplo, os levantamentos da morfologia do vulcão Bandai, no Japão, que fez sua última erupção em 1888, são relatadas fissuras entre 200 m e 2 km de comprimento, estendendo-se verticalmente, com profundidades entre 2 e 7 m (SEKIGUCHI *et al.*, 1997).

2.6.3 VARIÁVEIS INDIVIDUAIS ENVOLVIDAS NA FISSURAÇÃO DOS SOLOS

Estes estudos são muito específicos e apresentam-se em nível de pesquisa. Baseiam-se na avaliação das propriedades mecânicas e hidráulicas envolvidas na ruptura da estruturado solo. Isso inclui pesquisas sobre características de expansão e retração, estudos de resistência à tração e mecânica da fratura, por exemplo.

Em relação aos estudos de retração e expansão, existem atualmente modelos conceituais que envolvem técnicas experimentais e numéricas desenvolvidas a partir da mecânica dos solos não saturados, onde a sucção é incluída como uma das variáveis importantes que regem o fenômeno (LLORET e ALONSO, 1980 e 1985; GILI e ALONSO, 1988; ALONSO *et al.*, 1990; GENS e ALONSO, 1992; MARINHO, 1994; OLIVELLA *et al.*, 1995; ROMERO,

1999).

Esses modelos e técnicas em geral foram desenvolvidos para meios contínuos, portanto só permitem avaliar condições de fissuração ou as condições dos blocos individuais que têm sido fissurados, os quais dispõem de descontinuidades internas. No entanto, nos últimos anos foram desenvolvidos alguns trabalhos que tentam encontrar padrões de fissuração incorporando a teoria da mecânica de fratura e resistência à tração e, portanto, a sucção, como variáveis-chave que regem o fenômeno da fissuração (ÁVILA, 2004; LAKSHMIKANTHA, 2009).

Estudos da mecânica da fratura elástica linear (MFLE) aplicado à fissuração dos solos, não são muitos, embora nos últimos anos tenham mostrado que esta abordagem é promissora para entender os mecanismos de fissuração e em particular para avaliar as condições da extensão das fissuras, portanto começaram algumas pesquisas sistemáticas (KONRAD e AYAD, 1997; STURE *et al.*, 1999; KONRAD e CUMMINGS, 2001; ÁVILA *et al.*, 2004).

2.6.4 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DOS SOLOS

Resistência à tração é um parâmetro que caracteriza o comportamento coeso de materiais formados por agregados de partículas e é um indicador da capacidade de tais materiais para suportar uma tensão externa de tração sem romper (LU *et al.*, 2009). Portanto, o processo de fissuração do solo inicia no momento em que o solo perde a sua resistência à tração.

Em solos secos ou totalmente saturados, resistência à tração é frequentemente considerada como uma constante do material ou parte da resistência ao cisalhamento. No entanto, em solos não saturados, a resistência à tração não é constante e seu comportamento depende do grau de saturação ou valor de sucção. Esse comportamento é variável em relação ao grau de saturação, juntamente com o conceito generalizado de que a resistência à tração é muito menor do que a resistência à compressão (CUADRADO, 2013).

Desde os primeiros estudos até cerca de uma década atrás, considerou-se a resistência à tração como a máxima força de tração (T_{max}) por unidade de área transversal de material agindo num plano perpendicular à direção em que a tensão é aplicada. Em outras palavras, o valor de tração uniaxial (PIETSCH *et al.*, 1969; SCHUBERT, 1974).

No entanto, outros autores consideram a resistência à tração, como o possível intervalo de valores de tensão negativa que se estende desde o valor da sucção no solo, considera-se o valor de tração isotrópico, até o valor de tensão de tração uniaxial (de acordo com os sinais padrão usados em mecânica dos solos, a tração é positiva e a compressão é negativa), isto é mostrado

na Figura 2.4 (AVILA 2004; LU *et al.*, 2009).

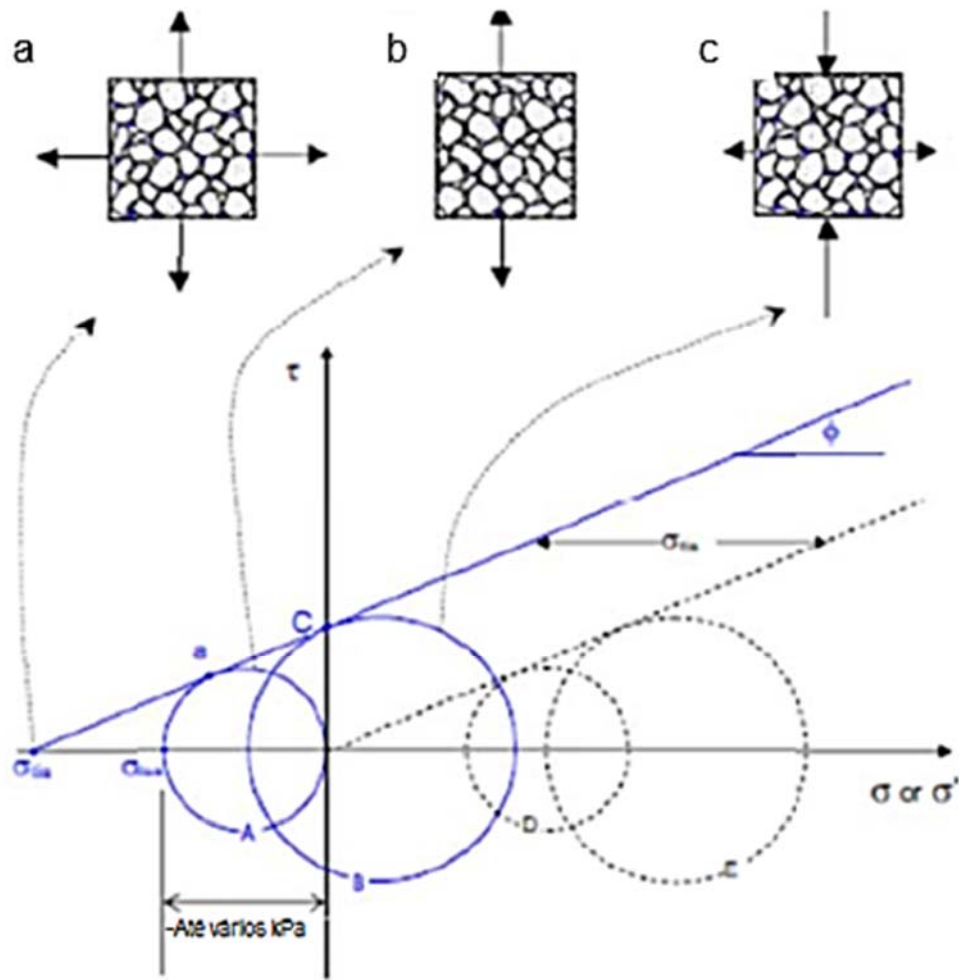


Figura 2.4 Diferentes estados de tensão: a) Tensão isotrópica de tração, b) Tração uniaxial, c) Coesão aparente (LU *et al.*, 2009)

Atualmente se considera que a definição referida à resistência à tração, entendida como uma faixa de tensões, sendo mais exato para descrever todas as possíveis tensões de tração que ocorrem no solo sem a existência de tensões de compressão, esta consideração permite introduzir o caráter de efeito de atrito do solo no comportamento de tração, quando as tensões aplicadas estão perto do eixo vertical τ (Tensões de cisalhamento) (CUADRADO, 2013).

Os mecanismos que contribuem para a resistência à tração podem ser identificados por meio da análise da curva de retenção do solo. Tal curva reflete a função constitutiva entre a sucção (ou também chamada pressão capilar) e o grau de saturação (ou teor de umidade). Em geral, essa curva pode ser dividida em três estados: pendular, funicular e capilar como mostrado na Figura 2.5, onde a relação qualitativa entre a curva de retenção e a resistência à tração para

cada estado pode ser observada (LU, WU e TAN, 2007).

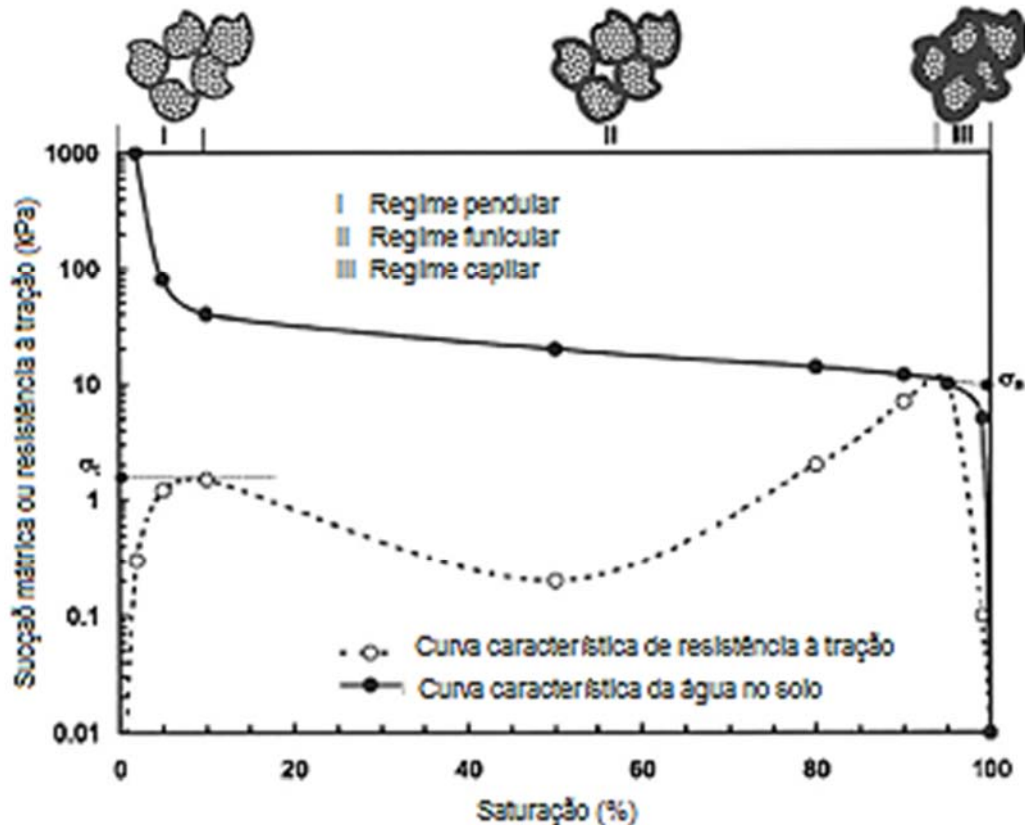


Figura 2.5 Esquema dos três estados da água no solo não saturado e da tensão de tração de acordo com a curva de retenção (LU, WU e TAN, 2007)

Observam-se na Figura 2.5 os mecanismos que contribuem para a resistência à tração, aqui entendida como tensão uniaxial, em cada estado podem ter diferenças notáveis. Para um estado pendular (I), tem-se um solo distante do solo com a saturação máxima e a força de atração é apenas limitada a pontes de união através da fase líquida entre cada par de partículas. No estado capilar (III), todos os poros são praticamente preenchidos com água, mas com pressão negativa e, portanto, forças de união devidas à sucção agindo de forma tridimensional ao conectar as partículas em um volume de solo. O estado funicular (II) é considerado um estado intermediário entre o pendular e o capilar. O grau de saturação para os intervalos de estado pendulares varia entre 0% e 20%, entre 20% e 90% para o estado funicular e acima de 90% para o estado capilar (SCHUBERT, 1974; LU, WU e TAN, 2007; PIERRAT e CARAM, 1997).

Como mostrado na Figura 2.5, a máxima resistência à tração encontra-se no estado funicular com graus de saturação próximos ao grau de saturação capilar, que é o caso das areias.

A curva de resistência à tração parece variar em cada estado e sua lei ainda está para ser descoberta. No entanto, pesquisas recentes parecem indicar que o pico de resistência à tração na areia fica perto do estado capilar, sendo capaz de se mover para o estado funicular nas argilas (CUADRADO, 2013).

Em um meio granular como o solo, o esforço de tração é o resultado de várias forças físicas e químicas tais como: 1) as forças de atração de Van der Waals; 2) as forças de repulsão ou atração elétrica devido à dupla camada; 3) cimentação devido à precipitação do soluto; 4) tensão capilar devida a pressão negativa de água nos poros e 5) tensão capilar devida à tensão superficial. As quatro primeiras forças entre partículas podem existir em solos saturados ou não saturados, mas é mais comum que elas se revelem em solos de grãos finos como as argilas. As duas últimas forças só são produzidas em condições não saturadas e tendem a ter um caráter predominante acima das outras forças, quando se trata de caracterizar o solo (CUADRADO, 2013).

Além disso, a distribuição de poros no solo tende a afetar o comportamento do solo especialmente em um sistema de tensões de tração. Estas tensões concentram-se nas extremidades das fissuras e propagam-se quando a tensão excede a resistência à tração do solo, que leva à ruptura do tipo frágil. De acordo com Lars, Schojonninge Bev (2002), a concentração de tensão aumenta com o aumento do comprimento e espessura das fissuras. Portanto, a concentração de tensão diminui a resistência à tração quando se tem maior continuidade nos poros, enquanto que a maior tortuosidade e descontinuidade dos poros aumenta a resistência à tração. Outros autores (HEIBROCK, ZEH e WITT, 2005; PIERRAT e CARAM, 1997) estudaram a variação da resistência à tração em amostras de solo com índice de poros diferentes preparadas em laboratório. O resultado é que, para amostras compactadas a resistência à tração é superior do que em amostras onde a distribuição de poros é variável ao longo da amostra, mesmo mantendo o mesmo índice global de poros. Entretanto, os resultados obtidos apresentam-se dispersos e não foi, portanto, clara a quantificação do efeito da distribuição dos poros no valor da resistência à tração.

2.6.5 TENACIDADE À FRATURA

Fissuração em solos não saturados é um processo complexo em que a resistência à tração determina o início do processo, enquanto a propagação de fissuras parece ser um processo onde os conceitos de mecânica da fratura são importantes na avaliação da evolução

das fissuras e determinação da propagação de fissuras (BROEK, 1986). BROEK (1986) afirmou que uma fissura em um sólido pode ser submetida ao estresse em três diferentes modos, sendo detalhado a seguir e evidenciados na Figura 2.6:

- Modo I ou de abertura: a fissura abre devido à aplicação de tensão normal ao plano de falha.
- Modo II ou deslizante: a fissura abre devido à aplicação da tensão de cisalhamento no plano da fratura, são produzidos movimentos longitudinais das superfícies neste plano.
- Modo III ou de ruptura transversal: corresponde ao deslocamento da superfície de ruptura em direções opostas, devido à aplicação da tensão de cisalhamento em planos diferentes ao plano da fratura.

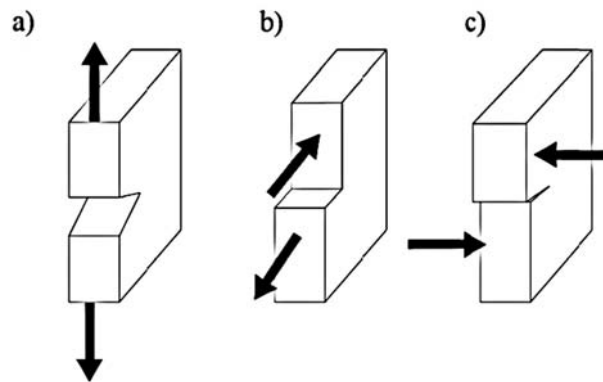


Figura 2.6 Modos de fissuração: a) Modo I; b) Modo II; c) Modo III (BROEK, 1986)

Baseado nestes três modos, a mecânica da fratura elástica linear (LEFM) parece ser a teoria mais adequada para explicar o modo de fissuração, o que é o mais comum nas fissuras de argilas por dissecação. Em termos simples, a formulação de energia da mecânica da fratura compara a energia disponível para a propagação de uma fissura em uma estrutura com a energia necessária para produzir a sua fissuração (CUADRADO, 2013).

2.6.6 MODELOS DE INÍCIO, PROPAGAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE FISSURAS

Estes modelos podem ser agrupados em três categorias:

- Modelos físicos unidimensionais de início e propagação de fissuras.
- Modelos físicos de distribuição espacial das fissuras.
- Modelos de distribuição espacial probabilística das fissuras.

Os dois primeiros modelos procuram determinar sob que condições uma fissura começa a

aprofundar, onde e qual será a distância entre duas ou mais das fissuras que se formam. Os modelos probabilísticos destinam-se a simular mecanismos para início e propagação de múltiplas fissuras em múltiplas direções. Estes modelos utilizam algoritmos para o crescimento e interação das fissuras baseado nos padrões de fissuração observados em amostras de laboratório e *in situ*, em diferentes tipos de solo, os quais são relativamente semelhantes aos resultados da condição real. Dentro desta categoria podem-se encontrar modelos do tipo bidimensional (MORAN e MCBRATNEY, 1997; HORGAN e YOUNG, 2000) e do tipo tridimensional (CHERTKOV e RAVINA, 1998).

Considerando a grande dificuldade que representa prever as condições reais da fissuração com modelos puramente físicos para os casos bidimensional e tridimensional, os métodos probabilísticos fornecem uma possibilidade interessante de se aproximar do ponto de vista prático. No entanto, o problema é que não levam em conta, explicitamente, as variáveis importantes envolvidas na quebra do solo, como as características de retração, resistência a tração, nem a mecânica da fratura. Provavelmente um modelo combinado seria muito mais bem aplicado, mas isso requer uma pesquisa mais detalhada destas variáveis (CUADRADO, 2013).

Existem vários modelos que buscam interpretar e simular o início dos processos de fissuração, calcular a profundidade máxima das fissuras e estimar a separação ou distância entre elas. Alguns deles representam de forma geral a imagem atual do estado de conhecimento sobre o tema, destacando os modelos de Lee, Loet *al.*, 1988; Morris, Graham *et al.*, 1992; Abu-Hejlehe Znidarcic, 1995; e Konrade Ayad, 1997. É importante mencionar que, antes destes modelos gerais, existiam várias propostas e formulações anteriores sobre os mecanismos que regem a fissuração em argilas e que serviu de base para as pesquisas mais recentemente desenvolvidas, como por exemplo as formulações de Baker (1981).

2.6.7 ESTUDOS DO COMPORTAMENTO DE SOLOS FISSURADOS

Nestes casos, tem-se estudado os efeitos das fissuras nas propriedades mecânicas e hidráulicas do solo, sem que o interesse principal seja explorar as causas de tais fissuras. Dentro desta abordagem geral podem-se distinguir dois tipos de estudos: aqueles que têm relação direta com a alteração das propriedades hidromecânicas, tais como a resistência ao cisalhamento, permeabilidade e a deformabilidade e aqueles que têm a ver com o fluxo que surge através das fissuras. A Tabela 2.1 mostra um resumo do estado atual do conhecimento da fissuração do solo (ÁVILA, 2004).

Tabela 2.1 Resumo do estado do conhecimento sobre fissuração dos solos (ÁVILA, 2004)

Abordagem geral (descrição)	Tipos de estudo	Aplicações	Estado do conhecimento
Estudos da morfologia e evolução das fissuras (características geométricas, como são: comprimento, profundidade, inclinação, padrão de abertura, etc. alterações morfológicas também são indicados no tempo)	Identificação de fissuras in-situ	Permite identificar as características e magnitude do problema local ou regional e levantar hipóteses sobre as suas possíveis causas e evolução	A observação da superfície de trincamento é fácil de determinar, mas a sua abertura, a sua profundidade e orientação são difíceis de determinar <i>in situ</i>
	Campos de teste instrumentados	Permitem conhecer com boa precisão a evolução morfológica das fissuras e relacionar elas com as variáveis medidas	Nos poucos estudos existentes já conseguiu-se identificar as condições do início e evolução das fissuras e esta informação tem sido usada para calibrar alguns modelos
	Estudos em amostras de laboratório e em lixões	O efeito de diferentes variáveis envolvidas pode ser analisado de uma maneira sistemática como: umidade, densidade, geometria, umidade relativa, temperatura, etc.	Estudos de caracterização com amostras que são sujeitas a dessecação e são controladas as suas variáveis mais importantes. Testes semelhantes foram feitos em aterros sanitários especiais para avaliar os efeitos da fissuração no fluxo
	Estudos de micro fissuração	Ajuda a identificar mecanismos de início e propagação de fissuras em relação com a sua micro estrutura	Existem estudos de micro fissuração por cisalhamento direto mas não por tração. Existem vários estudos ao respeito em outros materiais como concreto e aço
Estudo da fissuração associada a problemas locais específicos. As fissuras são estudadas como um efeito secundário associado a fenómenos locais.	Fissuração por subsidência	O seu estudo se relaciona com as grandes deformações por adensamento do terreno e em geral associa-se à extração da água subterrânea e a condições geológicas locais	São estudos de carácter regional relacionados a grandes deformações devido à adensamento da terra e em geral estão associados com a extração de águas subterrâneas e as condições hidrogeológicas locais
	Fissuras pela presença de árvores	Aplica-se muito para identificar causas de deterioração em obras civis e projetar medidas correctivas	Há boas informações sobre estudos de caso, mas falta profundidade nos estudos sobre mecanismos de transmissão da sucção e sua relação com a evolução das condições de trincamento
	Fissuras por eventos sísmicos ou vulcânicos	O estudo das fissuras pós-evento é importante para conhecer as características e magnitudes das mesmas	As fissuras nesses casos estão associadas com cisalhamento direto mais do que com mecanismos de tração. É o ramo de estudo da Engenharia sísmica
Estudo das variáveis individuais que intervêm na fissuração dos solos, são modelos que visam representar os mecanismos e processos de fissuração partindo da inter-relação das variáveis envolvidas. Com estes modelos tenta-se prever o comportamento sob certas condições conhecidas.	Modelos físicos unidimensionais de início e propagação de trincas	Eles procuram identificar as condições particulares do início da fissura e até qual profundidade será prolongada levando em conta as variáveis físicas citadas.	Os modelos de início da fissuração baseiam-se na resistência à tração e nas trajetórias de tensões. Os modelos de extensão das fissuras são baseados em condições de tensão, índice de poros crítico ou MF.
	Modelos físicos de distribuição espacial de trincas	Os modelos básicos procuram estimar a separação entre trincas e os mais avançados procuram a orientação e distribuição espacial de múltiplas trincas	Os modelos básicos visam estimar a distância entre as fissuras e os mais avançados da orientação espacial e da distribuição das múltiplas fissuras
	Modelos probabilísticos de distribuição espacial de trincas	A partir de certas regras com base nas propriedades gerais observadas em processos de fissuração, que teoricamente permitem modelar simulações aproximadas à condição real de fissuração, que é considerada tridimensional	De certas regras baseadas em propriedades gerais observadas em processos de trincamento, são feitas simulações que teoricamente permitem aproximar-se à condição real de fissuração, que é tridimensional
Estudo do comportamento de solos fissurados. São estudados os efeitos das trincas sobre as propriedades mecânicas e hidráulicas do solo, sem que o interesse principal seja pesquisar sobre a causa de tais trincamentos.	Estudos experimentais e numéricos na resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade do solo	Muito útil para determinar o comportamento das obras civis, para prever o efeito da fissuração no comportamento do solo e para a adoção de medidas corretivas em locais com problemas	Existem estudos sobre certos tipos de argilas, mostrando que a influência das trincas sobre a deformabilidade e a resistência ao cisalhamento é baixa se a abertura é pequena, mas aumenta com a abertura. Fluxo em solos fissurados é muito maior através das rachaduras, mesmo se aquelas são aparentemente fechadas.
	Modelos de fluxo que levam em conta o efeito da fissuração nos solos	Muito úteis em problemas ambientais, agrologicos e hidrogeológicos, também se aplicam à avaliação em obras civis como barragens e na estabilidade de encostas	Existem alguns modelos que envolvem o efeito das fissuras e sua evolução nas condições de fluxo, mas não são muito ligados com os mecanismos físicos de início e propagação de trincas.

2.6.8 O PADRÃO HIERÁRQUICO DA FISSURAÇÃO

Na natureza pode-se encontrar uma grande variedade de padrões de fissuração. Em muitos casos, fissuras ou juntas formam uma rede fechada e, portanto, faz com que ocorra a divisão de uma superfície bidimensional em domínios diferentes. Diversos processos matemáticos, biológicos, físicos ou sociais dão origem à divisão espacial em padrões bidimensionais. Um exemplo deste efeito pode ser o retículo formado pelas fissuras em camadas finas, a estrutura celular de tecidos vivos de duas dimensões, ventilação de folhas, ou a divisão de grandes áreas geográficas, por estradas, ruas ou fronteiras políticas. Estas redes possuem uma propriedade comum expressa pelo teorema de Euler, que diz que “no nível de cada domínio há, em média, seis vizinhos”. Para muitas redes celulares, sugere-se que o número médio de lados por célula é também seis (BOHN, 2004; BOHN *et al.*, 2005a).

Existe um subconjunto daquelas divisões em relação ao espaço, dividindo as redes em duas dimensões, onde a geometria requer que os domínios sejam, em média, de quatro lados. Compatível com o teorema de Euler, a média de quatro lados é o indicador da hierarquia. É o resultado de um processo de formação que pode ser descrita como a sucessiva divisão dos domínios e a ausência de qualquer reorganização (BOHN *et al.*, 2005b; BOHN *et al.*, 2005c).

Padrões espaciais em duas dimensões nem sempre se traduzem em padrões hierárquicos, um exemplo clássico é o padrão formado pelas bolhas de sabão. Enquanto o processo das divisões sucessivas em duas dimensões resulta em domínios que respondem a padrões hierárquicos em alguns casos, os padrões formados pelas bolhas de sabão são relativamente dinâmicos e instantâneos. Algumas formas/padrões mostram uma semelhança surpreendente com a espuma de sabão em duas dimensões que muitas vezes tem sido considerada como o sistema de modelo para os padrões da divisão dos espaços. A estrutura geométrica da espuma de sabão é dada pelo fenômeno de reorganização. Sendo móveis, as películas de sabão são adaptadas de forma a minimizar a sua superfície. Em condições bidimensionais, as linhas relacionadas com as películas que se formam na espuma são arcos de círculos e as interseções dos ângulos que formam são de 120° (leis de Plateau). Estes ângulos são o resultado de um equilíbrio de força quase instantânea sobre os contatos de borda (BOHN, 2004).

A Figura 2.7 resume a característica mais marcante de um padrão hierárquico de uma fissura em comparação com um padrão de espuma de sabão. O histograma mostra que a maioria das células danificadas tem quatro lados, mas a maioria destes polígonos têm seis vizinhos que

é uma característica típica de padrões hierárquicos. Mostra-se também uma comparação pictórica entre as células da espuma hexagonal com seis vizinhos e um padrão hierárquico típico de fissuração.

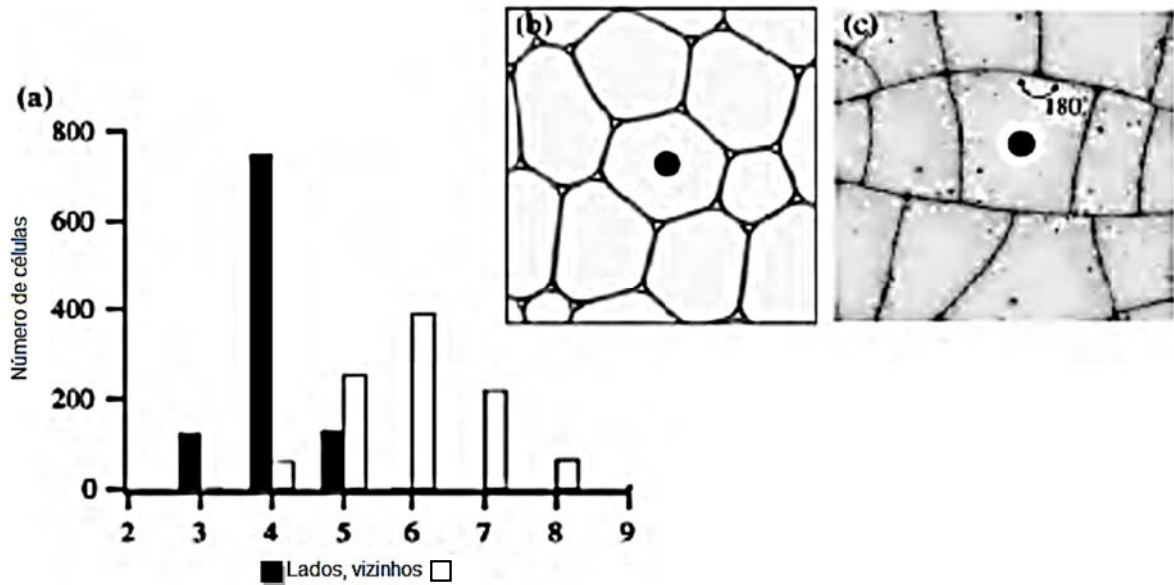


Figura 2.7 a) Histograma do número de lados (preto) e o número de vizinhos (branco) de domínios em um padrão de fissuração cerâmico; b) Célula de seis lados em espuma; c) Célula de quatro lados em um padrão de fissuração (LAKSHMIKANTHA, 2009).

2.6.9 HIERARQUIA ESPECÍFICA NA FISSURAÇÃO DO SOLO

Padrões hierárquicos são um fenômeno natural na secagem dos solos onde são formados e evoluem por alterações na resistência do material devido à sua heterogeneidade ou ser submetido a ciclos de aumento e diminuição de tensão causada por alterações ambientais sazonais.

Padrões hierárquicos são geralmente semi dinâmicos ou quase estáticos, quando é considerado em relação ao tempo decorrido desde a sua formação. Em contraste com os domínios formados em bolhas de sabão, que alcançam o equilíbrio em um período de tempo muito curto e está em constante redistribuição para manter o equilíbrio, os padrões de fissuras formando na secagem do solo alcançam o equilíbrio relativamente devagar dependendo da velocidade de secagem. Este padrão de formação não é dinâmico, já que é impossível a reordenação do domínio e normalmente o tamanho dos domínios permanece fixo no tempo.

O processo de dividir domínios normalmente segue um padrão que sugere a existência de

uma hierarquia que pode ser explicada por três importantes processos: 1. Geração de tensões acima da resistência do material; 2. Orientação da geração de tensão e 3. Redistribuição de tensões nas proximidades ou no interior do novo domínio formado. Todos estes processos podem ocorrer simultaneamente em diferentes domínios gerados.

A natureza granular dos solos é a principal causa da geração de tensões no seu interior. O sistema de 2 ou 3 fases que constitui o solo, o torna um sistema complexo no qual os pontos de fraqueza para possíveis pontos de fratura são distribuídos aleatoriamente em uma massa de solo e, por sua vez, a resistência nestes pontos varia de acordo com a evolução das fissuras ao longo do tempo. A direção destas tensões, geradas quando o solo seca e contrai em pontos aleatórios de fraqueza, rege a direção do crescimento da fissura (CUADRADO, 2013).

A existência de hierarquia na formação de fissuras tem sido referenciada a partir de alguns estudos experimentais sobre determinados materiais, como látex e outros (BHON, 2004; BHOH *et al.*, 2005b; BHOH *et al.*, 2005c). No entanto, não se fez nenhuma tentativa para mostrar o padrão de fissuração de argilas em estudos anteriores ao de Lakshmikantha (2009), no qual foram usadas amostras dos testes usados no equipamento do DETCG da UPC. Um exemplo do sistema de fissuras estudado pode ser visto na Figura 2.8.

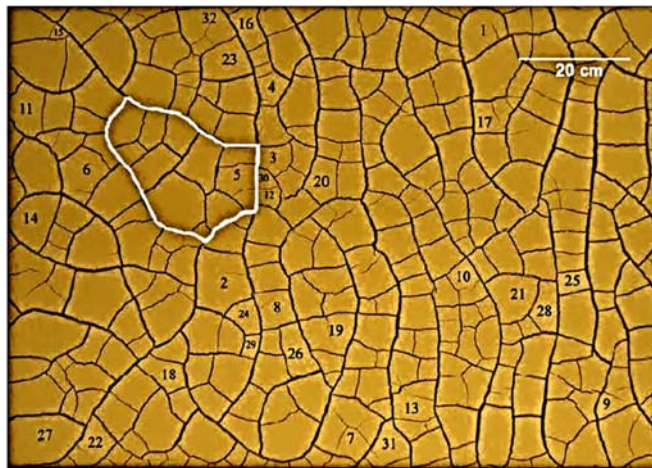


Figura 2.8 Fissuração final de uma amostra. (LAKSHMIKANTHA, 2009).

Baseada em seus ensaios, Lakshmikantha (2009) apresenta o padrão de fissuração observado em todas as amostras, sendo elas de diferentes tamanhos, espessuras e de moldagens diferentes. Em geral, Lakshmikantha (2009) fez um acompanhamento temporário de algumas das células resultantes da divisão fissurada buscando retratar os processos de divisão que

ocorriam.

Um exemplo da descrição do padrão observado por Lakshmikantha (2009) pode ser observado na Figura 2.9, que é na verdade o estudo de uma pequena porção da amostra que foi apresentada na Figura 2.8.

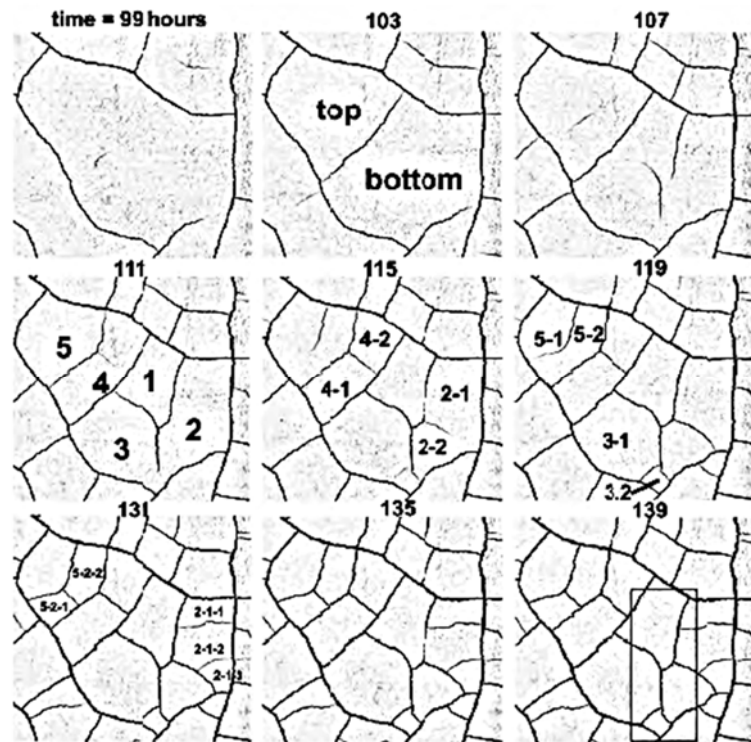


Figura 2.9 Evolução temporal da área delimitada na Figura 2.8 (LAKSHMIKANTHA, 2009).

2.6.10 ÂNGULO DE INTERSEÇÃO DAS FISSURAS

O ângulo de interseção das fissuras é um dos parâmetros mais importantes de uma rede de fissuração. Seu estudo fornece informações sobre a direção das tensões principais durante a formação e propagação da fissura individual e ajuda a entender o padrão de fissuração no conjunto (LAKSHMIKANTHA, 2009; CUADRADO, 2013).

2.6.11 FORMAÇÃO DAS JUNTAS DURANTE A FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO

Existem três tipos de juntas que se podem formar durante fissuração por ressecamento. O primeiro tipo de junta é formado quando a propagação de uma fissura intercepta uma fenda existente. O segundo tipo de junta é formado quando uma fissura é iniciada ou bifurca de uma fissura existente (LAKSHMIKANTHA, 2009; CUADRADO, 2013). Em ambos os casos, o

ângulo de interseção é aproximadamente 90° , desde que o relaxamento de tensões seja produzido na direção perpendicular à direção das fissuras e a tensão paralela à direção da fissuração só pode contribuir para a formação de uma fissura na direção perpendicular à fissura existente. O terceiro tipo de junta ocorre quando a partir do ponto inicial de fissuração, começam a ocorrer duas ou mais fissuras ao mesmo tempo. Nestes casos não seria mais um ângulo de 90° (Figura 2.10), alguns estudos mostram a predominância de ângulos de 120° (TOGA e ALACA, 2006).

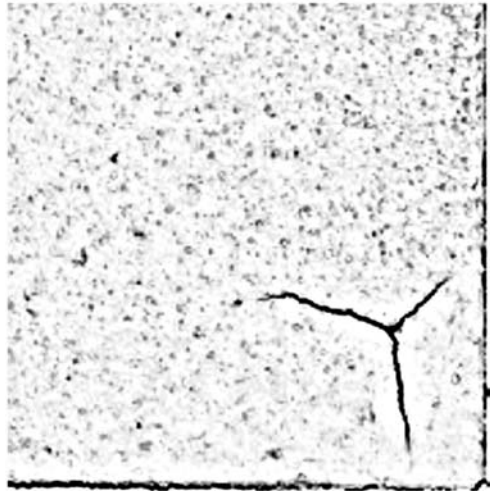


Figura 2.10 Três fissuras formadas de um mesmo ponto de partida (LAKSHMIKANTHA, 2009)

2.6.12 FISSURAS POR CONTRAÇÃO: RESSECAMENTO OU SINÉRESE?

As fissuras por contração que aparecem quando uma lama perde água podem apresentar, pelo menos, três tipos de características:

Fissuras formadas na atmosfera aberta (subaérea). Estas são fissuras muito comuns em poças de lama seca: chamado "fissuras de ressecamento", são formadas ao se evaporar a água do material. O resultado são fissuras com padrão poligonal e apresentam tipicamente forma de V na sua seção transversal de até 15 m de profundidade. Em alguns casos, podem se formar ondulações na lama acima ou abaixo das fissuras; estas ondulações podem aparecer ou desaparecer se a superfície fosse inundada.

As fissuras na lama formadas embaixo da água (sub-aquosas): a sinérese é um termo usado pelos químicos para descrever a separação do líquido de um gel. A importância deste processo em lodos e lamas tem sido conhecida por geólogos durante muitos anos. As fissuras por sinérese são formadas no fundo de alguns lagos, lagoas de sedimentação e mesmo na lama de

cal em águas marinhas rasas nas Bahamas. A perda de água é conduzida por osmose e ocorrem especialmente em lagos salinos. A menos que sejam observadas ondas de lama, essas fissuras são extremamente difíceis de distinguir das fissuras por ressecamento (CUADRADO, 2013).

As fissuras que se formam nas lamas quando estão enterradas (sub-estratigráficação), são geradas quando uma lama perde a água em estado enterrado. A água pode ser pressionada a partir da camada de lama lentamente devido à compactação que recebe da parte superior, ou é lançada rapidamente, como resultado de um terremoto. As fissuras resultantes tendem a formar um modelo poligonal, com uma forma de lente ou de lados retos na sua secção transversal. Elas podem penetrar para cima, descer ou ocorrerem duas situações ao mesmo tempo, a sinérese neste caso também pode desempenhar um papel importante em algumas fissuras sub-estratigráficas quando uma camada é diferente da outra na concentração de sal das partículas de água internas (CUADRADO, 2013).

As fissuras por dessecação podem se formar em uma variedade de ambientes e não é fácil distingui-las *in situ*. É um grande erro supor que, por padrão, as fissuras que se formam na antiga lama ou nas camadas de lodo são devidas aos períodos de secas quando é sabido que certas fissuras podem se formar nas épocas de inundação (LAKSHMIKANTHA, 2009; CUADRADO, 2013).

2.7 METODOLOGIA PARA DEFINIR CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DE SOLOS PARA CAMADAS DE COBERTURAS

A metodologia proposta Benson e Daniel (1990) foi aplicada por Daniel e Wu (1993), considerando três critérios de aceitação: condutividade hidráulica inferior a 10^{-9} m/s, retração volumétrica máxima de 4% e resistência à compressão não confinada superior a 200 kPa, que ao serem avaliados, permite a determinação das zonas aceitáveis para cada um deles. Segundo estes autores os estudos estatísticos de testes de condutividade hidráulica em grande escala e em escala real levaram à conclusão que a condutividade hidráulica em solos compactados varia diretamente em função da umidade de compactação, da massa específica seca e da energia de compactação; são estas as principais variáveis que afetam a permeabilidade.

O procedimento descrito nesta metodologia é mostrado na Figura 2.11, inicia-se com a compactação Proctor com três níveis de energia(normal, reduzido e modificado) em cinco a seis corpos de prova; determina-se a condutividade hidráulica dos corpos de prova, plotam-se os resultados da condutividade hidráulica em função do teor de umidade; plotam-se no gráfico

a massa específica x umidade de moldagem e os pontos que possuem valores de condutividade hidráulicas admissíveis (inferior a 10^{-9} m/s) e finalmente determina a zona de aceitação considerando o critério de condutividade hidráulica identificando as novas zonas admissíveis em função de outros parâmetros (índices de consistência, granulometria, pH, por exemplo).

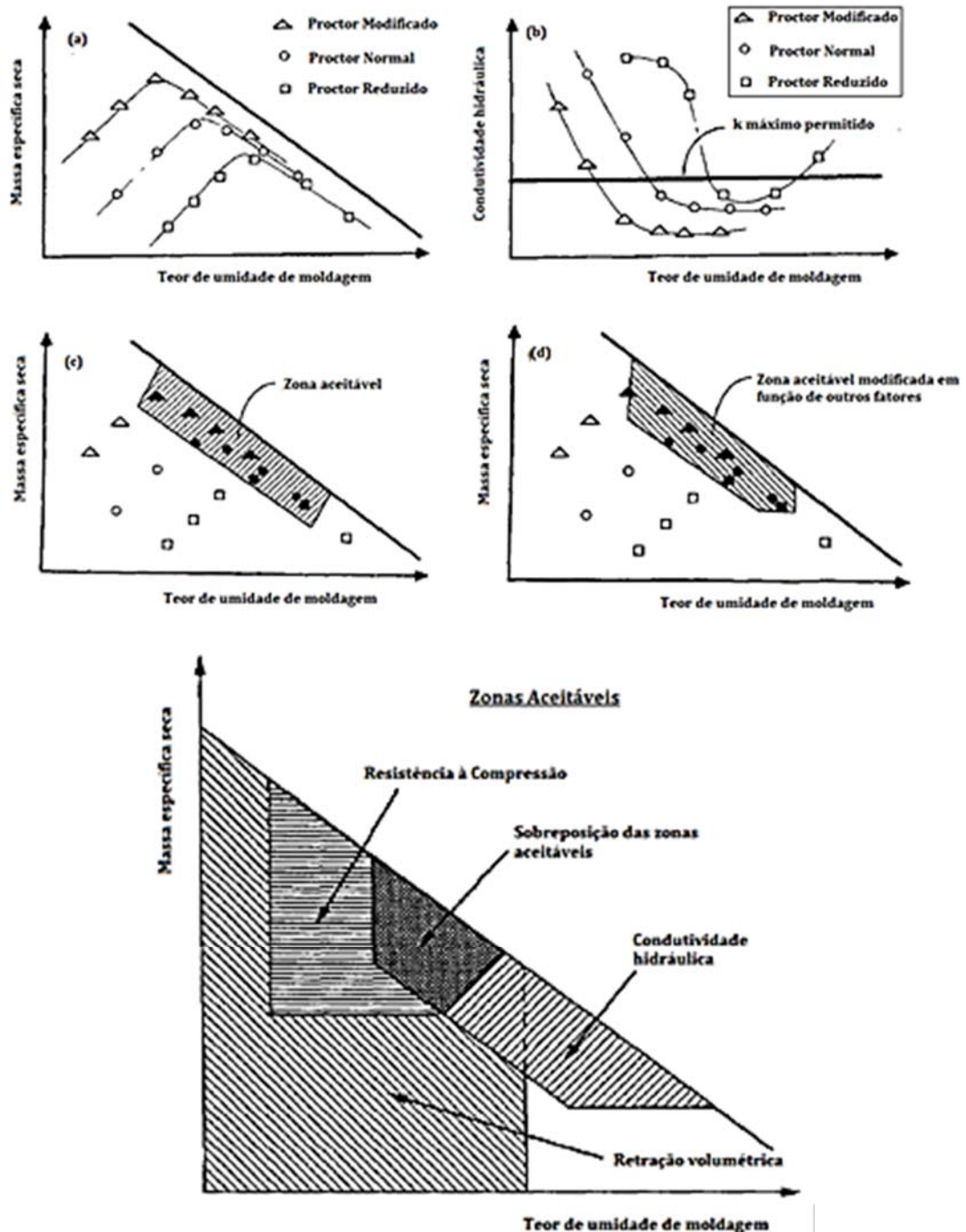


Figura 2.11 Metodologia para definir critérios de aceitação de solos para camadas de coberturas (DANIELE BENSON, 1990)

A zona admissível é representada pela combinação de valores de massa específica seca e teor de umidade, os quais garantem certos valores desejados de condutividade hidráulica, contração e resistência ao cisalhamento. A realização de alguns estudos tem mostrado que a combinação entre teor de umidade e o peso específico seco dentro da zona admissível não representa em todas as situações solos argilosos com condutividade hidráulica inferior a 1×10^{-9} m/s, mais sim para valores maiores (CAMARGO, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para ampliar o entendimento do comportamento do processo de fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos, foi proposto nesta pesquisa um programa experimental baseado na caracterização física, química e mineralógica de um resíduo de construção civil (RCC) e misturas de RCC com bentonita e os consequentes padrões de fissuração devido ao ressecamento. A metodologia de avaliação RCC seguiu a metodologia proposta por Costa (2015). É importante ressaltar que a proposta deste trabalho foi avaliar o efeito da adição de bentonita na agregação das partículas predominantemente granulares do RCC e avaliar a viabilidade técnica do uso do RCC em camadas de cobertura de aterros sanitários. Neste sentido, foram estudadas as propriedades hidráulicas e mecânicas dos compósitos RCC-bentonita e avaliado o processo de fissuração por ressecamento para os materiais isoladamente e para as diferentes misturas.

3.1 MATERIAIS SELECIONADOS PARA PESQUISA

3.1.1 RCC

Para material de natureza granular foi usado um agregado miúdo reciclado obtido a partir do beneficiamento do RCC, produzido pela empresa Areia Bela Vista, localizada na Região Administrativa de Sobradinho, Distrito Federal. Este resíduo granular, produzido comercialmente, é denominado areia rosa.

A Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, define este resíduo com os seguintes termos: “Resíduo 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”.

3.1.2 BENTONITA

Para o material argiloso foi utilizada bentonita sódica, fornecida pela empresa Soleminas Indústria e Comércio de Minerais Ltda. Localizada no estado da Paraíba.

A bentonita é uma mistura de argilas geralmente impuras de grãos muito finos, formada por alteração de cinzas vulcânicas. Consiste principalmente de montmorilonita (60% a 80%), podendo conter outras argilas em maior ou menor proporção (ilita e caulinita), além de outros minerais como quartzo, feldspato, calcita ou pirita e ferro, que fornecem características particulares de plasticidade e resistência. Os tipos mais comuns são a bentonita cálcica e a bentonita sódica. A bentonita sódica é uma argila muito pegajosa que incha quando recebe água, com um alto grau de contração e tem tendência a fraturar-se durante o aquecimento e o esfriamento (HUSE, 2007).

A bentonita sódica possui uma composição granulométrica puramente de finos (argila 86,6%, silte 13% e areia fina 0,4%), a condutividade hidráulica é da ordem de 1×10^{-10} m/s, a densidade real dos grãos é 2,78, limites de liquidez 50,56% e de plasticidade 46,3%, apresenta grande trabalhabilidade pelo elevado valor de umidade correspondente ao limite de liquidez (HUSE, 2007).

3.2 METODOLOGIA

Como metodologia da pesquisa, foi proposta a caracterização física, química, mineralógica do RCC, da bentonita e das misturas, a realização de ensaios de compactação e condutividade hidráulica. Com base nestes resultados e em acordo com a metodologia de Benson e Daniel (1990) foi possível estabelecer a porcentagem de bentonita a ser utilizada nos ensaios. Para definição destas porcentagens foram avaliados os ganhos na plasticidade e/ou limite líquido obtidos com essa adição e assim obteve-se a mistura que melhor se ajusta ou aos critérios especificados para camadas impermeabilizantes de cobertura de aterros. Um esquema dos ensaios realizados está apresentado na Figura 3.1.

Todos os ensaios realizados seguiram integralmente os procedimentos preconizados nas normas da ABNT. A Tabela 3.1 lista as normas utilizadas para a realização dos diferentes ensaios.

Tabela 3.1 Resumo normas ABNT usadas nos ensaios

Nº da Norma NBR	Nome da Norma	ABNT, ano
6457	Amostra de solos - Preparação para ensaio de caracterização e compactação	agosto, 1986
6458	Grãos de ped. retidos na # 4,8mm - determinação da massa específica aparente e da absorção de água	outubro, 1984
6459	Solo - determinação do limite de liquidez	outubro, 1984
6508	Grãos de solo que passam na # de 4,8mm determinação da massa específica	outubro, 1984
7180	Solo - Determinação do limite de Plasticidade	outubro, 1984
7181	Solos - Análise granulométrica	dezembro, 1984
7182	Solos - Ensaio de Compactação	agosto, 1986
7183	Determinação do Limite e Relação de Contração de Solo	fevereiro, 1982
9252	Solo- Determinação do grau de acidez do solo	fevereiro, 1986
14545	Solo-Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de solos argilosos a carga variável	julho, 2000
12770	Solo coesivo - Determinação da resistência a compressão não confinada	outubro, 1992

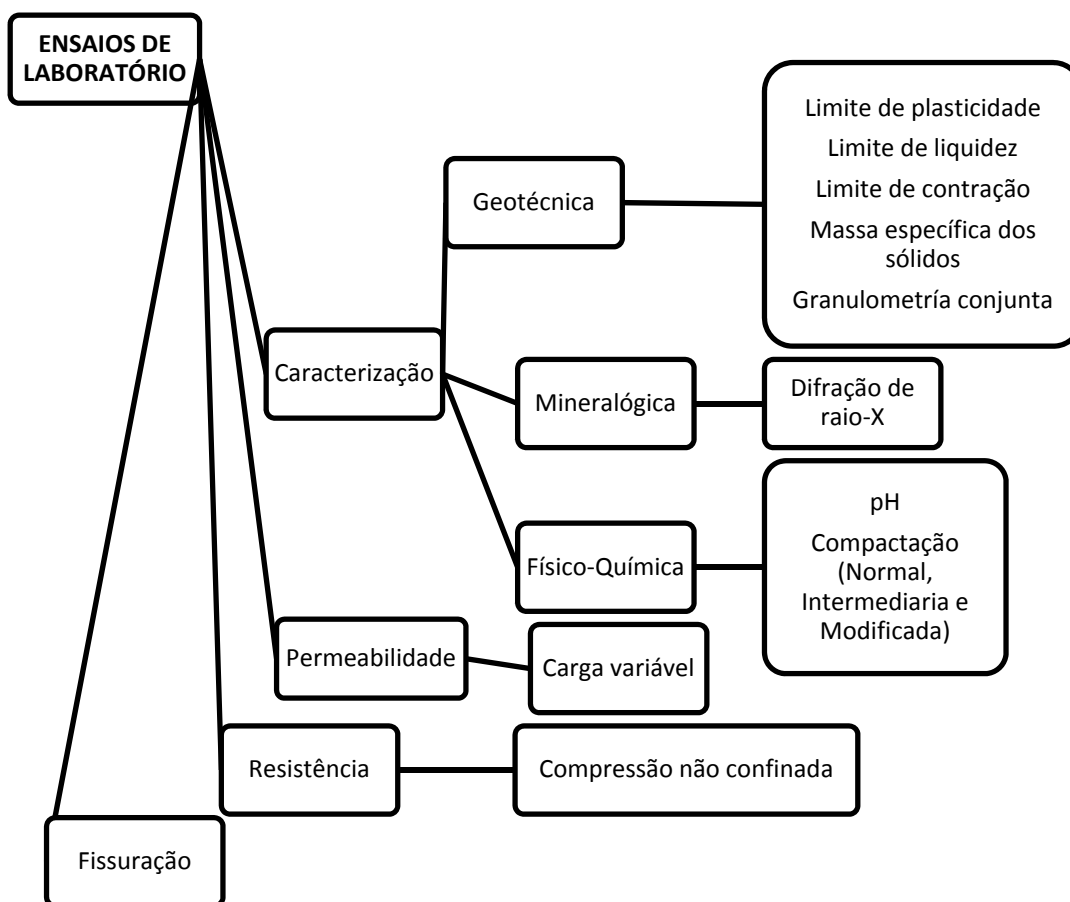


Figura 3.1 Esquema dos ensaios de laboratório.

Para a preparação das misturas foram adotados os seguintes procedimentos:

- Homogeneização do RCC na condição natural seco ao ar e passante na peneira #40 para verificar a possibilidade do uso do cilindro pequeno;
- Adição da bentonita no teor desejado em massa seca, seguido pela homogeneização manual da mistura;
- Para realização dos ensaios de compactação, permeabilidade, compressão simples e ressecamento, iniciou-se a adição da água destilada na quantidade necessária para atingir as diferentes umidades calculadas ou estimadas, seguida por uma segunda mistura e homogeneização dos materiais;
- Acondicionamento da mistura em sacos plásticos fechados e deixados em repouso por um período mínimo de 24 horas, com o intuito de se atingir a completa homogeneização na umidade dos materiais.

3.2.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Conforme visto na Figura 3.1 os ensaios de caracterização podem ser reunidos em três grupos principais: ensaios de caracterização física-química e mineralógica.

Para caracterização geotécnica foram realizados os ensaios de granulometria conjunta peneiramento e sedimentação, densidade das partículas sólidas e limites de liquidez, plasticidade e contração.

A determinação dos limites de Attemberg ou limites de consistência são um método de avaliação da natureza de solos criado por Albert Attemberg, permitem determinar a consistência de um solo e está relacionada à manifestação das forças físicas de coesão e adesão que nele atuam para vários teores de umidade. Eles fornecem indicativos dos solos quanto às suas características de plasticidade, permeabilidade e resistência. Os limites se baseiam na constatação de que um solo argiloso ocorre com aspectos distintos conforme o seu teor de umidade. Estes tipos de ensaios apresentam uma importância no sentido de buscar uma associação dos valores de umidade aos quais o solo inicia seu processo de fissuramento e contração.

Iniciaram-se os ensaios analisando misturas de RCC e bentonita em porcentagens de 2%, 3%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12%, continuou-se os ensaios acrescentando o teor de bentonita em 2% para procurar uma mistura com a plasticidade mínima recomendada para os materiais

usados nas camadas de cobertura (DANIEL e BENSON, 1990) até chegar no teor de 14% e depois foram testadas as misturas com 16% e 18% com o objetivo de verificar as mudanças das propriedades hidromecânicas dos materiais.

Para o limite de liquidez, tomou-se o material restante preparado para o ensaio de limite de plasticidade, na impossibilidade de conseguir a abertura da ranhura ou seu fechamento com mais de 25 golpes, considerou-se a amostra como não apresentando limite de liquidez (NL),

Os Limites de Liquidez e Limites de Plasticidade permitiram calcular o Índice de Plasticidade e assim obter o Índice de Atividade (IA) de Skempton, que indica o grau de influência da composição química e da mineralogia da fração argila nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso.

A atividade permite identificar a potencial expansibilidade dos solos argilosos, para se ter uma ideia desta variável Tabela 3.2 apresenta alguns valores típicos de atividade para vários minerais argilosos.

Tabela 3.2 Valores típicos de atividade para vários minerais argilosos (MITCHELL, 1993)

<u>Mineral</u>	<u>Atividade</u>
Esmecitas	1,0– 7,0
Ilitas	0,5 – 1,0
Caolinitas	0,5
Haloisita (2H ₂ O)	0,5
Holoisita (4H ₂ O)	0,1
Atapulgíta	0,5 – 1,2
Alófano	0,5 – 1,2

Para o limite de contração usou-se parte do material do ensaio limite de liquidez o qual teve menos de 25 golpes para fechar a ranhura e realizou-se o ensaio seguindo a norma NBR 7183(ABNT, 1982), com algumas modificações ao equipamento usado e a forma de obter os dados de volume das amostras úmidas e secas. No caso do equipamento as cápsulas foram substituídas por anéis de PVC de 20 mm de diâmetro por 5 mm de altura, para a determinação do volume inicial da amostra úmida foi usado um paquímetro e para a determinação do volume final foi usado análise de imagens na determinação das áreas das amostras e o paquímetro para as alturas finais.

A análise granulométrica conjunta objetiva determinar os tamanhos dos diâmetros equivalentes das partículas sólidas em conjunto com a proporção de cada fração constituinte do solo. O ensaio consiste de duas fases: peneiramento e sedimentação. Foi utilizado também

o granulômetro a laser para aferir alguns resultados obtidos por meio da sedimentação, principalmente os relativos as amostras contendo bentonita.

Para a análise granulométrica por sedimentação seguiu-se as normas referidas na Tabela 3.1, sendo também utilizado o granulômetro a laser.

Para a análise com granulômetro a laser, liga-se o equipamento formado por os 2 aparelhos (S3500 e *Sample Delivery Content*) e o computador, ingressa-se no software instalado no computador do laboratório de Geotecnia do SG 12 "*Microtrack-flex*", clicar em "*file/create new database*", seleciona-se o local de criação do arquivo com uma nova pasta, clicar em "*Measure/Selectinstruments/S3500*", encher com água destilada o aparelho seguindo a sequência: "*Fill*", o granulômetro vai encher o sistema até o recipiente ficar acima da metade da a sua capacidade. Depois clicar no ícone "SOP", nomear a amostra e salvar o arquivo, clicar logo em "*options/Measure/SOP options/Identify*", repete-se o nome dado à amostra, clica-se logo em "*Analysis*", coloca-se o nome de novo e salva-se o arquivo criado. No seguinte passo, clica-se em "*Perspective*", se quiser pode-se mudar nesta parte o "*rangeSDC*" do aparelho (faixa de tamanho das partículas a analisar), seleciona-se o nome da lista, salvar o arquivo, clicar em *OK* e fechar com "*Close*". Fazer recircular água destilado no sistema para a lavagem do aparelho usando o ícone "*Flow*", clicar no ícone *S/Z* para entrar no modo "*Set Zero*" até ficar completo o processo, verificando que a cor da barra emergente seja verde. Entrar no ícone *LD* para iniciar o ensaio, coloca-se aos poucos a amostra no aparelho levando em consideração que o sistema vai amostrar um limite verde que determina a quantidade ideal de amostra a utilizar. Entra-se no modo "*Run*", aguardam-se as leituras, exportam-se logo as leituras a "*Excel*" com o click direito sobre o arquivo gerado, se salva o arquivo com o nome desejado. Realizar depois a análise da amostra com "*Ultrasonic*", aguarda-se o processo, entra-se no modo "*Run*" novamente, aguardam-se as leituras e se salva e exportasse para "*Excel*" o arquivo novamente. Finaliza-se o ensaio com a limpeza do sistema clicando no ícone "*Rinse*", várias vezes para garantir a limpeza completa do sistema.

Nos ensaios de massa específica para o RCC e cada uma das misturas RCC+14%, RCC+16% e RCC+18%, considerando-os como materiais granulares, foram tomados 60 g de material seco ao ar já misturado e homogeneizado conforme norma NBR 6508 (ABNT, 1984). Para a bentonita, como recomendado por Camargo (2012), foram utilizados 15 g ao invés de 50 g recomendado pela NBR 6508 (ABNT, 1984) nos mesmos 125 ml de solução de água destilada foi deixado em repouso por 8 dias para garantir a sua completa hidratação e depois

seguinte procedimentos preconizados pela norma. Esta alteração se justificou devido à alta expansibilidade da bentonita.

Para as análises feitas com penta-picnômetro deve-se escolher a cápsula do analisador de densidade automático modelo PENTAPYC 5200, disponível no laboratório de Geotecnia do SG12, e de acordo com o material a ser avaliado, assim:

- Grande: para materiais com densidade baixa como as fibras em geral;
- Média: para materiais com densidade média como os solos;
- Pequena: para materiais com densidade alta como os ferros.

Deve-se usar de 10 a 15 g de material seco em estufa e pesado na balança com precisão de 0,0001 g, enchendo a cápsula e fechando bem a tampa do aparelho, sem esquecer-se de verificar que o número da cápsula e o número do compartimento sejam os mesmos. Depois se verifica o menu, clicando 1 para entrar no modo “*RUN*”, 2 para inserir a informação da célula, seguido de 1 para fazer um análise individual (para diferentes materiais) ou 2 para a realização de um análise combinado (para materiais iguais), logo escolhe-se o tipo de cápsula que foi usada (1-pequena, 2-media, 3-grande) clicando o número correspondente, depois entra-se o peso do material inserido sem tara e repete-se o procedimento para todas e cada uma das células utilizadas no ensaio, logo clica-se “*Clear*” para limpar a tela do aparelho e ao final clica-se 3 (“*start*”) para começar o ensaio. Calibra-se a pressão das cápsulas, para qualquer material, levando em consideração uma pressão de 0 a 20 PSI para a cápsula pequena, de 20 a 40 PSI para a cápsula media e de 40 a 60 PSI (valor limite) para a cápsula grande. Aguardam-se as leituras do aparelho, abre-se o software PENTAPYC disponível no laboratório do SG12, conecta-se ao último servidor com o ícone “*R*”, copia-se o arquivo da análise e guarda-se em uma pasta nova. Para terminar, deve-se restabelecer o aparelho, retirar o material e limpar as cápsulas com papel toalha e colocar de volta no aparelho na mesma ordem das cápsulas e compartimentos.

Adicionalmente aos ensaios de caracterização foram realizados ensaios de compactação sem reaproveitamento do material (RCC, Bentonita, RCC+4%, RCC+8%, RCC+14%, RCC+16% e RCC+18%), nas energias Proctor normal, intermediária e modificada, com a finalidade de determinar a função de variação da massa específica seca com o teor de umidade para uma dada energia de compactação e para as diferentes porcentagens de bentonita associado ao RCC. Com a compactação, o solo altera suas propriedades físicas, tais como

resistência ao cisalhamento, compressibilidade, capacidade de carga e permeabilidade, dados importantes para aferição das propriedades compatíveis com as exigências mínimas para as camadas de cobertura de aterros sanitários.

Os ensaios de compactação começaram com a preparação de 35 kg de material por ensaio, com secagem previa até umidade higroscópica, peneiramento na peneira de 4,78 mm (#4), mistura dos componentes, umedecimento e homogeneização por 24 horas em câmara úmida. Considerando que todo o material passou na peneira #4, o cilindro utilizado para todos os ensaios nas diferentes amostras foi o pequeno (10,0 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura), o soquete e o número de camada foram escolhidos seguindo a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Especificações para a realização do ensaio de compactação. (NBR 7182-ABNT/1986)

Ensaio de Compactação	A amostra preparada passa integralmente a peneira (mm)	Cilindro a ser utilizado no ensaio	Quantidade de amostra (em massa seca) a ser tomada (kg)
Sem reuso de material	<u>4,8</u>	<u>Pequeno</u>	<u>15</u>
		Grande	35
	19,1	Grande	35

Foi determinado também o valor do pH do RCC, bentonita e misturas. Deve-se levar em conta que os principais contribuintes para acidez dos solos são a matéria orgânica, os alumino silicatos das frações finas, os sesquióxidos e a lixiviação de certos sais solúveis. O pH afeta a solubilidade de vários elementos, como por exemplo o ferro e o alumínio. A carga elétrica das partículas pode variar o pH que, por sua vez, influi consideravelmente nos fenômenos de adsorção, troca catiônica, dispersão e floculação. Desta forma, a identificação do valor do pH tem importância fundamental nos efeitos que as diferentes associações têm, ao alterar as características do material final obtido.

Para o ensaio de pH foram secos 100g de cada amostra ao ar até a umidade higroscópica, posteriormente secos em estufa e peneirados na peneira de 2,00mm (#10). Foram preparadas todas as soluções e feitas as misturas, depois foram colocadas no centrifugador por uma hora, foi calibrado o aparelho com as soluções tampão, logo foram feitas as medições esperando a estabilização da leitura, em tempos que variaram entre duas e quatro horas, em alguns casos mostrando grande instabilidade. Para a leitura, o aparelho foi limpo e seco, ligou-se o pHmetro, com a tecla “Range” se procurou o modo de leitura de pH, foram introduzidos o eletrodo de temperatura e pH na solução e após a estabilização foi feita cada leitura.

Frequentemente, a instabilidade de uma leitura deve-se a que o eletrodo envelheceu, por mau estado de conservação ou porque a sua vida média chegou a termo. Algumas equipes são preparadas de tal forma que só mostram o valor de pH quando a medição é estável; ou seja, quando não se tem uma variação significativa dentro de um intervalo de tempo pré-determinado. A vida média de alguns eletrodos, especialmente quando se trabalha com eles imerso em solução aquosa, pode ser menos de um ano; daí a necessidade de manter cheio de eletrólito os compartimentos e sempre deve-se calibrar o medidor de pH ou substituí-lo quando ele perder a sensibilidade.

Desde que o pH depende da temperatura da dissolução, juntamente com a leitura de pH que indica tela do medidor é necessário fornecer a temperatura da solução no momento da leitura. Por convenção, o valor do pH, salvo indicação em contrário, deve-se referir a 25 ° C. Por isso para dar uma leitura correta do pH pode precisar de fazer uma conversão final. O pHmetro Hanna utilizado compensou automaticamente a temperatura, então não foi necessário esse cuidado, a leitura foi direta.

O ensaio de caracterização mineralógica mostra a composição dos materiais e permite a compreensão das suas características físicas e químicas, principalmente no caso dos solos finos, permitindo também prever o comportamento do material perante fatores externos, conhecendo seu modo de ocorrência e alguns das principais características que tendem a influenciar seu comportamento geomecânico. O método empregado nesta pesquisa para a identificação mineralógica foi a Difração de Raios-X, realizada no Laboratório de Analítica, do Instituto de Química (IQ), da Universidade de Brasília.

A determinação da composição mineralógica foi executada para a fração fina das amostras, com o material passante pela peneira #40 - abertura de 0,425 mm. Estas amostras foram homogeneizadas e levadas ao difratômetro *BRUKER D8 FOCUS* para uma análise de varredura do ângulo Bragg (2Θ) = 0-90 com um incremento (“*step*”) = 0.05 e uma velocidade (graus/min) = 1. A identificação de todas as fases cristalinas foi feita por meio de comparações com o banco de dados *PDF II* do *IQ* realizado no software *EVA*.

3.2.2 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Foram realizados ensaios de permeabilidade a carga variável em permeâmetro de parede rígida nas amostras de RCC, bentonita e nas misturas de RCC-bentonita nas porcentagens de 4%, 8%, 14%, 16% e 18%. Os corpos de prova foram moldados por

compactação dinâmica em cilindros com dimensões de 10,0 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura, a energia de compactação do Proctor Normal (5,72 Kg/cm/cm³).

O propósito desse ensaio foi determinar o valor de k do solo, utilizando condições de carga variável, devido à baixa permeabilidade prevista para os materiais estudados (solos finos). Com o intuito de padronizar o efeito da variação da viscosidade da água com a temperatura, o coeficiente de permeabilidade foi recalculado de acordo com a Lei de Darcy para uma temperatura de 20° C e o resultado final foi à média aritmética simples de k a 20°C em m/s.

Para a realização dos ensaios de condutividade hidráulica foram utilizados corpos de prova moldados por compactação dinâmica na energia Proctor normal, além de ter seguido as recomendações da norma NBR 14545 (ABNT, 2000), foi vedado com parafina ao redor, no topo e na base do corpo de prova a fim de garantir o fluxo da água somente pelo material, foi colocado papel filtro com o diâmetro da amostra no topo e na base do mesmo, foi montado o permeâmetro com vedação na parede com bentonita sódica hidratada por 24 horas; finalizada a montagem, foi colocado um anel de plástico para evitar a contaminação da bentonita com a areia grossa no final e poder recuperar a bentonita posteriormente. Depois foram colocados os corpos de prova para saturar. Após a saturação comprovada pela saída de água no orifício da tampa do equipamento, o permeâmetro foi ligado a uma bureta de vidro graduada, para a medição das cargas hidráulicas durante o ensaio.

Conforme Shackelford (1994), um dos maiores problemas relacionados à precisão do ensaio está na fuga da água, tanto por desvios transversais no próprio solo induzindo a água por caminhos que não são da percolação longitudinal, quanto pela fuga de água pela própria parede do permeâmetro, o chamado efeito parede. Segundo o autor para evitar esses erros é de fundamental importância que a parede lateral da amostra seja totalmente impermeabilizada, direcionando a água por um caminho preferencial e garantindo desta forma que o fluxo seja unidimensional, mais ainda com o cuidado na preparação dos ensaios, isto parece ter influenciado alguns dos resultados devido à afinidade eletroquímica da bentonita, gerando condições imprevisíveis nos resultados.

3.2.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

A resistência das amostras foi avaliada em laboratório por meio do ensaio de compressão não confinada que consiste na ruptura por compressão axial de um corpo de prova,

geralmente cilíndrico, sem confinamento lateral. A carga que leva o corpo de prova à ruptura, dividida pela área deste corpo é denominada resistência à compressão simples. Os corpos de prova utilizados nestes ensaios foram moldados por compactação estática em moldes com dimensões de 5x 10 cm, respeitando a relação de altura igual a duas vezes o diâmetro da seção transversal, sendo o teor de umidade calculado com base nos valores de umidade ótima obtidas nos ensaios de compactação das amostras RCC, bentonita e misturas de RCC-bentonita nas porcentagens de 14%, 16% e 18%. Os corpos de prova foram moldados em cinco camadas distribuídas uniformemente ao longo da altura do molde. Esta condição teve por finalidade assegurar a correta distribuição de tensões no interior do corpo de prova. A velocidade de aplicação da carga utilizada foi de 1 mm/min.

3.2.4 AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO

Na sequência, foram realizados ensaios de simulação de secagem e umedecimento por meio de um equipamento dotado de um sistema de monitoramento que possibilitou uma avaliação de maneira integrada da variação da perda de massa, conteúdo de umidade, umidade e temperatura do ambiente e na superfície do solo e assim comparar o desempenho quanto à formação e propagação de fissuras por ressecamento das misturas RCC-Bentonita escolhidas (RCC, Bentonita, RCC+4%, RCC+14%, RCC+18%).

Com o uso de um equipamento adaptado de Lakshmikanta (2009), mostrado na Figura 3.2, foi possível simular, no ambiente do laboratório, a exposição de uma amostra de 15 cm x 25cm e 1,5 cm de espessura, a dois ciclos de secagem e um de molhagem. Durante o processo de ressecamento, com a instalação de um termo higrômetro *Thermo Hygro* foram medidas a temperatura e a umidade ambiente. Para verificar as perdas de massa durante o ensaio, relativas à perda de umidade, foi instalada uma balança *Shimadzu B13200h* na base do recipiente contendo a amostra. Todo o processo de secagem foi monitorado por uma câmera digital *GoPro Hero 3* instalada na parte superior do equipamento posicionada sobre amostra e programada para registrar uma foto por minuto, o que permitiu identificar o momento de início da fissuração, a propagação das mesmas e seus padrões.

Este equipamento contém duas lâmpadas infra vermelhas incandescentes de 250 W/220V *Ecolume*, instaladas em bocal de cerâmica suportadas por uma estrutura metálica que permite variar a altura, a inclinação vertical e a distância horizontal entre as lâmpadas e a amostra. Inicialmente as lâmpadas foram posicionadas a 35cm de altura acima da superfície da

amostra e 40 cm de separação entre as lâmpadas, medidos desde o centro da amostra e ao centro das lâmpadas. Este procedimento objetivou gerar a máxima incidência da luz das lâmpadas na parte central, bem como obter a máxima incidência de luz sobre toda a sua superfície da amostra. Usou-se outra estrutura metálica encaixada no suporte das lâmpadas e também com altura variável para verificar a possibilidade de realização das leituras nas imagens e fixar a posição da câmera, a uma altura inicial de 80 cm, desde a base da bandeja até a câmera.

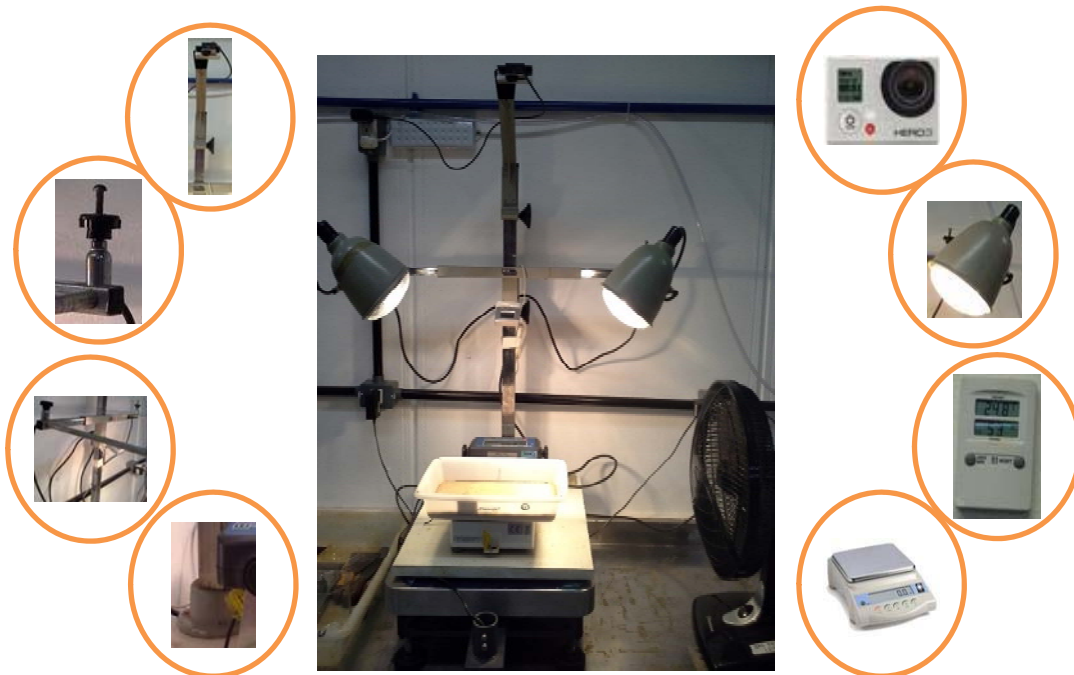


Figura 3.2 Equipamento para o ensaio de ressecamento adaptado de Lakshmikanta (2009)

Antes de iniciar o ensaio, as amostras (RCC, Bentonita, RCC+4%, RCC+14%, RCC+18%) foram preparadas a partir da homogeneização completa dos materiais previamente secos ao ar. No caso das misturas definiam-se as proporções em massa seca de cada material, bentonita e RCC seguida da completa homogeneização e umedecimento. No caso dos materiais na condição pura, a quantidade definida em massa seca era simplesmente transferida para o recipiente e logo em seguida umedecidos. O processo de umedecimento inicial foi realizado a partir da definição da quantidade de água necessária para se atingir um teor de umidade próximo ao limite de liquidez. Após a adição da água, as amostras eram homogeneizadas com auxílio de uma espátula e para garantir uma completa homogeneização as amostras foram deixadas em repouso por 24 horas na câmara úmida. Ao final deste tempo as amostras eram

transferidas para uma bandeja retangular de PVC com 27x16 cm de lado e 6 cm de altura. Com a retirada das bolhas de ar e o material perfeitamente distribuído iniciava-se o primeiro ciclo de ressecamento.

Após a conclusão do primeiro ciclo de ressecamento, avaliado pela estabilização da massa da amostra, procedeu-se a um novo ciclo de umedecimento acrescentando água na mesma quantidade calculada para a preparação da mistura inicial e continuou-se com o segundo e último ciclo de secagem, novamente até estabilização da massa. Ao todo foram realizados dois ciclos de ressecamento e um de molhagem para cada uma das amostras ensaiadas.

3.2.5 ANÁLISE DE IMAGENS

O processamento das imagens obtidas durante os ensaios foi realizado utilizando o software de distribuição livre chamado *ImageJ*, que é um programa de domínio público, para plataformas múltiplas (há versões para *Linux*, *Windows* e *MacOS*). É um programa muito útil e versátil para o processamento de imagens. O programa permite executar operações simples em imagens, como ajustar o contraste, ou transformar uma imagem de cor em uma imagem preta e branca, bem como realizar operações mais sofisticadas em imagens como por exemplo, destacar alguns detalhes e esconder outros, decompor um vídeo em imagens e vice-versa.

Uma imagem digital é composta de pixels. Cada pixel é um ponto com um valor de intensidade para cada canal (cores "primárias"). Combinando diferentes canais pode-se obter a cor desejada. No caso da proposta desta pesquisa foi realizada a análise da contribuição de cada canal na imagem, estudando os canais referidos como RGB: "*Red, green and blue*".

Dentro de cada canal um pixel tem um valor inteiro entre 0 e 255, por exemplo, se os pixels são "*8-bit*" (tons de cinza), para atribuir uma cor é gerada uma escala ou faixa de valores que definem cada canal. Assim, áreas escuras de uma imagem serão representadas por pixels com valores perto de 0, enquanto as áreas claras com valores perto de 255 pixels. Desta forma, analisando os canais RGB de uma seleção da imagem que pode quantificar (contagem) os pixels com cada valor de cor (entre 0 e 255) para cada canal (RGB). O número de pixels com base no valor da escala gráfica gera um histograma, uma contagem de pixels para cada valor.

O processo de análise das imagens começa com a sua abertura usando o menu *File*, selecionando "*Open*" e na caixa de diálogo, escolher a imagem que se deseja abrir, ou em um navegador de arquivos como "*Windows Explorer*" clicar com o botão esquerdo do mouse sobre o arquivo e arrastar a imagem para liberá-la na barra de ferramentas do *ImageJ* chamada caixa

“*Drag and drop*”.

Em seguida, é selecionada a região de interesse com o ícone *ROI* para ampliar a imagem e realizar a sua duplicação para não perder os arquivos originais e somente realizar a análise sobre essas cópias, podendo-se mudar e salvar a nova imagem com as alterações e com o nome desejado. Na sequência, a imagem deve ter um formato do tipo binário, usando o menu *Image*, no sub menu “*Type*” seleciona-se a opção “*8 bits*”, que transforma a imagem em cores para uma escala de cinza. Posteriormente, a imagem é filtrada usando o sub menu “*Binary*” no menu “*Process*” e selecionando “*Make binary*”, isso converte a imagem para preto e branco, com valores em pixels de 0 ou 255 bits para posterior quantificação. Sobre a imagem em preto e branco é feita a calibração da seguinte forma: colocando um objeto ou pontos de referência com comprimento conhecido sobre a imagem, nos ensaios foi usada a diagonal da caixa do equipamento com um comprimento de 32,0 cm, ao introduzir o seu valor no macro de calibração, consegue-se fazer com que as medidas tomadas na imagem correspondam às medidas reais na amostra. Para fazer isso, desenha-se uma linha sobre o objeto usado como parâmetro com a ferramenta “*straight*”, clicando entre o ponto inicial e o ponto final do objeto parâmetro. Em seguida, determinar os pixels que tem essa linha, para isso existe dois caminhos, um é usar a combinação de teclas *Ctrl + k*, o que permite traçar o perfil da linha e no gráfico contar os seus pixels; ou com o botão “*List*” ler o comprimento da linha diretamente no eixo horizontal; a segunda maneira é usando o menu “*Analyze*”, tendo selecionada a linha, clicar sobre o menu e com a opção “*Perimeter*” selecionado no sub menu “*Set Measurements*”, o programa lança a medida em pixels da linha de uma forma mais precisa.

Outra opção para calibrar é com a ferramenta de calibração, no menu “*Analyze*”, a opção “*Calibrate*” é selecionada, se insere o comprimento real medido na caixa “*Known distance*”, na caixa “*Pixel aspect ratio*” inserir o valor de 1.0 e na caixa “*Unit of length*” inserir a unidade de medida utilizada (cm). Desde que a posição da caixa e da câmera permanecem constantes durante todo o ensaio a calibração “*Set Scale*”, pode tornar-se global, clicando sobre a caixa de seleção “*Global*” e finalmente aceitar as alterações feitas. O ícone “*Calibrar*” funciona da mesma forma

Para a medição das áreas fissuradas, no sub menu “*Set measurements*” do menu “*Analyze*” são selecionadas as opções “*Area, Perimeter, Display label*” e termina-se com *OK*. Estas medidas são mostradas na caixa de diálogo “*Results*”, que aparece quando é selecionada a opção “*Measure*” do menu “*Analyze*” ou usando a combinação de teclas “*Ctrl + M*”. Estes

resultados são salvos aceitando com “Yes” na caixa de diálogo que aparece ao fechar a janela de resultados: deve-se selecionar o local onde irá salvar os dados e o nome do arquivo como tipo “.xls” para torná-lo compatível com “Excel” e ser capaz de realizar análise estatística. A sequência de passos após a seleção do setor na imagem inicial é mostrada na Figura 3.3.

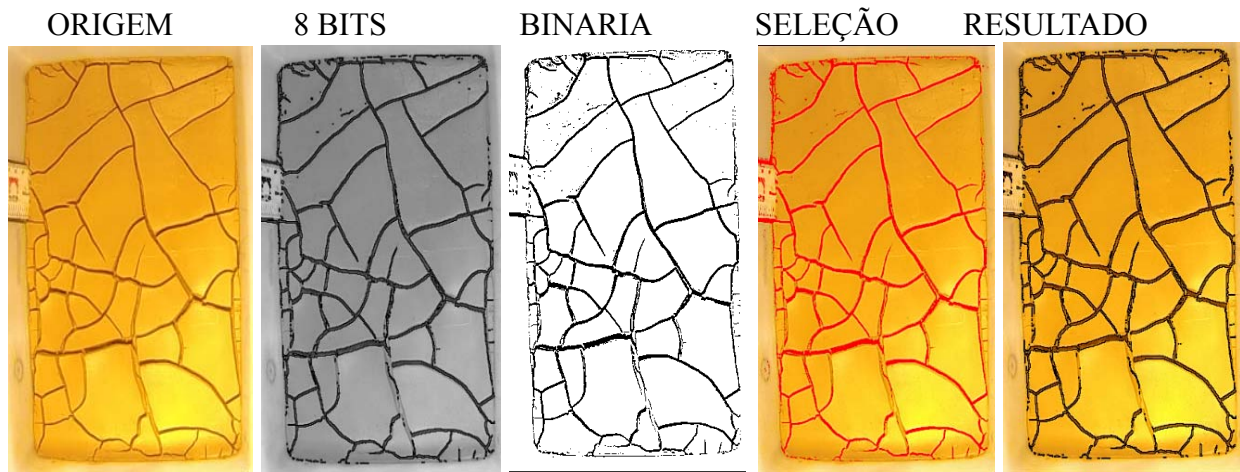


Figura 3.3 Sequência de passos para a medição das áreas fissuradas em uma região específica selecionada da imagem inicial

Essa rotina é salva como um macro, isso permite que grave-se a sequência de etapas para logo ser executada automaticamente, minimizando o tempo de análise das imagens, usando a seleção “Record” do sub menu “Macros” no menu de “Plugins” para poder aplicar automaticamente a cada uma das imagens do que é chamado “stack”, que é um grupo de imagens armazenadas em uma pasta que é obtida através do processo de arrastar e soltar na barra de ferramentas de *ImageJ* (FERREIRA e RASBAND, 2012).

Para criar um macro do *ImageJ*, abre-se um dos arquivos que se deseja analisar dentro do *ImageJ*, clica-se em “Plugins->Macros->Record”, uma janela do gravador de macro irá aparecer. No menu *Image*, clica-se no comando que se deseja executar. Por exemplo, clicando em “Image->Adjust->Threshold” modificam-se as opções do comando (se aplicável); depois, para definir os intervalos de matiz, saturação e brilho e em seguida, com “Threshold color” define-se o filtro da imagem para “B&W”. Se há um botão “Macro” na parte inferior da janela (Figura 3.4), clica-se nele. Esse procedimento informa o macro para usar as configurações atuais para o comando. Se o botão “Macro” não aparecer, simplesmente clica-se em “Ok” ou “Apply” etc., para executar o comando. Assim, a sequência de passos é automaticamente adicionada à janela macro (Figura 3.4).

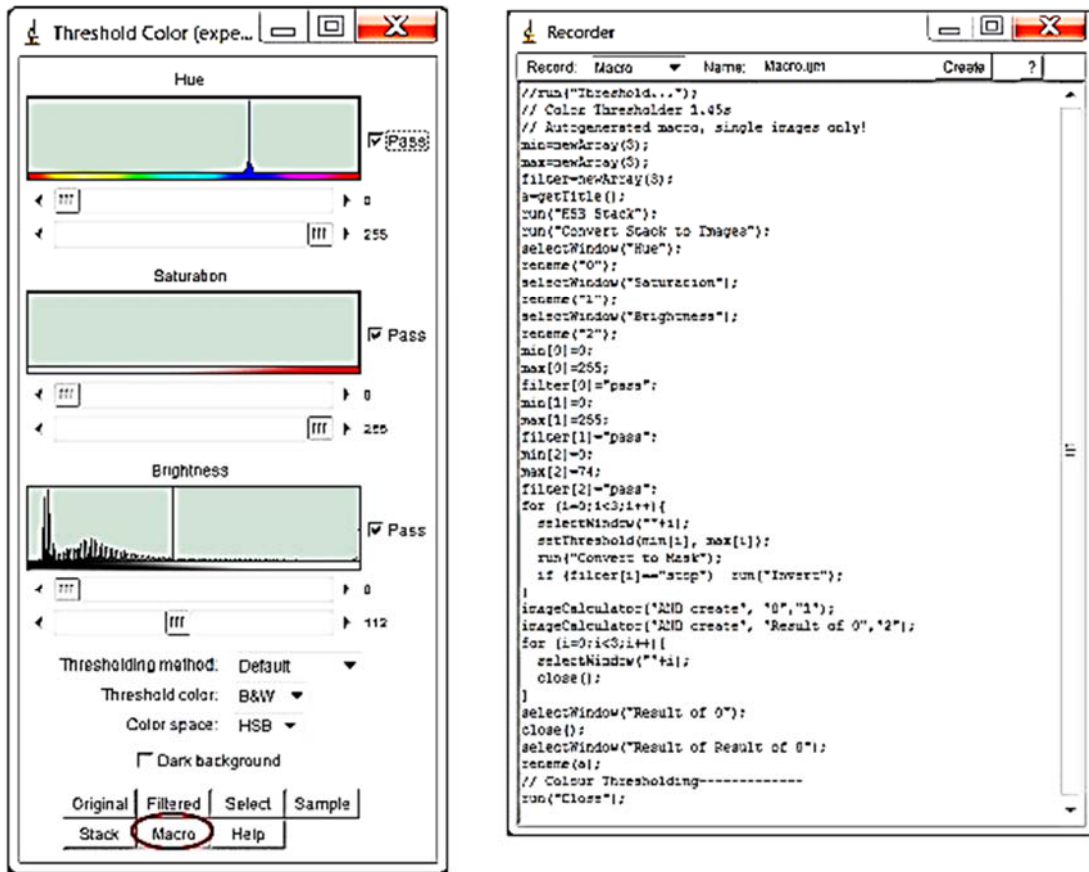


Figura 3.4 Exemplo da criação de um macro em *ImageJ*

Para analisar as imagens e realizar as medições usa-se o botão de comando "*Measure*", este comando é selecionado e executado para que os dados apareçam em uma tabela. Depois de ter concluído todas as tarefas a executar no macro, procura-se a janela do gravador e clica-se em "*Create*", uma segunda janela aparecerá (Figura 3.5), mostrada à direita. Clica-se em "*File->SaveAs*" para salvá-lo em algum lugar no computador. Verifica-se que o nome do arquivo tem a extensão ".*ijm*" no final, isto significa que é um arquivo *Macro* de *ImageJ*.

Para usar o macro de novo, abre-se um dos arquivos para analisar dentro do *ImageJ*, clicando em "*Plugins->Macros->Run*", uma janela irá aparecer, permitindo a navegação no computador. Seleciona-se o arquivo de macro criado, clica-se em "*Open*" para abrir o macro e deve-se executar automaticamente a sequência de passos já realizada, bem como mostrar os dados finais de saída. O macro pode-se instalar em *ImageJ* para uso repetido, assim o macro é mostrado em "*Plugins->Macros*". Para executar este passo, clica-se em "*Plugins->Macros->Install*", uma janela irá aparecer permitindo a navegação no computador para procurar o

macro. Abre-se o macro, que agora será listado na parte inferior dos “*Plugins*” e pode ser executado de lá, a janela do gravador do macro é mostrada à esquerda.

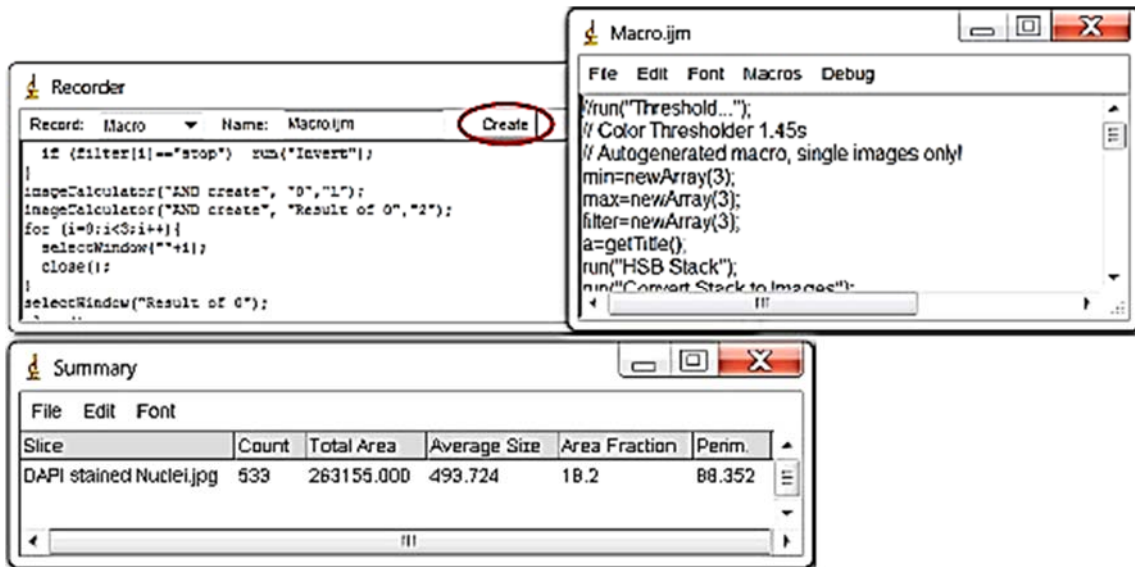


Figura 3.5 Janela do macro criado

Para analisar as múltiplas imagens com processamento em lote, executa-se o macro para o processamento em lote. Depois de analisar cada imagem, o “*Batch Processing*” irá gerar uma tabela que lista os dados analisados de cada imagem, permitindo a exportação para uma planilha eletrônica como “*Microsoft Excel*”. O processo começa colocando todas as imagens que precisam ser analisadas na mesma pasta no computador. No *ImageJ*, clica-se em “*Process->Batch->Macro*”, a janela do “*Batch Process*” (Figura 3.6) irá abrir-se, clica-se em “*Input...*” e seleciona-se a pasta que contém todas as imagens a serem analisadas, clica-se em “*Output...*” e seleciona-se ou cria-se uma nova pasta na qual *ImageJ* deverá colocar todas as imagens já analisadas, deve-se criar esta pasta, mesmo que não vai-se precisar das imagens. Clica-se em “*Open...*” na parte inferior da janela do processo em lote para abrir um arquivo macro do computador, uma vez estiver pronto, clica-se em “*Process*”, *ImageJ* abre cada imagem. Assim, irá aplicar o macro para cada uma e os dados da análise serão exportado sem um quadro-resumo (Figura 3.7). Para definir o que será mostrado na tabela de resumo, clica-se em “*Analyze->Set Measurements*” antes de executar o processo em lote.

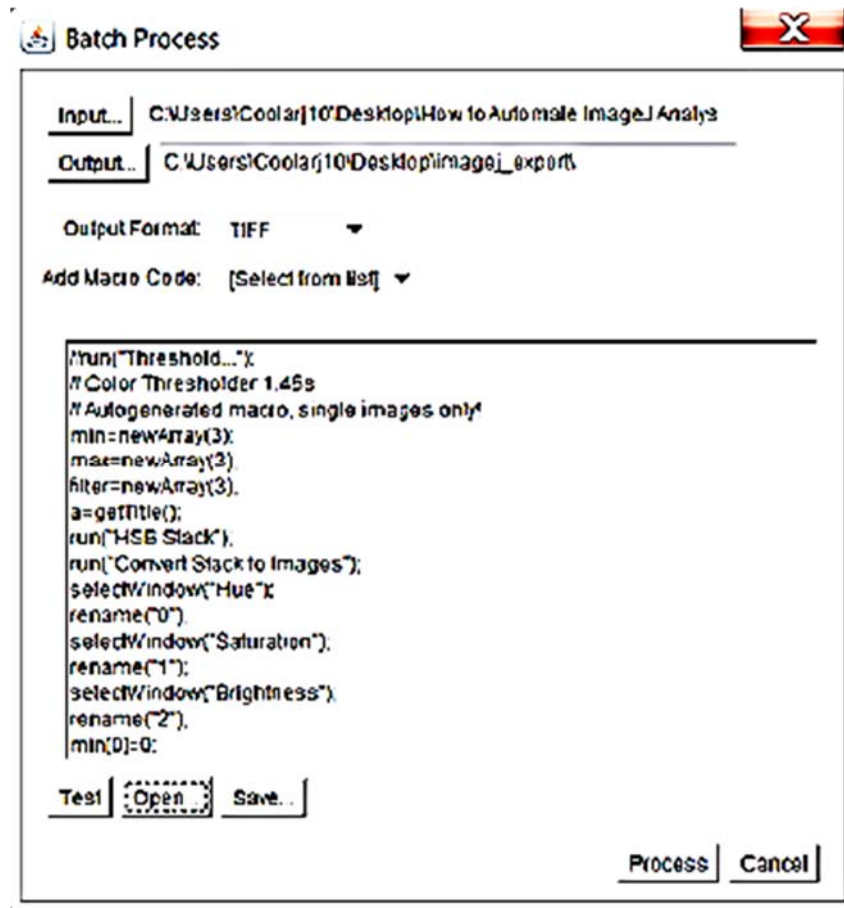


Figura 3.6 Janela do processador em lote

Summary

Slice	Count	Total Area	Average Size	Area
15_scaf1_slide1_section1_east_DAPI.jpg	94	6123.000	65.138	0.2
15_scaf1_slide1_section1_northwest_DAPI.jpg	17	733.000	43.118	0.0
15_scaf1_slide1_section2_east_DAPI.jpg	27	909.000	33.667	0.0
15_scaf1_slide1_section2_west_DAPI.jpg	3	124.000	41.333	0.0
15_scaf2_slide1_section1_east_DAPI.jpg	37	796.000	21.514	0.0
15_scaf2_slide1_section1_south_DAPI.jpg	11	682.000	62.000	0.0
15_scaf2_slide1_section2_east_DAPI.jpg	70	1427.000	20.386	0.1
15_scaf2_slide1_section2_west_DAPI.jpg	40	2573.000	64.325	0.1
15_scaf3_slide1_section1_south_DAPI.jpg	281	16048.000	57.110	0.6
15_scaf3_slide1_section1_west_DAPI.jpg	244	16126.000	66.090	0.6
15_scaf3_slide1_section2_north_DAPI.jpg	50	1482.000	29.640	0.1
15_scaf3_slide1_section2_southeast_DAPI.jpg	83	2947.000	35.506	0.1

Figura 3.7 Janela de resultados de *ImageJ*

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e discussões dos ensaios de caracterização geotécnica, caracterização físico-química e mineralógica, permeabilidade, resistência e ressecamento de acordo com o descrito no capítulo anterior para cada uma das amostras RCC, Bentonita e as misturas RCC-Bentonita nas diferentes porcentagens avaliadas.

4.1 ANÁLISE MICRÓSCOPICA DO RCC E MISTURA

As Figuras 4.1 a 4.3 mostram uma visão geral da aparência dos materiais componentes na condição pura e das misturas. A Figura 4.1 apresenta imagens com aumento de 100X, permite observar a homogeneização das misturas e de uma forma qualitativa, permitiu visualizar o tamanho dos grãos, o tamanho dos poros e aumento na quantidade de partículas de bentonita com o acréscimo do teor da mesma adicionada ao RCC. Percebe-se ainda, a efetividade do processo manual de mistura pela uniformidade da distribuição de bentonita no RCC.

A Figura 4.2 apresenta imagens com aumento de 200X, mostrando de uma forma mais clara o tamanho dos grãos e a variação na tonalidade dos materiais e misturas.

A Figura 4.3, agora com aumento de 400X, mostra como as partículas de bentonita, devido a sua afinidade eletroquímica, aglomeram-se, formando pacotes isolados de permagel que, ainda preenchendo alguns dos vazios dos materiais. Contudo, estas aglomerações não parecem fechar todos os vazios; porém deve-se levar em conta que estas amostras foram analisadas na condição seca. Em uma condição úmida a expansibilidade da bentonita poderia chegar a fechá-los ou gerar um contato diferencial que impedisse o contato entre os grãos e, desse jeito, mudar a resistência e/ou a permeabilidade das misturas.

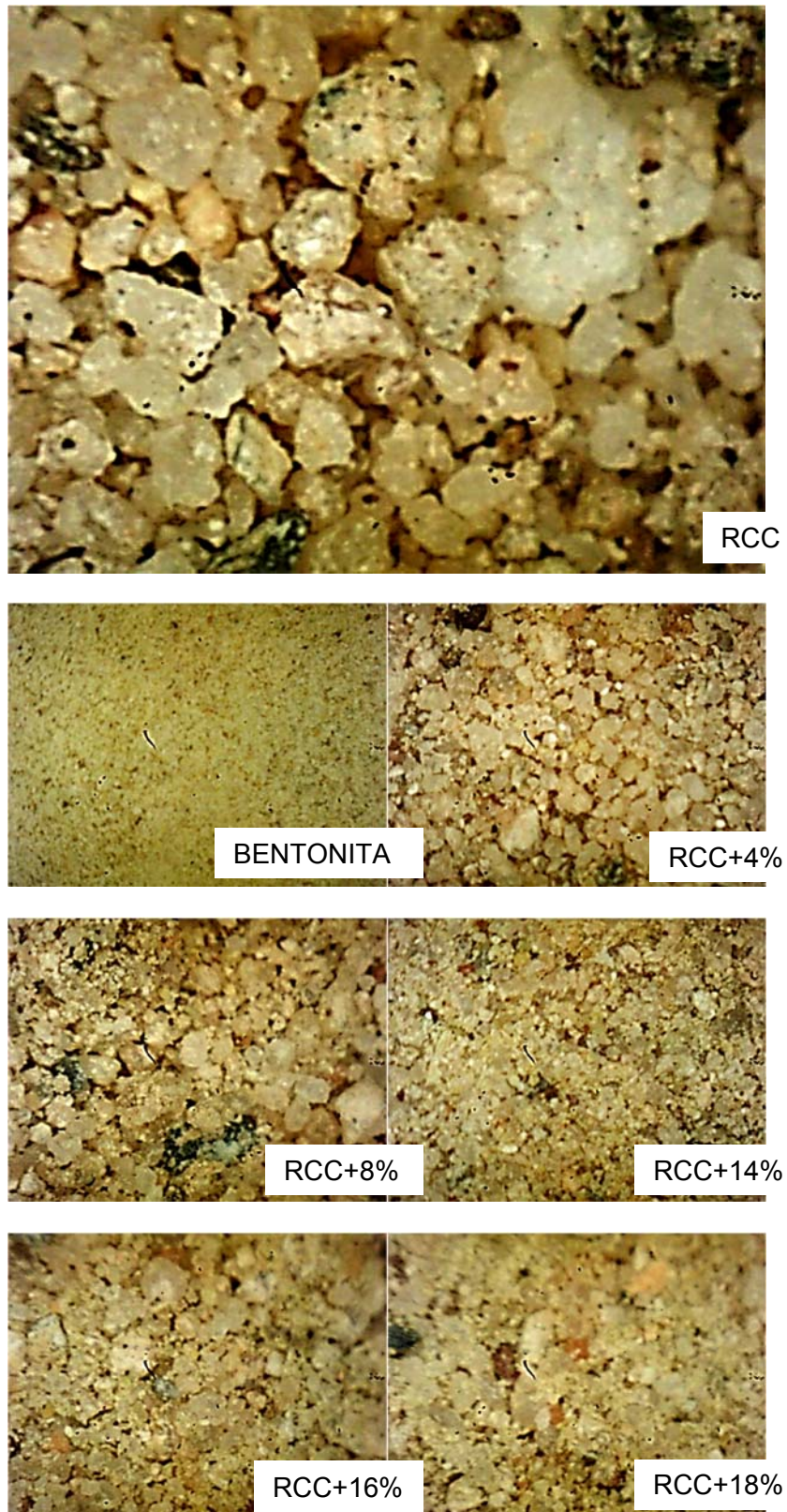


Figura 4.1 Imagem geral dos materiais componentes RCC, bentonita e das misturas 4%, 8%, 14%, 16% e 18% (100X)

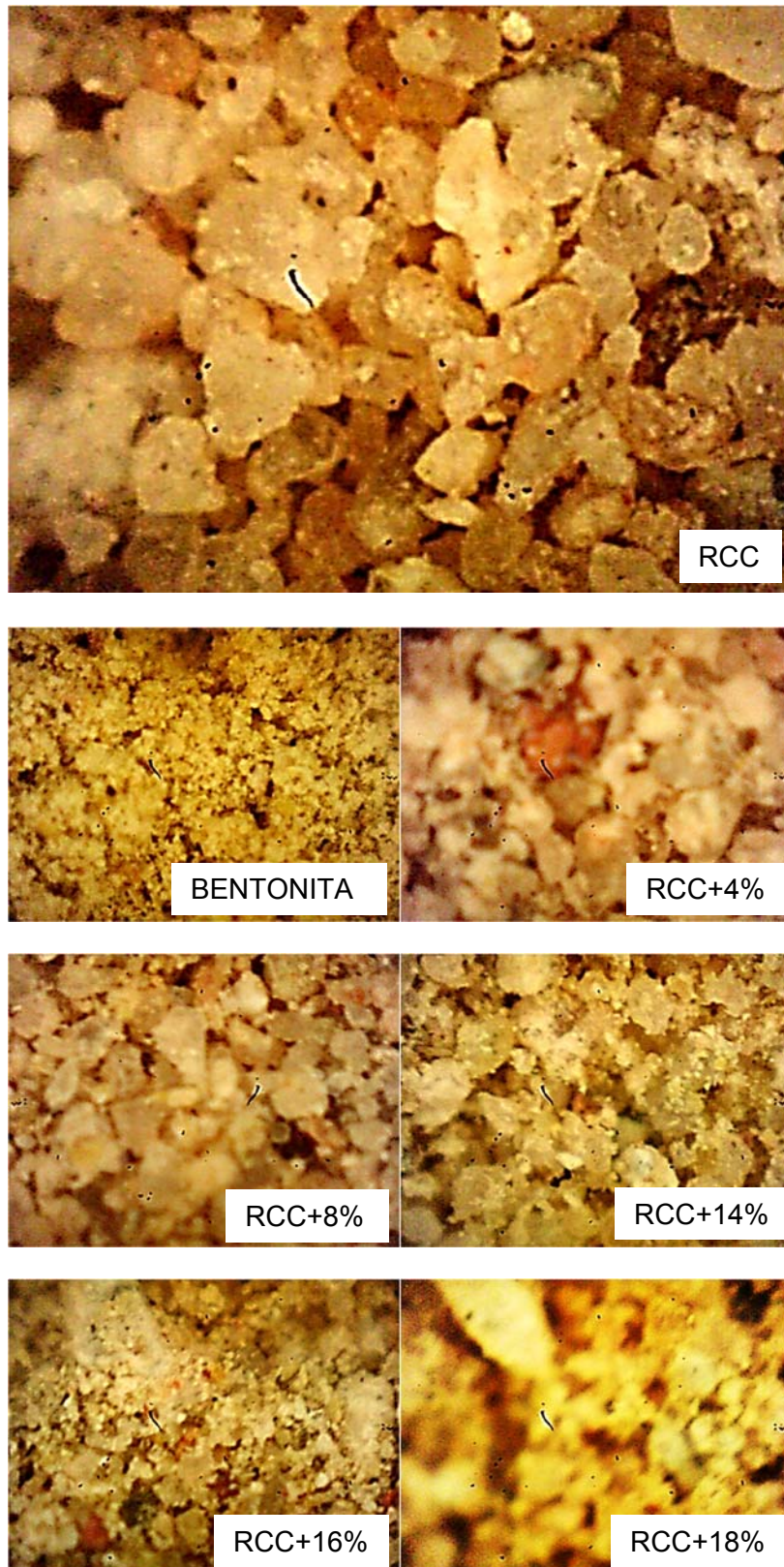


Figura 4.2 Imagem geral dos materiais componentes RCC, bentonita e das misturas 4%, 8%, 14%, 16% e 18% (200X)

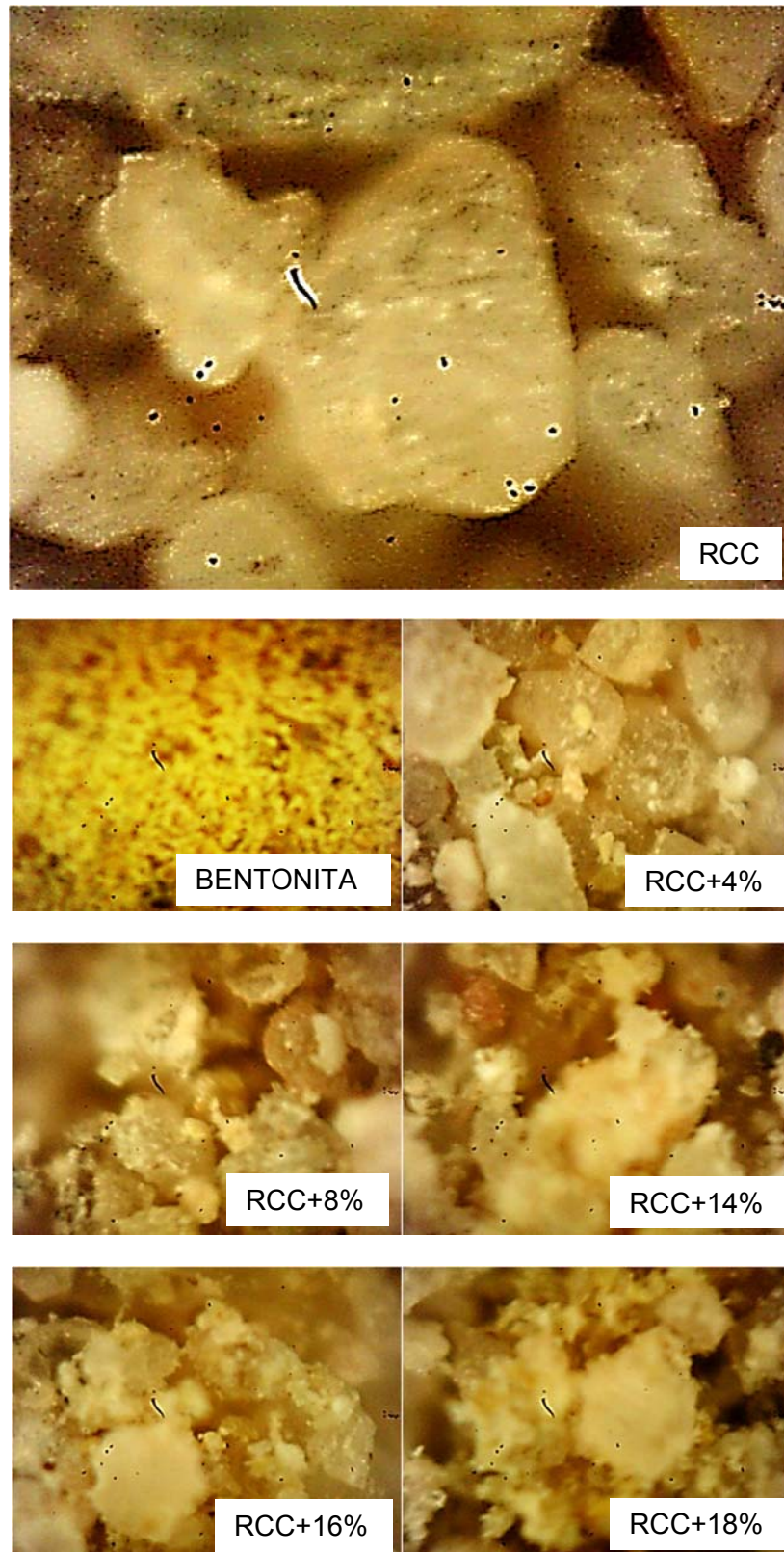


Figura 4.3 Imagem geral dos materiais componentes RCC, bentonita e das misturas 4%, 8%, 14%, 16% e 18% (400X)

4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

4.2.1 LIMITES DE ATTEMBERG E ATIVIDADE

As misturas de RCC e bentonita em porcentagens de 2%, 3%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12% não apresentaram limite de plasticidade (NP) verificado pela impossibilidade de se obter o cilindro com 3 mm de diâmetro. A plasticidade mínima requerida para os materiais usados como componente das camadas de cobertura de aterro sanitário, segundo as recomendações de Daniel e Benson (1990), foi encontrada no teor de 14% e depois foram testadas misturas com 16% e 18% com o objetivo de verificar as mudanças nas propriedades dos materiais.

Conseguiu-se misturas com limite de liquidez aceitável para o teor de 14% de bentonita, acrescentou-se o teor de bentonita da mesma forma que foi feito no ensaio de plasticidade. De forma geral, o RCC e as misturas com porcentagem inferior a 14% não apresentaram plasticidade e nem valores de contração apreciável. A tabela 4.1 apresenta o resumo dos resultados obtidos a partir dos limites de Attemberg realizados com RCC, bentonita e para as misturas.

Tabela 4.1 Densidade específica dos sólidos das amostras

AMOSTRAS	wL (%)	wP (%)	IP (%)	IA	wc (%)
RCC	NL	NP	-	-	-
RCC+2%	NL	NP	-	-	-
RCC+3%	NL	NP	-	-	-
RCC+4%	NL	NP	-	-	-
RCC+6%	NL	NP	-	-	-
RCC+7%	NL	NP	-	-	-
RCC+8%	NL	NP	-	-	-
RCC+10%	NL	NP	-	-	-
RCC+12%	NL	NP	-	-	-
Bentonita	488	65	423	5	63
RCC+14%	49	33	16	11	30
RCC+16%	60	31	29	20	28
RCC+18%	59	30	29	21	28

Avaliando-se os valores de wL, observa-se que a amostra de bentonita apresenta um valor alto para este parâmetro. Este comportamento já era esperado e corrobora com os valores

na faixa de porcentagens de 450 % a 490 % reportados por Camargo (2012) para a bentonita sódica. Os valores dos w_L das misturas estudadas se mostraram fortemente influenciados pela característica não plástica do RCC, apresentando valores entre 49% a 60%, os quais são compatíveis com os valores reportados para materiais com características similares como misturas de solo lateríticos, cimento e bentonita, estudadas por Batista (2006).

Analisando os valores de w_P observa-se que o valor encontrado para a bentonita sódica usada nos ensaios foi de 65% e encontra-se no limite superior da faixa de 40% a 65%, reportada por Camargo (2012) e encontra-se acima do valor de 58% reportado por Barreto (2004) e abaixo do valor de 71,7% reportado por Batista (2006) para o material permagel fornecido pela empresa Katatz, reportados também para a bentonita sódica. Para as misturas com porcentagens de 14% a 18% observa-se que o valor do w_P permaneceu praticamente constante.

O valor de $IP = 423\%$ encontrado para a bentonita neste estudo foi maior do que o valor de 192,35% reportado por Batista (2006) para a bentonita sódica usada por ele, mas se tem que levar em conta que o valor de w_L reportado foi de 264,05%, o qual está muito abaixo dos valores reportados por alguns outros autores como Camargo (2012) e Huse (2007). Para os valores de IP encontrados neste estudo para as misturas (16% a 29%) se tem o valor de comparação de 28,26% de IP reportado por Huse (2007) dos seus ensaios feitos para um solo Paulista misturado com 5% de bentonita; por outro lado, o valor de $IP = 16\%$ encontrado para a mistura RCC+14% encontram-se abaixo do valor de referência do material areno-siltoso estudado por Huse (2007), enquanto que para as misturas RCC+16% e RCC+18% é semelhante, mostrando que essas misturas apresentam valores maiores do que 7%, e então, aceitáveis para ser usadas em camadas de cobertura de aterros sanitários, segundo as recomendações de Daniel e Benson (1990).

O Índice de Atividade da bentonita e das misturas mostram a presença da esmectita que é uma variação da caulinita, pertencente à classe dos filossilicatos (silicatos que formam folhas paralelas tetraédricas) e pertencente ao grupo da montmorilonita, ela possui uma coloração esverdeada e tem um alto índice de absorção de água, o que faz com que a mesma possua uma alta capacidade de trocar cátions com o meio (SKEMPTON, 1953), o que segundo a classificação feita por Vargas (1977) define os materiais como argilas ativas e podem apresentar potencial expansibilidade.

O limite de contração $w_C = 63\%$ obtido para a bentonita na faixa de 38% a 63% reportada por Camargo (2012) para a bentonita sódica e o w_C obtido para as misturas de RCC+14%

bentonita, RCC+16% bentonita e RCC+18% bentonita foi de 30% para a primeira associação e 28% nas últimas duas misturas testadas. Ressalta-se que esses valores correspondem à média dos ensaios realizados para as diferentes misturas e objetivaram fornecer uma primeira ideia da contração dos materiais analisados, parâmetro importante no estudo do processo de fissuração dos solos (CUADRADO, 2013). Contudo, diante das dificuldades relativas à realização deste ensaio e interpretação dos resultados se torna importante aprofundar no seu estudo.

4.2.2 DENSIDADE ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

Os ensaios de densidade específica dos sólidos foram realizados com base na metodologia convencional, norma NBR 6508 (ABNT, 1984), e com o uso do pentapicnômetro. Os valores de densidade específica dos sólidos das amostras são mostrados na tabela 4.1 e na Figura 4.4.

Tabela 4.2 Densidade específica dos sólidos das amostras

Amostra	Gs picnômetro 1	Gs picnômetro 2	Gs picnômetro médio	Gs penta-picnômetro	Diferença %
RCC	2,77	2,77	2,77	2,77	0,04
Bentonita	2,69	2,69	2,69	2,69	0,02
RCC+4%	2,69	2,69	2,69	2,69	0,02
RCC+8%	2,71	2,71	2,71	2,71	0,01
RCC+14%	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
RCC+16%	2,67	2,67	2,67	2,67	0,01
RCC+18%	2,67	2,67	2,67	2,67	0,02

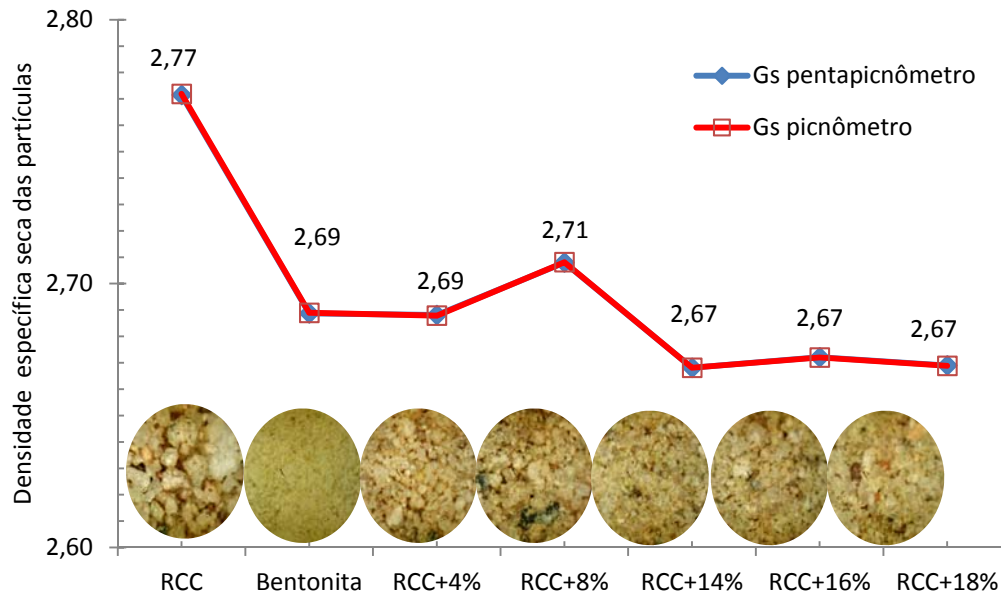


Figura 4.4 Densidade específica seca média dos sólidos das amostras

Observa-se que não há diferenças significativas entre os valores de densidade das amostras testadas nos ensaios com picnômetro e penta-picnômetro. Por outro lado, o RCC apresenta o maior valor de Gs, enquanto que o Gs das misturas diminuiu com o aumento na porcentagem de bentonita com exceção da mistura com adição de 8% de bentonita que teve um Gs de 2,71. O valor encontrado para o RCC é compatível com o valor $G_s=2,68$, reportado por Santos (2007) e o valor de Gs para a bentonita sódica de $G_s=2,69$ encontra-se abaixo da faixa de valores reportada por Camargo (2012) entre 2,8 e 3,0. As misturas apresentam valores de Gs muito semelhantes, pouco influenciadas pela adição de bentonita, mantendo-se ao redor de 2,67. Não se percebeu uma tendência do Gs nas misturas com o aumento no teor de bentonita.

4.2.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA

Igualmente aos procedimentos adotados no ensaio de densidade das partículas, os ensaios com a bentonita foram realizados conforme as recomendações de Camargo (2012), sendo utilizado 25 g ao invés de 70 g, conforme recomendado pela norma, nos mesmos 125 ml de solução de água destilada e mantendo o mesmo período de repouso por 8 dias para garantir a sua completa hidratação, devido à alta expansibilidade da bentonita.

A Figura 4.5 mostra os resultados dos ensaios de granulometria realizados nas amostras de bentonita seguindo as diferentes metodologias, sedimentação com e sem defloculante, com

uso do granulômetro laser sem ultrassom e sem defloculante, com uso do granulômetro laser com ultrassom e com defloculante.

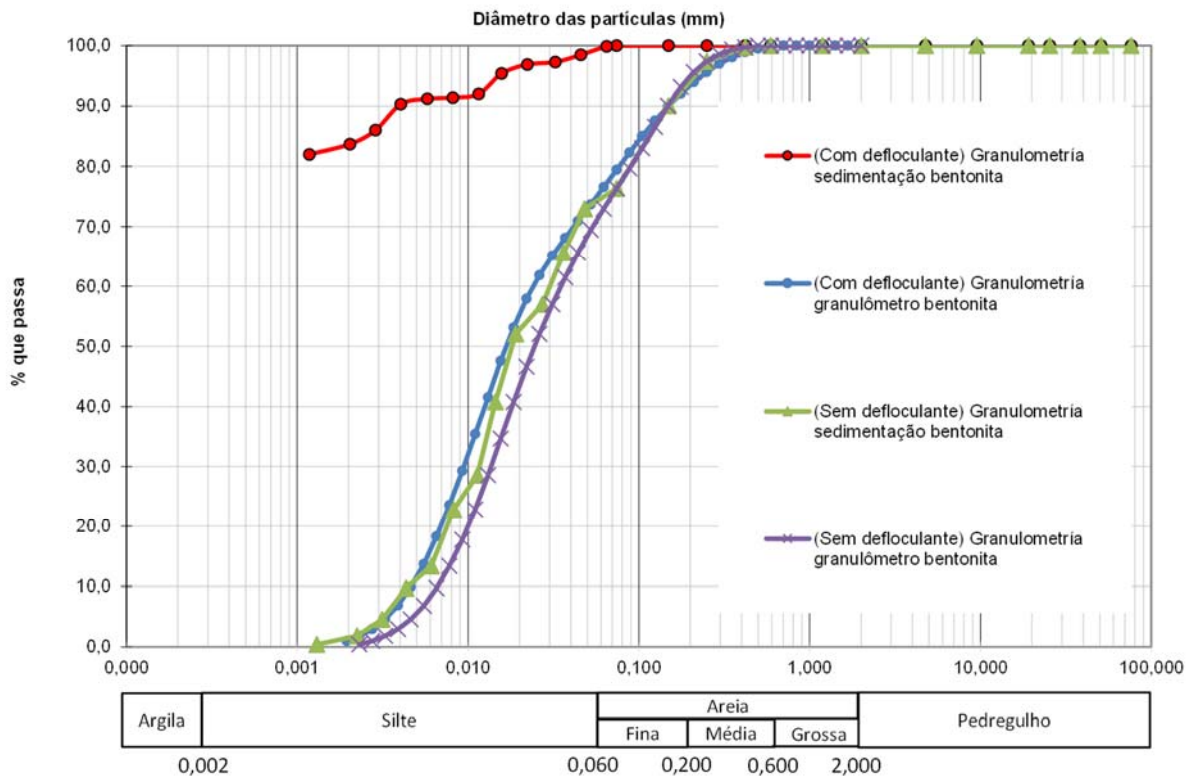


Figura 4.5 Granulometria da bentonita sódica (Soleminas)

A Figura 4.5 mostra uma grande variação nas porcentagens que passam para o ensaio de sedimentação da bentonita com o uso do defloculante em relação com os outros ensaios sem defloculante e com granulômetro laser. Esta variação pode ter ocorrido pelo processo de desagregação das partículas ocorrido no período 8 dias de hidratação da bentonita. É interessante notar que os resultados do ensaio por sedimentação com defloculante hexametáfosfato de sódio com concentração de 47,5 g de sal por 1000 cm³ de solução, encontram-se na faixa de valores reportados por Camargo (2012) e na mesma ordem de grandeza dos valores reportados por Batista (2006) para a bentonita sódica fornecida pela empresa Kataz, enquanto que para os outros ensaios os valores apresentaram pouca variação. O tamanho máximo de partícula obtido para a bentonita sódica com defloculante foi de 0,06 mm, enquanto que no ensaio sem defloculante foi de 0,42 mm, o que mostra alta agregação entre as partículas de bentonita.

A tabela 4.2 apresenta a composição granulométrica da bentonita segundo a NBR 7217 (ABNT, 1983) para os ensaios de granulometria por sedimentação com e sem defloculante.

Tabela 4.3 Granulométrica da bentonita sódica escala ABNT (1983)

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT, 1983) Bentonita								
Ensaio	Argila	Silte	Areia			Pedregulho		
			Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso
Com defloculante	85,9	13,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sem defloculante	2,8	77,4	13,5	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0

Os ensaios de granulometria para o RCC e as diferentes misturas foram realizados segundo a Norma NBR 7181 (ABNT, 1984). As Figuras 4.6 e 4.11 mostram, respectivamente, os resultados dos ensaios de granulometria do RCC e das misturas, adotando os vários métodos usados na avaliação da fração fina, sedimentação com e sem defloculante e granulômetro laser com e sem ultrassom.

Na Figura 4.6 observa-se que os resultados dos ensaios de granulometria nas amostras de RCC considerando os diferentes métodos usados não apresentam variação significativa. A tabela 4.3 apresenta os parâmetros obtidos a partir da análise da curva granulométrica do RCC com e sem defloculante, incluindo os coeficientes de uniformidade (Cu) e curvatura (Cc). Estes resultados mostram um diâmetro efetivo de partícula destes resíduos de 0,11mm, obtidos em ambas metodologias sedimentação com e sem defloculante. Os resultados confirmam a característica granular do RCC caracterizando-se como um material composto principalmente por frações típicas de areia média e fina.

Tabela 4.4 Análise da curva granulométrica do RCC com e sem defloculante.

Análise da granulometria RCC		
	Com defloculante (mm)	Sem defloculante (mm)
D₁₀	0,11	0,11
D₃₀	0,20	0,20
D₆₀	0,30	0,30
Cu	2,73	2,73
Cc	1,21	1,21

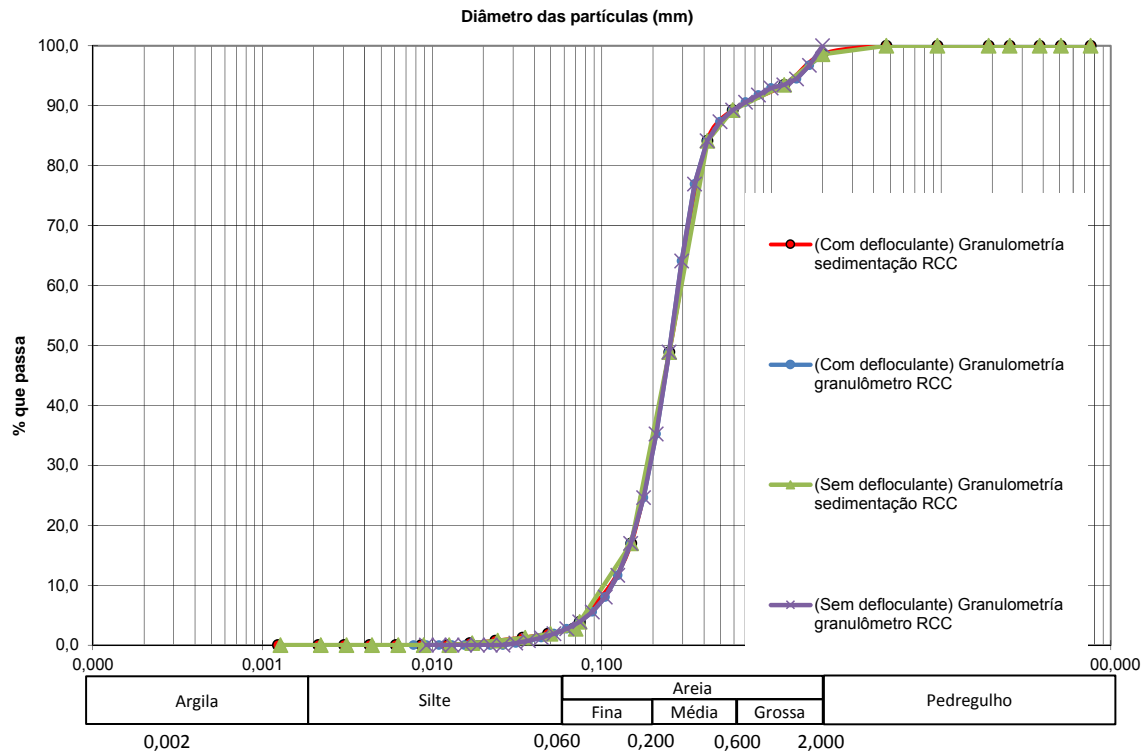


Figura 4.6. Granulometria RCC-areia rosa

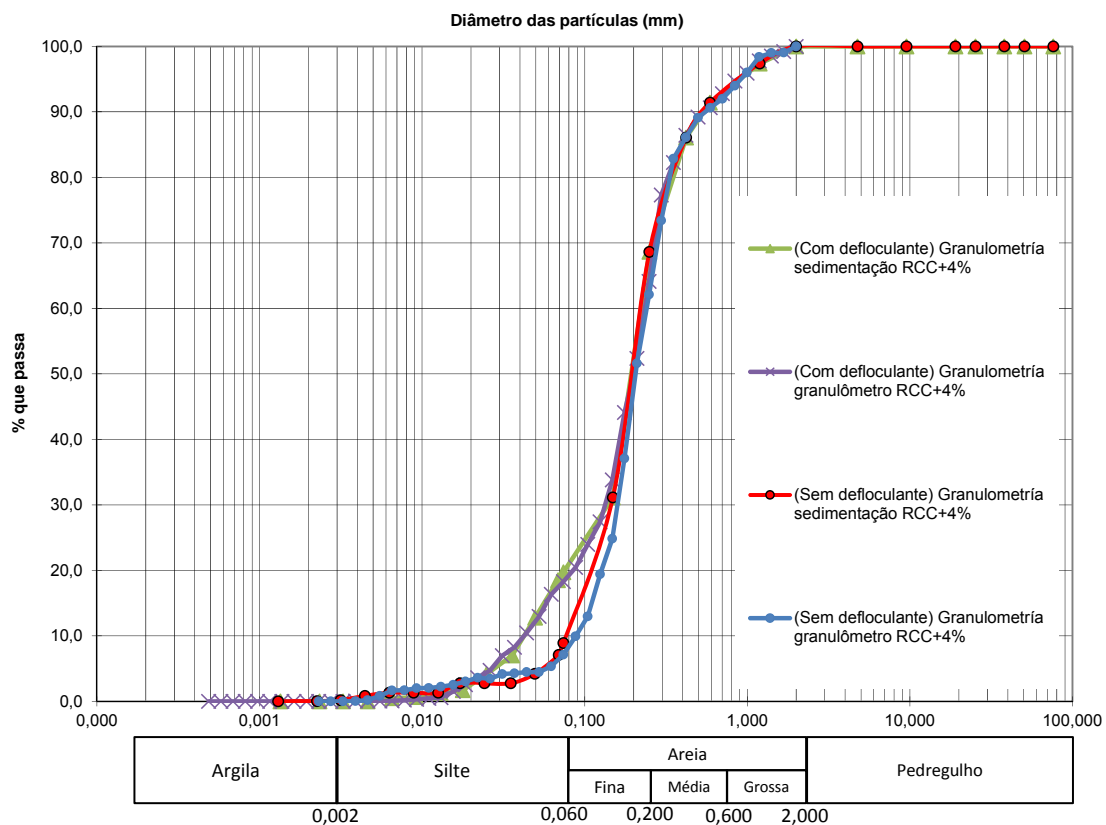


Figura 4.7 Granulometria RCC+4% bentonita.

A tabela 4.4 Tabela 4.5 apresenta os resultados da análise da curva granulométrica com e sem defloculante, o diâmetro efetivo obtido para esta associação foi de 0,04mm e 0,11mm, respectivamente a classificação ABNT é mostrada na tabela 4.6, trata-se de um material uniforme, mal graduado e composto principalmente por areia média e fina.

Tabela 4.5. Análise da curva granulométrica do RCC+4% com e sem defloculante.

Análise da granulometria RCC+4%		
	Com defloculante (mm)	Sem defloculante (mm)
D₁₀	0,04	0,11
D₃₀	0,13	0,20
D₆₀	0,22	0,30
Cu	2,00	7,50
Cc	0,70	3,33

A Figura 4.8 mostra a curva granulométrica do RCC+8% e a tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos com base nas análises das curvas granulométricas com e sem defloculante, o diâmetro efetivo para esta associação para os ensaios com e sem defloculante foi de 0,01mm e 0,05 mm, respectivamente.

Tabela 4.6 Análise da curva granulométrica do RCC+8% com e sem defloculante.

Análise da granulometria RCC+8%		
	Com defloculante	Sem defloculante
D10	0,010	0,050
D30	0,040	0,120
D60	0,190	0,210
CU	19,000	4,200
Cc	0,842	1,371

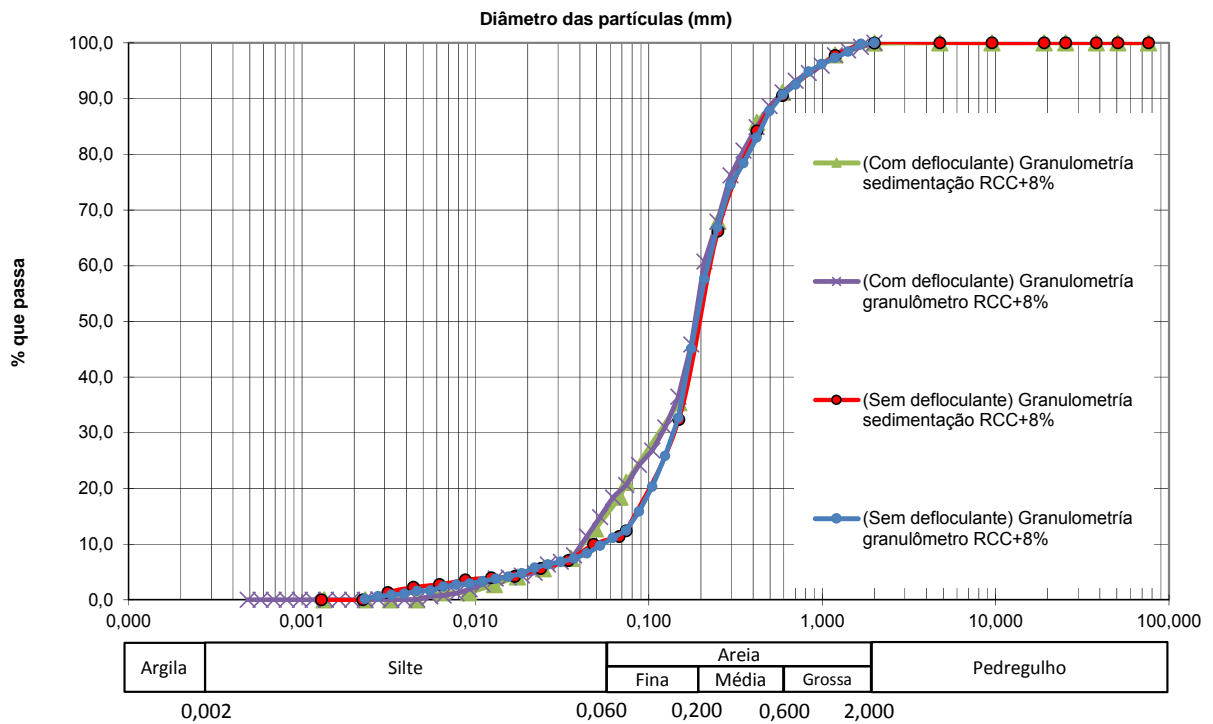


Figura 4.8 Granulometria RCC+8% bentonita.

Na Figura 4.9 observa-se que os resultados obtidos a partir dos ensaios de granulometria da mistura RCC+14% de bentonita pelos diferentes métodos de avaliação da fração fina não apresentaram variação significativa quando comparados entre si os ensaios com defloculante na sedimentação convencional e utilizando o granulômetro a laser. As diferenças foram mais pronunciadas na comparação entre as condições com e sem defloculante, evidenciando um pequeno aumento nas porcentagens de frações silte e argila, enquanto que as porcentagens para os tamanhos típicos de areia média e fina diminuíram.

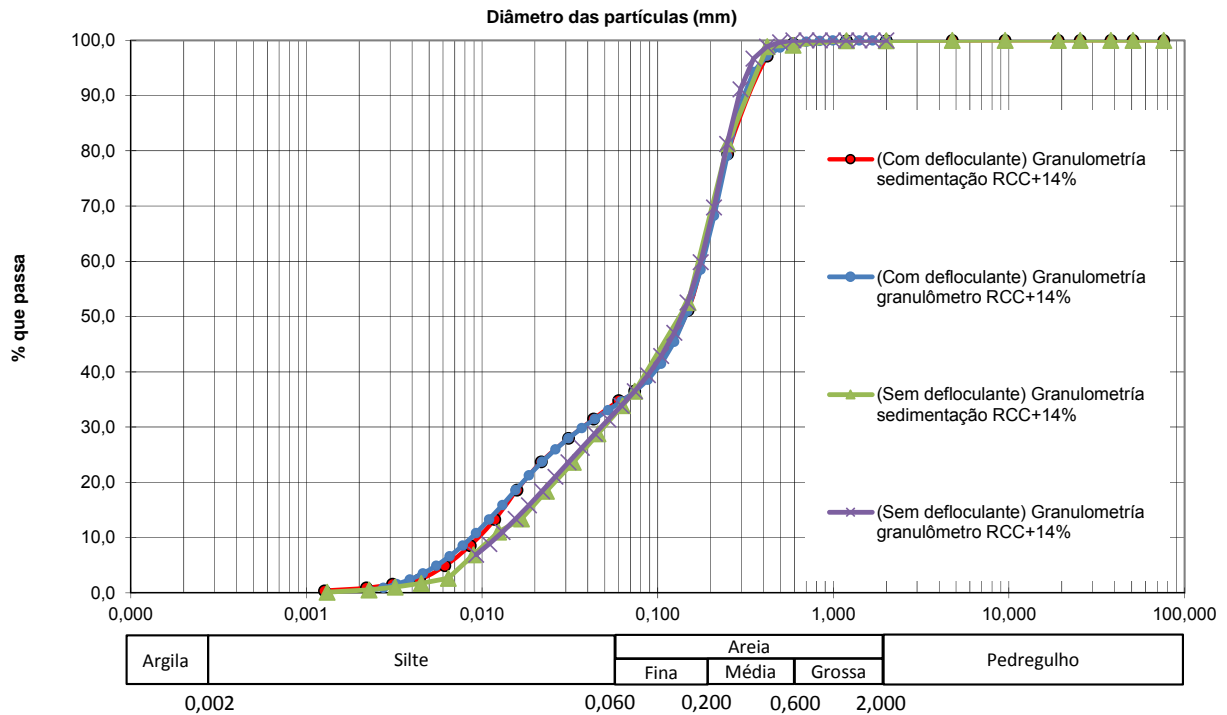


Figura 4.9 Granulometria RCC+14% bentonita.

Na Figura 4.10 observa-se que os dados dos ensaios de granulometria da mistura RCC+16% de bentonita apresenta uma característica muito semelhante a mistura RCC+14%, igualmente ao que ocorreu na mistura de RCC+14%, se observa um pequeno aumento nas porcentagens relativas a fração silte e argila e diminuição das porcentagens para os tamanhos de areia média e fina.

Na Figura 4.11 observa-se que os resultados dos ensaios de granulometria da mistura RCC+18% de bentonita relativas a todos os métodos de ensaios utilizados, não apresentaram variação significativa.

A tabela 4.6 resume os resultados a respeito das porcentagens das diferentes frações obtidas a partir das médias dos ensaios de granulometria realizados para os diferentes materiais, bentonita e RCC e misturas estudados. Uma observação importante refere-se as porcentagens da fração areia fina que se manteve pouco alterada em relação a característica original do RCC. O mesmo não ocorreu com a fração areia media que apresentou uma queda de cerca de 20% em relação a condição original do RCC.

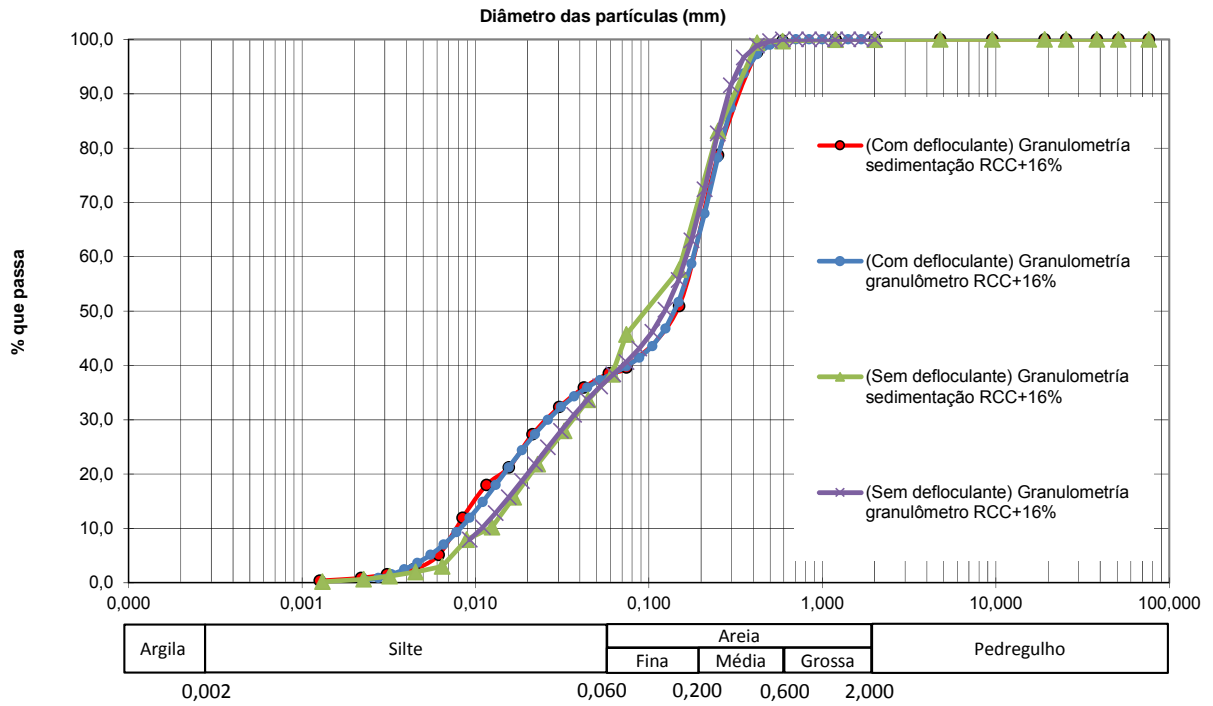


Figura 4.10 Granulometria RCC+16% bentonita

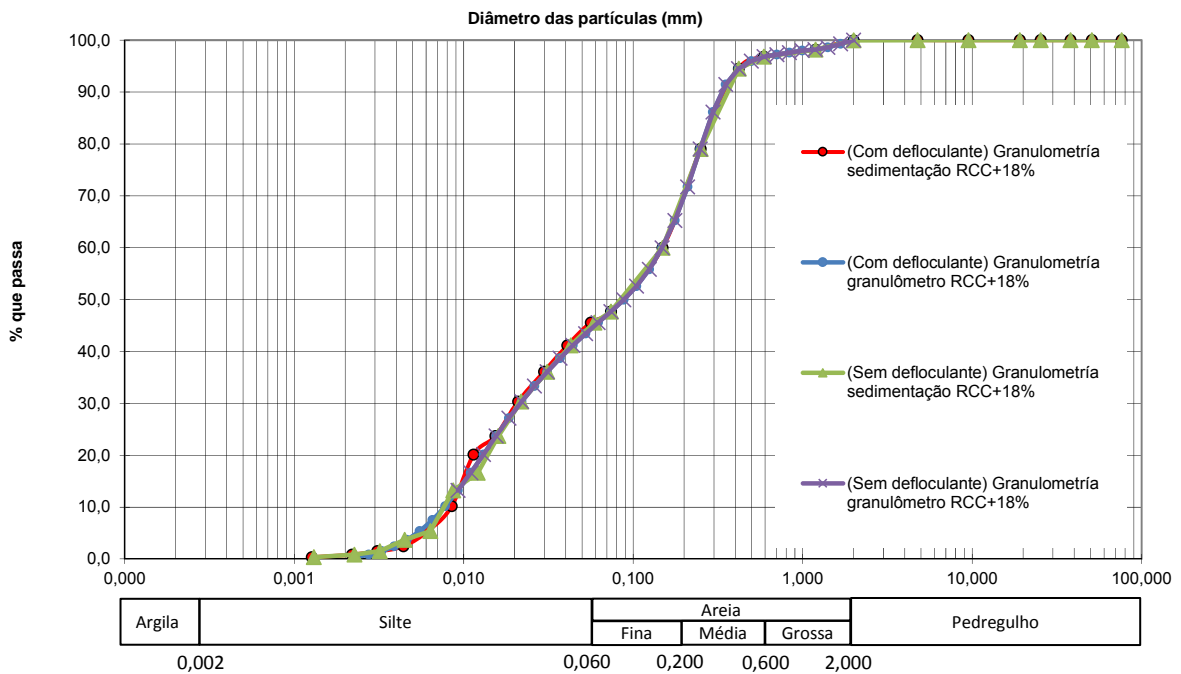


Figura 4.11 Granulometria RCC+18% bentonita.

Tabela 4.7 Resultados da análise granulométrica conjunta das amostras.

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT, 1983) - Com defloculante								
Material	Argila	Silte	Areia			Pedregulho		
			Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso
Bentonita	85,9	13,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RCC	0,0	2,4	30,7	56,2	9,3	1,4	0,0	0,0
RCC+4%	0,2	5,6	44,3	41,5	8,4	0,0	0,0	0,0
RCC+8%	1,0	9,9	38,6	41,2	9,3	0,0	0,0	0,0
RCC+14%	1,4	33,4	30,6	34,0	0,5	0,0	0,0	0,0
RCC+16%	1,4	37,3	26,2	34,8	0,2	0,0	0,0	0,0
RCC+18%	1,4	45,3	22,9	27,3	3,1	0,1	0,0	0,0

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT, 1983) - Sem defloculante								
Material	Argila	Silte	Areia			Pedregulho		
			Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso
Bentonita	2,8	77,4	13,5	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0
RCC	0,0	2,3	30,8	56,2	9,3	1,4	0,0	0,0
RCC+4%	0,0	15,9	34,1	41,5	8,5	0,0	0,0	0,0
RCC+8%	0,0	16,0	35,8	39,4	8,7	0,0	0,0	0,0
RCC+14%	0,8	32,2	34,1	32,1	0,8	0,0	0,0	0,0
RCC+16%	1,2	44,6	23,7	27,3	3,1	0,1	0,0	0,0
RCC+18%	1,2	44,6	23,7	27,3	3,1	0,1	0,0	0,0

4.2.4 CLASSIFICAÇÃO SUCS E AASHTO DAS AMOSTRAS

Com os resultados da análise granulométrica conjunta e dos limites de Atterberg foi possível enquadrar os materiais analisados dentro das propostas de classificações de solos segundo o sistema de classificação unificada (SUCS) e o sistema de classificação da AASHTO, os resultados são apresentados na tabela 4.7 e na Figura 4.12.

Tabela 4.8 Classificação das amostras segundo os Sistemas SUCS e AASHTO

Amostra	Classificação das amostras com defloculante	
	SUCS	AASHTO
RCC	SP - Areia mal graduada	A3 - Areia fina
Bentonita	CH - Argila de alta plasticidade	A.7.5 - Solo argiloso
RCC+4%	SP-SM - Areia mal graduada com silte	A3 - Areia fina
RCC+8%	SP-SM - Areia mal graduada com silte	A3 - Areia fina
RCC+14%	SM - Areia siltosa	A.7.5 - Solo argiloso
RCC+16%	SM - Areia siltosa	A.7.5 - Solo argiloso
RCC+18%	SC - Areia argilosa	A.7.5 - Solo argiloso

A Figura 4.12 mostra os pontos da classificação das misturas RCC+14%, RCC+16% juntos na região correspondente ao solo tipo ML e a mistura RCC+18% na faixa MH. Os pontos das misturas com plasticidade aceitáveis segundo a norma vão-se deslocando do limite entre a

região de baixa plasticidade para a de alta plasticidade como foi esperado pela adição de bentonita ao aliar um material de alta plasticidade com um material granular como é o RCC.

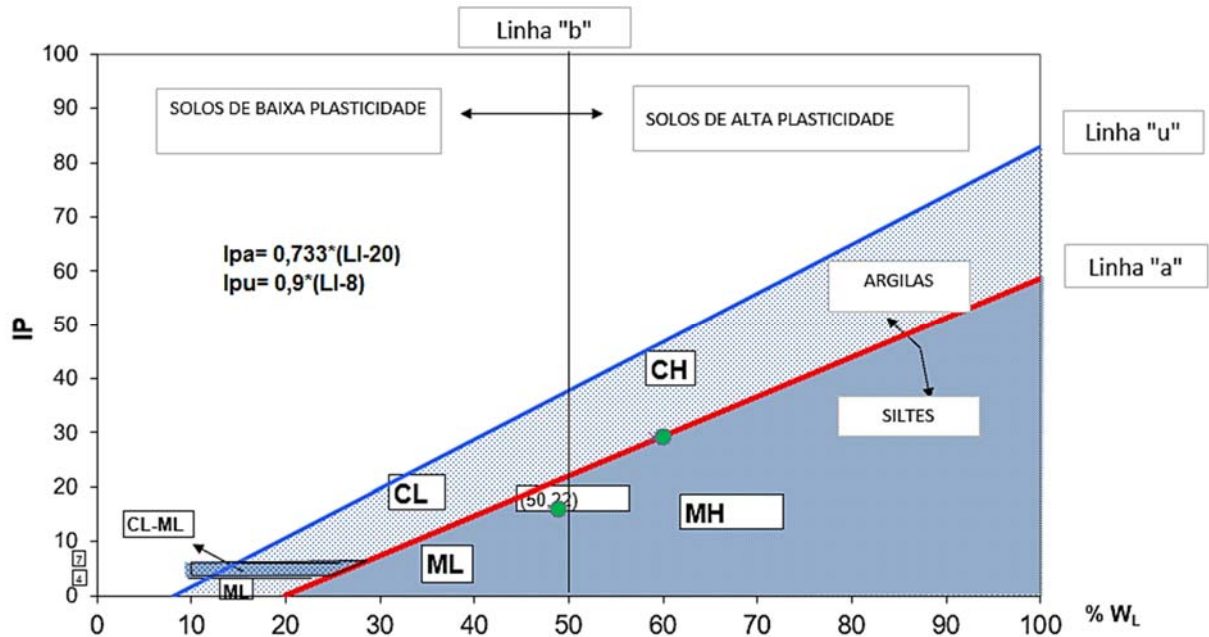


Figura 4.12 Carta de plasticidade das misturas com adição de 14%, 16% e 18%.

4.2.5 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA-COMPACTAÇÃO

Com a finalidade de obter a curva de compactação, bem como a umidade ótima e o seu respectivo peso específico aparente seco máximo dos materiais, foi realizado o ensaio de compactação sem reuso nas energias Proctor-Normal, Intermediária e Modificada seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 7182 (ABNT, 1986).

A Figura 4.13 apresenta os resultados dos ensaios de compactação do RCC. Através desses parâmetros obtidos para o RCC, pode-se observar que o teor de umidade ótima para as energias Normal e Intermediária encontram-se na ordem de 21%, enquanto que o peso específico seco se encontra na ordem de 15 kN/m³. Em geral, o aumento no peso específico é induzido pela redução dos vazios e o aumento na quantidade de partículas sólidas nas amostras, que também levam a uma diminuição na umidade ótima.

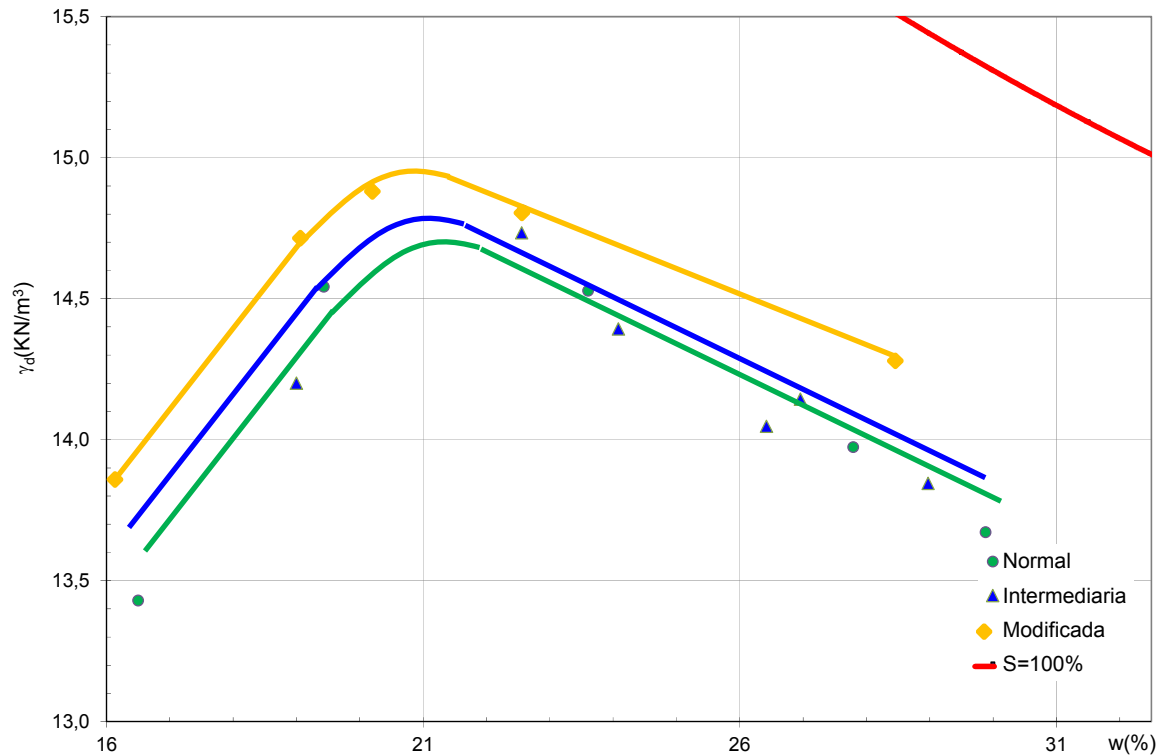


Figura 4.13 Resultados do ensaio de compactação RCC

A Figura 4.14 mostra os resultados da compactação da bentonita, observa-se para as diferentes energias Normal, Intermediária e Modificada obteve-se um peso específico seco ao redor de 12 kN/m^3 e uma umidade ótima de 30% e do 40%. Os resultados foram como esperados, para a energia Normal obteve-se um peso específico seco de $10,4 \text{ kN/m}^3$ semelhante ao reportado por Camargo (2012) de $9,6 \text{ kN/m}^3$ para a bentonita sódica, em quanto que para a umidade ótima tem-se uma grande variação do valor obtido no ensaio de 42,0% em comparação com o valor de 50% dos ensaios de Camargo (2012), acredita-se que dita variação deve-se a uma composição mineralógica diferenciada nas bentonitas, uma fornecida pela empresa *Bentonit União Nordeste S.A* e outra por *Soleminas indústria e comercio de minerais Ltda*. A variação nos valores de peso específico e umidade ótima das amostras compactadas foi da forma esperada, apresenta um aumento do peso específico seco e diminuição no teor de umidade com o aumento da energia de compactação.

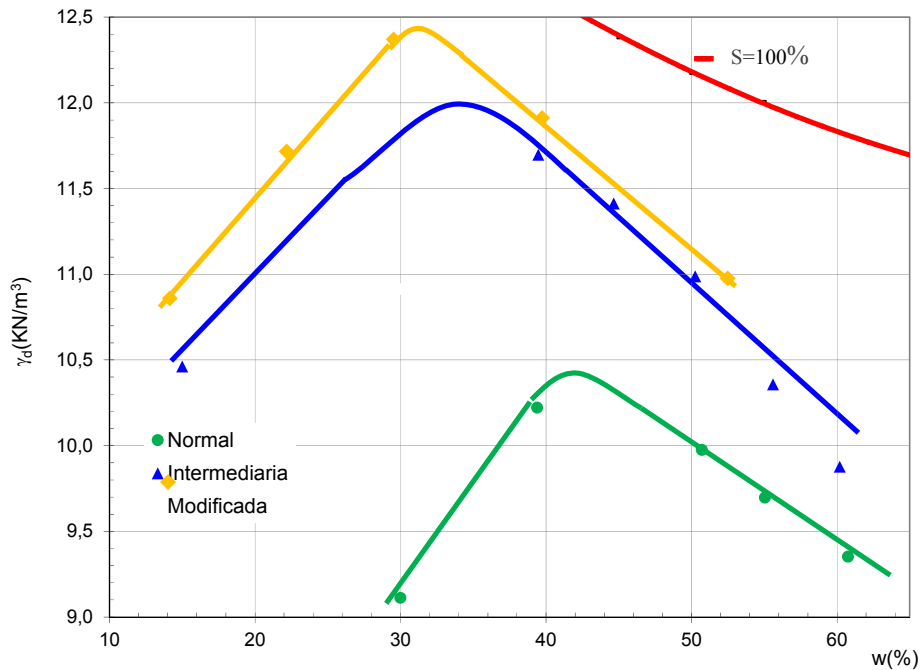


Figura 4.14 Resultados do ensaio de compactação da bentonita

A Figura 4.15 apresenta os resultados dos ensaios de compactação na mistura de RCC+4% de bentonita, mostra-se a variação nos valores de peso específico e umidade ótima com aumento do peso específico seco de 15,6 kN/m^3 para 16,9 kN/m^3 e diminuição no teor de umidade de 21,0% para 14,5%, ao aumentar a energia de compactação de normal para modificada, tal como aconteceu para a energia intermediária.

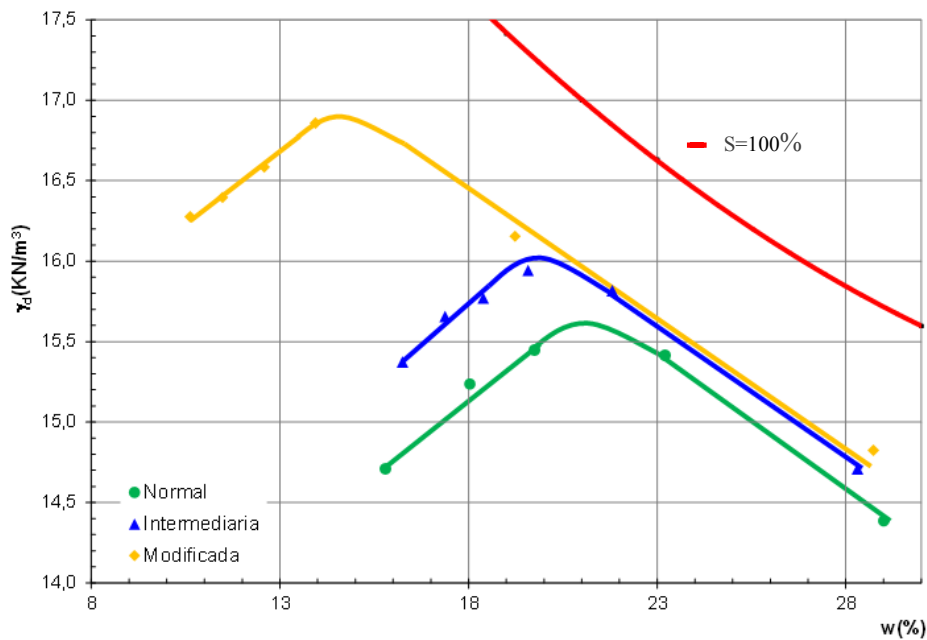


Figura 4.15 Resultados do ensaio de compactação RCC+4%

A Figura 4.16 apresenta os resultados dos ensaios de compactação na mistura de RCC+8% de bentonita, mostra-se a variação nos valores de peso específico e umidade ótima com aumento do peso específico seco de $15,5 \text{ kN/m}^3$ para $16,9 \text{ kN/m}^3$ e diminuição no teor de umidade de 20,2% para 16,4%, ao aumentar a energia de compactação de Normal para Modificada.

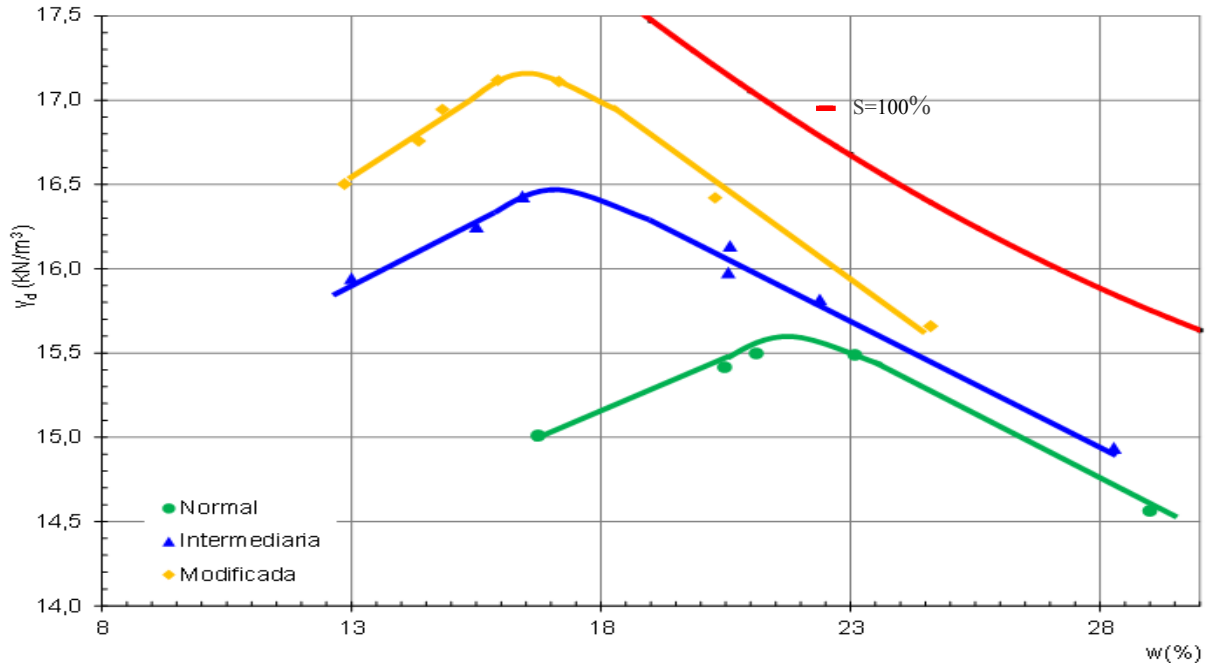


Figura 4.16 Resultados do ensaio de compactação RCC+8%

A Figura 4.17 apresenta os resultados dos ensaios de compactação na mistura de RCC+14% de bentonita, mostra-se a variação nos valores de peso específico e umidade ótima com aumento do peso específico seco de $15,8 \text{ kN/m}^3$ para $17,6 \text{ kN/m}^3$ e diminuição no teor de umidade de 18,5% para 12,3%, ao aumentar a energia de compactação de normal para modificada.

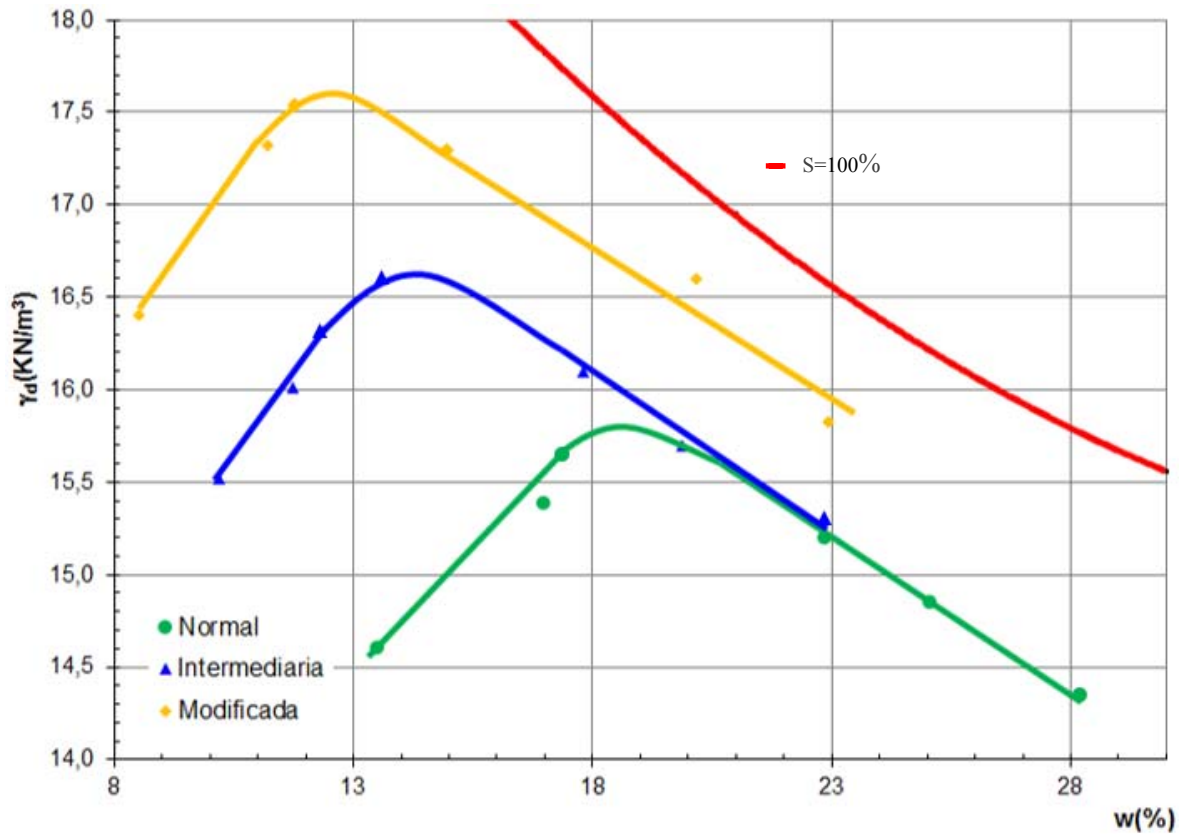


Figura 4.17 Resultados do ensaio de compactação RCC+14%

A Figura 4.18 apresenta os resultados dos ensaios de compactação na mistura de RCC+16% de bentonita, mostra-se a variação nos valores de peso específico e umidade ótima com aumento do peso específico seco de $15,2 \text{ kN/m}^3$ para $16,9 \text{ kN/m}^3$, observa-se diminuição no teor de umidade de $17,0\%$ para $11,8\%$ com o aumento da energia de compactação, a tendência continuo da forma esperada.

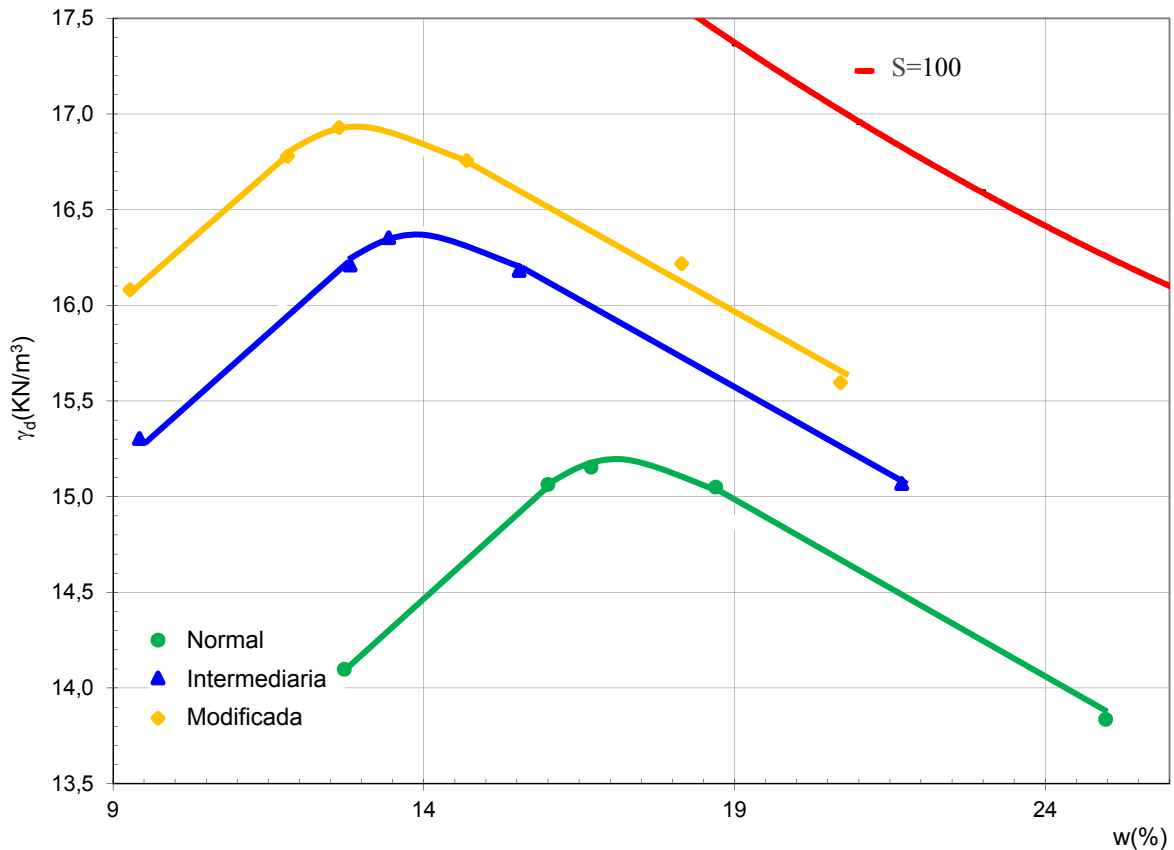


Figura 4.18 Resultados do ensaio de compactação RCC+16%

A Figura 4.19 apresenta os resultados dos ensaios de compactação na mistura de RCC+18% de bentonita, mostra-se a variação nos valores de peso específico e umidade ótima com aumento do peso específico seco de 14,6 kN/m³ para 16,8 kN/m³ e diminuição no teor de umidade de 21,9% para 13,3%, ao aumentar a energia de compactação de Normal para Modificada, comportamento diferenciado do aquele apresentado pelas outras misturas com possível quebra de grãos para o qual não se tem uma explicação clara e precisa-se de aprofundar na sua compressão.

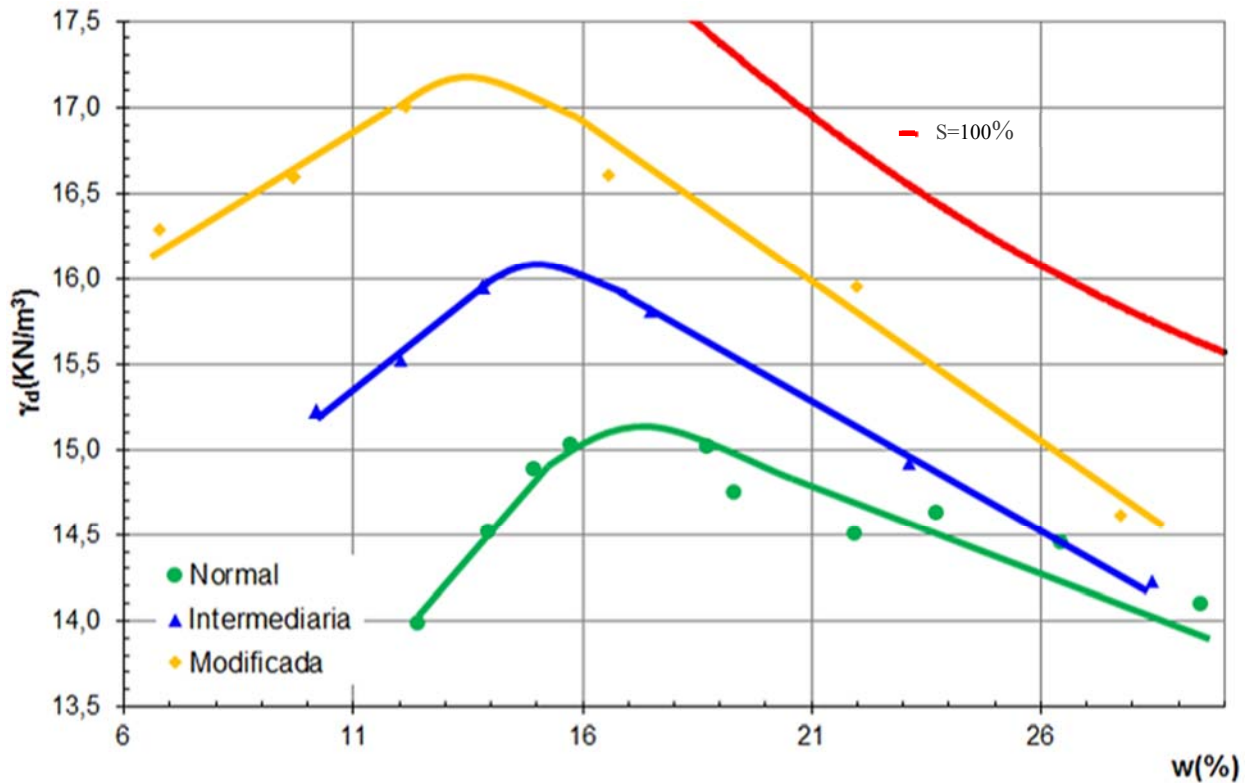


Figura 4.19 Resultados do ensaio de compactação RCC+18%

O resumo dos resultados dos ensaios de compactação para todas as amostras ensaiadas é mostrado na tabela 4.8. Nas Figuras 4.13 a 4.19 observa-se que as curvas apresentam uma configuração abatida semelhante às encontradas nos materiais granulares, esta característica poderia ser interpretada como uma condição na qual o peso específico seco do material não apresenta significativa susceptibilidade às variações no teor de umidade.

A Figura 4.20 mostra os resultados comparativos dos ensaios de compactação das diferentes amostras para ter uma melhor ideia daquelas variações nos parâmetros de peso específico seco e umidade ótimas encontradas ao acrescentar a energia de compactação.

Tabela 4.9. Resultados dos ensaios de compactação.

Material	Energia	w _{ot} . (%)	γ _{dmax} (kN/m ³)
RCC	Normal	21,20	14,80
	Intermediaria	21,10	14,90
	Modificada	20,50	15,10
Bentonita	Normal	42,00	10,40
	Intermediaria	34,00	11,90
	Modificada	30,50	12,40
RCC+4%	Normal	21,00	15,60
	Intermediaria	20,00	16,00
	Modificada	14,50	16,90
RCC+8%	Normal	21,50	15,60
	Intermediaria	17,00	16,40
	Modificada	16,30	17,20
RCC+14%	Normal	18,50	15,80
	Intermediaria	14,00	16,60
	Modificada	12,30	17,60
RCC+16%	Normal	17,00	15,20
	Intermediaria	13,80	16,60
	Modificada	12,00	16,90
RCC+18%	Normal	15,00	16,10
	Intermediaria	17,50	15,10
	Modificada	13,50	17,20

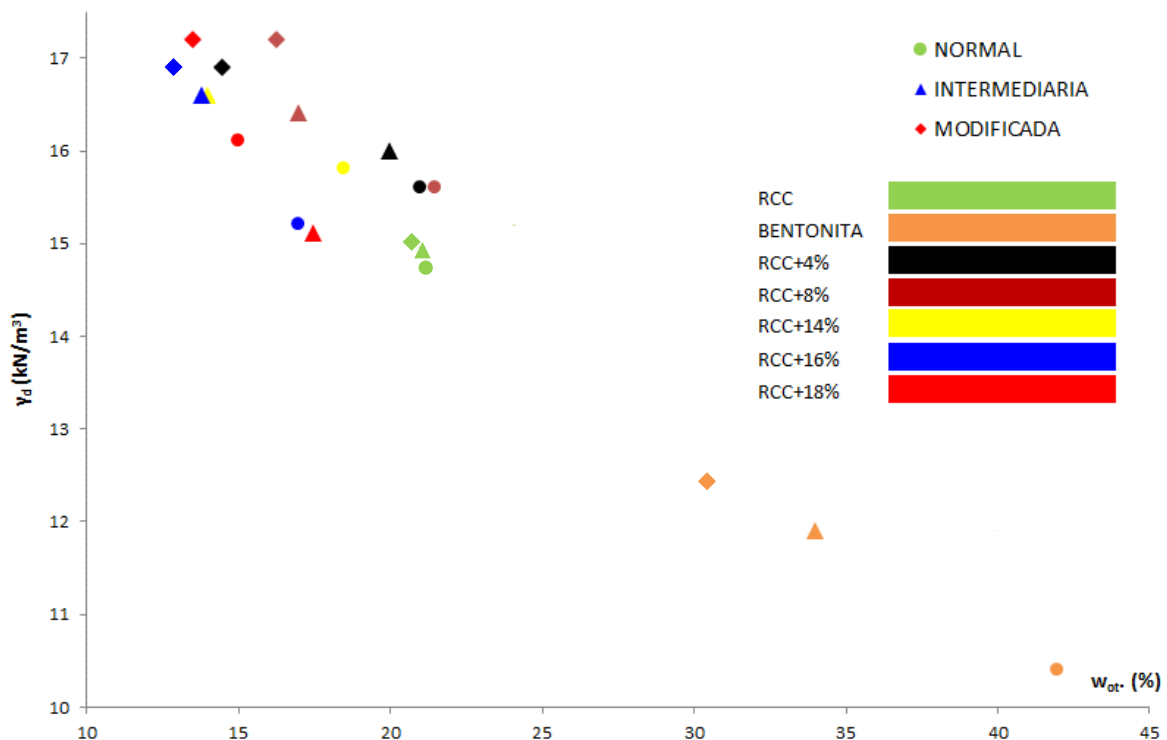


Figura 4.20 Resultados comparativos do ensaio de compactação

4.2.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA - pH

Nas tabelas 4.9 e 4.10 e na Figura 4.21 apresentam-se os resultados da determinação de pH em água destilada, em acetato de sódio e em solução de KCl. Para todas as amostras testadas o resultado do ensaio em água destilada foi de solução fortemente alcalina ou básica. O Δ pH determinado pela diferença entre o pH em KCl e o pH em água, foi positivo para todas as amostras, o que conforme Lima (2003), citado por Pessoa (2004), indica a predominância de cargas positivas, óxidos de ferro, óxidos de alumínio e também indicam uma quantidade baixa de alumínio trocável. Observa-se que as misturas em solução ácida tornaram-se também ácidas, as soluções com cloreto de potássio mostram grande variabilidade entre as diferentes amostras. O pH é um parâmetro influente no comportamento do solo, interferindo nos processos de defloculação/floculação das partículas de argila. As amostras atenderam os requerimentos exigidos para ser usados como material constituinte de camadas de cobertura de aterros sanitários segundo recomendações de Daniel e Benson (1990), mais apresentaram susceptibilidade ao contato com soluções ácidas que baixaram o pH.

Tabela 4.10 Resultados da determinação de pH

AMOSTRA	Temperatura (°C)	pH _{KCl}	pH _{H2O}	Δ pH	pH _{Acetato de sódio}
RCC	26,5	7,98	9,24	1,26	7,99
BENTONITA	26,5	7,12	9,5	2,38	3,96
RCC+4%	26,5	11,16	11,19	0,03	3,53
RCC+8%	26,5	10,73	11,07	0,34	3,61
RCC+14%	26,5	7,4	9,91	2,51	4,16
RCC+16%	26,5	10,82	10,86	0,04	4,09
RCC+18%	26,5	7,09	9,12	2,03	4,02

Tabela 4.11 Resultados da determinação de pH

AMOSTRA	Resultado pH H2O	Resultado pH KCl	Resultado pH Acetato de sódio
RCC	Fortemente alcalino	Alcalino	Alcalino
BENTONITA	Fortemente alcalino	Neutro	Extremamente ácido
RCC+4%	Fortemente alcalino	Fortemente alcalino	Extremamente ácido
RCC+8%	Fortemente alcalino	Fortemente alcalino	Extremamente ácido
RCC+14%	Fortemente alcalino	Alcalino	Extremamente ácido
RCC+16%	Fortemente alcalino	Fortemente alcalino	Extremamente ácido
RCC+18%	Fortemente alcalino	Neutro	Extremamente ácido

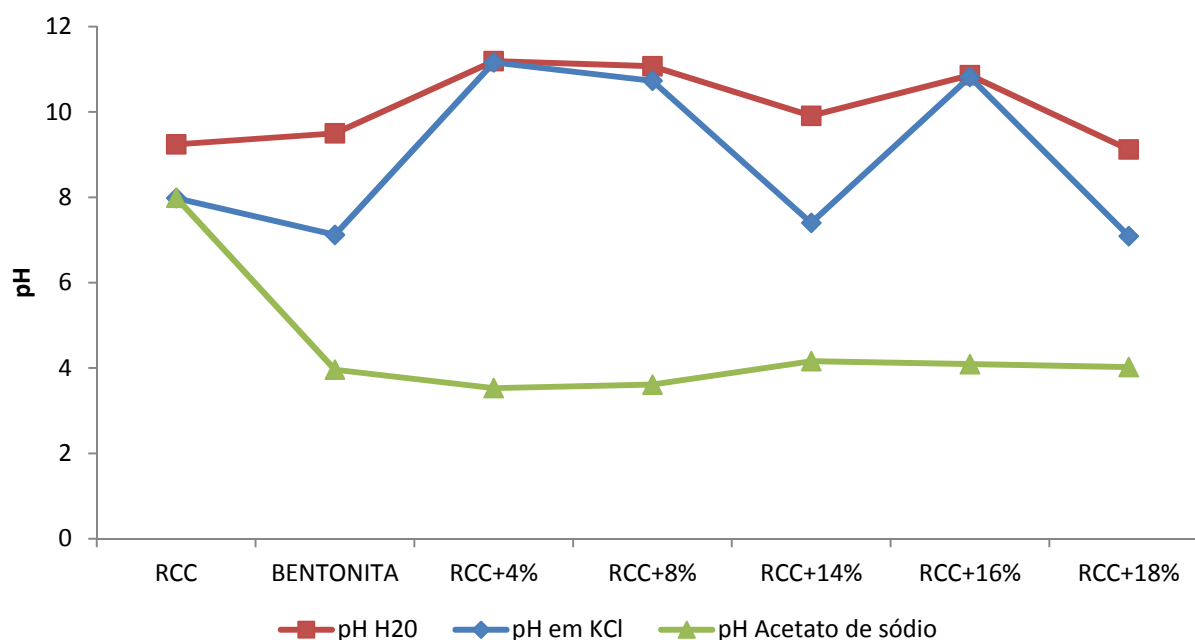


Figura 4.21 Resultados da determinação de pH

O pH afeta fortemente a expansão livre da bentonita, sendo que as bentonita sódicas são as mais afetadas por este fator. A expansão máxima da argila ocorre em um meio com pH aproximado de 8. Além disso, a redução da expansão, associada à redução do pH, provoca uma redução da dupla camada de íons, aumentando, conseqüentemente, a condutividade hidráulica. Considerando-se que em um meio contaminado poderá existir uma grande variação de pH, a probabilidade de ocorrência de variação de condutividade hidráulica em aterros contendo bentonita sódica é elevada (KHERA, 1995; CAMARGO, 2012).

4.2.7 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A tabela 4.11 e as Figuras 4.22 à 4.28 mostram os resultados dos ensaios de Difração de raios x para as diferentes amostras. Nos difractogramas obtidos para o RCC e para a bentonita observa-se grande ruído e uma base pouco clara para a interpretação. A utilização do software EVA e a sua base de dados associada tornou possível a identificação dos diferentes minerais presentes em cada um dos materiais estudados e nas misturas. As porcentagens totais não chegaram a 100% pela dificuldade de identificação de alguns outros minerais presentes. O mineral predominante no RCC e nas misturas foi a Sílica com porcentagens acima de 55%, seguido pelos peróxidos de Cálcio e os óxidos de Alumínio com aproximadamente 15% e em menor proporção óxidos de Ferro com 5% de conteúdo.

Tabela 4.12 Composição das amostras segundo os resultados DRX

Constituinte	Fórmula	% Composição						
		RCC	Bentonita	RCC+4%	RCC+8%	RCC+14%	RCC+16%	RCC+18%
Peróxido de Cálcio	CaO ₂		0,5	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Óxido de Cálcio	CaO	17,5	2,4	16,9	16,3	15,4	15,1	14,8
Óxido de Magnésio	MgO	1,25		1,2	1,2	1,1	1,1	1,0
Óxido de Potássio	K ₂ O		0,58	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Óxido de Sódio	Na ₂ O		2,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4
Anidro Silícico	SiO ₂	55	58,1	55,1	55,2	55,4	55,5	55,6
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	14	13,85	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
Óxido Férrico	Fe ₂ O ₃	4,5	7,2	4,6	4,7	4,9	4,9	5,0
Óxido de Titânio	TiO ₂		0,9	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2
Total		92,3	85,7	92,0	91,7	91,3	91,2	91,1

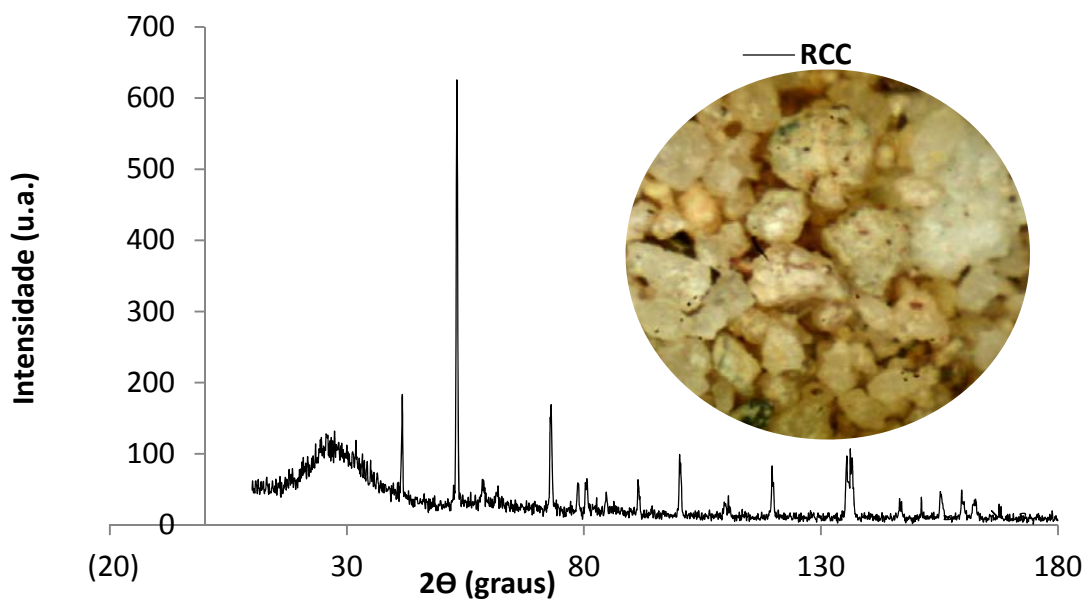


Figura 4.22 Resultados DRX RCC

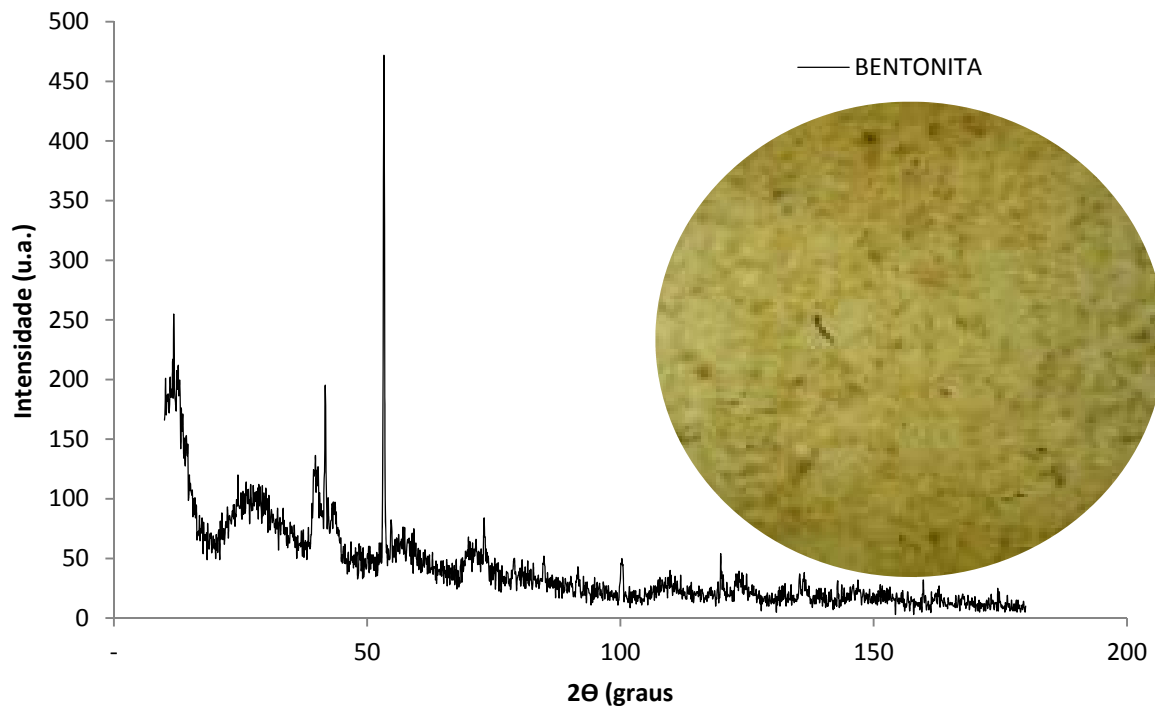


Figura 4.23 Resultados DRX bentonita

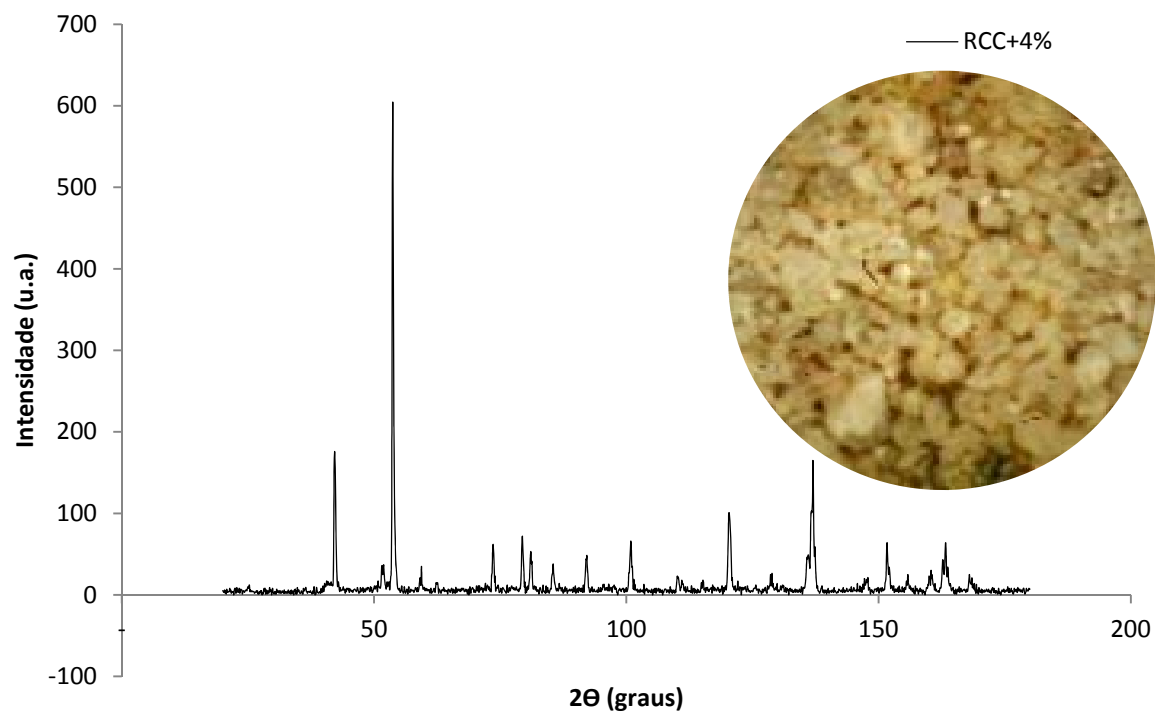


Figura 4.24 Resultados DRX RCC+4%

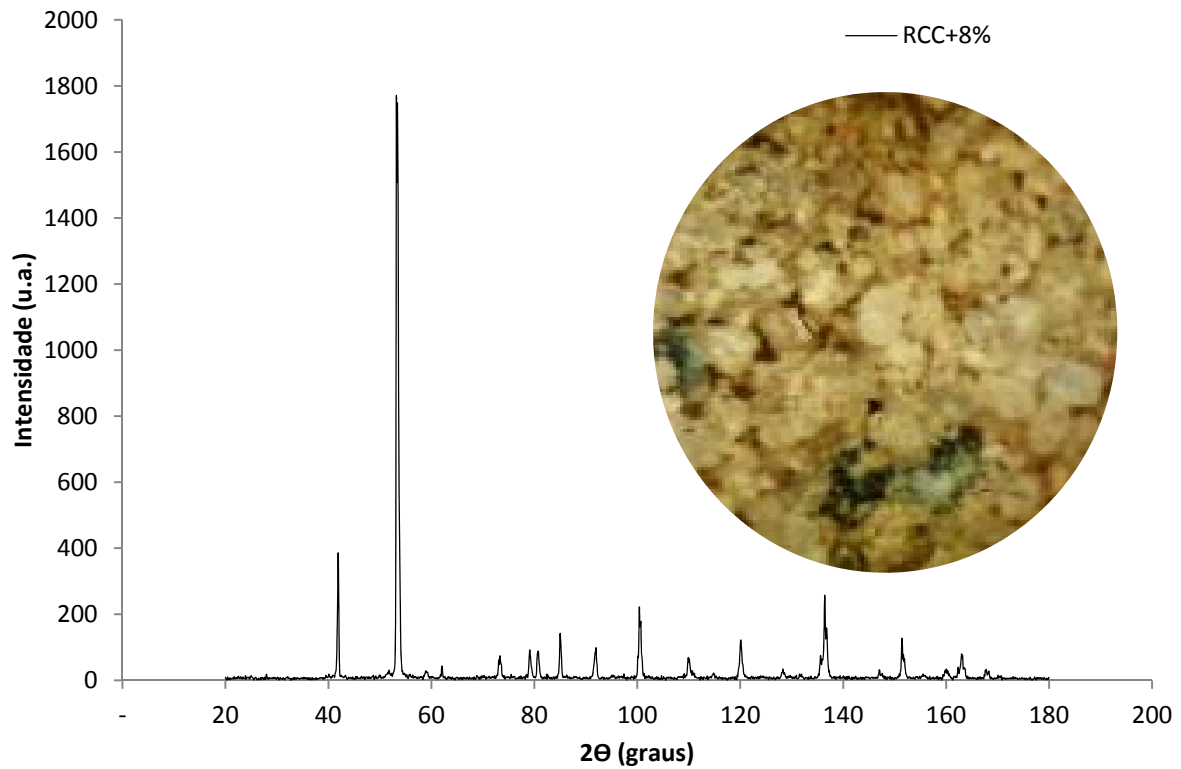


Figura 4.25 Resultados DRX RCC+8%

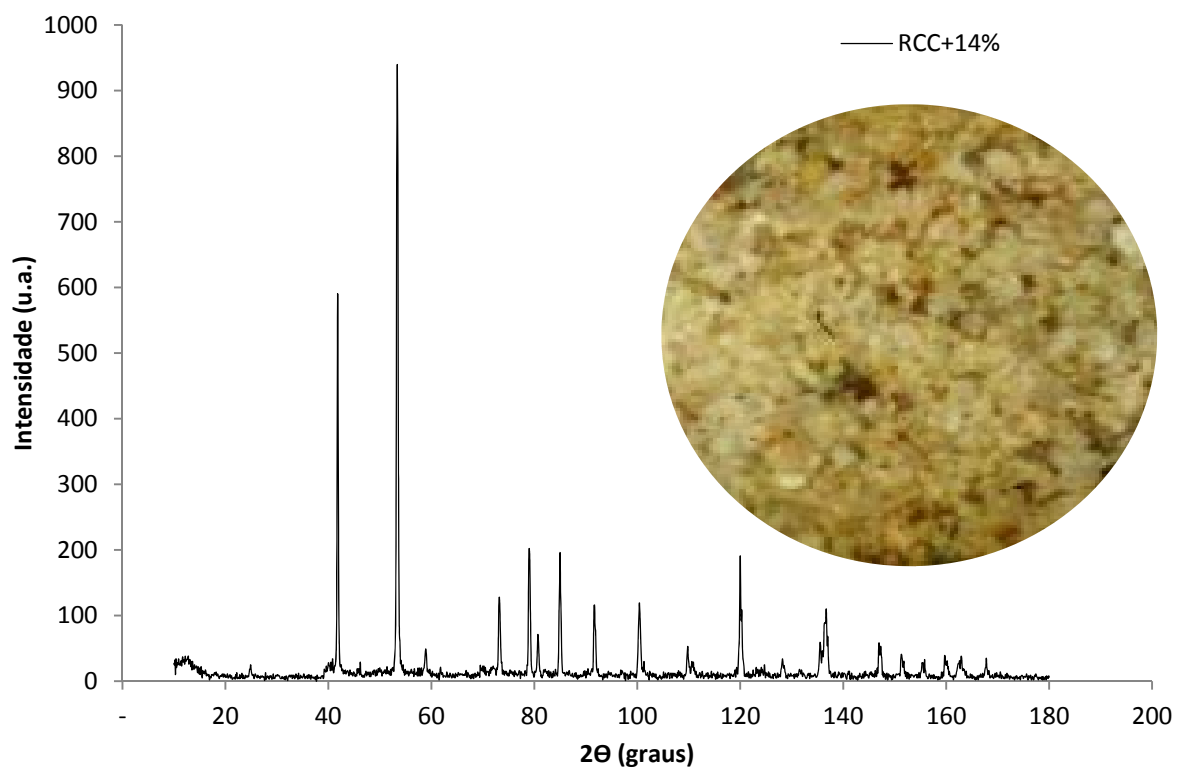


Figura 4.26 Resultados RCC+14%

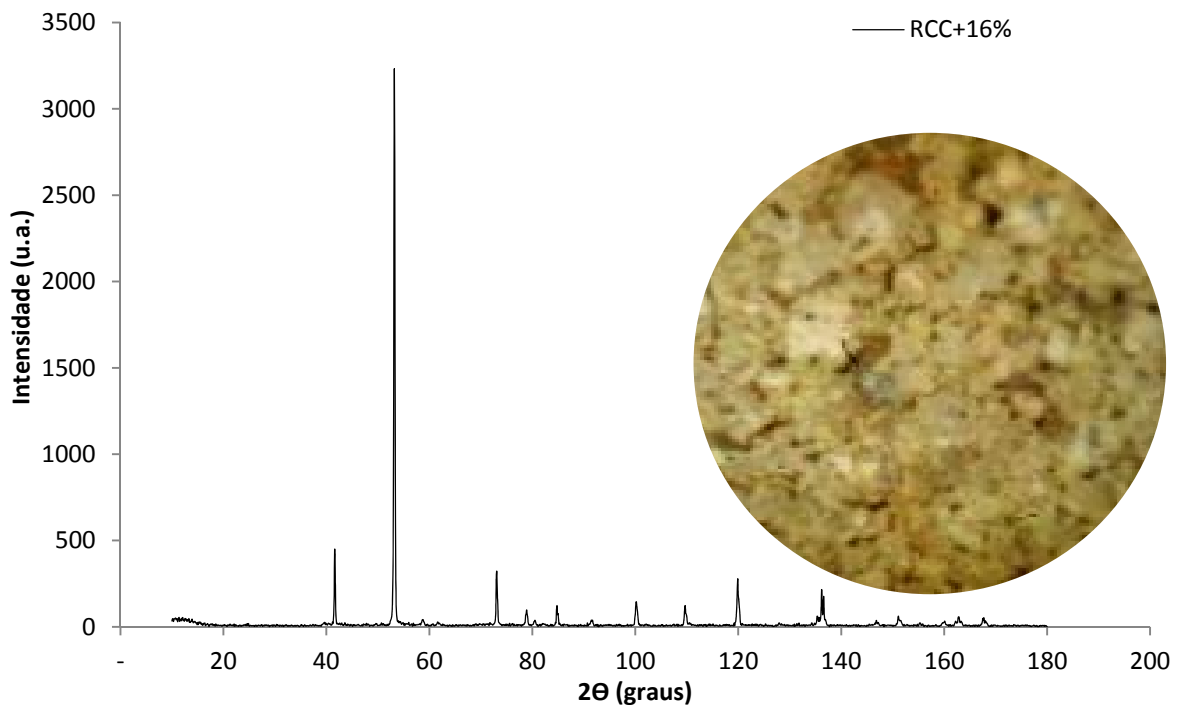


Figura 4.27 Resultados DRX RCC+16%

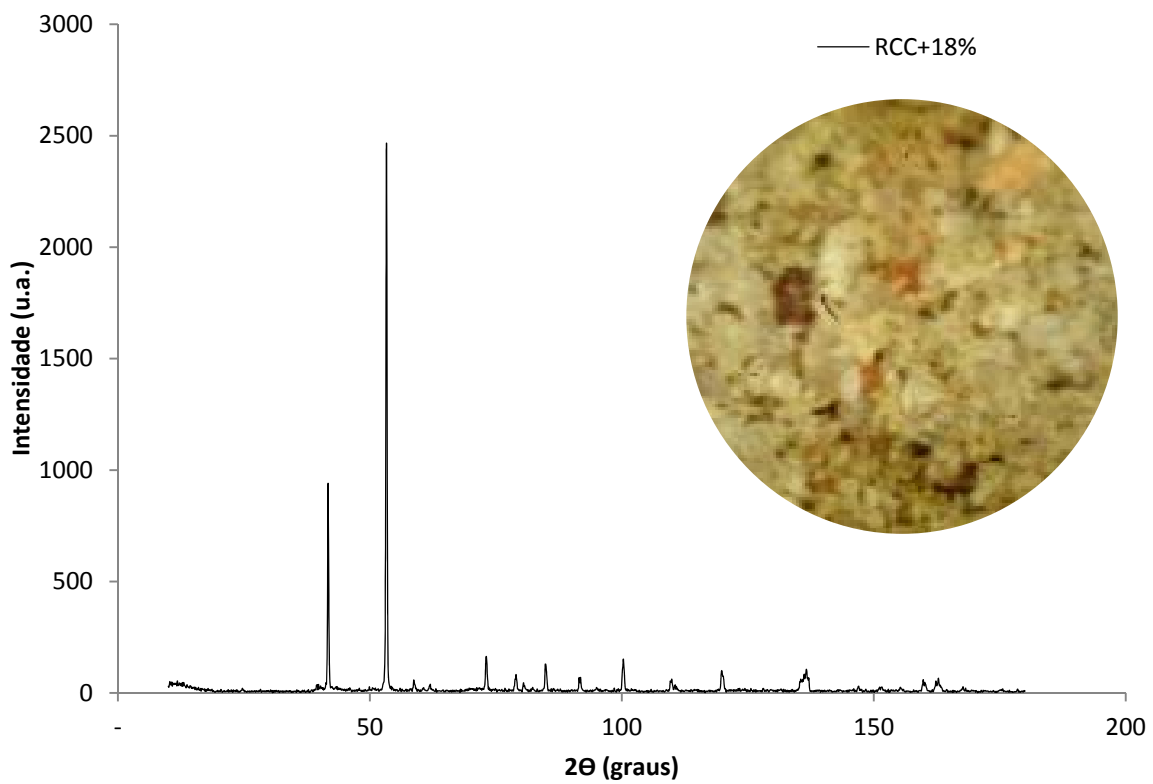


Figura 4.28 Resultados DRX RCC+18%

4.3 CARACTERÍSTICAS HIDRO-MECÂNICAS

4.3.1 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os resultados dos ensaios para determinação da condutividade hidráulica das amostras são apresentados na Figura 4.29. Comparando-se os resultados é possível observar que há uma diminuição da permeabilidade do RCC em níveis compatíveis com os requeridos para a construção de “liners” (DANIEL e BENSON, 1990). A adição de 14% de bentonita se mostrou ideal com relação a redução do valor da permeabilidade, entretanto, com o aumento no teor de bentonita acima desta porcentagem houve certo aumento no valor de k para a amostra RCC+16% e RCC+18% em relação à RCC+14%. Isto implicaria dizer que a adição da bentonita acima de 14% não trouxe o efeito desejado de diminuição deste parâmetro. Este efeito poderia estar associado a uma maior aglutinação entre os grãos das amostras RCC+16% e RCC+18% causada pela bentonita. Estes possíveis grumos poderiam estar interferindo na estrutura do material, contudo para certificar este tipo de comportamento seriam necessários mais estudos aprofundados no sentido de avaliar estas aglutinações de RCC e bentonita. O mesmo resultado foi verificado nas amostras de 8% em relação à de 4%.

Segundo GLEASON *et al.* (1997), a afinidade da bentonita com a água e sua alta capacidade de expansão são características que conferem a esta material resistência à passagem da água e em condições confinadas as partículas expandidas são forçadas entre si de maneira que ocorre uma barreira contra a passagem do fluxo.

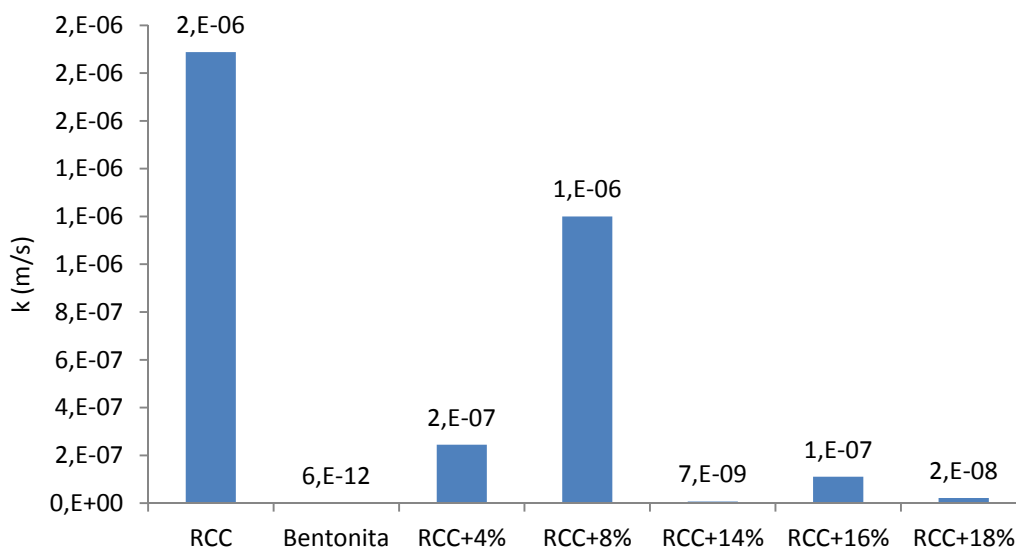


Figura 4.29 Condutividade hidráulica das amostras

4.3.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 4.30 apresenta as curvas de tensão versus deformação relativas aos ensaios de compressão simples para todas as amostras analisadas, os ângulos de ruptura foram feitos por leitura direta nas fotos tiradas dos corpos de prova falhados. A tabela 4.12 apresenta um resumo destes resultados.

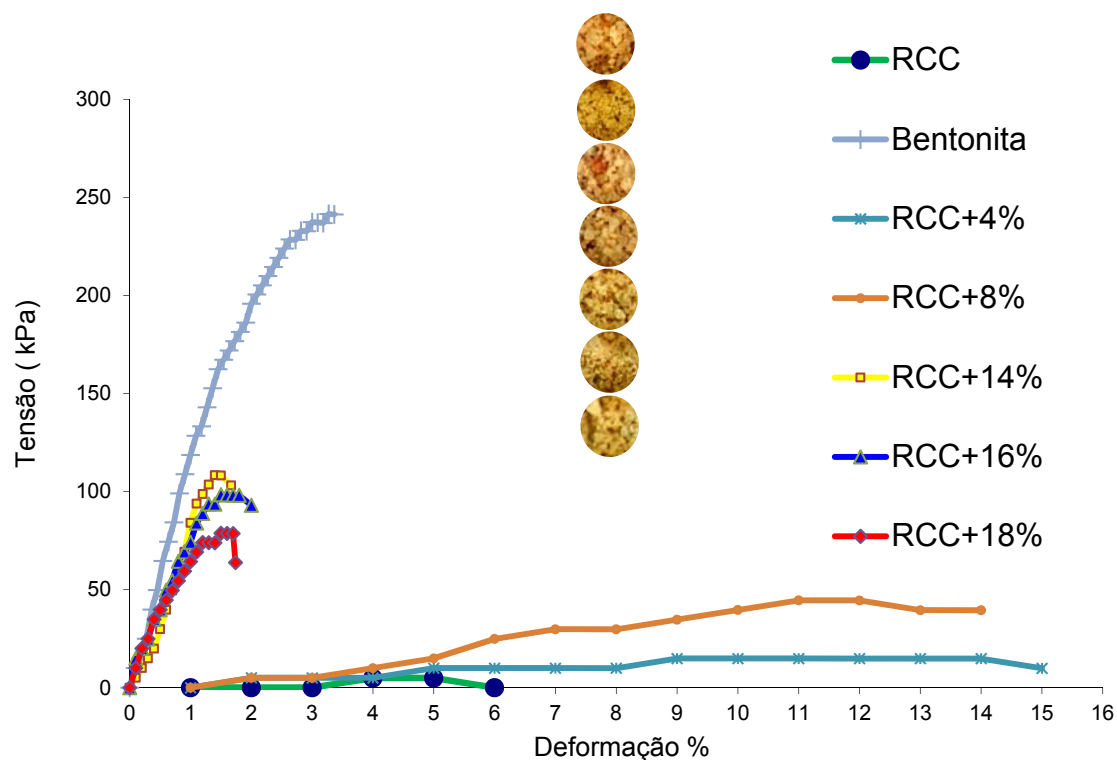


Figura 4.30 Resultados do ensaio de compressão simples

Tabela 4.13 Resultados do ensaio de compressão simples

Mistura	qumax (kPa)	Ângulo de Ruptura (°)
RCC	4,90	120
BENTONITA	241,55	-
RCC+4%	14,86	90
RCC+8%	44,50	90
RCC+14%	108,34	104
RCC+16%	98,39	66
RCC+18%	78,71	65

Ao se comparar às curvas de compressão simples das amostras, observa-se um aumento na resistência do RCC com a adição de bentonita devida possivelmente ao aumento na coesão. Após o teor de 14% de bentonita associado ao solo, o acréscimo no teor de bentonita na mistura fez com que a resistência baixasse em relação ao máximo valor encontrado, isto para o caso da bentonita pura. A mistura de RCC+14% apresentou a maior resistência à compressão não confinada e a ruptura do corpo de prova foi frágil, mostrando uma maior rigidez em comparação com as outras misturas ensaiadas. Com o aumento no teor de bentonita, as misturas RCC+16% e RCC+18% evidenciaram uma resistência menor que a amostra contendo 14% de bentonita. Estas associações mostraram uma ruptura com pontos de plastificação, da mesma forma foram encontrados pontos de plastificação nas amostras com 4% e 8% ao aumentar a plasticidade nas mesmas em relação ao RCC; as amostras com 4% e 8% mostraram uma maior deformabilidade quando comparadas com as amostras acima de 14%. Em nenhum caso as misturas mostraram valores compatíveis com os requeridos para ser usados como camada de cobertura para aterros sanitários (DANIEL e BENSON, 1990). Um aspecto importante para levar em consideração ao avaliar a resistência dos materiais é o efeito do confinamento que não ocorre no ensaio de compressão simples e poderia justificar a baixa resistência dos materiais com baixos teores de bentonita.

4.4 ANÁLISE DA FISSURAÇÃO

Com a realização das diferentes operações de filtragem das imagens usando as ferramentas descritas no capítulo da metodologia para a análise da fissuração e os posteriores cálculos feitos com ajuda do *Microsoft Excel (2013)*, observou-se de uma forma geral que, o início da fissuração não é claramente apreciável com o uso do software *ImageJ*, no processo de análise se tem interferência do brilho e das sombras, o qual é interpretado pelo programa como fissuração. Assim, foram realizadas operações manuais mais complexas para cada uma das imagens. Neste sentido, pode-se melhorar a quantificação das áreas fissuradas em uma amostra específica. Este tipo de procedimento dificultou a implementação da análise usando um macro de forma geral para todas as imagens e em todas as amostras, constituindo um objetivo a mais para futuras pesquisas na mesma área de estudo.

Para começar os ensaios estabeleceu-se o critério de analisar em primeira instância os materiais componentes para determinar as faixas limites do comportamento das posteriores misturas. O primeiro ensaio realizado foi com o RCC como material base da mistura. As

análises realizadas mostraram que o RCC não fissurou para nenhum dos dois ciclos de ressecamento. Este comportamento já era esperado, corroborando com os resultados qualitativos obtidos a partir do ensaio de limite de contração que indicou uma característica não contráctil do RCC. Durante o ensaio a temperatura média foi de $29,32 \pm 1,23^\circ\text{C}$ com uma máxima de $30,6^\circ\text{C}$, correspondente com o valor de calibração inicialmente estabelecido (30°C) para manter as condições de temperatura dentro dos níveis aceitáveis para o funcionamento da câmara. A umidade ambiente teve uma média de $40.61 \pm 5.44\%$ e alcançou uma máxima de $56,00\%$, a velocidade média de ressecamento no material foi de $0,85 \pm 1,01$ g/min, sendo esta a mais alta de todos os materiais testados.

Na sequência, o ensaio de ressecamento da bentonita forneceu, como esperado o máximo valor de fissuração. Esse ensaio teve como condições ambientais uma temperatura média de $29,91 \pm 0,61^\circ\text{C}$ com uma máxima de $30,6^\circ\text{C}$, a umidade ambiente média foi de $43.07 \pm 3,11\%$. O processo de fissuração começou na borda inferior esquerda após 8 minutos do início do ensaio em direção paralela ao contorno da bandeja no primeiro ciclo, mostrando a grande influenciadas condições de contorno no processo, isto é as condições de aderência do material às paredes da bandeja. A propagação das fissuras iniciou-se após 16 min e em sentido perpendicular a fissura inicial, como mostrado na Figura 4.31. A máxima fissuração deste ciclo ocorreu às 14 horas e 22 minutos desde o início do ensaio quando a massa já havia estabilizado e a hierarquia com tendência retangular predominou neste ciclo.

Observa-se no segundo ciclo de ressecamento da bentonita, que com o processo de molhagem a amostra foi cicatrizando gradualmente nos minutos iniciais sem conseguir fechar totalmente as fissuras existentes e após 4 minutos de secagem começaram a se abrir novamente. Após 4 horas surgiram novas fissuras, o que foi considerado como a propagação das fissuras já existentes, sendo este momento pouco claro na sua determinação, como é mostrado na Figura 4.31. A máxima taxa de fissuração foi de $68,89\%$ e a área máxima fissurada foi de $252,11$ cm² obtida em um tempo de 12 horas e 33 minutos do começo do ensaio para o segundo ciclo. Alguns outros dados como a velocidade média e máxima de fissuração, entre outros, são listados na Tabela 4.13 e no resumo comparativo de todos os resultados apresentado na Figura 4.35 e Figura 4.36 ilustram comparativamente as fases mais importantes do processo de ressecamento para cada uma das amostras analisadas para cada ciclo de secagem. As Figura

4.37 a Figura 4.41 mostram comparativamente os resultados obtidos em cada uma das amostras. Os tempos de início da fissuração e a máxima fissuração são semelhantes para cada amostra em ambos os ciclos. A propagação das fissuras teve um comportamento diretamente proporcional ao conteúdo de bentonita na mistura, foi mais lenta quando o teor de bentonita aumentou. A velocidade média de ressecamento e a taxa média de fissuração também aumentaram quando o conteúdo de bentonita aumentou.

As imagens apresentadas nas Figuras 4.31 e 4.32 mostram os resultados dos ensaios de fissuração para cada um dos materiais testados (RCC, bentonita, RCC+4%, RCC+14%, RCC+18%) no primeiro e segundo ciclo de ressecamento.

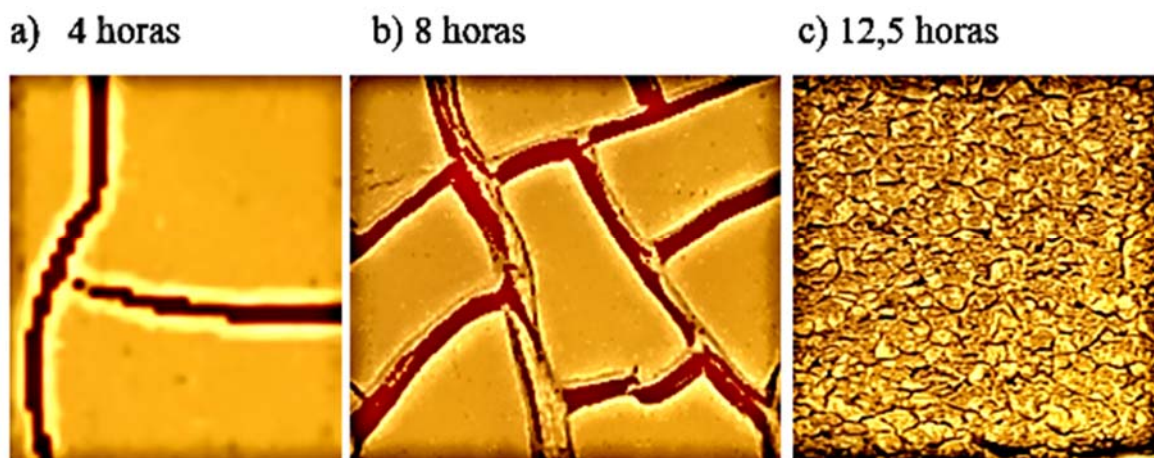


Figura 4.31 Ensaio de ressecamento da bentonita: a) ângulo de propagação da fissura, b) hierarquia retangular e c) máxima área fissurada no segundo ciclo de ressecamento

Na continuação dos ensaios envolvendo as misturas, observa-se no ensaio do RCC+4%, a formação de uma camada de material fino na superfície com espessura aproximada de 1 mm, na qual apresentou-se a fissuração sem atingir a espessura total do material. Este comportamento provocou uma perda de umidade mais lenta quando comparada com as perdas de umidade nos ensaios realizados com RCC e bentonita, retardando o início da fissuração na superfície. Durante o ensaio foi mantida uma temperatura média de $44,67 \pm 5,94^\circ\text{C}$ com uma máxima de $47,4^\circ\text{C}$, a umidade ambiente média foi de $31,55 \pm 3,46\%$ e chegou até um máximo de $43,0\%$; o aumento na temperatura deveu-se a retirada do efeito do ventilador que foi desligado para evitar a interferência da sua vibração e desta forma ter um melhor controle da perda de massa durante as leituras. A fissuração na superfície começou na borda inferior direita após 12 horas e 18 minutos do início do ensaio em direção paralela ao contorno da bandeja

durante o primeiro ciclo. As fissuras continuaram propagando-se pela borda direita da bandeja a partir das 12 horas e 43 minutos do início do ensaio, 25 minutos após da aparição da primeira fissura. O ângulo de propagação também foi de 90° em relação à fissura existente, o detalhe é mostrado na Figura 4.31. A máxima fissuração durante este ciclo ocorreu às 22 horas e 47 minutos a partir do início do ensaio e da mesma forma que aconteceu com a bentonita, quando a massa já havia estabilizado. Não foi claramente visualizada a hierarquia das fissuras predominante no material.

No segundo ciclo de ressecamento do RCC+4 %, o processo de molhagem da amostra gerou a cicatrização total das fissuras durante os minutos iniciais. O processo de fissuração começou novamente 12 horas e 46 minutos depois da molhagem, a propagação evidenciou-se às 13 horas e 49 minutos, 1 hora e 3 minutos após surgiram as primeiras fissuras neste ciclo e não apresentaram uma hierarquia claramente identificável. Este comportamento é mostrado na Figura 4.32. A taxa máxima de fissuração foi de 81,83 % e a área fissurada máxima foi de 304,39 cm² obtida em um tempo de 22 horas e 47 minutos do começo do ensaio para o primeiro ciclo. Outros dados como a velocidade média e taxa máxima e média de fissuração também são listados na tabela 4.13 e as Figuras 4.35 e 4.36 ilustram comparativamente as fases mais importantes do processo de ressecamento para cada uma das amostras analisadas para cada ciclo de secagem. As Figuras 4.37 e 4.41 mostram comparativamente os resultados obtidos em cada uma das amostras. Os tempos de início da fissuração e a máxima fissuração são semelhantes para cada amostra em ambos os ciclos. A propagação das fissuras teve um comportamento diretamente proporcional ao conteúdo de bentonita na mistura, foi mais lenta quando o teor de bentonita aumentou. A velocidade média de ressecamento e a taxa média de fissuração também aumentaram quando o conteúdo de bentonita aumentou.

Tabela 4.14 apresentam de forma resumida a compilação de todos os ensaios realizados.

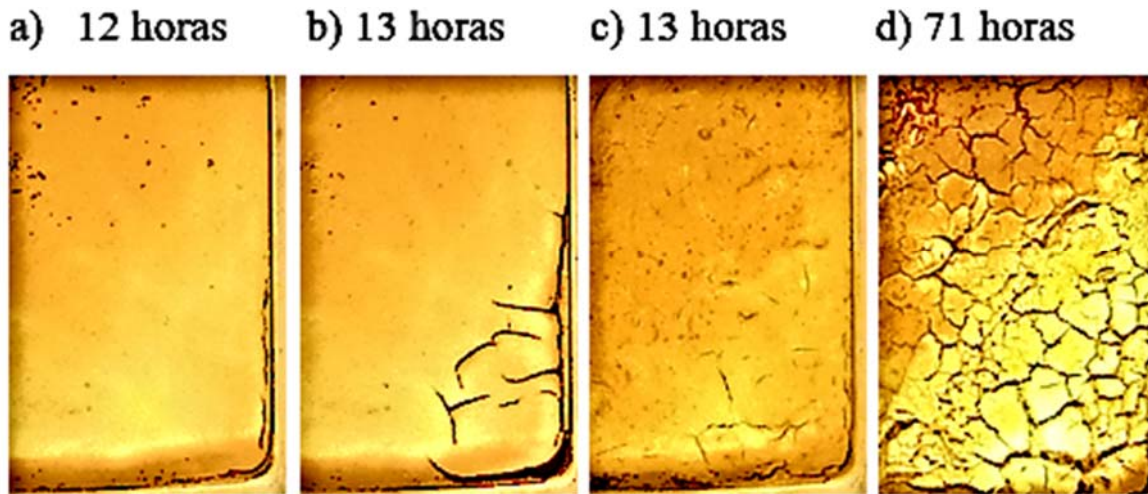


Figura 4.32 a) Início da fissuração no primeiro ciclo, b) Ângulo de propagação da fissura no primeiro ciclo, c) Início da fissuração no segundo ciclo d) máxima área fissurada no segundo ciclo RCC+4%

A seguir, foi ensaiada a mistura de RCC+14% de bentonita também preparada com umidade no limite líquido. Como esta associação apresentou um melhor comportamento hidromecânico durante a caracterização inicial, observou-se que para esta mistura a formação de fissuras foi influenciada pelos contornos da bandeja; sendo neste caso concentradas essencialmente na borda esquerda da bandeja. O tempo para aparecimento destas fissuras foi de 1 hora e 21 minutos desde o começo do ensaio. A propagação das mesmas foi observada em um período de 1 hora e quatro minutos depois do surgimento da primeira trinca. No tempo de 2 horas e 25 minutos as fissuras seguiram um padrão hierárquico, formando ângulos de 90° com a direção da fissura existente e atingido a espessura total da amostra. A temperatura média foi de $42,22 \pm 6,20^\circ\text{C}$ com uma máxima de $46,70^\circ\text{C}$, a umidade ambiente média foi de $31,44 \pm 6,97\%$ e chegou até um máximo de $44,00\%$; o ventilador permaneceu desligado durante todo o período de realização do ensaio do mesmo modo que foi feito na mistura RCC+4%. O processo de fissuração é mostrado na sequência de imagens da Figura 4.313. A máxima fissuração durante este ciclo ocorreu às 21 horas e 21 minutos junto com a estabilização da massa total medida pela balança instalada sob a base da bandeja. Esta amostra, corroborando com o padrão inicialmente seguido pelas fissuras, apresentou uma hierarquia retangular.

Seguindo os procedimentos anteriores a amostra contendo RCC+14% foi submetida a um processo de molhagem, gerando a cicatrização quase total das fissuras existentes durante o ciclo de secagem. Igualmente ao que aconteceu na mistura RCC+4%, o processo de fissuração

durante o segundo ciclo começou 2 horas e 24 minutos depois da molhagem, a propagação se apresentou às 21 horas e 44 minutos desde a molhagem a partir da reabertura das fissuras geradas durante o primeiro ciclo. A hierarquia continuou mantendo o padrão predominantemente retangular conforme observado no primeiro ciclo. A sequência de imagens apresentadas na Figura 4.33 evidenciam este tipo de comportamento. A taxa máxima de fissuração foi de 19,74% e a área máxima fissurada foi de 72,10 cm² obtida em um tempo de 22 horas e 53 minutos do começo do ensaio, primeiro e segundo ciclos. Outros dados obtidos neste ensaio estão listados nas Tabela 4.13 e as Figuras 4.35 e 4.36 ilustram comparativamente as fases mais importantes do processo de ressecamento para cada uma das amostras analisadas para cada ciclo de secagem. As Figuras 4.37 e 4.41 mostram comparativamente os resultados obtidos em cada uma das amostras. Os tempos de início da fissuração e a máxima fissuração são semelhantes para cada amostra em ambos os ciclos. A propagação das fissuras teve um comportamento diretamente proporcional ao conteúdo de bentonita na mistura, foi mais lenta quando o teor de bentonita aumentou. A velocidade média de ressecamento e a taxa média de fissuração também aumentaram quando o conteúdo de bentonita aumentou.

Tabela 4.14 apresentam de forma resumida a compilação de todos os ensaios realizados.

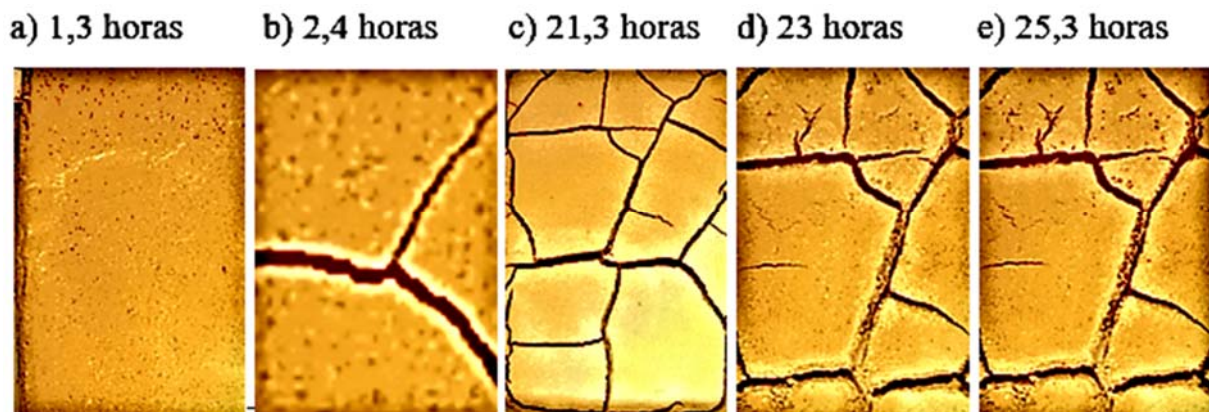


Figura 4.33 a) Início da fissuração no primeiro ciclo, b) ângulo de propagação da fissura no primeiro ciclo, c) máxima área fissurada no primeiro ciclo, d) estabilização da massa no segundo ciclo e) máxima área fissurada no segundo ciclo RCC+14%

Com o intuito de analisar o comportamento da fissuração em relação ao conteúdo de bentonita associado ao RCC, foi submetida ao processo de ressecamento a mistura RCC+18%. Os mesmos procedimentos para preparação das amostras e rotina dos ensaios adotados nas avaliações anteriores foram adotados na análise desta composição. Neste ensaio, as fissuras

apresentaram-se inicialmente, 43 minutos após o começo do ensaio, na borda esquerda da bandeja. A propagação das fissuras foi observada 3 horas e 56 minutos após o início, formando um ângulo de 90° com a direção da fissura existente, atingido a espessura total do material e quase toda a largura da amostra. A temperatura média foi de $44,13 \pm 3,83^{\circ}\text{C}$ com uma máxima de $47,60^{\circ}\text{C}$, a umidade ambiente média foi de $28,06 \pm 2,67\%$ e chegou até um máximo de 35,00%. Igualmente ao ensaio anterior, o ventilador foi mantido desligado durante o ensaio. A Figura 4.34 mostra as imagens relativas a este ensaio. Do mesmo modo que nas outras misturas, o tempo da máxima fissuração durante este ciclo ocorreu juntamente com a estabilização da massa. Às 22 horas e 39 minutos após o início do ensaio. O material apresentou uma hierarquia de fissuramento com padrões retangulares e triangulares.

Durante a molhagem do RCC+18%, após término do primeiro ciclo de ressecamento, observou-se uma completa cicatrização das fissuras existentes de uma maneira quase instantânea. Entretanto, após 3 horas e 17 minutos depois da molhagem e o conseqüente início do processo de secagem, as fissuras geradas no primeiro ciclo começaram a reabrir. Após 7 horas de ensaio ainda era perceptível o processo de evolução destas fissuras. A hierarquia das fissuras ocorrida no primeiro ciclo foi repetida na sua totalidade para este ciclo (Figura 4.34). A taxa de fissuração máxima foi de 23,54% e a área fissurada máxima foi de $86,63 \text{ cm}^2$, obtida em um tempo de 22 horas e 39 minutos a partir do começo do ensaio. Outros dados obtidos neste ensaio estão listados nas Tabela 4.13 e As Figura 4.35 e 4.36 ilustram comparativamente as fases mais importantes do processo de ressecamento para cada uma das amostras analisadas para cada ciclo de secagem. As Figura 4.37 e 4.41 mostram comparativamente os resultados obtidos em cada uma das amostras. Os tempos de início da fissuração e a máxima fissuração são semelhantes para cada amostra em ambos os ciclos. A propagação das fissuras teve um comportamento diretamente proporcional ao conteúdo de bentonita na mistura, foi mais lenta quando o teor de bentonita aumentou. A velocidade média de ressecamento e a taxa média de fissuração também aumentaram quando o conteúdo de bentonita aumentou.

a) 1 hora b) 4 horas c) 23 horas d) 23 horas e) 12,3 horas f) 24 horas



Figura 4.34a) Início da fissuração no primeiro ciclo, b) ângulo de propagação da fissura no primeiro ciclo, c) máxima área fissurada no primeiro ciclo, d) umedecimento e cicatrização, e) estabilização da massa no segundo ciclo, f) máxima área fissurada no segundo ciclo
RCC+18%

A Tabela 4.13 mostra a tendência dos materiais com maiores teores de bentonita a fissurar mais rapidamente, sendo a bentonita pura o material que fissurou mais rápido e o RCC+14% a mistura que mais demorou a fissurar. É importante notar as condições iniciais das amostras. Nestas avaliações todos os ensaios foram realizados a partir de um teor de umidade próximo ao limite de liquidez. Esta condição inicial se mostrou de extrema importância nas análises realizadas e nas futuras análises relacionadas ao processo de ressecamento nestes tipos de materiais e aplicações. Ressalta-se aqui o caráter preliminar destes estudos bem como a sua importância na continuidade deste tipo de avaliação. Uma vez que as condições iniciais de umidade dos materiais tendem a influenciar sobremaneira no processo de fissuração por ressecamento.

Tabela 4.14 Tempos comparativos de começo e propagação da fissuração nos materiais

Material	Tempo do início da fissuração no ciclo 1 (min)	Tempo do início da fissuração no ciclo 2 (min)	Tempo do início da propagação da fissuração no ciclo 1 (min)	Tempo do início da propagação da fissuração no ciclo 2 (min)
RCC	-	-	-	-
BENTONITA	8	4	16	241
RCC+4%	738	766	16	829
RCC+14%	81	144	145	1304
RCC+18%	43	197	236	420

Tabela 4.15 Tempos máximos da fissuração, velocidades de ressecamento e taxas médias e máximas para cada um dos ciclos nos diferentes materiais analisados.

Material	Tempo da máxima fissuração no ciclo 1(min)	Tempo da máxima fissuração no ciclo 2(min)	Velocidade média de ressecamento (g/min)	Velocidade máxima de ressecamento (g/min)	Taxa média de fissuração (%)	Taxa máxima de fissuração (%)
RCC			0,85	6,32		
BENTONITA	862	879	0,68	2,38	19,64%	68,89%
RCC+4%	1367	1345	0,55	2,60	10,46%	81,83%
RCC+14%	1281	1384	0,29	0,54	7,07%	19,74%
RCC+18%	1359	1415	0,37	0,54	3,72%	23,54%

Nos resultados mostrados na As Figura 4.35 e 4.36 ilustram comparativamente as fases mais importantes do processo de ressecamento para cada uma das amostras analisadas para cada ciclo de secagem. As Figura 4.37 e 4.41 mostram comparativamente os resultados obtidos em cada uma das amostras. Os tempos de início da fissuração e a máxima fissuração são semelhantes para cada amostra em ambos os ciclos. A propagação das fissuras teve um comportamento diretamente proporcional ao conteúdo de bentonita na mistura, foi mais lenta quando o teor de bentonita aumentou. A velocidade média de ressecamento e a taxa média de fissuração também aumentaram quando o conteúdo de bentonita aumentou.

Tabela 4.14 destaca-se a taxa máxima de fissuração na mistura RCC+4%, na qual ocorreu de forma superficial e acredita-se que obedeceu ao procedimento de homogeneização manual das amostras. Desta forma, o material com um melhor comportamento quanto à fissuração foi o RCC+14% de bentonita. Esta associação apresentou uma menor velocidade de ressecamento, isto é uma maior capacidade de retenção de água, um tempo de início de fissuração alto, destacando também que esta mistura apresentou uma grande capacidade de cicatrização. Resultados muito próximos do encontrado para a mistura RCC+18%.

As Figuras 4.35 e 4.36 ilustram comparativamente as fases mais importantes do processo de ressecamento para cada uma das amostras analisadas para cada ciclo de secagem. As Figuras 4.37 e 4.41 mostram comparativamente os resultados obtidos em cada uma das amostras. Os tempos de início da fissuração e a máxima fissuração são semelhantes para cada amostra em ambos os ciclos. A propagação das fissuras teve um comportamento diretamente proporcional ao conteúdo de bentonita na mistura, foi mais lenta quando o teor de bentonita aumentou. A velocidade média de ressecamento e a taxa média de fissuração também aumentaram quando o conteúdo de bentonita aumentou.

Tabela 4.15 Resumo das principais etapas no processo de ressecamento dos materiais

Etapa	Tempo (min)	Área fissurada (cm ²)	Umidade (%)	Taxa de fissuração (%)	Velocidade de ressecamento (g/min)
RCC					
Início ressecamento	0	0,000	32,61%	0,00%	0,00
Início fissuração ciclo 1	59	0,000	25,44%	0,00%	1,17
Propagação perpendicular ciclo 1	313	0,000	3,26%	0,00%	1,01
Estabilização da massa	614	0,000	0,45%	0,00%	0,07
Máxima fissuração ciclo 1	614	0,000	0,45%	0,00%	0,07
Umedecimento	4192	0,000	42,65%	0,00%	0,00
Início fissuração ciclo 2	10	0,000	41,36%	0,00%	0,06
Propagação perpendicular ciclo 2	151	0,000	25,28%	0,00%	0,82
Estabilização da massa	682	0,000	0,42%	0,00%	0,09
Máxima fissuração ciclo 2	1517	0,000	0,38%	0,00%	0,01
BENTONITA					
Início ressecamento	0	0	479,65%	0,00%	0,00
Início fissuração ciclo 1	8	0,76	474,55%	0,21%	0,74
Propagação perpendicular ciclo 1	16	3,08	469,79%	0,84%	0,76
Estabilização da massa	862	199,97	2,19%	54,64%	0,21
Máxima fissuração ciclo 1	862	199,97	2,19%	54,64%	0,21
Umedecimento	1314	184,24	530,79%	50,34%	0,00
Início fissuração ciclo 2	4	178,35	529,12%	48,73%	0,48
Propagação perpendicular ciclo 2	241	142,88	341,51%	39,04%	0,93
Estabilização da massa	879	252,11	12,77%	68,89%	0,50
Máxima fissuração ciclo 2	879	252,11	12,77%	68,89%	0,50
RCC+4%					
Início ressecamento	0	0	85,00%	0,00%	0,00
Início fissuração ciclo 1	738	0	16,96%	0,00%	0,52
Propagação perpendicular ciclo 1	763	20,42	14,98%	5,49%	0,61
Estabilização da massa	1227	273,22	0,75%	73,45%	0,09
Máxima fissuração ciclo 1	1367	304,39	0,46%	81,83%	0,02
Umedecimento	1370	0	72,39%	0,00%	0,00
Início fissuração ciclo 2	766	66,78	13,15%	17,95%	0,53
Propagação perpendicular ciclo 2	829	99,84	8,69%	26,84%	0,42
Estabilização da massa	1345	117,66	0,45%	31,63%	0,06
Máxima fissuração ciclo 2	4255	123,46	0,39%	33,19%	0,00
RCC+14%					
Início ressecamento	0	0	63,54%	0,00%	0,00
Início fissuração ciclo 1	81	0,52	57,22%	0,14%	0,46
Propagação perpendicular ciclo 1	145	9,33	50,92%	2,55%	0,54
Estabilização da massa	1281	44,82	0,92%	12,27%	0,18
Máxima fissuração ciclo 1	1281	44,82	0,92%	12,27%	0,18
Umedecimento	1297	20,84	71,39%	5,71%	0,00
Início fissuração ciclo 2	144	37,3	57,87%	10,21%	0,53
Propagação perpendicular ciclo 2	1304	66,33	0,76%	18,16%	0,02
Estabilização da massa	1384	68,38	0,64%	18,72%	0,01
Máxima fissuração ciclo 2	1516	72,1	0,57%	19,74%	0,00
RCC+18%					
Início ressecamento	0	0	92,67%	0,00%	0,00
Início fissuração ciclo 1	43	0,91	87,08%	0,25%	0,37
Propagação perpendicular ciclo 1	236	17,32	66,52%	4,71%	0,53
Estabilização da massa	1359	86,63	1,07%	23,54%	0,08
Máxima fissuração ciclo 1	1359	86,63	1,07%	23,54%	0,08
Umedecimento	1360	26,58	98,83%	7,22%	0,00
Início fissuração ciclo 2	197	10,28	78,97%	2,79%	0,52
Propagação perpendicular ciclo 2	420	38,95	55,76%	10,58%	0,52
Estabilização da massa	737	61,76	25,19%	16,78%	0,45
Máxima fissuração ciclo 2	1415	70,2	0,69%	19,08%	0,05

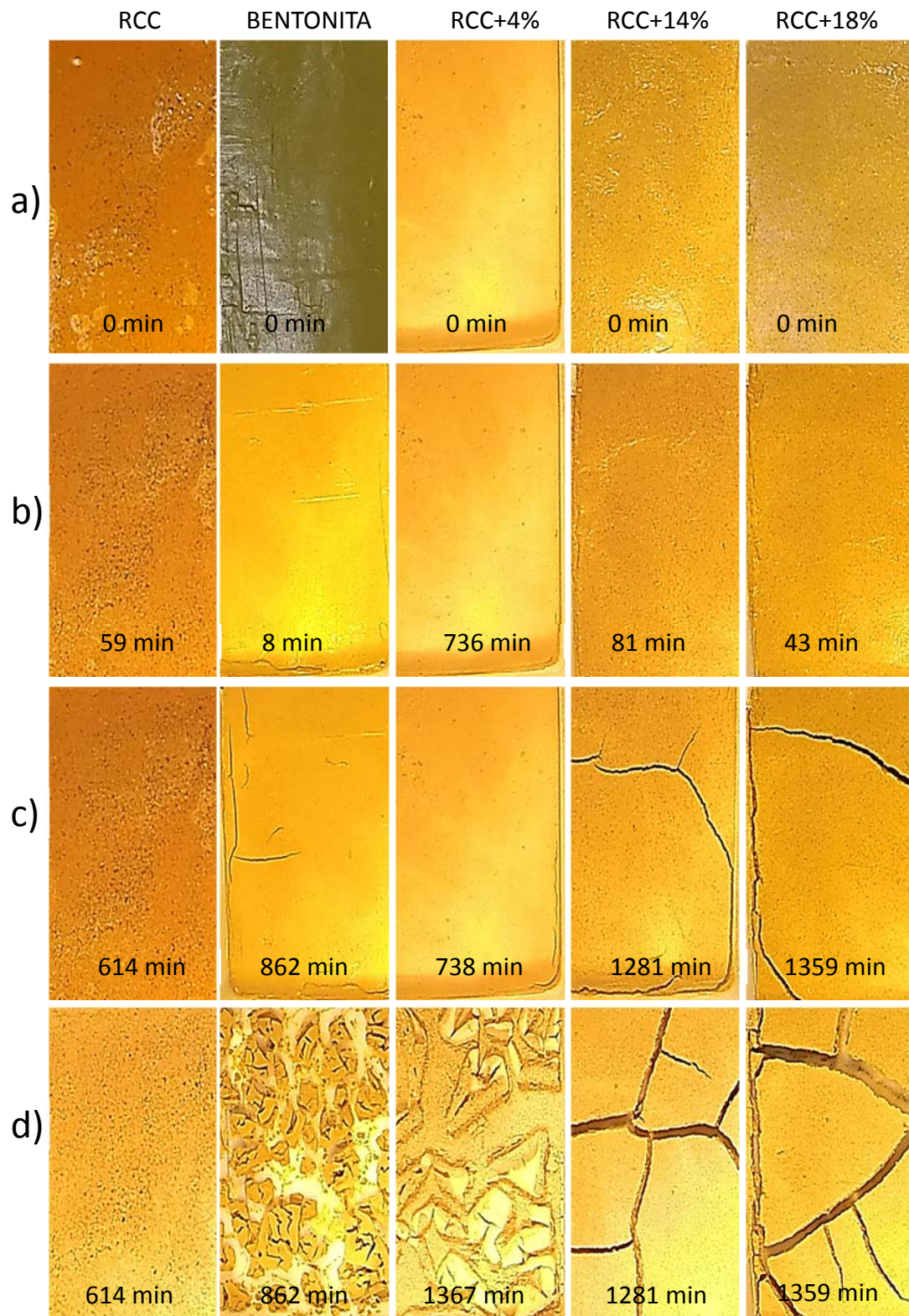


Figura 4.35 Ensaio de fissuração nos materiais e misturas no ciclo 1, a) Início do ensaio, b) Início da fissuração, c) estabilização da massa, d) Máxima fissuração

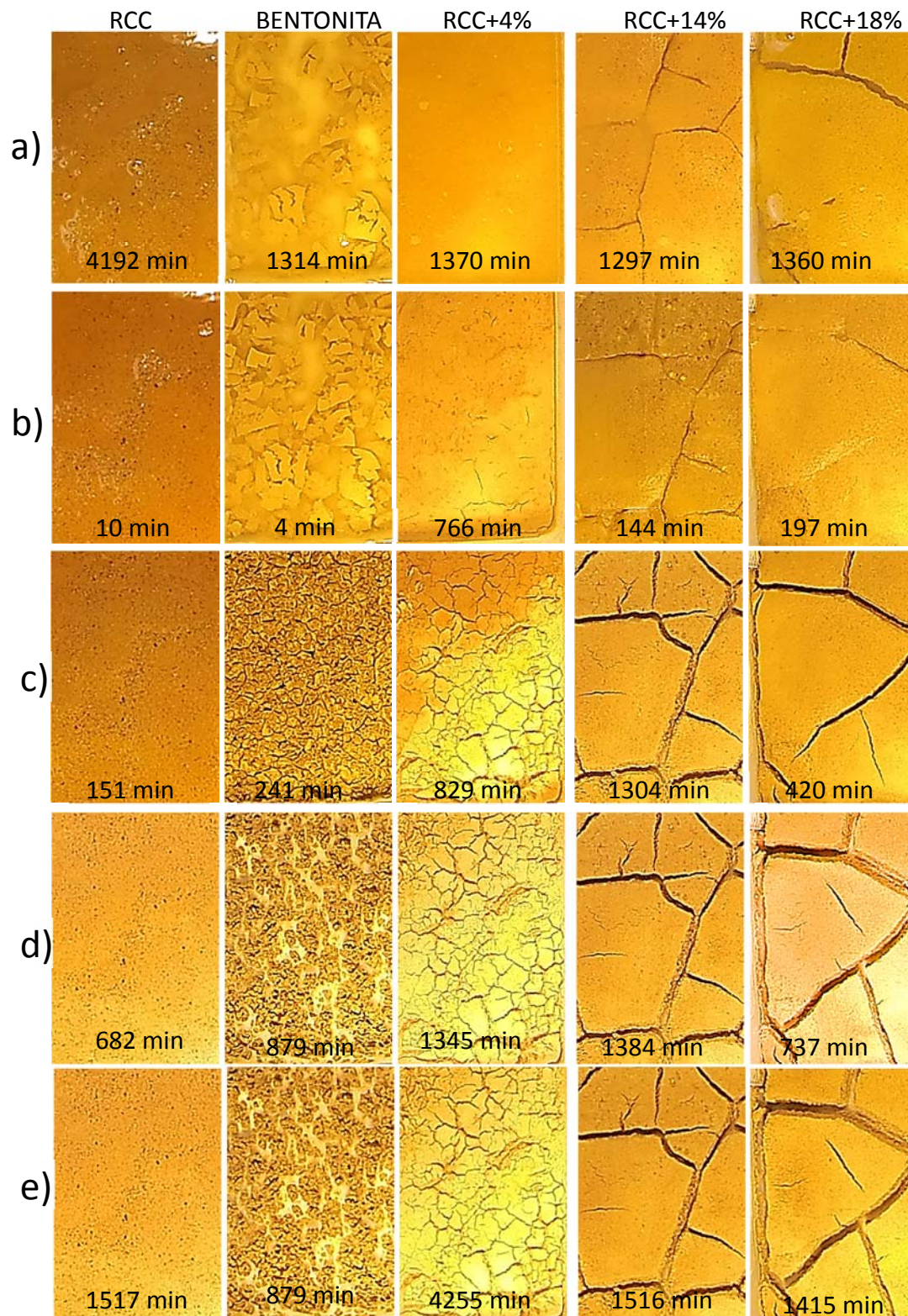


Figura 4.36 Ensaio de fissuração nos materiais e misturas no ciclo 2, a) Umedecimento, b) Reinício da fissuração, c) Propagação, d) estabilização da massa, e) Máxima fissuração

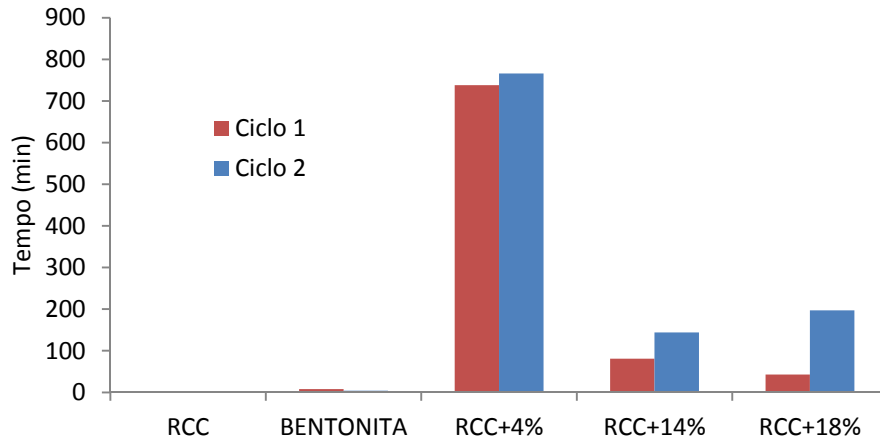


Figura 4.37 Comparação do começo da fissuração para cada ciclo e material

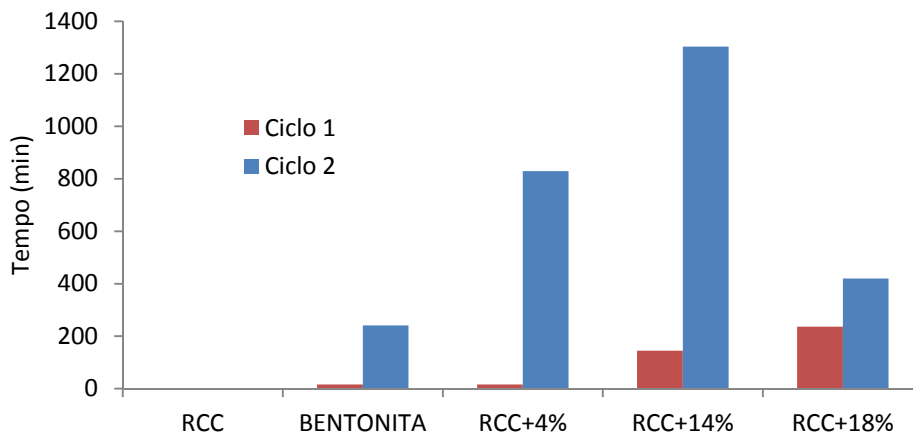


Figura 4.38 Comparação do começo da propagação da fissuração para cada ciclo e material

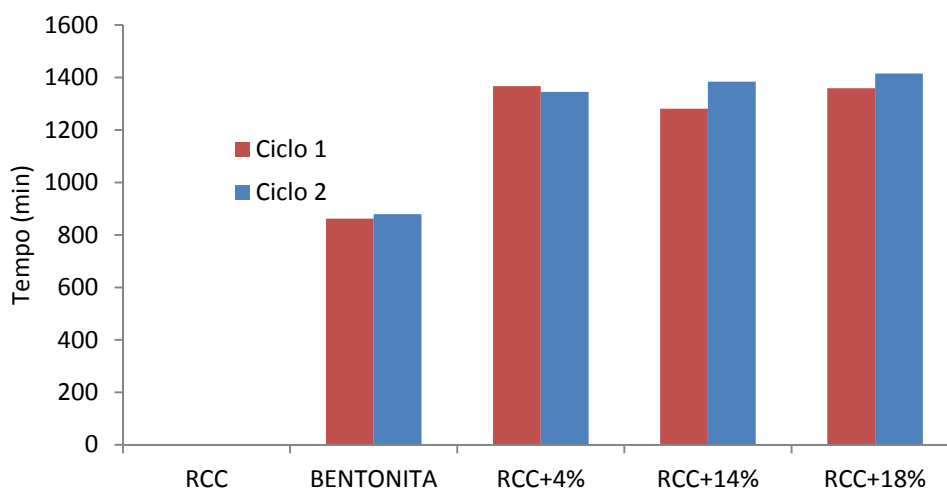


Figura 4.39 Comparação da máxima fissuração para cada ciclo e material

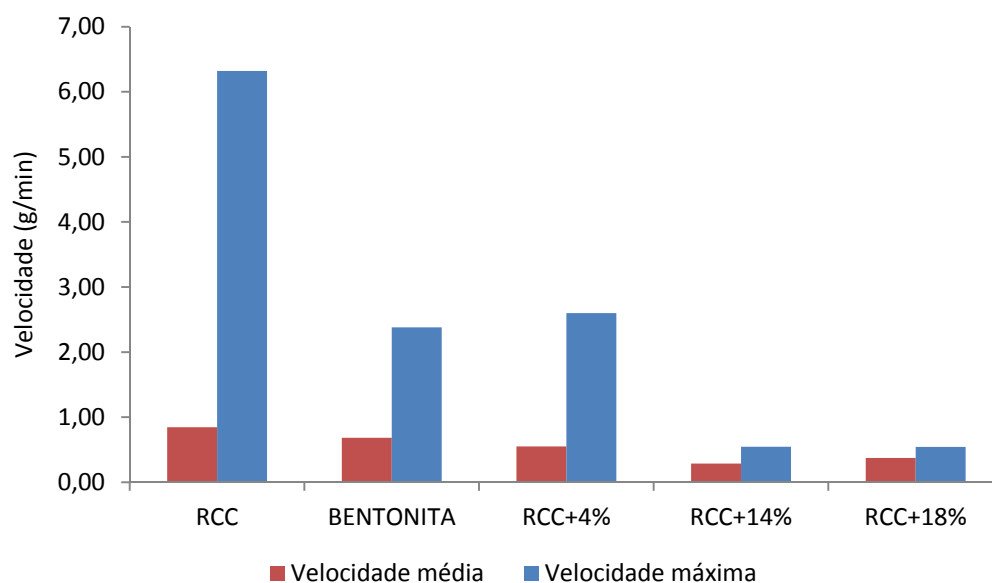


Figura 4.40 Comparação da velocidade média e máxima de ressecamento para cada ciclo e material

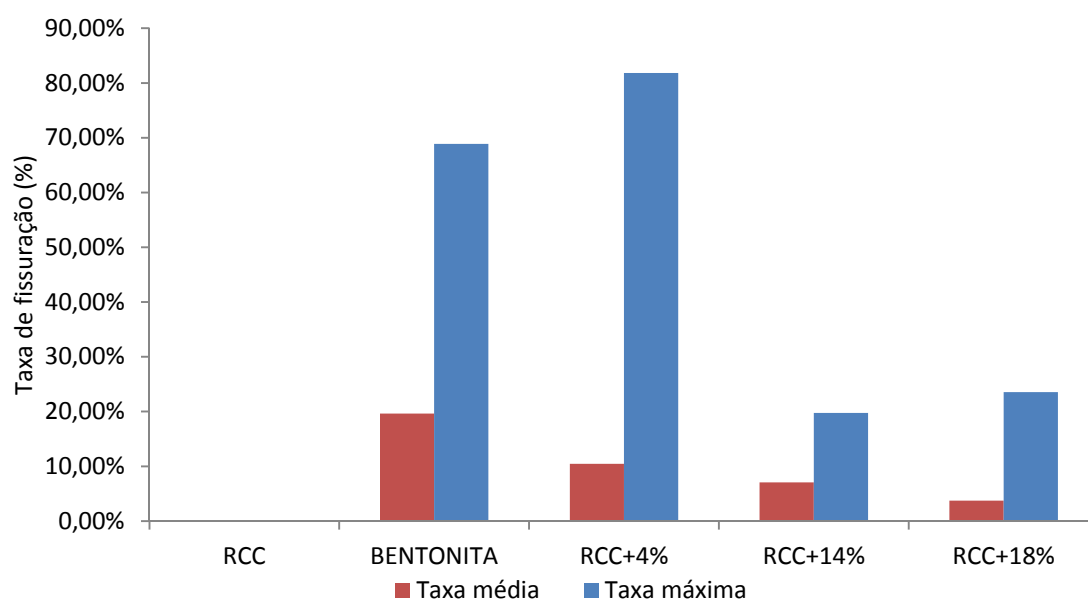


Figura 4.41 Comparação da taxa média de fissuração para cada ciclo e material

A evolução do perfil de umidade com o tempo é mostrada na Figura 4.42. No geral, a tendência do teor de umidade foi diminuir com o tempo no período de ressecamento para todas as amostras em ambos os ciclos. No início, os dados mostram que há uma variação maior da umidade quando há uma maior quantidade de água livre na mistura. Na medida em que as

misturas foram secando, o gradiente de perda de massa diminuiu ao se ter uma maior inferência das forças de adsorção, capilaridade e interações eletro químicas nos materiais. Há tendência de homogeneização desses valores no final do processo.

A Figura 4.43 apresenta a variação da umidade ambiente durante a fissuração e como esperado, na parte manhã a umidade começa com um valor alto, diminui no curso do dia e aumenta de novo na noite, evidenciando, assim algumas variações, embora pouco significativas, em seu padrão durante os ensaios. O valor médio da umidade ambiente dos materiais componentes esteve acima de 40% e para as misturas caiu para 30%, entretanto não apresentaram variações repentinas ou rápidas durante a execução dos ensaios.

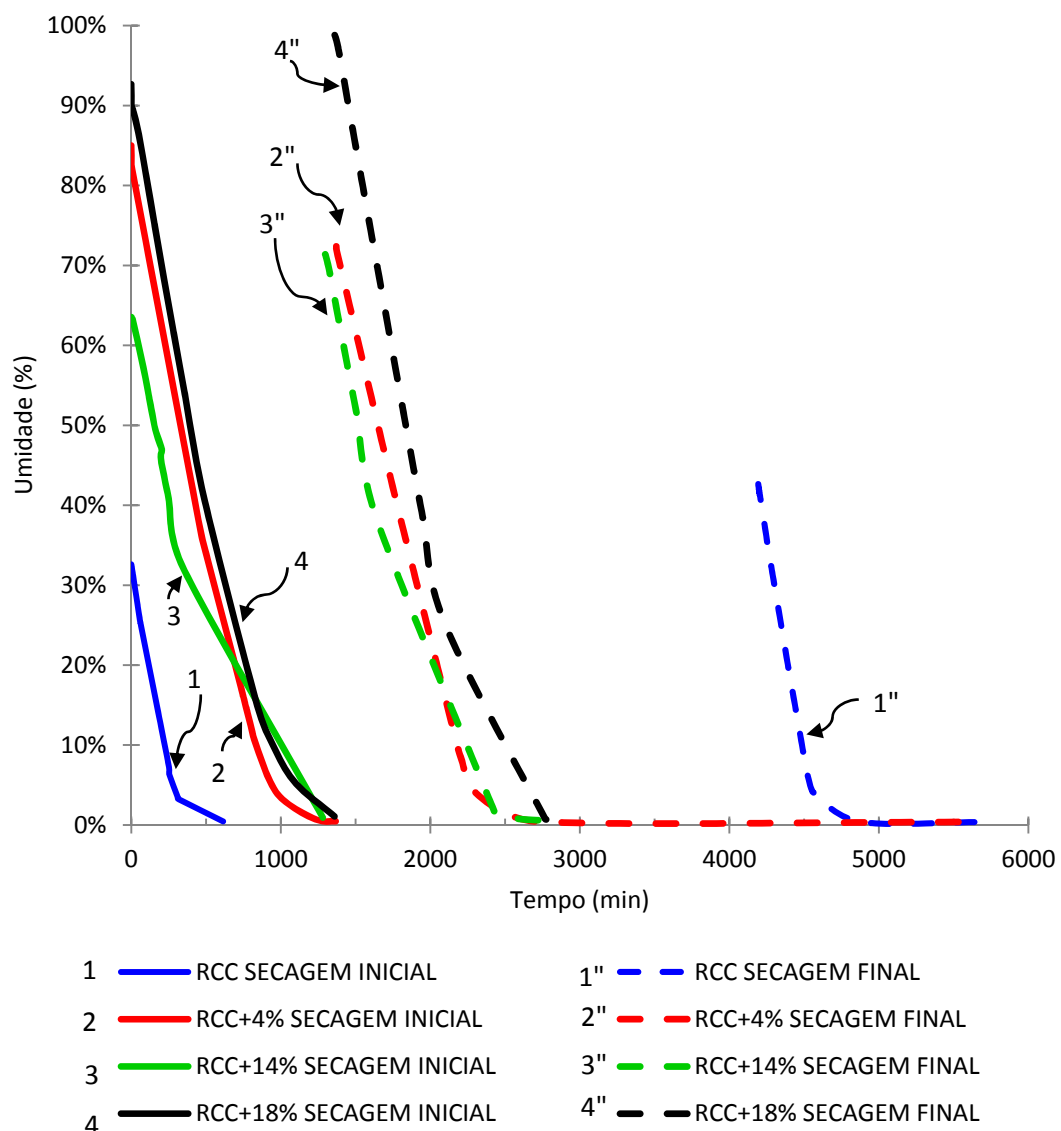


Figura 4.42 Variação da umidade das amostras durante os ciclos de ressecamento para cada material

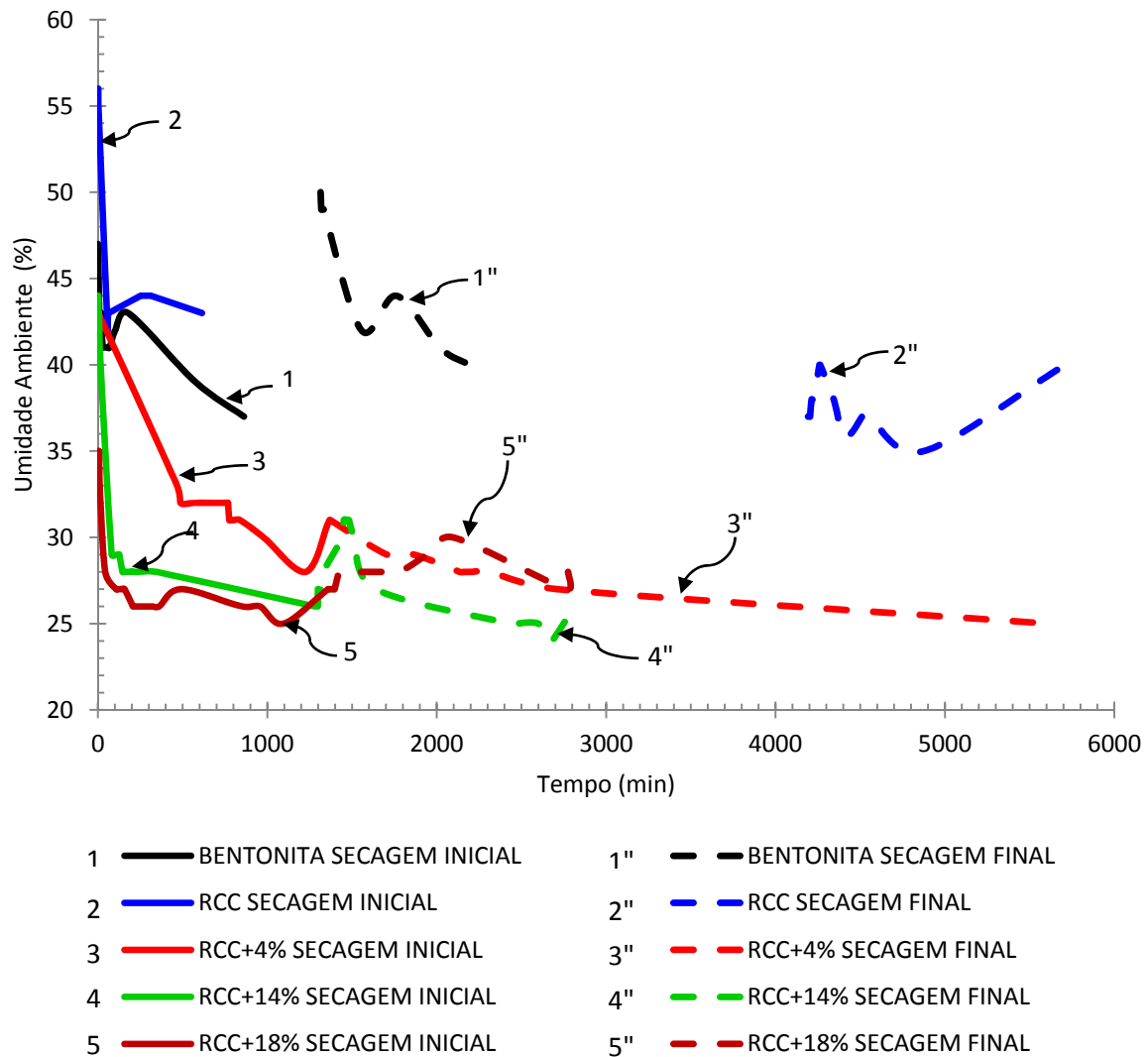


Figura 4.43 Variação da umidade ambiente durante os ciclos de ressecamento

A Figura 4.44 mostra a variação da temperatura ambiente durante os ciclos de ressecamento, na fase inicial observa-se um aumento da temperatura devido ao aquecimento em função do tempo necessário para que a temperatura atinja a temperatura de calibração adotada para cada um dos ensaios, 30°C para componentes RCC e bentonita puros com uso do ventilador para simular as condições climáticas de Brasília e 40°C para as misturas sem uso do ventilador para melhorar acurácia na medição da perda de massa mantendo uma taxa de evaporação semelhante à conseguida nos materiais base das misturas. É importante destacar que mesmo com as variações próprias da temperatura durante o dia e a noite os valores permaneceram muito próximos do valor médio de forma geral.

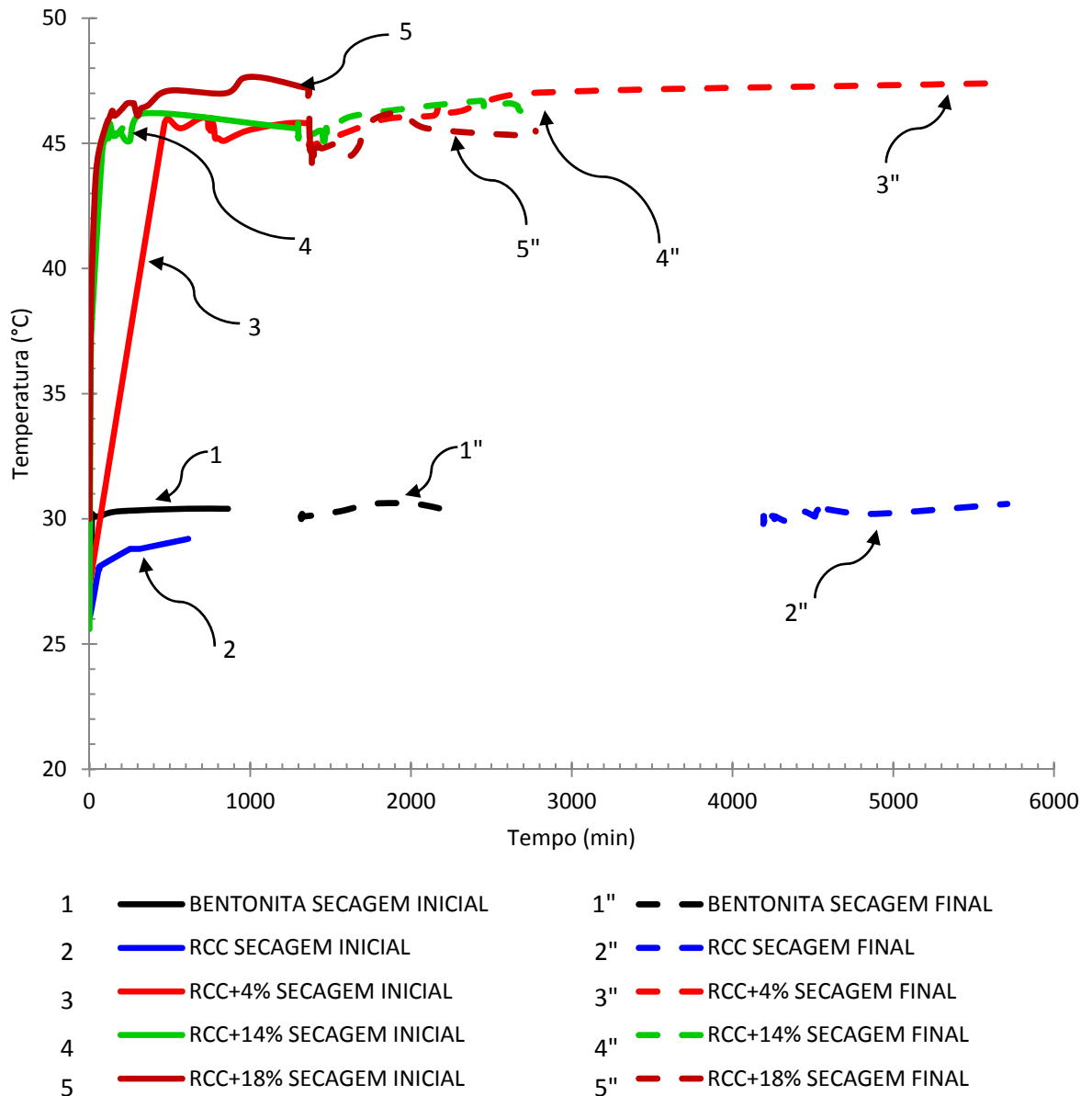


Figura 4.44 Evolução da temperatura ambiente durante os ciclos de ressecamento

A variação da taxa de fissuração das amostras é apresentada na Figura 4.45, observa-se que os valores aumentam de forma linear com o tempo e com maior intensidade nos momentos iniciais do ensaio. Na fase final do ensaio, provavelmente pela diminuição do efeito da perda de água pelo solo, a taxa de fissuração diminui consideravelmente até a estabilização. Este tipo de comportamento não foi completamente observado na amostra contendo bentonita, percebe-se uma pequena estabilização, seguida de um acréscimo acentuado na taxa de fissuração. Todos os materiais apresentaram cicatrização das áreas fissuradas durante o primeiro ciclo como processo de molhagem em maior ou menor escala.

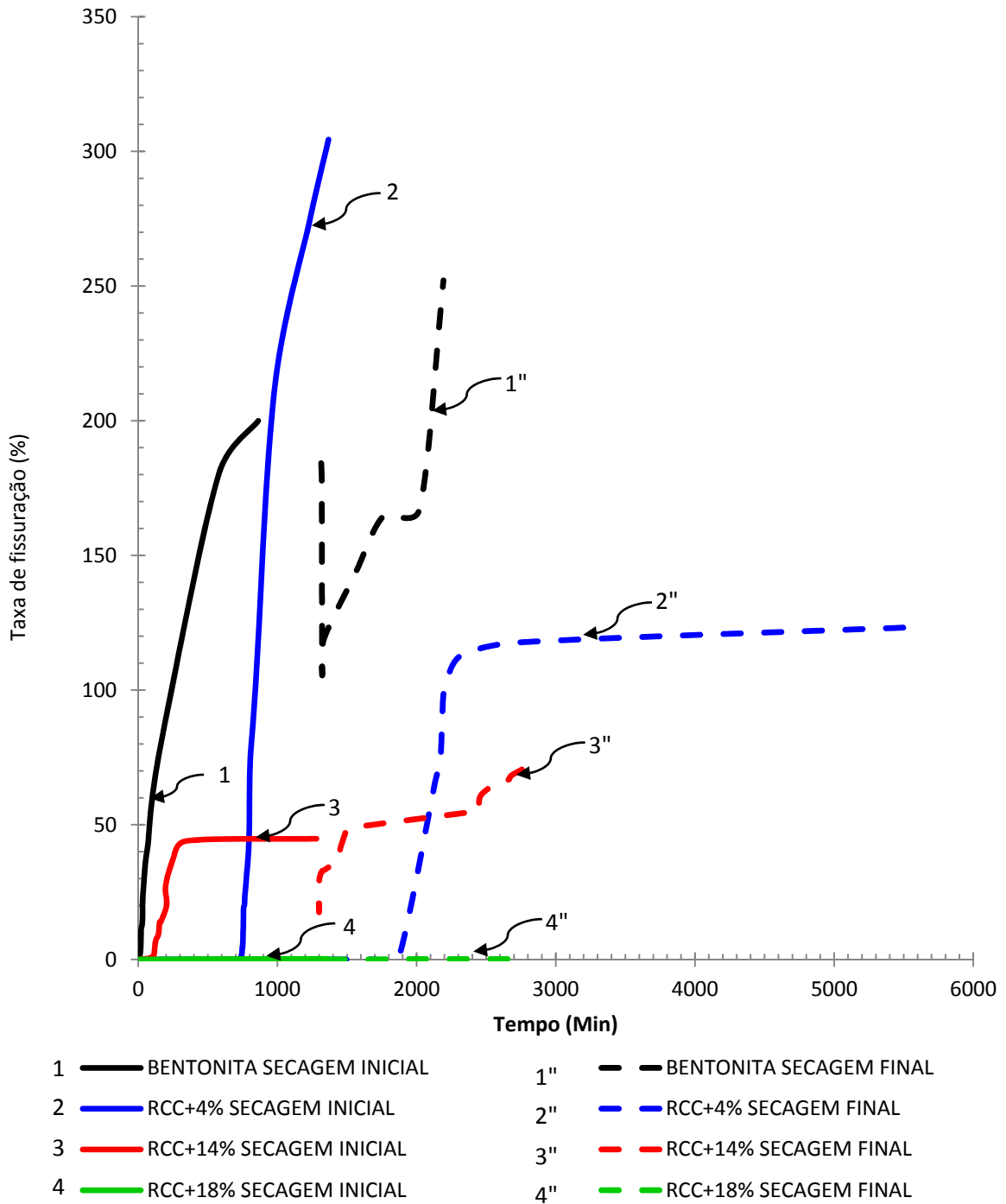


Figura 4.45 Variação da taxa de fissuração das amostras

5 CONCLUSÕES

As análises realizadas utilizando as diferentes misturas de RCC e bentonita submetidas a diferentes ensaios com respeito ao comportamento mecânico, hidráulico e quanto ao processo de fissuração permitiram estabelecer uma gama importante de conclusões. A caracterização física, química e mineralógica destes materiais permitiu conhecer o comportamento básico do RCC, bentonita e misturas desses materiais e subsidiaram os procedimentos e as análises durante as fases de ressecamento. Os ensaios de avaliação do comportamento mecânico permitiram avaliar a estabilidade e o comportamento funcional, levando em consideração a sua deformabilidade e resistência quando estes tipos de misturas são usados para a conformação de camadas de cobertura de aterros sanitários. A avaliação da permeabilidade das misturas permitiu a verificação do comportamento hidráulico objetivando a obtenção de valores compatíveis com os materiais usados comumente na construção de camadas de impermeabilização de aterros. A análise do processo de fissuração diante a utilização de ferramentas computacionais permitiu transpor uma avaliação puramente qualitativa para uma análise mais quantitativa, na qual a proposta metodológica abre as portas para dar continuidade nesta linha de pesquisa em trabalhos futuros. Com relação à habilidade de determinados materiais no contexto das camadas de cobertura de aterros sanitários, verifica-se uma inicial importância dos estudos dos limites de Atterberg. Estes estudos tendem a fornecer uma ideia inicial da trabalhabilidade do material e de alguns outros parâmetros necessários para uma validação da potencialidade de uso de cada material no contexto das camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. Neste sentido, a avaliação inicial se mostrou útil nesse sentido, pela simplicidade de execução desses ensaios e diminuição da quantidade de amostras a serem utilizadas. Estes ensaios mostraram que a inclusão de bentonita ao RCC proporcionou um aumento da plasticidade e da atividade das misturas e apresentaram valores compatíveis com os requeridos para confecção de “liners” de cobertura.

A metodologia de preparação das misturas com secagem prévia com o intuito de determinar as porcentagens dos diferentes componentes em peso seco nas misturas, isto é sem influência da umidade, gerou uma condição de agregação, que pode não ser revertida durante o processo de umedecimento subsequente na câmara úmida e que poderia influenciar os resultados finais dos ensaios. Esse fato foi considerado nas dispersões encontradas em alguns resultados entretanto, necessitando de um estudo mais profundo.

Os ensaios de caracterização mostraram uma mudança no comportamento do RCC ao aumentar o conteúdo de bentonita, levando a um aumento na plasticidade para todas as misturas. Contudo, devido à baixa porcentagem de bentonita incorporada ao RCC não proporcionou alterações significativas na composição granulométrica original do RCC, mantendo-se na faixa predominantemente de areia.

Ao se analisar as diferentes misturas com base nos ensaios de compactação percebe-se uma influência pouco significativa da adição de bentonita ao RCC com relação ao valor do peso específico seco obtido. Entretanto, devido a afinidade da bentonita com a água a adição de bentonita tendeu a influenciar o valor do teor de umidade ótimo obtido nas diferentes misturas. Uma questão importante refere-se ao efeito de agregação da bentonita ao RCC durante o processo de umedecimento e preparação das amostras. Percebia-se de forma contínua a formação de grumos de difícil dissolução e que influenciaram de sobremaneira na homogeneização dos materiais na compactação. Estas diferenças no comportamento do RCC em associação com a bentonita tendem a justificar algumas dispersões nos resultados obtidos na compactação para as diferentes energias de compactação.

Ressalta-se ainda que estes ensaios serviram de base para algumas avaliações iniciais do processo de ressecamento. Entretanto, devido as dimensões e a geometria das amostras, os próprios corpos de prova do ensaio de compactação o processo de fissuração não foi perceptível. Contudo, pode se perceber o efeito da bentonita no comportamento original do RCC e tendem a servir de base para a seleção da melhor porcentagem de bentonita a ser utilizada nas misturas a estudar. Os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica mostraram que em todos os casos analisados o acréscimo de bentonita na mistura levou a uma redução da permeabilidade em relação com a permeabilidade do RCC e somente a porcentagem de 14% de bentonita apresentou valores compatíveis com os requeridos para camadas de cobertura de aterros sanitários. Uma ressalva pode ser feita em relação ao crescimento linear desse tipo de adição ao RCC, com destaque ao aumento na permeabilidade para teores superiores a 14%. Contudo, seriam necessários maiores estudos para comprovar esta situação, uma vez que o processo de homogeneização tem uma importância fundamental nas características destas amostras. Acredita-se que a perda da capacidade de expansão da bentonita faz com que seja gerado um aumento na porosidade e por tanto maior permeabilidade. Estudos sobre o assunto são relativamente escassos sendo ainda necessário explorar a relação de sucção que poderia justificar também este comportamento.

A condutividade hidráulica das misturas é controlada por variáveis mecânicas e físico-químicas. A permeabilidade decresce com o aumento no teor de sólidos, especialmente com o teor de bentonita, devido a mudanças nas variáveis mecânicas (tamanho, forma e o arranjo das partículas). As variáveis físico-químicas (mineralogia) exerceram controle da tendência da bentonita em se dispersar ou se agregar, tanto quanto a sua capacidade de se expandir ou contrair. Em termos de redução da condutividade hidráulica, a aplicação de bentonita nas amostras compactadas não surtiu o efeito esperado, isto é uma diminuição na condutividade hidráulica ao aumentar o seu teor para valores superiores a 14%. Esperava-se inicialmente uma diminuição da permeabilidade com a adição de bentonita até chegar a um valor de adição para o qual houvesse uma estabilização, o que não aconteceu e os resultados surpreenderam ainda mais ao se verificar um aumento da permeabilidade para misturas com adição de bentonita acima de 14%.

Como pontuado anteriormente a sequência de homogeneização da mistura com bentonita e água tendeu a influenciar as propriedades do material resultante devido a possibilidade de afetar a habilidade da bentonita em expandir-se e/ou reter água.

A análise do pH das misturas mostrou valores compatíveis com os requeridos, quando testados em solução com água destilada e com cloreto de potássio. Entretanto, as misturas mostraram diminuição do pH ao entrar em contato com meios ácidos, hipótese está baseada na diminuição do pH obtida nos ensaios com acetato de sódio e que afetam a estabilidade da camada devido a possível variação dos fluidos de percolação.

A adição de bentonita nas amostras mostrou que as misturas mantiveram o pH estável na condição fortemente alcalina para o ensaio com água destilada e mudaram a condição alcalina do RCC para extremadamente ácida nas misturas. Assim, pode-se dizer que o pH das misturas é fortemente influenciado pelas características do fluido de percolação.

Os resultados de difratometria de Raios-X revelaram a predominância de Anidro silícico e óxidos de alumínio na fração fina do RCC e nas misturas de uma forma geral. As amostras em geral, mostraram estar constituídas por 54% de materiais cerâmicos e 12% de concretos e argamassas, as quais são susceptíveis a quebra de grãos com o aumento da energia de compactação.

Os resultados dos ensaios de compressão simples mostraram que a adição da bentonita aumentou a resistência para as adições inferiores a 14% em todos os casos, o maior acréscimo foi na porcentagem de 14% e ao aumentar o teor de bentonita para 16% e 18% houve uma

diminuição nos valores da resistência. As variações de resistência proporcionado pelo acréscimo de bentonita não foi significativo e com muitas dispersões, e neste sentido, deveram ser melhor analisadas num contexto mais amplo. Uma condição importante foi observada em relação ao comportamento das curvas tensão-deformação em que a bentonita proporciona uma maior trabalhabilidade ao RCC em consequência da maior agregação entre as partículas.

O estudo da morfologia da fissuração ajudou a determinar a origem das fissuras e pode esclarecer os mecanismos envolvidos durante o processo de ressecamento. A teoria da hierarquia, juntamente com o estudo do processo de fissuração possibilitaram determinar, mesmo que de forma indireta, o mecanismo de falha que rege a formação de uma fenda. O estado de tensão que gera o ângulo de interseção entre fendas é um parâmetro importante a ser considerado e pode ajudar no desenvolvimento de um modelo que explique o padrão de fissuração. Esse modelo poderia permitir o estabelecimento de uma relação mais estreita entre os parâmetros medidos no solo e o surgimento das fissuras.

Partindo das observações experimentais do processo de ressecamento, é claro que existe uma hierarquia bem marcada durante a formação de fissuras na secagem das misturas, com predominância retangular. Esta hierarquia fornece a informação que ajuda a explicar a maneira na qual os padrões de fissuração são formados. Pelo padrão de fissuração final, o conhecimento da ordem hierárquica torna possível controlar as alterações dos estados de tensão durante o processo de fissuração.

O tratamento das imagens exige uma prática que é mais ampla do que a efetuada nesta dissertação e talvez um procedimento mais complexo usando um processo de automação que melhore os resultados e a sua precisão. Neste sentido, é necessário efetuar mais estudos a este respeito. No entanto, em uma primeira análise simples e rápida de imagens usando o *ImageJ* pode-se perceber a evolução em tempo real das fissuras que seguido de um tratamento estatístico mais profundo tende a gerar um procedimento que pode contribuir significativamente para identificar os mecanismos de fissuração em solos.

Das misturas estudadas, o RCC+14% apresentou melhores características, adequando-se melhor aos requerimentos da norma para ser usada como “*liner*” de cobertura, mostrando uma menor taxa média de fissuração acompanhada de uma boa capacidade de cicatrização das fissuras geradas durante o processo de ressecamento.

Contudo, no que concerne às misturas estudadas, o uso de bentonita nestas proporções não pareceu ser adequado para fins de uso como material de cobertura de aterros sanitários por

apresentar valores de resistência inferiores aos recomendados. Acrescenta-se ainda os custos relativos a aquisição da bentonita, bem como as dificuldades envolvidas no processo de mistura.

Ressalta-se finalmente que embora se tenha uma previsão de utilização do RCC em camadas de cobertura, o estudo proposto apresenta uma primeira ideia desta aplicação considerando o RCC em sua condição original, cujas características de permeabilidade devam ser significativamente melhoradas. Neste sentido, a proposta mais relevante foi avaliar os efeitos da adição de bentonita nas diferentes propriedades do RCC, justificando assim a utilização de teores tão altos de bentonita.

6 TRABALHOS FUTUROS

Apesar de ter conseguido responder uma grande variedade de questões a respeito do comportamento do RCC e bentonita, bem como estabelecer algumas metodologias de avaliação do processo de fissuramento, algumas questões e recomendações poderiam ser levantadas:

Associar a estes estudos análises de Microscopia eletrônica de varredura nas misturas para melhor avaliação das interações das partículas de RCC-bentonita.

Implementar um sistema de aquisição de dados ao equipamento utilizado para a verificação da perda de massa com o uso de uma célula de carga adaptado a um sistema de reação, apesar dos métodos manuais de operação e registro dos sensores ainda serem comuns, o uso de “*dataloggers*” é de grande valia para um monitoramento contínuo.

Realizar ensaios de sucção nas misturas para obtenção da curva de retenção e posterior análise das diferentes etapas do processo de fissuração em relação a esta variável.

Realizar ensaios de compressão não confinada para as diferentes amostras estudadas neste trabalho para diferentes tempos após a preparação dos corpos de prova, para verificar a influência desta variável na resistência das misturas.

Pesquisar a adição de outros materiais na mistura com o intuito de aumentar a sua resistência como, por exemplo, cimento, cal, fibras naturais, fibras recicladas, etc.

Nesta dissertação foram apresentados testes para verificar o tratamento de imagens, no entanto, o tempo necessário para a preparação de cada julgamento não permitiu aprofundar nestes conceitos, portanto, é necessário dar continuidade a este tipo de avaliação no sentido de aprimorar as técnicas e melhorar a precisão dos resultados. A combinação da intuição e experiência certamente irão ajudar no tratamento eficaz de imagens para a identificação das fissuras com mais clareza.

Recomenda-se ainda, estudar a influência do tempo de homogeneização da umidade nas misturas e avaliar as diferentes propriedades para diferentes tempos de homogeneização.

Realizar misturas com cálculo de quantidades em peso úmido, mas realizadas em materiais com umidade natural corrigida para os valores requeridos nos ensaios e mantendo a mesma proporção usada neste trabalho.

Por fim realizar ensaios com amostras submetidas a processos de compactação no sentido de avaliar as condições mais próximas da realidade construtiva destas camadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de Solo que Passam na #4,8mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- ABNT (1984). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 13 p.
- ABNT (1984). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ, 6 p.
- ABNT (1984). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 3 p.
- ABNT (1986). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (método de ensaio). Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- ABNT (1986). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, RJ, 10 p.
- ABNT (1982). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7183: – Determinação do limite e relação de contração de solo. Rio de Janeiro, RJ, 3 p.
- ABNT (1986). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9252: Solo- Determinação do grau de acidez do solo. Rio de Janeiro, RJ, 2 p.
- ABNT (2000). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545: Solo – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, RJ, 3 p.
- ABNT (1984). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: Solo – Grãos de ped. Retidos na #4,8 - Determinação massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, 6 p.
- ABNT (1992). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência a compressão não confinada. Rio de Janeiro, RJ, 4 p.
- ABU-HEJLEH, A.N. Y ZNIDARI, D. (1995). *Desiccation theory for soft cohesive soils. Journal of Geotechnical Engineering*, 121 (6): 493-502.
- AFFONSO, F.J.A. (2005). Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos. 2005. 161 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.

- ALONSO, E.E. E LLORET, A. (1995). *Settlement of a 12 storey building due to dessication induced by trees. A case study. Proc 1 Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris. EE. Alonso e p. Delage (eds), Balkema / *Press des Ponts et Chaussées*: 935-943.
- ALONSO, E.E., GENS, A. E JOSA, A. (1990). *A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique* 40 (3): 405-430.
- ALSTON, C.; DANIEL, D. E.; DEVROY, D. J. (1997). *Design and construction of sand-bentonite liner for effluent treatment lagoon*. Marathon, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v. 34, n. 6, p. 841-852.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). (2014). *Panorama dos Resíduos sólidos no Brasil, 2013*. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>. Acesso em: Set./ 2014.
- ÁVILA, G., 2004. *Estudio de la retracciónyel agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá*. Tesis Doctoral. UPC, Barcelona.
- BAKER, R. (1981). *Tensile strength, tension cracks and stability of slopes. Soils and Foundations*. 21 (2): 1-17.
- BARRETO, A. R. M. (2004). *Comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento-bentonita para a aplicação em barreiras verticais de contenção de contaminante*. 115p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BARROS, M. C. (2005). *Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura*. 96p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.
- BATISTA, P. (2006). *Avaliação geotécnica de misturas de um solo laterítico com cimento e bentonita para uso em cortinas verticais*. 116p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.
- BIBONE F.R. A & POVINELLI J.(1999). *Conceitos básicos de resíduos sólidos*. Publicação EESC-USP. São Carlos, SP. 109 p.
- BIDDLE, P.G. (1983). *Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils. Géotechnique*, 23 (2): 107-126.
- BISSCHOP, J. E VAN MIER. JGM. (1999). *Quantification of shrinkage micro-cracking in young mortar with fluorescent ligh microscopy and ESEM. Heron*, 44 (4): 245-255.
- BLIGHT, G.E.(1971). *Craks and fissures by shrinkage and swelling, Proc. 5th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics Foundation Engineering*. Luanda. 1: 15-22.
- BOHN, S. (2004). *Hierarchical crack patterns: a comparison with two dimensional soap foams. Colloids and surfaces A*, 263: 46-51.

- BOHN, S., DOUADY, S., AND COUDER, Y. (2005). *Four sided domains in hierarchical space dividing patterns*. *Physical Review Letters*, 94: 054503: 1-4.
- BOHN, S., PAUCHARD, L., AND COUDER, Y. (2005). *Hierarchical crack pattern as formed by successive domain divisions. i. temporal and geometrical hierarchy*. *Physical Review E*, 71: 046214: 1-7.
- BOHN, S., PLATKIEWICZ, J., ANDREOTTI, B., ADDA-BEDIA, M., AND COUDER, Y. (2005). *Hierarchical crack pattern as formed by successive domain divisions. ii. Form disordered to deterministic behavior*. *Physical Review E*, 71:046215: 1-7.
- BOSCOV, M.E.G. (1997). Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/61AA3835/LivroConama.pdf>. Acesso em: Setembro de 2014.
- BROEK, D.(1986). *Elementary Engineering fracture mechanics. 4th edition*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- CAMARGO, R. K. I. (2012). *Hydraulic conductivity and other geotechnical properties of sand-bentonite mixture for mineral barriers applications*. 11p.
- CHERTKOV, V.Y. Y RAVINA, I. (1998). *Modelling the crack network of swelling clay soils*. *Soil Science Society of America Journal*. 62: 1162-1171.
- COLLINS, K., E MCGOWN, A. (1974). *The form and function of microfabric features in a variety of natural soils*. *Géotechnique*, 24: 223-254.
- CONDER. (2014) - Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia. Cartilha de Operação de Aterros Sanitários. Disponível em: <http://www.unipacvaleadoaco.com.br/ArquivosDiversos/Cartilha%20Opera%C3%A7%C3%A3o%20Aterro%20Sanit%C3%A1rio%20CONDER.pdf>. Acesso em: Setembro de 2014.
- CORTE, A. E HIGASHI, A. (1960). *Experimental research on desiccation cracks in soil*. *U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, Research Report N° 66, Corps of Engineers, Wilmette, Illinois, U.S.A.*
- COSTA, C. M. C. (2015). Avaliação do processo de fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos. Tese (Doutorado). 163 p. Universidade de Brasília. Brasília D.F, 2015.
- CUADRADO, C. A. (2013). *Detección de grietas por desecación en arcillas mediante GPR*. 2013. 133p. Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya.
- CUI, Y.J.; LU, Y.F; DELAGE, P.; RIFFARD, M. (2005). *Field simulation of in situ water content and temperature changes due to ground-atmosphere interactions*.

Géotechnique, 55(7): 557-567.

DANIEL, D. E.; BENSON, C. H. (1990). Water content-density criteria for compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(12): p. 1811-1830.

DANIEL, D.E.; WU, Y. K. (1993). *Compacted clay liners and cover for arid sites*. In: *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 119, n.2, p. 223-237, fev.

DIAS, G. G. (2011). Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros. 2011. 208p. Tese (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

DRISCOLL, R. (1983). *The influence of vegetation on swelling and shrinking of clay soils in Britain*. *Géotechnique*, 23 (2): 93-105.

DRUMM, E.C., BOLES, D.R. E WILSON, G.V. (1997). *Desiccation cracks results in preferential flow*. *Geotechnical News*, June: 22-25.

FERREIRA, T e RASBAND, W. (2012). *ImageJ user guide*. 198p. Disponível em: <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide>.

FUJIYASU, Y., FAHEY, M E NEWSON, T. (2000). *Field investigation of evaporation from freshwater tailings*. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 126 (6): 556-567.

GENS, A. E ALONSO, E.E. (1992). *A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays*. *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 1013-1032.

GILI, J.A. E ALONSO, E.E. (1988). *Discontinuous numerical model for partially saturated soils at low saturation*. *Numerical Methods in Geomechanics Innsbruck, 1988*. Swobods (ed). Balkema, 365-372.

GLEASON, N.H; DANIEL, D.E; EYKHOLT, G.R. (1997). *Calcium and sodium bentonita for hydraulic containment applications*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, New York, v. 123, n.5, p. 438-455.

GRABOWSKA-OLSZEWSKA, B., OSIPOV, V E SOKOLOV, V. (1984). *Atlas of the microstructure of clay soils*. Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.

GRAHAM, J; SAADAT, F; GRAY, M.N; DIXON, D.A; ZHANG, Q.Y. *Strength and volume change behavior of a sand-bentonite mixture*. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v. 26, n.2, p.292-305, 1989.

GRILO, M. B. (1999). Projeto, construção e testes de um simulador de radiação solar. Copele. UFPB, Campina Grande, Brasil. 57p.

HAN, D. (1996) *Use of fly ash-residual soil mixture as a dyke material*. *Environmental Geotechnics*. Balkema, Rotterdam, p.721-726.

HEIBROCK, G., ZEH, R. Y WITT, K.(2005). *Tensile strength of compacted clays*.

Unsaturated Soils: Experimental Studies. Ed. Springer. Vol. 93, Parte 4, 395-412.

HEINECK, K. S. (2002). Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis. 2002. 251p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HOLTZ, W.G. (1983). *The influence of vegetation on the swelling and shrinkage of clays in the United States. Géotechnique*, 23 (2): 159-163.

HOLZER, T.L. (1984). *Ground Failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment. Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology*, Vol. VI: 67-105.

HORGAN, G.W. Y YOUNG, I.M. (2000). *An empirical stochastic model for the geometry of two-dimensional crack growth in soil (with discussion). Geoderma*.96: 263-289.

HUSE, K. (2007). Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros. 2007. 126p. Tese (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios, PNAD (2010). Disponível em:
http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1708. Acesso em: Ago. 2014.

JUÁREZ, E. E RICO, A. (1969). *Mecánica de suelos. Tomo III. Limusa, México.*

KHERA, R.P. (1995). *Calcium bentoite, cement slag and fy ash as slurry wall aterial. In: GEOENVIRONMENT 2000- Characterization, containment, remediation and performance in environmental geotechnics. New Orleans.Procedings... Geotechnical special publication n.46, ASTM, v.1,2v, p.1237 – 1249.*

KONRAD, J.M e AYAD, R. (1997). *An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. Canadian Geotechnical Journal*, 34: 477-488.

KONRAD J.M. e CUMMINGS, J. (2001). *Fracture toughness of frozen base and subbase soils in pavement. Canadian Geotechnical Journal*. 38: 967-981.

KOZICKI, P.; HARTY, S. (1994). *Design and construction of soil-bentonite liners and two case histories. In: First International Congress on Environmental Geotechnics, Jul 1994, Alberta, Canada. Procedings...*, 1 v., p 713-719.

LAKSHMIKANTHA, M. R. (2011). *Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils. Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de Catalunya, BCN.*

LARS, J. M., SCHOJONNING P. Y BEV, D. K. (2002). *Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. Soil & Tillage* 64, 125-135.

- LEE, I.H., LO, K.W. Y LEE, S.L. (1988). *Tensión crack development in soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 114(8): 915-929.
- LLORET, A. E ALONSO, E.E. (1980). *Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour. Géotechnique*, 30 (4): 449-477.
- LLORET, A. E ALONSO, E.E. (1985). *State surfices for partially saturated soils. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanichas and Foundation Engineering (San Francisco, CA), Vol 2* : 557-562.
- LU, N. *et al.*(2009). *Tensile strength of unsaturated sand. Journal of Engineering Mechanics* 135 (12), 1410-1419.
- LU, N., WU, B. e TAN, C. P. (2007). *Tensile strength characterisitcs of unsaturated sands. Journal of Geoenvironmental Engineering* 133 (2), 144-154.
- LUKIANCHUKI, J.A. (2007). Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante. 124p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MARINHO, F. (1994). *Shrinkage behaviour of some plastic soils. PhD Thesis. London University.*
- MILLER, C.J., MI, H E YESILLER, N. (1998). *Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. Journal of the Amercan Water Resources Association*, 34 (3): 677-687.
- MITCHELL, J.K. (1993). *Fundamentals of soil behaviour. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2nd ed.*
- MORAN, C.J. Y MCBRATNEY, A.B. (1997). *A two-dimensional fuzzy random model of soil pore structure. Jornal of Mathematical Geology*, 29: 755-777.
- MORRIS, P.H, GRAHAM, J, & WILLIAMS, D.J. (1992). *Cracking in drying soils. Canadian Geotechnical Journal*, 29: 263-277.
- MORGENSTERN, N.R. E TCHALENKO, J.S. (1967). *Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear. Géotechnique*, 17: 309-328.
- MURILLO, R., MORALES E MONROY, R E HERNÁNDEZ, A. (1991). *Agrietamiento lacustre al oriente de la ciudad de México. En: Agrietamiento de suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.:* 79-94.
- MUTTERER J. E RASBAND W. (2015). *ImageJ macro language programmer's reference guide.* Disponível em: http://rsbweb.nih.gov/ij/docs/macro_reference_guide.pdf. 45 p. (Junho de 2015)
- OLIVELLA, S., GENS, A., CARRERA, J. E ALONSO, E.E. (1995). *Numerical formulation for a simulator (CODE-BRIGTH) for the couple analysis of saline media.*

Engineering Computations 13: 87-112.

OROZCO, J. E FIGUEROA, G. (1991). *Descripción cronológica del desarrollo de los conocimientos sobre el agrietamiento de terrenos. En: Agrietamiento de suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.: 1-11.*

PESSOA, F. H. C. (2004). Análises dos solos de Urucu para fins rodoviários. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.

PIERRAT, P. e CARAM, S. C. (1997). *Tensile strength of wet granular materials. Powder Technology* 91, 83-93.

PIETSCH, W., HOFFMAN, E. Y RUMPF, H.(1969). *Tensile strength of moist agglomerates. I & EC Product Research and Development Vol. 8, N° 1, 58-62.*

PROSAB, Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. (2003). Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/biogas/file/docs/operacao_aterro/prosab_residuos_solidos_urbanos.pdf. Acesso em: Set. 2014.

QUISSINI, C. S. (2009). Estudo da aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos. Dissertação (Mestrado). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, 83p. RAVINA, I. (1983). *The influence of vegetation on moisture and volume changes. Géotechnique*, 23 (2): 151-157.

RIBEIRO, B. T. *et al.* (2007). Calibração e uso de minissimulador de chuva para estudos de erosão e poluição do solo. In: Boletim Técnico, n. 77. Lavras: Ufla, 1-17.

RICHARDS, B.G., PETER, P. E EMERSON, W. W. (1983). *The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia. Géotechnique*, 23 (2): 127-139.

RODRIGUEZ, R. (2002). *Estudio experimental flujoytransporte de cromo, níquelymanganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): influencia del comportamiento hidromecánico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.*

ROMERO, E. (1999). *Characterisation and termo-hidro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.*

SANTEC.(2014). Especificações dos aterros sanitários. Disponível em <http://www.santecresiduos.com.br/aterro/especificacoes>. Acesso em Set. de 2014.

SANTOS, G.G.D. Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: o Caso da Incineração e da Disposição em Aterro. 2007. 193p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2011.

SEKIGUCHI, T., HARAGUCHI, K. E IWAHASHI, J. (1997). *Topographical configuration resulting from the 1888 eruption of Bandai Volcano. In: Bandai Volcano, Recent progress on hazard prevention. Research group for the origin of debris avalanche. Science and Technology Agency. Japan: 155-165.*

- SCHUBERT, H. (1974). *Tensile strength of agglomerates*. *Powder Technology* 11, 107-119.
- SHACKELFORD, C.D. (1994) *Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity*. In: *Hydraulic Conductivity and waste contaminant Transport in Soil*. ASTM STP. 1/42, Philadelphia.
- STURE, S. ALQASABI, A. Y AYARI, M. (1999). *Fracture and size effect characters of cemented sand*. *International Journal of Fracture*, 95: 405-433.
- TANG, C.J., CUI, Y.J., SHI, B., TANG, A.M., LIU, C. (2011). *Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles*. *Geoderma*, 166p.
- TREJO, A. e MARTÍNEZ, A. (1991). *Agrietamiento de suelos zona de Querétaro*. Em: *Agrietamiento de suelos*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.: 67-73.
- UNFPA. (2011). Relatório sobre a Situação da População Mundial 2011. Disponível em <http://www.un.org/files/PT-SWOP11-WEB.pdf>. Março de 2015.
- VARGAS, M. (1977). *Introdução à Mecânica dos Solos*. McGraw-Hill do Brasil, 507 p.
- VOGT, P. (1974). *Volcano spacing, fractures, and thickness of the lithosphere*. *Earth and Planetary Science Letters*, 21: 235-252.
- WILLIAMS, A.A. E PIDGEON, J. T. (1983). *Evapotranspiration and heaving clays in South Africa*. *Géotechnique*, 23 (2): 141-150.
- WORLDOMETER. (2015). Estatísticas em tempo real. Disponível em <http://www.worldometers.info/br/>. Março de 2015.
- YAN REE, C.C.D.; WESTSTRATE, F.A.; MESKERS, C.G.; BREMMER, C.N. (1992). *Design aspects and permeability of natural clay and sand-bentonite lines*. *Geotechnique, London*, v. 42, n.1, p.49-56.
- YESILLER, N., MILLER, C.J. INCI, G. E YALDO, K. (2000). *Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill soils*. *Engineering Geology*, 57: 105-121.