

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECIA,  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**VIABILIDADE DO USO DE SOLO  
TROPICAL E RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO  
CIVIL EM SISTEMAS DE COBERTURA DE  
ATERRO SANITÁRIO**

**MÔNICA CAROLINA CIRÍACO DIAS**

D0100G14  
GOIÂNIA  
2014

**MÔNICA CAROLINA CIRÍACO DIAS**

**VIABILIDADE DO USO DE SOLO  
TROPICAL E RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO  
CIVIL EM SISTEMAS DE COBERTURA DE  
ATERRO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lilian Ribeiro Rezende

Coorientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

D0100G14  
GOIÂNIA  
2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)  
GPT/BC/UFG**

Ciríaco Dias, Mônica Carolina

Viabilidade do Uso de Solo Tropical e Resíduo de Construção Civil em Sistema de Cobertura de Aterro Sanitário [manuscrito] / Mônica Carolina Ciríaco Dias. - 2014.

111 f. : il., figs, tabs.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lilian Ribeiro Rezende; Co-orientadora: Márcia Maria dos anjos Mascarenha

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil (ECC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Estruturas e Contrução Civil, Goiânia, 2015.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráficos, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Reutilização de resíduos 2. Resíduos da Construção Civil 3. Sistema de cobertura. 4. Solo tropical. I. Ribeiro Rezende, Lilian, orient. II. Dos Anjos Mascarenha, Márcia Maria, co-orient. III. Título.

Autorizamos a reprodução total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa.

Goiânia, 19/02/2015

Assinatura: Mônica Carolina Ciríaco Dias.

E-mail: mony.carolina@gmail.com

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**     **Dissertação**     **Tese**

**2. Identificação da Tese ou Dissertação**

Autor (a):	Mônica Carolina Ciríaco Dias		
CPF:	020.292.811-07		
E-mail:	mony.carolia@gmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não	
Vínculo empregatício do autor:	Nenhum		
Agência de fomento:	Campanha Nacional de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	Go
		CNPJ:	
Título:	Viabilidade do Uso de Solo Tropical e Resíduo de Construção Civil em Sistema de Cobertura de Aterro Sanitário		
Palavras-chave:	Reutilização de resíduos. Resíduos da Construção Civil. Sistema de cobertura. Solo tropical.		
Título em outra língua:	Viability of Using Tropical Soil and Civil Construction Waste System Landfill Cover		
Palavras-chave em outra língua:	Reuse of waste. Residue of Construction. System cover. Tropical soil.		
Área de concentração:	Geotecnia		
Data defesa: (29/08/2014)			
Programa de Pós-Graduação:	Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção civil		
Orientador (a):	Lilian Ribeiro Rezende		
E-mail:	rezende.lilian@gmail.com		
Co-orientador (a):	Márcia Maria dos Anjos Mascarenha		
E-mail:	marciamascarenha@gmail.com		

**3. Informações de acesso ao documento:**

Liberação para disponibilização?<sup>1</sup>                                     total                     parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

Capítulos. Especifique: \_\_\_\_\_

Outras restrições: \_\_\_\_\_

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Mônica Carolina Ciríaco Dias  
Assinatura do (a) autor (a)

Data: 19 / 02 / 2015.

<sup>1</sup> Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.



Universidade Federal de Goiás  
Escola de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### Viabilidade do Uso de Solo Tropical e Resíduo de Construção Civil em Sistema de Cobertura de Aterro Sanitário

Mônica Carolina Ciríaco Dias

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:

*Lilian R. de Rezende*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lilian Ribeiro de Rezende (GECON/UFG)

*Gilson de Farias Neves Gitirana Júnior*

Prof. Dr. Gilson de Farias Neves Gitirana Júnior (GECON/UFG)

*Cláudia Márcia Coutinho Gurjão*

Profa. Dra. Cláudia Márcia Coutinho Gurjão (ENC-UnB)

Goiânia, 29 de agosto de 2014

*Dedico este trabalho às pessoas que sempre estão do meu lado me apoiando e incentivando os meus estudos, em especial aos meus pais Zeraías e Margarida Célia, as minhas irmãs Suélen e Rízia Beatriz, a meus avós maternos Benedita Estelita e Canuto e a meu namorado Carlos Alejandro maiores incentivadores para conclusão desta jornada.*

## AGRADECIMENTOS

Pai, grata até aqui o Senhor tem me sustentado e ajudado. Seus planos pra mim são muito melhores do que eu poderia imaginar. Obrigada por mais esta etapa vencida. Te amo meu Deus.

Agradeço em especial aos meus pais Margarida Célia e Zeraías e aos meus avós maternos Benedita Estelita e Canuto pelo amor, carinho, apoio, por sempre estarem ao meu lado mesmo estando longe, por acreditarem na minha capacidade diante de todas as dificuldades. E as minhas irmãs Suélen e Rízia Beatriz pela torcida sempre.

Agradeço em especial ao meu namorado, amigo e companheiro Carlos Alejandro pela paciência, carinho, atenção e cumplicidade. Obrigada por estar sempre ao meu lado mesmo estando longe me dando força e me apoiando e fazendo acreditar cada vez mais que conseguiria realizar esta vitória.

A professora Lilian, que sempre esteve presente na orientação desta dissertação e por ter proporcionado grandes ensinamentos durante todo o período do mestrado.

Agradeço a minha co-orientadora Márcia Mascarenha por além de me orientar foi muitas vezes conselheira e amiga, sendo paciente em entender as minhas dificuldades e confiando que eu conseguiria.

Agradeço também ao professor André Brasil que além de ser simplesmente um professor foi um amigo que me ajudou e me incentivou a seguir meu caminho.

Aos meus professores do Programa de Pós-Graduação de Geotecnia: Maurício, Patrícia, Carlos, Gilson pelos ensinamentos de suas disciplinas que contribuíram para a minha formação profissional durante todo esse período.

Ao Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Goiás, por ter dado suporte necessário para o desenvolvimento da pesquisa e ao técnico João Jr., Cleyton e o ex-técnico Luciano pela ajuda com os ensaios.

A Eletrobrás Furnas e ao funcionário do Laboratório Saulo por ensinar a realizar o ensaio de Pinhole test.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fornecimento da bolsa de estudos e à FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás) pelo suporte financeiro para a realização desta pesquisa.

A colega Patrícia da Construção Civil por ter me ensinado a utilizar a lupa estereoscópica.

Agradeço ao apoio logístico da minha tia materna Zara Estela que mesmo de longe esteve me ajudando nas correções do texto deste trabalho.

Agradeço aos meus grandes amigos Glacielle e Mauro pelo companheirismo, por me apoiarem, me ajudarem, me acalmarem e me aguentarem nos momentos mais difíceis e por vivermos bons momentos juntos. Os levarei no coração para sempre.

Aos amigos João Guilherme, Antônio, Jorge, Francielle, Vinícius, Valdemar, Sofia e aos demais que me acompanharam e ajudaram nestes anos de Mestrado. Valeu pelo apoio.

Obrigada aos amigos distantes que mesmo longe me apoiaram e a todos que não mencionei sabe de sua importância nesta conquista.

Muito Obrigada!

## RESUMO

A geração de resíduo de construção civil (RCC) se destaca pela quantidade produzida e pelo volume ocupado na disposição. Dessa forma, surge a necessidade de reutilização desse material e uma alternativa viável é o uso em obras geotécnicas. A utilização dos resíduos em obras geotécnicas, também permite a substituição dos materiais geotécnicos naturais, de forma que ajuda a diminuir a exploração desordenada das jazidas. No Brasil desde a década de 1980, existem pesquisas desenvolvidas utilizando resíduos de construção os quais a maioria em obras de pavimentação, onde o uso destes materiais é promissor e tecnologicamente adequado. Todavia, o uso em pavimentação não garante uma reciclagem massiva deste resíduo, porque o mercado não é capaz de consumir mais de 50% deste material, surgindo à necessidade da aplicação em outros tipos de obras geotécnicas. Dessa forma, esta pesquisa objetiva verificar a viabilidade técnica do uso de RCC em sistema de cobertura de aterro sanitário. Em termos metodológicos, foram realizados os ensaios de caracterização física (granulometria, limites de Atterberg, massa específica, método da pastilha e azul de metileno), ensaios hidro-mecânico (adensamento, cisalhamento direto, permeabilidade, papel filtro) e os de erodibilidade (desagregação, crumb test, pinhole test e inderbitzen) nas amostras de Solo, RCC e Mistura. Os resultados mostraram que o Solo e a Mistura foram caracterizados como um silte de baixa compressibilidade e o RCC como uma areia siltosa. Com os valores de permeabilidade, foi verificado que o Solo e a Mistura atendem aos requisitos de permeabilidade propostos para a camada superior da cobertura, mas não atendem para a barreira hidráulica, devido principalmente ao arranjo granulométrico que possui estes materiais. E a permeabilidade do RCC não atende o requisito para ser utilizado em nenhuma dessas camadas. Os resultados do adensamento mostra que a influência dos coeficientes de deformabilidade são maiores que da tensão de pré-adensamento, visto que a deformação no RCC é maior que a do solo e a mistura têm comportamento próximo ao do RCC. Quanto aos ângulos de atritos e a coesão obtidos o RCC teve valores semelhantes à de solos granulares e a amostra de Solo e a Mistura obtiveram valores típicos de argilas de baixa plasticidade. Na análise da desagregação dos três materiais, verificou que o Solo e Mistura é um material não estável em presença da água ao contrário do RCC, que mostrou ser um material instável na presença de água. Em relação ao ensaio de Inderbitzen, o RCC tem maiores perdas de massa que a amostra de Solo, conforme o esperado por aquele ser um material não coesivo. Por outro lado a Mistura apresentou menor valor de perda de massa no decorrer do ensaio. Na análise da erosão interna o Solo e a Mistura são classificados como um material não desagregável e não dispersivo e o RCC é um material facilmente desagregável, mas não dispersivo. Com as análises feitas verificou-se que o percentual de acréscimo de 50% de solo tropical no RCC fez com que o material tivesse um melhor comportamento hidro-mecânico em relação ao RCC puro, além de ser um material menos erodível. A partir dos resultados, conclui-se que a Mistura é uma alternativa viável para uso em camada superficial e de proteção em um sistema de cobertura de aterro sanitário.

**Palavras-chaves:** Reutilização de resíduos. Resíduo da Construção Civil. Sistema de cobertura. Solo tropical.

## ABSTRACT

The generation of construction waste (RCC) stands out for the quantity produced and the volume occupied in the array. Thus, is required to reuse this material and a viable alternative is the use in geotechnical works. The use of waste in geotechnical works, also allows replacement of the natural geotechnical materials, so that helps to reduce the uncontrolled exploitation of the deposits. In Brazil since the 1980s, there is research developed using construction waste in paving, where the use of these materials is promising and technologically appropriate. However, the use of massive paving does not guarantee recycling of this waste, because the market is not able to consume more than 50% of the material, resulting in the need for application in other types of geotechnical. Thus, this research aims to verify the technical feasibility of using RCC in landfill cover system. In terms of methodology, the physical characterization were performed (granulometry, Atterberg limits, density, chip and method of the methylene blue), hydro-mechanical tests (density, direct shear, permeability, filter paper) and erodibility (disaggregation test, crumb test, pinhole test and inderbitzen) in Soil samples, RCC and misture. The results showed that the soil and misture were characterized as low plasticity silt and RCC as silty sand. With permeability values, it was found that the soil and the mixture comply with the proposed permeability requirements for the top layer of coverage, but do not meet for the hydraulic barrier, mainly due to grain size arrangement having these materials. And the permeability of RCC isn't appropriate to be used in any of these layers. The influence of deformation coefficients are larger than the pre-consolidation stress, since the deformation of the RCC is greater than the soil and mixing behavior are close to the RCC. As for the friction angle and cohesion obtained the RCC had values similar to those of granular soils and he sample of soil and the mixture obtained typical values of low plasticity clay. In analyzing the disaggregation of the three materials, and found that soil mixture is stable material in the presence of water unlike the RCC, which proved to be an unstable material in the presence of water. In relation to the test Inderbitzen, the RCC has greater mass loss of the sample soil as expected by that be a non-cohesive material. Moreover mixture showed the lowest weight loss value during the test. In the analysis of internal erosion Solo and the mixture are classified as a non-disintegrating and non-dispersive material and RCC is an easily disintegrating material, but not dispersive. With the analysis made it was found that the increase of percentage of 50% of tropical soil in RCC did the material had a better hydro-mechanical behavior compared to pure RCC as well as being a less erodible material. From the results, it is concluded that the mixture is a viable alternative for use in surface layer and protection in a landfill cover system.

**Key-words:** Reuse of waste. Residue of Construction. System cover. Tropical soil.

## RESUMEN

La generación del residuo de la construcción civil (RCC) se caracteriza tanto por la cantidad producida como por el volumen que ocupa. De esta forma surge la necesidad de reutilizar dicho material, siendo una alternativa viable su uso en obras geotécnicas. La utilización de los residuos en obras geotécnicas, también permiten la sustitución de los materiales geotécnicos naturales, de forma que ayuda a disminuir la explotación desordenada de los yacimientos. En Brasil, desde la década de los 80, existen investigaciones realizadas utilizando residuos de construcción, los cuales son en su mayoría relacionados con la pavimentación, donde el uso de estos materiales es promisorio y tecnológicamente adecuado. A día de hoy, el uso de estos materiales en pavimentación no garantiza su reciclaje masivo, porque el mercado no es capaz de consumir más del 50% de este material, surgiendo la necesidad de su aplicación en otros tipos de obras geotécnicas. De esta forma, esta investigación tiene como objetivo la verificación de la viabilidad técnica del uso del RCC en la capa de sellado de los vertederos. En términos metodológicos, fueron realizados los ensayos de caracterización física (granulometría, límites de Atterberg, masa específica, método de la pastilla y azul de metileno), ensayos hidro-mecánicos (adensamiento, cizallamiento directo, permeabilidad, papel filtro) y los ensayos de erosionabilidad (desagregación, crumb test, pinhole test y ensayo de inderbitzen) en muestras de Suelo, RCC y Mezcla de ambos. Los resultados mostraron en cuanto a la clasificación de las muestras fueron que el Suelo y la Mezcla fueron caracterizados como un limo de baja compresibilidad, mientras que la muestra de RCC fue caracterizada como una arena limosa. Con los valores de permeabilidad, fue verificado que el Suelo y la Mezcla atienden a los requisitos de permeabilidad propuestos para la capa superior del sellado de un vertedero, pero no atienden para la barrera hidráulica, debido principalmente a la forma granulométrica que poseen estos materiales. La permeabilidad del RCC no supera el requisito para ser utilizado en ninguna de esas capas. Los resultados del densamiento muestran que la influencia de los coeficientes de deformabilidad son mayores que los de tensión de pre-adensamiento, puesto que la deformación en el RCC es mayor que la del Suelo, teniendo la Mezcla un comportamiento próximo al RCC. En cuanto a los valores de ángulo de fricción y cohesión obtenidos, el RCC tomó valores similares a los valores de los suelos granulares mientras que la muestra de Suelo y la Mezcla obtuvieron valores típicos a los de las arcillas de baja plasticidad. En el análisis de desagregación de los tres materiales, se verificó que el Suelo y la Mezcla son materiales no estables en presencia de agua. En relación al ensayo de Inderbitzen, el RCC tuvo mayores pérdidas de masa que la muestra de Suelo, lo cual fue conforme a lo esperado, ya que es un material no cohesivo. Por otro lado la Mezcla presentó menor valor de pérdida de masa en el transcurso del ensayo. En el análisis de la erosión interna del Suelo y de la Mezcla se clasificaron como material no desagregable y no dispersivo; mientras que el RCC fue clasificado como un material fácilmente desagregable, pero no dispersivo. Con los análisis realizados se verificó que una relación por encima del 50% de suelo tropical en relación al RCC hace que el material tuviese un mejor comportamiento hidro-mecánico respecto al comportamiento que se tiene con el RCC puro, además de ser un material menos erosionable. Por tanto, se concluye que la Mezcla es una alternativa viable para su uso en la capa superficial y de protección de un sistema de sellado de vertederos.

**Palabras claves:** Reutilización de residuos. Residuos de la Construcción Civil. Sellado de vertederos. Suelo tropical.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Componentes básicas de um sistema de cobertura (Modificado de KOERNER; DANIEL, 1997).....	25
Figura 2.2 – Esquemática de ocorrência de solos em ambiente tropical. (VILLIBOR et al., 2009).....	28
Figura 2.3 – Micro e macroporos em solos lateríticos. (MASCARENHA, 2008).....	29
Figura 2.4 – Curva característica em função do grau de saturação (SILVA, 2009).....	30
Figura 2.5 – Carta de Classificação do Método das Pastilhas (NOGAMI e VILLIBOR, 1994). .....	31
Figura 2.6 – Formatos típicos das curvas de retenção (modificado de Fredlund e Xing, 1994). .....	36
Figura 2.7 – Principais aspectos da curva de retenção de água (D.G. Fredlund & Xing, 1994). .....	36
Figura 2.8 – Tipos de fluxos do solo para o papel filtro: a) medição da sucção total e b) medição da sucção matricial, (MARINHO, 1994).....	39
Figura 3.1 – Localização geográfica da cidade de Aparecida de Goiânia – GO.....	48
Figura 3.2 – Localização da coleta das amostras de solo (imagem obtida do Google Maps, 05/02/2014).....	49
Figura 3.3 - Solo utilizado na pesquisa: (a) Local de coleta. (b) Solo coletado passante na peneira 4,8 mm. ....	49
Figura 3.4 - Agregado utilizado na pesquisa: a) Local de coleta b) RCC coletado passante na peneira 4,8 mm. ....	50
Figura 3.5 – Lupa estereoscópica. ....	52
Figura 3.6 – (a) Moldagem dos copos de prova e (b) secagem das amostras moldadas. ....	53
Figura 3.7 – Umedecimento das amostras.....	54
Figura 3.8 - Equipamentos para ensaio de balança hidrostática.....	55
Figura 3.9 – Materiais utilizados na montagem do molde do ensaio de pinhole. ....	57

Figura 3.10 - Equipamento do ensaio de pinhole test montado.....	58
Figura 3.11 – Preparação do corpo de prova. ....	58
Figura 3.12 – Ensaio do furo de agulha para solo proveniente da voçoroca do Batalhão Florestal de Polícia, Goiânia – GO (Modificado de SANTOS, 1997). ....	60
Figura 3.13 – Equipamento de Inderbitzen. ....	61
Figura 3.14 – Corpo de prova do ensaio de Inderbitzen amostra. ....	62
Figura 4.1 – Curvas granulométricas do Solo com e sem defloculante. ....	64
Figura 4.2 – Curvas granulométricas do RCC com e sem defloculante.....	64
Figura 4.3 – Curvas granulométricas da mistura com e sem defloculante.....	65
Figura 4.4 – Materiais presente no RCC. ....	67
Figura 4.5 – . Amostra de solo, RCC e mistura sem aparecimento de trincas e expansão.....	67
Figura 4.6 – Carta de Classificação do Método das Pastilhas. ....	68
Figura 4.7 – Ensaio de adsorção de azul de metileno para a amostra de solo, RCC e mistura.....	68
Figura 4.8 – Curvas de compactação do Solo, RCC e Mistura. ....	69
Figura 4.9 – Permeabilidade ao longo do carregamento obtidas por meio da Equação 4.1 e através do ensaio de adensamento. ....	72
Figura 4.10 – Curva de retenção de água do Solo, RCC e Mistura.....	74
Figura 4.11 – Curva de permeabilidade não saturada ajustada. ....	76
Figura 4.12 – Curva de compressibilidade: Deformação volumétrica x Tensão.....	78
Figura 4.13 – Curva de compressibilidade: Índice de vazios x Tensão. ....	79
Figura 4.14 – Deformação do Solo, RCC e Mistura ao longo do tempo com carregamento de 25 kPa. ....	80
Figura 4.15 – Coeficientes de adensamento vertical obtido através da permeabilidade corrigida.....	81
Figura 4.16 – Tensão cisalhante x deslocamento horizontal da amostra de Solo. ....	82
Figura 4.17 – Tensão cisalhante x deslocamento horizontal da amostra de RCC.....	83
Figura 4.18 – Tensão cisalhante x deslocamento horizontal da amostra de Mistura. ....	83

Figura 4.19 – Deslocamento vertical x deslocamento horizontal da amostra de solo.....	84
Figura 4.20 – Deslocamento vertical x deslocamento horizontal da amostra de RCC. ....	84
Figura 4.21 – Deslocamento vertical x deslocamento horizontal da amostra de mistura. ....	85
Figura 4.22 – Envoltória de ruptura para resistência máxima do Solo.....	86
Figura 4.23 – Envoltória de ruptura para resistência máxima do RCC.....	86
Figura 4.24 – Envoltória de ruptura para resistência máxima da mistura. ....	87
Figura 4.25 – Envoltória de ruptura para resistência residual do solo. ....	87
Figura 4.26 – Envoltória de ruptura para resistência residual do RCC. ....	88
Figura 4.27 – Envoltória de ruptura para resistência residual da mistura. ....	88
Figura 4.28 – Resultado do ensaio de desagregação por imersão total da amostra de Solo: (a) CPs submergidos; (b) término do ensaio após 24h.....	90
Figura 4.29 – Resultado do ensaio de desagregação por imersão total da amostra de RCC: (a) Corpos de prova submergidos; (b) término do ensaio após 24h.....	90
Figura 4.30 – Resultado do ensaio de desagregação por imersão total da amostra de Mistura: (a) CPs submergidos; (b) término do ensaio após 24h. ....	91
Figura 4.31 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial na amostra de Solo: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras, (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras, (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras e (d) final do ensaio após 24h. ....	91
Figura 4.32 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial na amostra de RCC: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras, (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras, (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras e (d) final do ensaio após 24h. ....	92
Figura 4.33 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial nas amostras de Mistura: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras, (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras, (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras e (d) final do ensaio após 24h.	93
Figura 4.34 – Resultados do ensaio de crumb test. ....	95
Figura 4.35 – Resultados do ensaio de Pinhole na amostra de Solo. ....	96
Figura 4.36 – Resultados do ensaio de Pinhole na amostra de RCC.....	96
Figura 4.37 – Resultados do ensaio de Pinhole na amostra de mistura.....	97

Figura 4.38 – Amostras de (a) solo, (b) RCC e (c) Mistura submetidas ao ensaio de Pinhole.	97
Figura 4.39 – Massa erodida acumulada, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Solo, RCC e Mistura. ....	98
Figura 4.40 – Execução do ensaio de Inderbitzen: (a) Solo; (b) RCC e (c) Mistura.....	99
Figura 4.41 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica da amostra de solo. ....	99
Figura 4.42 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica da amostra de RCC. ....	100
Figura 4.43 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica da amostra de mistura. ....	100
Figura 4.44 – Massa total erodida acumulada corrigida, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Solo, RCC e Mistura. ....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Capacidade de troca catiônica de alguns tipos de argila (BEAULIEU, 1979 apud PEJON, 1992).....	34
Tabela 2.2 – Superfície específica de alguns argilominerais (LAN, 1979).....	34
Tabela 2.3 – Técnicas de Medida de Sucção.....	38
Tabela 2.4 – Classificação dos resíduos sólidos segundo a NBR 10004/04 (ABNT, 2004)....	41
Tabela 2.5 – Estimativas de geração de resíduos de construção civil em diversos países. ....	43
Tabela 2.6 – Valores de RCC coletados no Brasil e Centro-Oeste. (ABRELPE, 2012).....	43
Tabela 2.7 – Relação RSU e RCC em Goiânia (COMURG, 2011). ....	44
Tabela 3.1 – Classificação das reações ocorridas nas amostras, segundo a NBR 13601 (ABNT, 1996).....	57
Tabela 4.1 – Índices físicos do Solo, RCC e Mistura.....	63
Tabela 4.2 – Teores dos grãos e classificação dos materiais com defloculante.....	66
Tabela 4.3 – Teores dos grãos e classificação dos materiais sem defloculante.....	66
Tabela 4.4 – Resultados obtidos no ensaio de adsorção de azul de metileno.....	69
Tabela 4.5 – Valores da umidade ótima e peso específico seco máximo dos materiais. ....	70
Tabela 4.6 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de permeabilidade.....	70
Tabela 4.7 – Valores de permeabilidade dos materiais. ....	71
Tabela 4.8 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de papel filtro. ....	73
Tabela 4.9 – Valores utilizados no ajuste da curva de retenção. ....	73
Tabela 4.10 – Valores da capacidade de armazenamento de água máxima. ....	75
Tabela 4.11 – Valores utilizados no ajuste da permeabilidade não saturada. ....	75
Tabela 4.12 – Valores de sucção na umidade ótima dos materiais. ....	76
Tabela 4.13 – Valores da permeabilidade não saturada na umidade ótima dos materiais. ....	77

Tabela 4.14 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de adensamento. ....	77
Tabela 4.15 – Índices físicos iniciais dos três materiais. ....	78
Tabela 4.16 – Parâmetros de deformabilidade do solo, RCC e Mistura. ....	79
Tabela 4.17 – Coeficiente de variação volumétrica das amostras. ....	81
Tabela 4.18 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de cisalhamento. ....	82
Tabela 4.19 – Valores de ângulo de atrito e coesão dos materiais. ....	89
Tabela 4.20 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de desagregação total e crumb test. ....	89
Tabela 4.21 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de desagregação parcial. ....	89
Tabela 4.22 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de inderbitzen. ....	98

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- AEV - valor de sucção onde surgem os primeiros vazios não preenchidos totalmente por água
- ASTM –American Society for Testing Materials
- CCR – Concreto Compactado a Rolo
- CDW – Construction and Demolition Waste
- COMURG - Companhia de Urbanização de Goiânia
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CTC - Capacidade de Troca Catiônica
- CP - Corpo de Prova
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
- EUA – Estados Unidos da América
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
- GO - Estado de Goiás
- MCT – Miniatura Compactado Tropical
- NBR - Norma Brasileira
- ONU - Organização das Nações Unidas
- PF - Papel Filtro
- PPG-Gecon - Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil
- PVC – Policloruro de Vinilo
- RCC – Resíduo da Construção Civil
- RSU – Resíduo sólido urbano
- SE - Superfície específica
- SE<sub>AM</sub>: Superfície específica do corante azul de metileno
- SP – São Paulo
- SUCS - Sistema Unificado de Classificação dos Solos
- SWCC – Soil-water characteristic curve
- TRB – Transportation Research Board
- UE – União Europeia
- UFG - Universidade Federal de Goiás
- VEA - Valores de entrada de ar

## LISTA DE SÍMBOLOS

CA	Coefficiente de atividade da fração argilosa (< 0,002 mm)
c	Centímetros
e	Índice de vazios
$e_{wL}$	Índice de vazios dos macroporos
$e_{wS}$	Índice de vazios dos microporos
GC	Grau de compactação
h	Horas
IA	Índice de atividade
IP	Índice de plasticidade
kPa	quiloPascal
k	Permeabilidade
LA	Areia laterítica quartzosa
LA'	Solo arenoso laterítico
LG'	Solo argiloso laterítico
M	Massa do solo seco ensaiado
$m^2/g$	Metros quadrados por grama
min	Minutos
ML	Silte de baixa compressibilidade
$m_L$	Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção na transição no macroporos
ml/s	Mililitros por segundo
MPa	megaPascal
$m_S$	Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção após o valor de umidade higroscópica
$M_T$	Massa total erodida
$M_{R200}$	Massa lavada retida na peneira n° 200
N	Número inteiro referente à ordem da difração.
NA	Areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico
NA'	Misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solo arenoso)
NS'	Solo siltoso não laterítico

NG'	Solo argiloso não laterítico
$n_L$	Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos macroporos
$n_S$	Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos microporos
P	Coefficiente de capacidade de desagregação das partículas quando submerso em água
Pf	Porcentagem, do peso da fração < 0,002 mm
$P_{P200}$	Porcentagem passante na peneira n° 200 (0,075 mm), conforme curva granulométrica
$P_{200}$	Porcentagem da amostra total que passa na peneira de abertura 0,074 mm
S	Coefficiente de sorção
SC-SM	Areia argilo-siltosa
SE	Superfície específica da amostra ensaiada
$S_f$	Grau de Saturação final
$S_0$	Grau de Saturação inicial
$S_{res}$	Grau de saturação residual
TA	Teor de Agregação
V	Volume adicionado de solução padrão de azul de metileno durante o ensaio
$V_t$	Volume total de azul de metileno adsorvida em 1 g da amostra integral do solo
w	Umidade gravimétrica
$w_{ot}$	Umidade Ótima
$w_f$	Teor de umidade final
$w_L$	Limite de liquidez
$w_{nat}$	Umidade natural
$w_{res}$	Umidade residual
$w_p$	Limite de plasticidade
$e_w$	Teor de água do solo
$e_{wL}$	Índice de vazios dos macroporos
$\alpha_L$	Parâmetro relacionado ao valor de entrada de ar dos macroporos
$\alpha_S$	Parâmetro relacionado ao valor de entrada de ar dos microporos
$\Psi_t$	Sucção total
$\Psi_o$	Sucção osmótica
$\gamma_s$	Peso específico dos grãos
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco
$\gamma_w$	Peso específico da água.

$e_i$	Índice de vazios inicial
$S_i$	Grau de saturação inicial
$h_s$	Altura ideal de sólidos
$u_a - u_w$	Sucção matricial
$u_{wz}$	Velocidade média do fluxo
$k_z$	Permeabilidade respeito à fase d'água na direção z
$\theta$	Umidade volumétrica
$\theta_s$	Umidade volumétrica de saturação
$\theta_r$	Umidade volumétrica residual
$\alpha$	Parâmetro de ajuste da curva
$\lambda_s$	Razão de variação da umidade com a sucção
$\theta_{CC}$	Umidade volumétrica da capacidade de campo
$WS_{máx}$	Máxima capacidade de armazenamento
$H_{raiz}$	Altura de raiz

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>1.1 OBJETIVO .....</b>	<b>22</b>
<b>1.2 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1 SISTEMA DE COBERTURA.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2 SOLOS TROPICAIS NÃO SATURADOS.....</b>	<b>27</b>
2.2.1 Solos tropicais .....	27
2.2.2 Ensaio típicos para solos tropicais.....	30
2.2.3 Solos não saturados .....	35
<b>2.3 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – (RCC).....</b>	<b>40</b>
2.3.1 Reutilização de RCC em obras geotécnicas .....	44
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGIA.....</b>	<b>48</b>
<b>3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2 ENSAIOS LABORATORIAIS .....</b>	<b>50</b>
3.2.1 Ensaio de caracterização e compactação .....	50
3.2.2 Ensaio hidro-mecânicos.....	52
<b>3.3 ENSAIOS DE ERODIBILIDADE.....</b>	<b>55</b>
3.3.1 Ensaio para análise da erodibilidade interna .....	55
3.3.2 Ensaio para análise da erodibilidade superficial .....	61
<b>CAPÍTULO 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....</b>	<b>63</b>
<b>4.2 COMPORTAMENTO HIDRÁULICOS DOS MATERIAIS.....</b>	<b>70</b>
4.2.1 Permeabilidade.....	70
4.2.2 Curva de retenção.....	73

4.2.3 Permeabilidade não saturada.....	75
<b>4.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS.....</b>	<b>77</b>
4.3.1 Adensamento.....	77
4.3.2 Cisalhamento Direto.....	82
<b>4.4 ENSAIOS DE ERODIBILIDADE.....</b>	<b>89</b>
4.4.1 Ensaio para análise de erodibilidade interna.....	89
4.4.2 Ensaio para análise da erodibilidade superficial .....	97
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>102</b>
<b>5.1 SUGESTÕES.....</b>	<b>103</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A produção de resíduos sólidos é uma característica ligada a toda atividade humana. Essa produção tende a ser cada vez maior, com o aumento da população e da industrialização. O uso de resíduos sólidos vem crescendo, quando trata-se de utilização de técnicas de gerenciamento que visam reduzir, reciclar e reaproveitar os resíduos produzidos pelas diferentes atividades humanas.

A sociedade tem se preocupado com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais, o que leva a busca por alternativas de crescimento sustentáveis, a fim de promover o equilíbrio entre o homem e o meio ambiente. E a reciclagem de resíduo tem se mostrado uma boa alternativa na redução do impacto causado pelo consumo desordenado de matéria-prima e redução das áreas de disposição.

No cenário mundial, a Europa e os Estados Unidos têm a prática da reciclagem do RCC já consolidada. A Holanda, por exemplo, recicla 95% do entulho de resíduos sólidos; já no Brasil, apenas cerca de 5% do total de resíduo gerado na construção civil é reciclado (P. FILHO *et al.*, 2007).

Segundo Silva (2006), praticamente todos os setores da construção civil são geradoras de resíduos sólidos, sendo que o grande número de Resíduos de construção civil (RCC) gerado pela construção civil é decorrente de perdas no setor, algo em torno de 50%, mostrando que um bom gerenciamento e planejamento das construtoras poderão ser de fundamental importância para o menor desperdício de materiais.

Atualmente, o setor da construção civil tem se preocupado com os impactos ambientais ao que refere-se aos resíduos gerados pelo conjunto das atividades humanas. Devido a isso vem surgindo ações que vão em direção de uma construção sustentável, preservadora do meio ambiente por meio da utilização de materiais reciclados. Esses materiais, ainda, não se encontram no mercado brasileiro em larga escala, mas observa-se um movimento nessa direção. Constata-se isso pelo crescente interesse nas usinas de reciclagem, que têm se

número de instalações em expansão pelo país.

Em Goiânia-GO, os resíduos de construção civil (RCC) representam de 40 a 70% da massa de resíduos sólidos do aterro sanitário. A geração de entulho nesta cidade gira em torno de 70 mil t/mês, sendo que desse total 60% é entulho passível de reutilização (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

No Brasil, já existem pesquisas desenvolvidas desde a década de 80 utilizando resíduos da construção (MOTTA, 2005). Uma alternativa para o RCC é sua utilização em camadas de pavimentos após ser submetido ao beneficiamento de reciclagem. Todavia, o uso de agregados de RCC em bases de pavimentação, não garante uma reciclagem massiva deste resíduo, porque este mercado não é capaz de consumir mais de 50% deste resíduo, surgindo a necessidade da aplicação em outros tipos de obras. Neste sentido, as obras geotécnicas apresentam-se como uma boa alternativa para a reutilização desses materiais, como em reforços de aterros (gabiões), remediação de erosões, preenchimentos de valas, sistema de cobertura entre outras.

Além disso, essa alternativa pode diminuir a quantidade de RCC a ser disposto, que permite a substituição dos materiais geotécnicos naturais, diminuindo a exploração desordenada das jazidas. Vale ressaltar que esses materiais podem ser utilizados isoladamente, ou em associação com solos tropicais finos, que são abundantes na região de Goiânia.

## 1.1 OBJETIVO

O principal objetivo desta pesquisa é verificar a viabilidade do uso de RCC na camada de proteção, na camada superficial e na barreira hidráulica do sistema de cobertura de aterro sanitário. Devido aos resultados obtidos por Barros (2005), que evidenciam que o RCC puro possui permeabilidade no limite do aceitável para camada de proteção, decidiu-se analisar uma mistura deste material com solo tropical. Pretende-se, dessa forma, reduzir esta permeabilidade e aumentar a capacidade de armazenamento de água da referida camada, verificando o uso destes materiais na camada de superfície e na camada de proteção. A mistura utilizada é na proporção de 50% de cada material.

Diante do exposto, foram definidos os objetivos específicos desta dissertação, os quais são detalhados a seguir:

- Caracterização física, mecânica e hidráulica do solo, do resíduo e da mistura;
- Verificação da erodibilidade do solo, do resíduo e da mistura.

## **1.2 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO**

Esta pesquisa foi estruturada em 6 capítulos conforme itens a seguir:

**Capítulo 1 – Introdução** - No presente capítulo são apresentados a relevância e os objetivos da pesquisa.

**Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica** - são apresentados definições e características dos solos tropicais e RCC, informações sobre sistema de cobertura e o uso de RCD em obra geotécnica.

**Capítulo 3 – Metodologia** – são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e a metodologia adotada na execução dos diversos ensaios.

**Capítulo 5 – Apresentação e Análises dos Resultados** – são apresentadas as análises realizadas a partir dos resultados apresentados.

**Capítulo 6 – Conclusão** - são apresentadas as conclusões finais do trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste item são abordadas as definições e características do RCC e do solo tropical, que são os materiais utilizados nesta pesquisa. Além disso, serão apresentadas informações sobre sistema de cobertura e o uso de RCC nesse tipo de obra geotécnica.

#### **2.1 SISTEMA DE COBERTURA**

A camada de cobertura é um sistema que tem como objetivo impedir a entrada de água e/ou ar para dentro do aterro, minimizar a migração de gás para fora do aterro, servir como elemento de redução de odor, vetores de doenças e outros inconvenientes. Existem várias metodologias de construção da camada de cobertura, sendo que a utilização de solos compactados com baixa condutividade hidráulica é o método mais empregado. O sistema deve ser projetado de forma a minimizar a infiltração e a erosão do material de cobertura. Esse sistema deve ser inspecionado, mantido e reparado sempre para assim garantir sua durabilidade.

De acordo com Oliveira (2002), o sistema de cobertura do maciço de resíduos procura minimizar os impactos ao meio ambiente através da proteção da superfície da camada de lixo. O recobrimento diário, com espessura mínima de 15 cm de solo, evita o arraste de detritos pelo vento, bem como a proliferação de vetores que possam provocar problemas de saúde pública. O recobrimento final é executado após o encerramento de uma parcela do aterro. Este possui espessura mínima de 40 cm de solo e, além das funções inerentes a do recobrimento diário, esta camada também minimiza a infiltração de águas provenientes de precipitações, o que pode ocasionar um aumento substancial do volume de chorume gerado. Adicionalmente, o recobrimento final impede o escape de gases, além de propiciar a plantação de vegetação.

O sistema de cobertura de aterros de resíduos sólidos e aterros de resíduos perigosos possui um número muito similar de camadas. Existem seis componentes básicos em um sistema de cobertura conforme apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Componentes básicas de um sistema de cobertura (Modificado de KOERNER; DANIEL, 1997)



Algumas camadas podem ser combinadas. Por exemplo, tem-se verificado que a camada de superfície pode ser combinada com a camada de proteção. Da mesma forma, a camada de coleta de gás (composta por solo granular) é frequentemente combinada com a camada de base. Vale ressaltar que para a construção dessas camadas, além dos solos naturais, podem ser utilizados também os materiais geossintéticos (KOERNER; DANIEL, 1997).

Existem algumas recomendações para um sistema de camadas de cobertura. A seguir, encontram-se algumas características dessas camadas:

A camada superficial tem a função de separar os componentes que se encontram abaixo da mesma do meio ambiente, além de prevenir a erosão, promover a evapotranspiração e o crescimento de vegetação. Para esta camada podem ser utilizados cascalhos, solos naturais ou mistura de argila, silte e areia, concreto asfáltico e até alguns materiais de demolição e construção.

A camada de proteção é situada abaixo da camada superficial. Armazena água (retenção para evaporação), minimiza os ciclos de secagem e umedecimento dos solos abaixo desta, é um anteparo físico para camada drenante (raízes e animais).

Em casos onde o projeto do sistema de cobertura seja uma barreira evapotranspirativa, isto é, onde a camada de superfície é composta de vegetação, a camada de proteção deve ser capaz de sustentar o crescimento das espécies para minimizar a erosão (BARROSO, 2008).

Segundo Koerner e Daniel (1997), existem uma variedade de solos que podem ser utilizados como camada de cobertura e a escolha do tipo de solo a ser usado devem ser precedidas de uma avaliação dos existentes no local onde se pretende construir a cobertura. Os solos de granulometria média têm em geral características melhores para germinar sementes e desenvolvimento de raízes das plantas. Os solos de textura fina, como as argilas, são frequentemente férteis, podendo apresentar dificuldades em períodos úmidos para o estabelecimento inicial da vegetação. Solos arenosos pode ser um problema devido à baixa retenção de água e à perda de nutrientes por lixiviação. Outros materiais, como cascalhos, também podem ser usados como camada de proteção, em aplicações especiais. A permeabilidade do solo que será utilizado nesta camada deve ser menor que  $< 10^{-5}$  cm/s.

A camada drenante é formada por materiais granulares que possuem elevada transmissividade e tem o objetivo de reduzir a carga hidráulica, drenar lateralmente a água do solo acima e eliminar a poropressão na interface da barreira subjacente. Essa camada tem que ter a permeabilidade superior a  $10^{-2}$  cm/s. Esta camada é necessária quando há excessivas quantidades de água que passam pelas camadas superiores ou quando as forças de percolação são elevadas.

A barreira hidráulica tem como função impedir a percolação de líquido e gases que entra em contato com esta camada. Segundo Shackelford (1997), para que uma camada de solo argiloso compactado tenha um bom funcionamento como barreira hidráulica, ou seja, dificultando fluxo de água para dentro do depósito, o ideal é que esta camada tenha uma condutividade hidráulica igual ou inferior a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s.

A camada de coleta de gás tem como função direcionar os gases produzidos pela massa de lixo, em consequência da degradação da matéria orgânica, para a atmosfera. Os materiais utilizados nesta camada deverão ser granulares e altamente permeáveis, como cascalho e pedregulho (KOERNER; DANIEL, 1997).

Por fim, a camada de base ou fundação é construída imediatamente sobre o resíduo e serve de base para as outras camadas que compõem o sistema de cobertura final. Dependendo do tipo

de resíduo que esteja sendo coberto, ela pode ser a última camada de solo colocado diariamente, ou uma cobertura de solo temporária, ou ainda uma camada de solo colocada previamente à construção do sistema de cobertura (BARROS, 2005).

## 2.2 SOLOS TROPICAIS NÃO SATURADOS

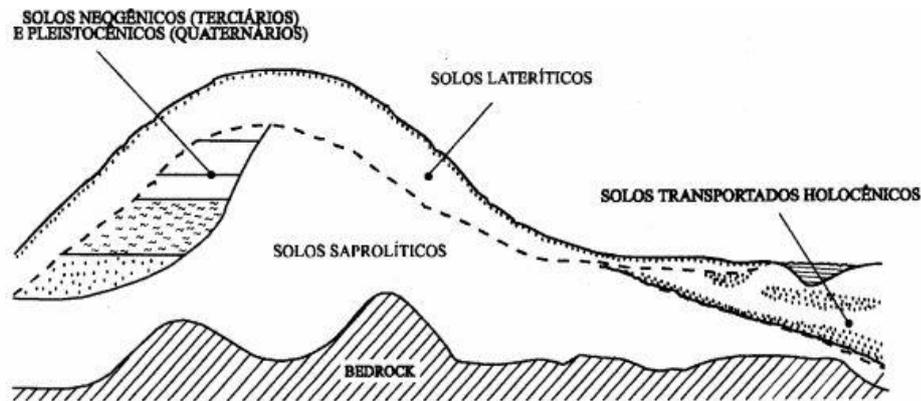
Serão abordados neste item definição dos solos tropicais, descrição dos ensaios típicos para solos tropicais, e conceitos e comportamento hidráulico de solos não saturados.

### 2.2.1 Solos tropicais

Segundo Villibor *et al.*, (2009), solos são materiais naturais não consolidados, isto é, constituídos de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos. Dentro da classificação dos solos, solos tropicais são aqueles que apresentam propriedades peculiares e de comportamento, em decorrência da atuação de processo geológico e/ou pedológico típicos das regiões tropicais úmidas. Dentre os solos tropicais destacam-se duas grandes classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos.

Os solos lateríticos (later, do latim: tijolo) são solos superficiais, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, resultantes de uma transformação da parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo, por processo denominado laterização. Os solos saprolíticos (sapro, do grego: podre) são aqueles que resultam da decomposição e/ou desagregação *in situ* da rocha matriz pela ação das intempéries (chuvas, insolação, geadas) e mantêm, de maneira nítida, a estrutura da rocha que lhe deu origem. São genuinamente residuais, isto é, derivam de uma rocha matriz, e as partículas que o constituem permanecem no mesmo lugar em que se encontrava em estado pétreo (VILLIBOR *et al.*, 2009). A Figura 2.2 mostra um perfil esquemático da ocorrência de solos que são encontrados em regiões tropicais.

Figura 2.2 – Esquemática de ocorrência de solos em ambiente tropical. (VILLIBOR et al., 2009).



De acordo com Vargas (1985), os solos tropicais apresentam duas porções com comportamentos geotécnicos distintos: a porção superficial com intensa evolução pedogenética e estágio avançado de laterização, constituindo-se no solo laterítico e a porção profunda que apresenta estruturas reliquias da rocha e se constitui no solo saprolítico.

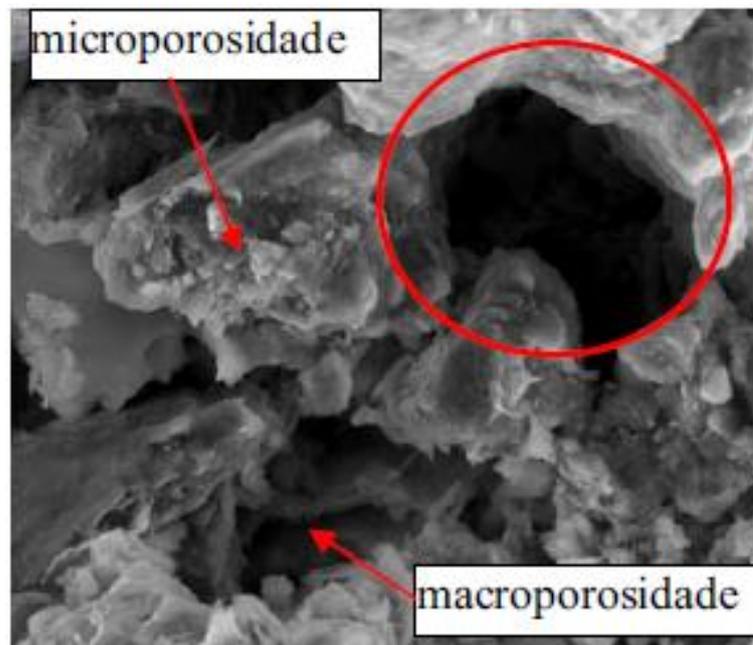
Segundo Nogami e Vilibor (1995), a fração argilosa dos solos tropicais caracteriza-se pela presença de argilo-minerais como a caulinita, além de elevada concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, como a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), que levam à formação das chamadas concreções lateríticas, devido às suas propriedades cimentantes. A presença desses materiais resulta em baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e expansividade dos solos lateríticos.

Segundo Santos (2006), os solos tropicais podem revelar comportamentos distintos relacionados com seu comportamento mecânico e hidráulico devido ao processo de laterização. Em relação às propriedades mecânicas, cabe destacá-las no seu estado natural e em seu estado compactado. Um solo que apresenta comportamento laterítico adquire, quando compactado em condições ideais, alta capacidade de suporte e baixa perda dessa capacidade quando imerso em água. Vale ressaltar que nem sempre o aumento de energia de compactação melhora as propriedades mecânicas, pois esse pode quebrar as agregações presentes no solo, motivo pelo qual também não é recomendada a recompactação deste material.

Segundo Oliveira e Boscov (2004), quando sejam utilizadas monocoberturas de solos lateríticos em aterros sanitários, tem-se a necessidade de controle rigoroso de compactação no campo, pois a curva de compactação desses solos muito íngreme perde densidade seca e aumenta a permeabilidade significativamente para desvios de umidade negativos.

Boscov (2004) comenta que os solos lateríticos apresentam uma curva de compactação bem característica, as quais possuem um pico bem definido e uma grande inclinação do ramo seco; sendo que um erro em campo na umidade de compactação acarreta uma queda de peso específico aparente seco importante, com reflexos significativos na permeabilidade. E segundo Camapum de Carvalho *et al.*, (1994), esses solos são metaestáveis, constituídos de micro e macroporos conforme apresentado na Figura 2.3.

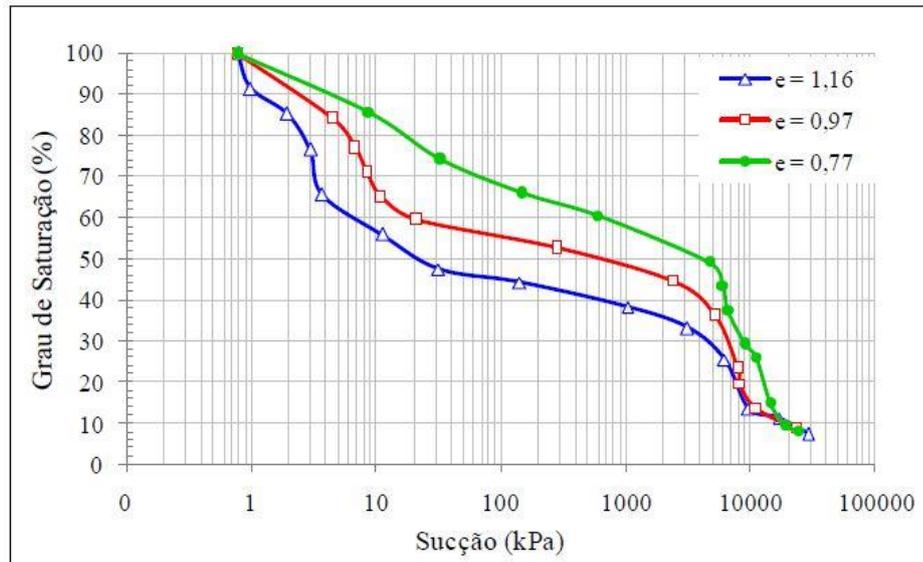
Figura 2.3 – Micro e macroporos em solos lateríticos. (MASCARENHA, 2008).



Além disso, segundo Camapum de Carvalho e Leroueil, (2000), a existência de micro e macroporos resultam numa curva de retenção bimodal, tendo dois valores de entrada de ar, um na micro e outra na macroestrutura. Isso ocorre porque o valor de sucção está associado a distribuição dos poros preenchidos de água., conforme apresentado na Figura 2.4.

Além de interferir na curva de retenção, a existência de micro e macroporos interfere na permeabilidade dos solos tropicais, resultando em solos argilosos com coeficientes de permeabilidade em torno de  $10^{-5}$  cm/s. Porém, segundo Boscov (2004), quando compactados na Energia Próctor Normal podem atingir valores em torno de  $10^{-7}$  cm/s. Segundo Batalione, 2007, os solos lateríticos mais arenosos apresentam valores de coeficiente de permeabilidade, em torno de  $10^{-3}$  cm/s.

Figura 2.4 – Curva característica em função do grau de saturação (SILVA, 2009).



Para entender como varia a permeabilidade ao longo da curva de compactação em solos tropicais, Boscov (2004) pesquisou argilas lateríticas de Sumaré (SP), que apresentaram variações na permeabilidade do solo de até 1000 vezes (valores de  $k$  obtidos entre  $5 \times 10^{-10}$  m/s e  $5 \times 10^{-7}$  m/s quando foram compactados diferentes corpos de provas com um grau de compactação variando entre 95% e 103%).

Uma particularidade que apresentam os solos lateríticos segundo Boscov (2004) é o alto nível de contrações que se produzem quando secos, o qual favorece as aparições de trincas, o que pode refletir em variações nos valores da permeabilidade. Assim, Boscov (2004) indica que seria preferível compactá-los com teor de umidade no máximo igual ao ótimo, e não no ramo úmido, para minimizar os efeitos de redução do teor de umidade.

## 2.2.2 Ensaios típicos para solos tropicais

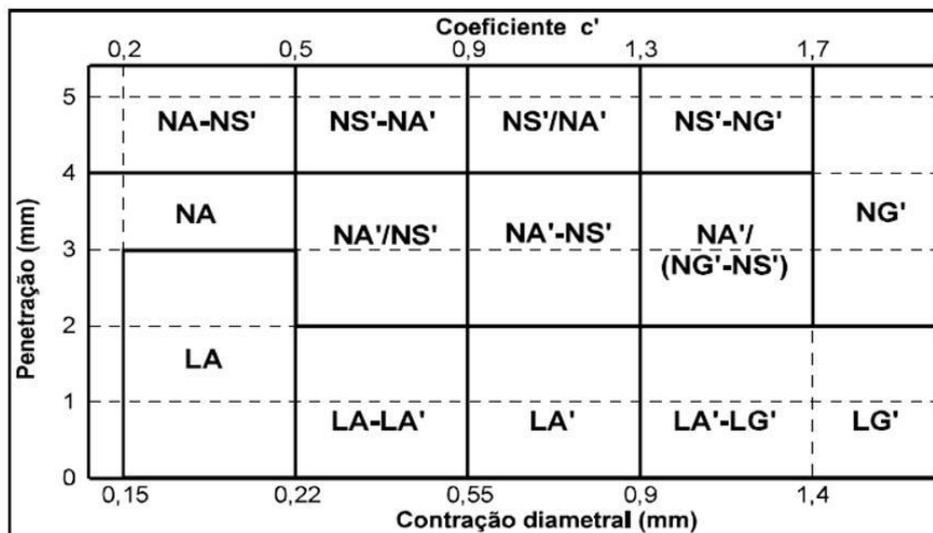
Devido à classificação dos solos convencionais não representarem adequadamente os solos tropicais, tornou-se necessária a adoção de critérios de classificação típicos desses solos. Os métodos da pastilha e o método do azul de metileno são abordagens rápidas e eficazes para a classificação dos solos tropicais e são descritos a seguir.

O ensaio do método da pastilha apresenta simplificações do método convencional da metodologia Miniatura Compactado Tropical (MCT) e baseia-se em determinações efetuadas

em pastilhas que são moldadas em anéis de inox, secas, verificando-se a contração diametral e submetida à reabsorção de água, quando se observa surgimentos de trincas, expansão e resistência à penetração de uma agulha padrão (FORTES; MERIGHI; ZUPPOLINE NETO, 2002).

Após os procedimentos de ensaio os materiais estudados são classificados analisando as medidas de contração diametral (Ct), obtendo a média aritmética dos valores de contração e o valor da medida de penetração, expressas em milímetros. A partir dos valores obtidos identifica-se na carta de classificação, apresentada na Figura 2.5, que grupo o solo condiz na metodologia MCT.

Figura 2.5 – Carta de Classificação do Método das Pastilhas (NOGAMI e VILLIBOR, 1994).



Esta classificação dos solos com o uso da metodologia MCT classifica os solos tropicais em duas grandes classes, os de comportamento laterítico e os de comportamento não laterítico. Os solos de comportamento laterítico, denominado pela letra L, são subdivididos em 3 grupos:

- LA – areia laterítica;
- LA' – solos lateríticos arenosos;
- LG' – solos lateríticos argilosos.

Os solos de comportamento não laterítico (saproliítico), denominado pela letra N, são subdivididos em 4 grupos:

- NA – areia não laterítica;

- NA' – solos arenoso não lateríticos;
- NS' – solo não laterítico siltoso;
- NG' solo não laterítico argiloso.

O princípio do ensaio de azul de metileno consiste em introduzir quantidades crescentes de solução de azul de metileno, por doses sucessivas, até que a superfície das partículas que têm capacidade de adsorção esteja coberta. Nesse momento passa a existir um excesso de azul de metileno na preparação, correspondendo ao ponto de viragem que marca o fim do ensaio, e que pode ser detectado pelo teste da mancha. Este teste consiste em colocar uma gota da preparação num papel filtro e verificar se existe uma auréola azul mais clara no bordo da mancha. A presença de auréola traduz a existência de azul de metileno livre na preparação, evidenciando que todas as partículas susceptíveis de adsorverem azul de metileno estão cobertas por uma camada de moléculas daquela substância.

O equipamento específico necessário à realização do ensaio é simples e pouco dispendioso, limitando-se a uma bureta graduada, um agitador eletromagnético ou de palhetas e papel filtro normalizado. Os demais equipamentos e utensílios existem habitualmente nos laboratórios.

Fabbri (1994) obteve a Equação 2.1 para determinar o coeficiente de atividade (CA) da fração argilosa em função do volume total de azul de metileno ( $V_t$ ) adsorvida por 1g de solo, descrita a seguir.

$$CA = \frac{100 \times V_t}{P_f} \quad (2.1)$$

Em que:

CA: coeficiente de atividade;

$V_t$ : volume total de azul de metileno adsorvida em 1 g da amostra integral do solo, dado em ml.

$P_f$ : porcentagem, em peso, que o solo contém da fração que se quer avaliar a atividade.

O  $P_f$  adotado no ensaio foi o correspondente a fração de diâmetro menor do que 0,005 mm

pois, de acordo com Fabbri (1994) é a fração que melhor reflete o comportamento do solo.

Como o ensaio é realizado com 1g da fração do solo que passa na peneira de abertura 0,075mm, o cálculo do volume total ( $V_t$ ) é calculado segundo a Equação.

$$V_t = V \times \left( \frac{P_{100}}{100} \right) \times \left( 1 + \frac{w}{100} \right) \quad (2.2)$$

Em que:

$V_t$ : volume total de azul de metileno adsorvida em 1 g da amostra integral do solo, dado em ml.

$V$ : volume de azul de metileno adicionado à suspensão durante o ensaio;

$P_{200}$ : porcentagem que o solo possui na peneira de abertura 0,075 mm;

$w$ : teor de umidade no momento do ensaio, da amostra que passa na peneira de abertura 0,075 mm (%).

Para o cálculo dos valores de capacidade de troca catiônica (CTC) e da superfície específica (SE), Pejon (1992) utilizou as Equações:

$$CTC = \frac{(V \times C \times 100)}{M} \quad (2.3)$$

Em que:

$CTC$ : capacidade de troca catiônica, em meq/100g;

$V$ : volume da solução padrão de azul de metileno utilizada no ensaio, em ml;

$C$ : concentração da solução padrão de azul de metileno, em meq/ml. Romão, 1995, adotou o valor de  $2,68 \times 10^{-3}$  meq/ml);

$M$ : massa do solo seco ensaiado em g (admitido como sendo 1 g).

$$SE = \frac{(SE_{AM} \times V)}{M} \quad (2.4)$$

Em que:

$SE$ : Superfície específica da amostra ensaiada, em m<sup>2</sup>/g;

$SE_{AM}$ : Superfície específica do corante azul de metileno (Romão, 1995, adotou o valor 2,44 m<sup>2</sup>/g para 1 g de solo);

V: Volume de solução padrão de azul de metileno consumido, em ml;

M: Massa do solo seco ensaiado, em g (admitindo como sendo 1 g).

Na Tabela 2.1 são apresentados os valores de CTC para alguns tipos de argila segundo (BEAULIEU, 1979<sup>1</sup> *apud* PEJON, 1992).

Tabela 2.1 – Capacidade de troca catiônica de alguns tipos de argila (BEAULIEU, 1979 *apud* PEJON, 1992).

Argila	CTC (meq/100g)
Caolinita	3 - 15
Haloisita 2H <sub>2</sub> O	5 - 10
Haloisita 4H <sub>2</sub> O	10 - 40
Ilita	10 - 40
Clorita	80 - 150
Atapulgita	10 - 40
Montmorilonita	20 - 30
Vermiculita	100 - 150

Na Tabela 2.2 são apresentados alguns tipos de argilominerais com seus respectivos valores de superfície específica, segundo (LAN, 1979).

Tabela 2.2 – Superfície específica de alguns argilominerais (LAN, 1979).

Tipo de argilomineral	Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)
Montmorilonita	800
Vermiculita	200
Ilita	40-60
Caulinita	05-20

<sup>1</sup> BEAULIEU, J. Identification géotechnique de matériaux argileux naturels par la mesure de leur surface au moyen du bleu de méthylène. **Thèse de Doctorat de 3<sup>o</sup> cycle**, Univ. De Paris-Sud, Orsay, 133p. 1979.

### 2.2.3 Solos não saturados

A teoria da mecânica dos solos clássica considera o solo na condição saturada. Mas em muitas regiões de nosso planeta, especialmente nas áridas e semiáridas, o nível do lençol freático se encontra vários metros abaixo da superfície do solo. E nestes casos a mecânica dos solos não saturados é a que melhor representa as condições reais.

As propriedades hidráulicas (permeabilidade) ou mecânicas (resistência e deformação) que regem um solo não saturado podem ser definidas a partir das variáveis de tensões. Uma dessas variáveis é a sucção, que é a tensão resultante dos efeitos causados pela interação que ocorre entre a água, o ar e as partículas do solo devido fenômenos como a capilaridade e adsorção.

A sucção total do solo " $\Psi_t$ " é definida como a energia livre da água no solo e se compõe da soma da sucção matricial " $\Psi$ " e da sucção osmótica " $\Psi_o$ ".

A sucção matricial " $\Psi$ " é definida como  $(u_a - u_w)$ , onde  $u_a$  é a poropressão de ar e  $u_w$  é a poropressão da água, estando associada ao fenômeno capilar.

A sucção osmótica " $\Psi_o$ " é associada à quantidade de sais na água que fica nos poros. Na análise de fluxos de soluções (águas com sais dissolutas), geralmente resulta dominante o gradiente de carga hidráulica da parte da sucção matricial, considerando  $\Psi_o = 0$ , sendo que  $\Psi_t = \Psi$ .

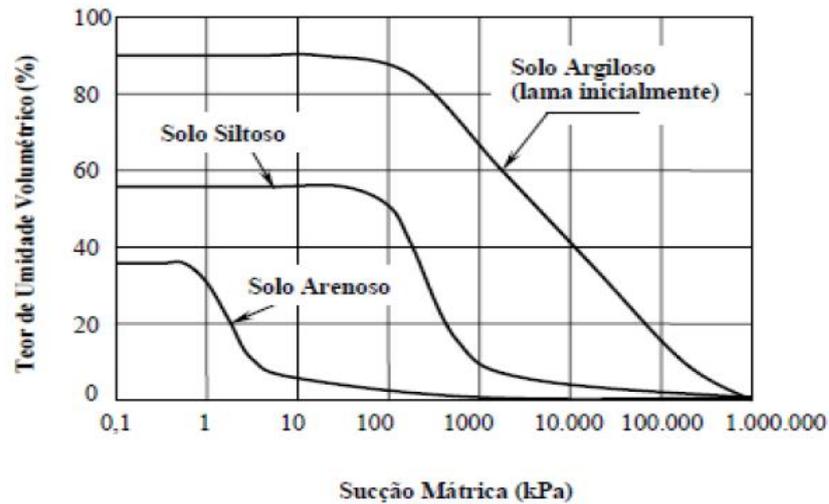
A relação entre umidade e a sucção do solo é uma característica do solo não saturado e pode ser representada a partir de um gráfico denominado curva de retenção de água e que pode ser definida como a variação da sucção com a capacidade de retenção do água em macro e micro poros do solo.

A forma da curva de retenção de água ou característica solo-água (*soil-water characteristic curve*, SWCC) depende de algumas características do material, tais como a distribuição do tamanho do poro, a granulometria, o peso por unidade, o teor de argila e a mineralogia.

Solos argilosos tendem a apresentar curvas mais suaves, uma vez que quanto maior a quantidade da fração argila, maior será o teor de umidade para um mesmo valor de sucção. Os solos arenosos tendem a apresentar perda brusca de umidade quando a sucção ultrapassa um determinado valor, em função da existência de poros maiores e mais conectados. A Figura 2.6

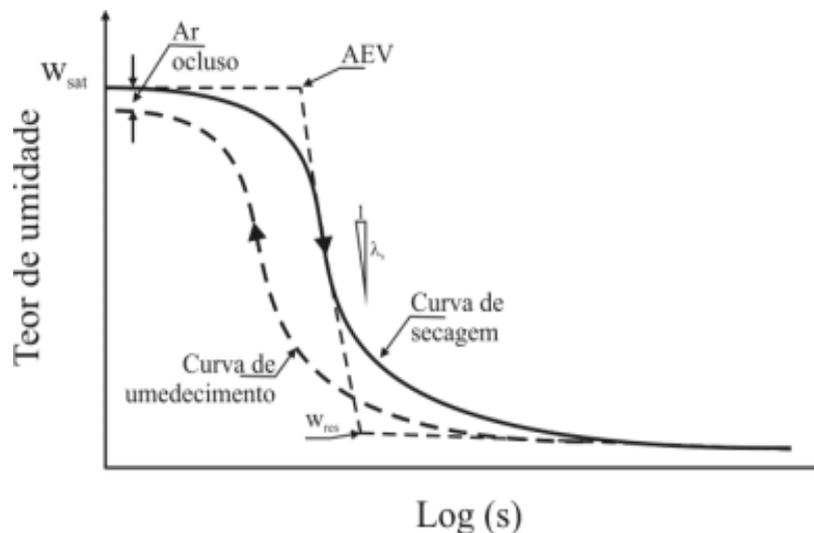
Fredlund e Xing (1994) apresentam os formatos característicos das curvas de sucção em função da granulometria.

Figura 2.6 – Formatos típicos das curvas de retenção (modificado de Fredlund e Xing, 1994).



A Figura 2.7 apresenta uma curva de retenção, onde é possível verificar alguns parâmetros que a definem: umidade de saturação ( $w_{sat}$ ), o valor de sucção onde surgem os primeiros vazios não preenchidos totalmente por água (AEV), o teor de umidade residual ( $w_{res}$ ), e finalmente a razão de variação da umidade com a sucção ( $\lambda_s$ ). Fórmulas matemáticas que representam esta curva foram propostas por Van Genuchten (1980) e Gitirana Jr. e Fredlund, (2004).

Figura 2.7 – Principais aspectos da curva de retenção de água (D.G. Fredlund & Xing, 1994).



Os dados obtidos nos ensaios laboratoriais para obtenção da curva característica de sucção são uma série de pontos desconectados e por isso, são necessárias equações de ajuste para a apresentação gráfica e modelagem numérica dos resultados. Uma das mais utilizadas é a proposta de Van Genutchen (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (2.5)$$

Em que:

$\theta$ : umidade volumétrica [ $L^3/L^3$ ].

$\theta_s$ : umidade volumétrica de saturação [ $L^3/L^3$ ].

$\theta_r$ : umidade volumétrica residual [ $L^3/L^3$ ].

$\alpha$ : parâmetro de ajuste da curva [ $1/L$ ].

$\Psi$ : sucção matricial [ $L$ ].

$n$  e  $m$ : parâmetros de ajuste.

Durner (1994) modificou a expressão da curva característica de Van Genutchen (1980), de forma a estender sua aplicação às curvas bimodais, típicas de solos tropicais. A equação proposta por Durner (1994):

$$e_w = e_{wL} \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_L (u_a - u_w))^{n_L}} \right]^{m_L} + e_{wS} \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_S (u_a - u_w))^{n_S}} \right]^{m_S} \quad (2.6)$$

onde  $e_w$  é o teor de água do solo,  $e_{wL}$  é o índice de vazios dos macroporos;  $\alpha_L$  está relacionado ao valor de entrada de ar dos macroporos,  $n_L$  é associada à inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos macroporos,  $m_L$  é inclinação da reta que relaciona umidade e sucção na transição,  $e_{wS}$  é o índice de vazios dos microporos;  $\alpha_S$  está relacionado ao valor de entrada de ar dos microporos,  $n_S$  é inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos microporos e  $m_S$  é a inclinação da reta que relaciona umidade e sucção após o valor de umidade higroscópica do solo. É importante ressaltar que  $m$  pode ser obtido a partir de  $n$ , pela relação mostrada na Equação 2.7:

$$m = 1 - 1/n \quad (2.7)$$

Existem diferentes metodologias para determinação da sucção do solo, tanto no laboratório, como no campo. A Tabela 2.3 apresenta um resumo de algumas técnicas de medidas de sucção.

Tabela 2.3 – Técnicas de Medida de Sucção.

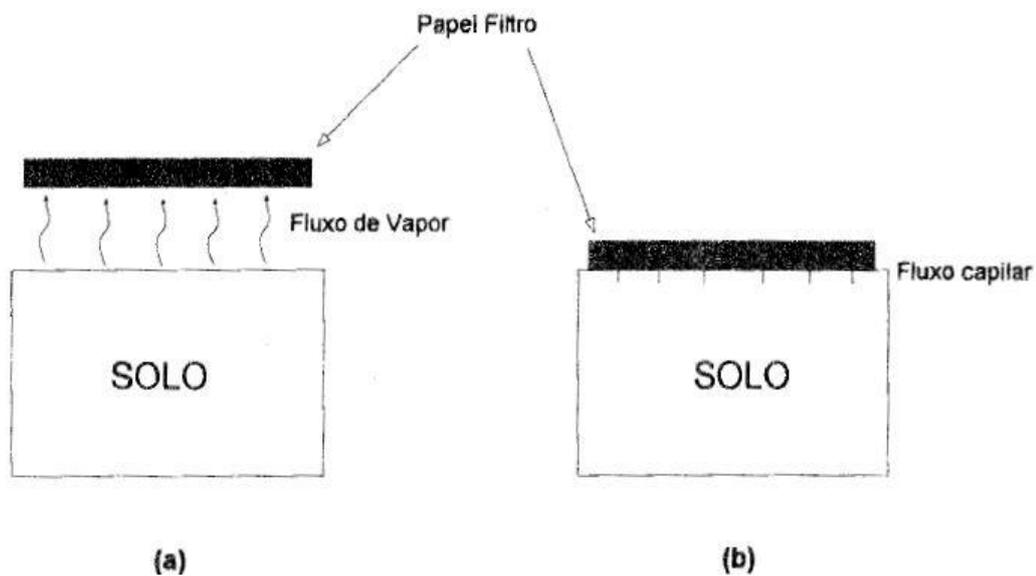
<b>Técnica</b>	<b>Tipo de Sucção Medida</b>	<b>Faixa de Medida (kPa)</b>
Tensiômetro	Matricial	0 – 90
Translação de Eixos	Matricial	0 – 1500
Psicrômetro	Total e Osmótica	100 – 8000
Condutividade Elétrica	Matricial e Osmótica	20 – 1500
Condutividade Térmica	Matricial	0 – 400
Papel Filtro	Matricial e Total	0 – 29000

Dentre os métodos utilizados, um dos mais corriqueiros é o método do papel filtro. Este método baseia-se no princípio de que, quando solo úmido é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de adsorver água, esta será transferida do solo para esse material até que o equilíbrio seja alcançado. No estado de equilíbrio, os potenciais matriciais da água no solo e no material poroso igualam-se, apesar de as respectivas umidades serem diferentes (MARINHO; OLIVEIRA, 2006).

O equilíbrio pode ser atingido pela movimentação do fluido pelo vapor de água (fluxo de vapor) ou entre o solo e o papel filtro em contato direto (fluxo capilar), conforme verificado na Figura 2.8.

Se o fluxo ocorre apenas através de vapor de água (Figura 2.8 a), se medirá a sucção total, pois o componente osmótico age como força que impede o fluxo de água para o papel filtro. O espaço de ar deixado entre o solo e o papel filtro fornece uma barreira para os sais, permitindo apenas o fluxo de vapor de água. Quando o papel filtro é colocado em contato direto com a amostra do solo (Figura 2.8 b), se medirá a sucção matricial, onde o fluxo capilar implica numa interação entre o papel filtro e a água do poro (MARINHO, 1994).

Figura 2.8 – Tipos de fluxos do solo para o papel filtro: a) medição da sucção total e b) medição da sucção matricial, (MARINHO, 1994).



Um dos grandes problemas dos solos não saturados é a determinação da permeabilidade. Pode-se definir a permeabilidade de um solo não saturado como aquela que ocorre no solo em condições de umidade menor do que a de saturação.

Portanto, é importante conhecer as diferentes teorias referentes aos processos da infiltração nos solos e as relações existentes entre os parâmetros como a sucção, grau de saturação, umidade e permeabilidade; assim como o comportamento do solo quando estão compactados. Partindo da lei de Darcy, temos definida a velocidade média de um fluido segundo a Equação:

$$v_{wz} = k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.8)$$

Em que:

$v_{wz}$ : Velocidade média do fluxo.

$k_z$ : Permeabilidade respeito à fase d'água na direção z.

$\frac{\partial h}{\partial z}$ : Gradiente hidráulico na direção z. Também conhecido como  $i_z$ .

Essa relação ocorre também nos solos não saturados, como foi verificada por Childs e Collis

George (1950), mas com o problema que o coeficiente de permeabilidade,  $k$ , não tem um valor constante, pois ele depende do teor de umidade ( $w$ ), do grau de saturação ( $S$ ), e da sucção matricial ( $u_a - u_w$ ).

A função da condutividade hidráulica já teve varias propostas de autores com formulações alternativas, muita delas apoia-se na curva de retenção de água no solo de Van Genuchten (1980). A seguir é apresentada a equação para determinar a permeabilidade não saturada de Mualem (1976), a qual é utilizada nesta pesquisa.

$$k(\psi) = k_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} \times \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (2.9)$$

Em que:

$k(\psi)$ : coeficiente de condutividade hidráulica não saturada [L].

$k_s$ : coeficiente de condutividade hidráulica saturada [L].

$\theta_s$ : umidade volumétrica saturada [ $L^3/L^3$ ].

$\theta_r$ : umidade volumétrica residual [ $L^3/L^3$ ].

$n$  e  $m$ : parâmetros de ajuste.

## 2.3 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – (RCC)

Resíduos sólidos urbanos são gerados por um aglomerado urbano, exceto os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos, ou seja, são os resíduos gerados nas residências, no comércio ou em outras atividades desenvolvidas nas cidades. A Tabela 2.4 apresenta a classificação dos resíduos sólidos de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Tabela 2.4 – Classificação dos resíduos sólidos segundo a NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Classificação de resíduos	Definição
Classe I – perigosos	São aqueles que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidades.
Classe II - não inertes	São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos de classe I ou de classe III, nos termos dessa norma. Os resíduos de classe II podem ter propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
Classe III – inertes	Quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a NBR 10007 – amostragem de resíduos, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, segundo a NBR 10006 – solubilização de resíduos, não tiver nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, executando-se os padrões de aspectos, cor, turbidez e sabor. Como exemplos desses materiais, têm-se: rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostas prontamente.

Dentre os resíduos sólidos, destacam-se os resíduos de construção e demolição, gerados pela indústria da construção civil. Estes resíduos podem ser definidos como sobras de materiais provenientes de obras de construção, das reformas e de demolições.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) resolução 307, de 5 de julho de 2002 diz:

Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultados 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, argamassas, gesso, telhas, pavimentos asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (CONAMA, 2002).

Na Resolução 307 do CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002 os resíduos da construção civil são classificados nas seguintes classes:

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

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc) produzidas nos canteiros de obras;

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

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

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

Porém, na Resolução 431 do CONAMA (2011), o gesso passou a ser classificado como classe B, ou seja, resíduo reciclável para outras destinações.

Os RCC são gerados em três etapas: durante a construção, na manutenção e na demolição. Segundo Zordan (1997), o RCC por ser produzido num setor onde existem diferentes técnicas e metodologias de produção e cujo controle de qualidade de processo produtivo é recente. Característica como composição e quantidade produzida depende do estágio de desenvolvimento da indústria de construção local e da fase da obra. Dessa forma, a característica média deste resíduo está condicionada a parâmetros específicos da região geradora do resíduo analisado.

Com a intensificação do processo de urbanização, a quantidade de resíduos gerados pelas obras de construção é cada vez mais elevada, quer pelas demolições decorrentes do processo de renovação urbana, quer por novas edificações. O crescimento populacional e o déficit habitacional aumenta a geração de entulho (CARNEIRO; CASSA; BRUM, 2001).

A construção civil é responsável por até 50% do total de resíduos sólidos gerados no Brasil. Neste cenário o RCC tem sido coletado, segundo a pesquisa do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (SNSA, 2012), na quantia de 7.192.372 t/ano de origem pública e 7.365.566 t/ano de origem privada, totalizando 14.557.939 t/ano. O destino final dos resíduos gerados pela atividade da construção civil é um desafio para a sociedade.

O relatório *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) produzido em 2007 pela Organização das Nações Unidas (ONU), aconselha o desenvolvimento e a divulgação de novas tecnologias e políticas de gerenciamento que contribuam para a diminuição da geração de resíduos (RAFI; QADIR; SIDDIQUI, 2010).

A geração de resíduos de construção e demolição é tendência mundial e estes valores aumentem cada dia mais. Na Tabela 2.5, são apresentados os dados sobre quantidade de resíduos de construção civil gerados em alguns países.

Tabela 2.5 – Estimativas de geração de resíduos de construção civil em diversos países.

País	Quantidade Anual (Ton/hab/ano)	Fonte
Suécia	1,14	CDW Report of UE - Fevereiro 2011
Holanda	1,47	CDW Report of UE - Fevereiro 2011
Reino Unido	1,66	CDW Report of UE - Fevereiro 2011
Bélgica	1,06	CDW Report of UE - Fevereiro 2011
Dinamarca	3,99	CDW Report of UE - Fevereiro 2011
Itália	0,8	CDW Report of UE - Fevereiro 2011
Alemanha	2,33	CDW Report of UE - Fevereiro 2011
Portugal	1,09	CDW Report of UE - Fevereiro 2011

Na Tabela 2.6 são apresentadas a quantidade total de RCC coletados, nos municípios brasileiros na região Centro-Oeste, nos anos de 2011 e 2012, onde se observa um aumento nos valores coletados segundo a Associação Brasileira de empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2012).

Tabela 2.6 – Valores de RCC coletados no Brasil e Centro-Oeste. (ABRELPE, 2012).

Região	RCC Coletado (t/dia)		RCC Coletado (kg/hab/dia)	
	2011	2012	2011	2012
Centro-Oeste	12.231	12.829	0.966	1.000
Brasil	106.549	112.248	0.656	0.686

Na Tabela 2.7 constam os valores de RSU e RCC gerados na capital de Goiás de acordo com a Companhia de Urbanização de Goiânia – COMURG (2011).

Tabela 2.7 – Relação RSU e RCC em Goiânia (COMURG, 2011).

Cidade	RSU produzido em Goiânia	RCC produzido em Goiânia	RCC x RSU
Goiânia	1.694,40	1.200,00	70,80%

Neste contexto de geração, o resíduo de construção e demolição possui um grande potencial para ser utilizado em obras geotécnicas, tais como: camadas de pavimento rodoviário, construções de aterros sanitários, camada final de terraplenagem, entre outros.

### 2.3.1 Reutilização de RCC em obras geotécnicas

Vários países como o os Estados Unidos, França, Bélgica, Inglaterra, Holanda, Japão e Dinamarca têm se dedicado a reutilização do resíduo de construção e demolição, tal a sua importância na Engenharia, na urbanização e no dia a dia das cidades (LEITE, 2001). Alguns usos dos resíduos de construção e demolição já são bem difundidos, como a utilização em base e sub-base de pavimentos, produção de argamassa e de concretos magros sem fins estruturais, utilização em projetos de drenagem, produção de blocos de concreto, entre outros. Entretanto, vários autores dizem que a utilização de resíduo da construção e demolição no concreto é uma das melhores alternativas e que a reutilização destes resíduos está crescendo cada vez mais (HANSEN, 1992; SIMONS; HENDERIECKX, 1993; VAN DER WEGEN; HAVERKORT, 1998; MAULTZSCH; MELLMANN, 1998; DHIR; LIMBACHIYA; LEELAWAT, 1999; BANTHIA; CHAN, 2000).

Algumas organizações internacionais de pesquisa já possuem, inclusive, normas para utilização deste resíduo na construção, como é o caso do Japão, que desde 1977, dispõe de normas técnicas para o uso de agregados e de concretos reciclados, inclusive classificando-os pela densidade, para emprego em concreto e bases para pavimentos, etc. Nos EUA, após 1982, as normas ASTM C-33 (1982) e C125 (1979) criam condições para o reuso de RCC em pavimentos e concretos (HANSEN, 1992).

Segundo Schneider e Philippi (2004), países como os da União Européia, os EUA e os Países Baixos, a reciclagem dos resíduos é uma realidade bastante frequente. A taxa de resíduos aproveitados na construção civil nesses lugares pode chegar a 90%. Os países baixos, desde 2002, processam integralmente o seu resíduo e também importa de outros países, para

aplicação em concreto reciclado e pavimentos de estradas e ruas.

Segundo Dorsthost (2003), 95% de todo RCC produzido na Holanda é reutilizado ou reciclado e, desde o ano 2000, é proibido enviar resíduo com possibilidade de reutilização para aterros sanitários.

No Brasil, desde a década de 80 existem pesquisas desenvolvidas utilizando resíduos da construção. (PINTO 1986<sup>2</sup> *apud* ÂNGULO, 2000) foi o primeiro a apresentar um estudo sobre a utilização de resíduos de construção e demolição para produção de argamassas.

Atualmente existem várias aplicações para a reutilização do RCC e algumas delas já estão bem difundidas tais como, a utilização na confecção de blocos de concreto, argamassa para revestimentos e na produção de concretos magros sem fins estruturais. Os produtos oriundos do RCC reciclado apresentam muitas vantagens, apesar de ter determinadas limitações especialmente estruturais (CORCUERA; CAVALCANTI, 2012).

A utilização de agregados reciclados em argamassas de revestimento surge como alternativa, uma vez que esse material apresenta desempenho adequado, conforme vários trabalhos publicados sobre o tema (SILVA, 1997; LEVY, 1997; PINTO, 1998).

Outra alternativa de uso do resíduo de construção e demolição é como material de preenchimento de estrutura de solo reforçado, Santos (2007) verificou que este resíduo apresentou baixo coeficiente de variação nos resultados de caracterização e excelente comportamento mecânico, encontrando uma boa aplicação para este material neste tipo de obra.

A utilização de resíduos de construção e demolição já está bastante difundida dentro da pavimentação de rodovias, principalmente no exterior (BANTHIA; CHAN, 2000). No Brasil estes materiais vêm sendo utilizado, tendo resultados promissores e tecnologicamente adequado e possui normatização própria NBR 15115 (ABNT, 2004a) e NBR 15116 (ABNT, 2004b).

---

<sup>2</sup> PINTO, T. P. Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas. **Dissertação (Mestrado)** - Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos - Universidade de São Paulo, p. 140, 1986.

Alguns estudos sobre a utilização deste resíduo em pavimentação foram realizados em Goiânia. Ribeiro (2006), Oliveira (2007), Resplandes (2007) e Quintanilha (2008) trabalharam em um trecho de pavimento do município de Goiânia-GO, onde fizeram ensaios e concluíram que a mistura de agregado reciclado e solo tropical possui propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, comparadas aos materiais tradicionais. Além disso, o resíduo é um material não inerte e não perigoso. Dessa forma, os resultados mostraram viabilidade para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis de baixo a médio volume de tráfego e com o potencial de uso, que contribui com a solução para questão ambiental do RCC.

Amorim (2013) verificou, a partir do comportamento mecânico e da caracterização física que o uso de RCC e um solo laterítico do município de Campo Verde têm potencial de aplicação em obras de pavimentos urbanos, constatando também a sua viabilidade técnica-econômica.

Leite (2007) verificou a possibilidade de uso de RCC em concreto compactado a rolo (CCR) observando um grande paralelismo de características e no comportamento mecânico entre os CCR confeccionados com agregados de RCC e os elaborado de modo tradicional tornando-se uma alternativa ao pavimento de baixo custo.

Hood (2006) e Amadei (2011) verificaram que um teor de 25% RCC possui valores satisfatórios nos parâmetros relacionados à resistência a compressão, resistência à abrasão e a absorção de água, verificando que este resíduo tem viabilidade técnica para ser utilizada em blocos de concreto para pavimentação com baixo tráfego.

Além do uso em pavimentação tem-se o uso de RCC em sistema de cobertura. Assim, Barros (2005) verificou a possibilidade do uso deste material como material alternativo para camada de aterros. O material utilizado possui granulometria inferior a 4,8 mm e o autor observou que o material apresenta valores de coeficiente de permeabilidade saturada na ordem de  $10^{-5}$  cm/s e não saturada na ordem de  $10^{-12}$  cm/s para uma sucção de 200 kPa, sendo adequado principalmente para uso em regiões de clima árido e semiárido. Em relação aos parâmetros de resistência o ângulo de atrito médio obtido através do ensaio de resistência ao cisalhamento foi de 35° e conclui-se ainda que este material é erodível e facilmente desagregável, porém não dispersivo. Segundo o autor o agregado reciclado miúdo de RCC pode ser utilizado como um material alternativo em sistema de cobertura.

Nesse caminho, Affonso (2005) observou que o RCC com granulometria superior a 4,8 mm possui permeabilidade média deste material foi de  $2,5 \times 10^{-2}$  m/s na direção horizontal, e a na faixa de  $8 \times 10^{-2}$  m/s na direção vertical sendo adequado para uso em camada drenante.

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o procedimento de coleta dos materiais empregados, as caracterizações básicas dos materiais geotécnicos, a preparação das amostras e as investigações laboratoriais que foram executados no decorrer desta pesquisa.

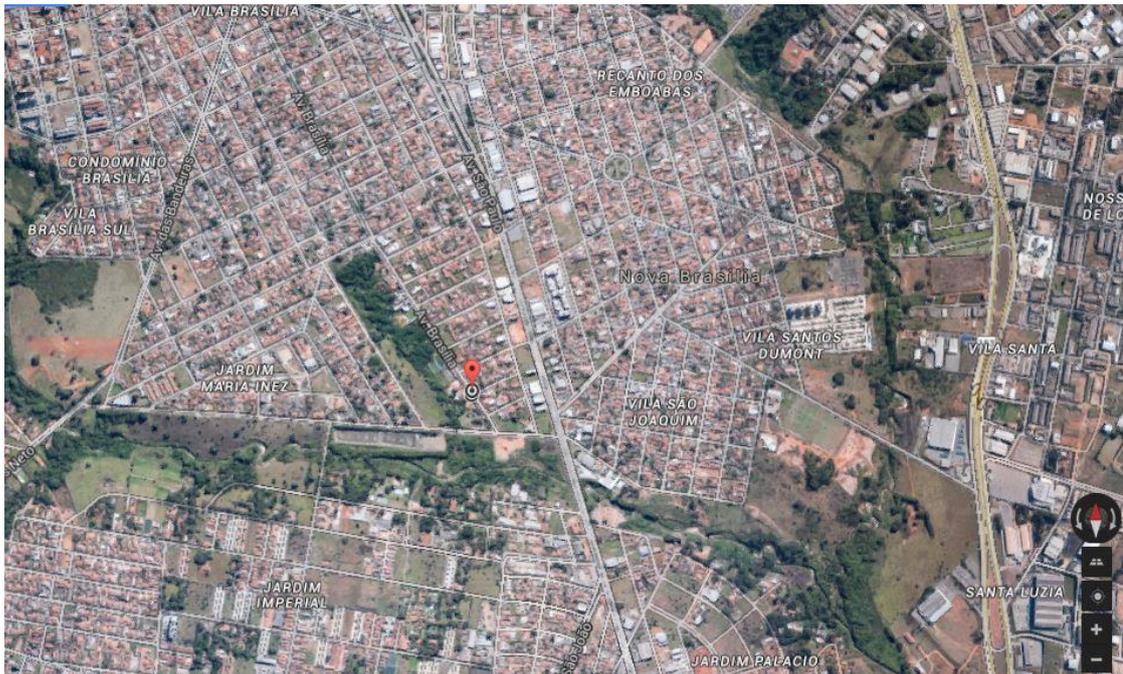
### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

O solo estudado nesta pesquisa está situado na cidade de Aparecida de Goiânia-GO, conforme apresentado na Figura 3.1 e o local da coleta foi na Avenida Brasília, Setor Vila Brasília na mesma jazida utilizado por Metogo (2010), conforme representada na Figura 3.2. As amostras deformadas foram coletadas em sacos em um único dia à profundidade média de 0,50 cm da superfície do terreno no horizonte residual laterítico.

Figura 3.1 – Localização geográfica da cidade de Aparecida de Goiânia – GO



Figura 3.2 – Localização da coleta das amostras de solo (imagem obtida do Google Maps, 05/02/2014).



As amostras foram transportadas para o Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia Civil da UFG onde passou pelo procedimento de destorroamento, homogeneização e quarteamento, com a finalidade de obter uma amostra mais uniforme possível, e em seguida foi identificado e armazenado em sacos plásticos para a realização dos ensaios. A Figura 3.3 mostra o local de coleta do solo e o solo utilizado na pesquisa.

Figura 3.3 - Solo utilizado na pesquisa: (a) Local de coleta. (b) Solo coletado passando na peneira 4,8 mm.



(a)



(b)

O resíduo da construção civil (RCC) estudado é oriundo da cidade de Goiânia e Aparecida de Goiânia-GO, sendo transformado em agregado reciclado miúdo através do processo de

britagem em uma usina particular de reciclagem. A Figura 3.4 mostra o agregado utilizado na pesquisa e o local da coleta da amostra. Após passar pelo processo de beneficiamento, o RCC foi transportado para o Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFG, onde passou pelo processo de peneiramento. O material utilizado foi o passante na peneira 4,8 mm, o qual foi armazenado e identificado em sacos plásticos para efetivação dos ensaios.

Figura 3.4 - Agregado utilizado na pesquisa: a) Local de coleta b) RCC coletado passante na peneira 4,8 mm.



(a)



(b)

Além desses materiais foi preparada uma mistura constituída de 50% de massa seca do solo tropical e 50% de massa seca do resíduo da construção e demolição. Esta mistura foi feita devido a permeabilidade do RCC puro estar no limite do aceitável para camada de cobertura.

## 3.2 ENSAIOS LABORATORIAIS

Neste item são abordados os procedimentos de execução dos ensaios laboratoriais que foram executados no decorrer da pesquisa.

### 3.2.1 Ensaios de caracterização e compactação

Foram executados ensaios de caracterização nas amostras mencionadas anteriormente, quais sejam: análise granulométrica, limite de consistências, massa específica dos grãos e o ensaio de compactação. Os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia da Escola de

Engenharia da UFG.

A preparação das amostras para os ensaios de compactação e caracterização foram feitas seguindo a NBR 6457 (ABNT, 1986a).

O ensaio de granulometria foi realizado pelo procedimento discriminado na NBR 7181 (ABNT, 1984a), feitas por peneiramento para fração grossa e por sedimentação com e sem defloculante para frações finas.

A determinação do limite de liquidez foi executada de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 1984b) e o limite de plasticidade foi determinado através da NBR 7180 (ABNT, 1984c). A partir da determinação dos valores obtidos nesses ensaios, foi calculado o índice de plasticidade das amostras.

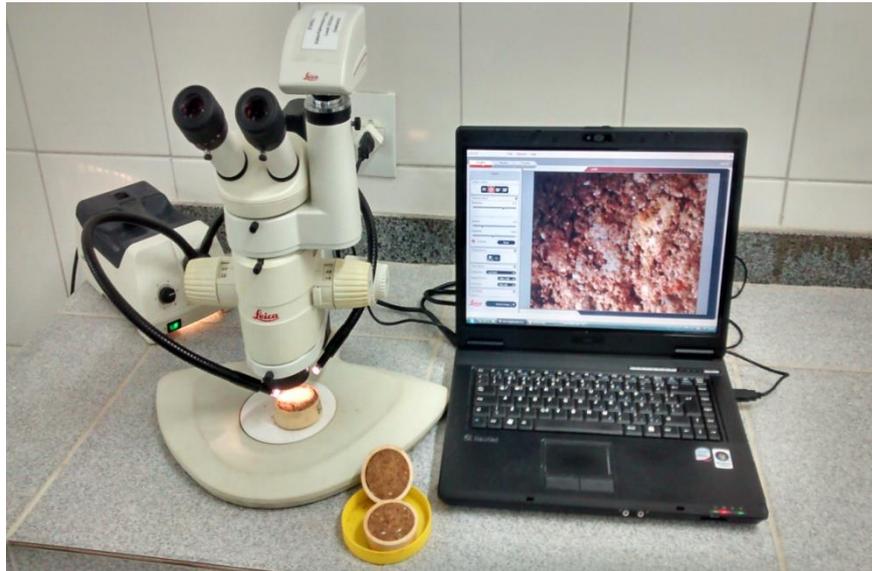
A massa específica dos grãos foi determinada pelo método do picnômetro, utilizando o procedimento da NBR 6508 (ABNT, 1984d).

Além desses ensaios convencionais, foram executados ensaios específicos para a classificação dos solos tropicais: ensaios do método das pastilhas e do azul de metileno. O ensaio pelo método da pastilha foi executada de acordo com a metodologia proposta por Fortes, Merighi, Zuppolino Neto (2002) e DERSA (2006). E o ensaio de azul de metileno ou “método da mancha” foi realizado de acordo com o proposto por Fabbri (1994).

O ensaio de compactação foi executado seguindo o procedimento da NBR 7182 (ABNT, 1986b) na Energia Proctor Normal com a finalidade de se obter a curva de compactação, bem como a umidade ótima e seu respectivo peso específico aparente seco.

Para identificar os materiais contidos nas amostras do resíduo de construção e demolição, foi utilizada a lupa estereoscópica da Leica modelo MZ 12.5, a qual possui capacidade máxima de magnificação de 640x, escala micrométrica e câmera digital colorida Leica EC3. A Figura 3.5 mostra o equipamento. As amostras analisadas foram moldadas do corpo de prova compactados na Energia Proctor Normal, utilizando anéis de PVC com 5 (cinco) cm de diâmetro e 2 cm de altura.

Figura 3.5 – Lupa estereoscópica.



### 3.2.2 Ensaio hidromecânicos

Para realização dos ensaios mecânicos e hidráulicos foram moldados corpos de prova compactados na Energia Proctor Normal, na umidade ótima e peso específico seco máximo definido pelas curvas de compactação do solo, RCC e a mistura solo-RCC.

O ensaio de adensamento foi executado com a finalidade de determinar os parâmetros de deformabilidade, tais como coeficiente de adensamento ( $C_v$ ), tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{pa}$ ), coeficiente de compressão ( $C_c$ ) e coeficiente de re-compressão ( $C_r$ ) de cada material. Esses parâmetros são fundamentais para a previsão de recalque da camada de proteção e o tempo de ocorrência do recalque.

Os ensaios foram realizados de acordo com o descrito na NBR 12007 (ABNT, 1990), na condição saturada, com trajetórias de carregamento de 5; 12,5; 25; 100; 200; 400 e 800 kPa, seguido por descarregamento. Neste ensaio foi medida a permeabilidade dos materiais no processo de carregamento para verificar como a permeabilidade varia com o carregamento.

O ensaio de cisalhamento direto foi executado como objetivo de determinar a resistência ao cisalhamento do solo, por meio da determinação da coesão ( $c$ ) e do ângulo de atrito ( $\phi$ ). Estes parâmetros são importantes para o estudo de estabilidade do aterro.

A metodologia utilizada para execução deste ensaio foi a norma internacional da ASTM D3080 – 04 *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. Para a determinação da envoltória de ruptura foram executados ensaios com as tensões de confinamento de 25, 100, 200 e 400 kPa na condição saturada e a velocidade utilizada durante os ensaios foi de 0,042 mm/min.

Os ensaios de permeabilidade foram executados com o objetivo de obter o coeficiente de permeabilidade destes materiais, sendo que essa informação é importante para prever a quantidade de água percolada pela cobertura, que resultará na produção de chorume. O método adotado foi o de determinação da permeabilidade a carga variável descrito pela NBR 14545 (ABNT, 2000).

Para determinar a curva de retenção de cada material, foi utilizado o método do papel filtro, seguindo recomendações de Marinho (1994), empregando-se papel-filtro Whatman nº 42. Vale ressaltar que a curva de retenção permite determinar a capacidade de armazenamento de água do material e prever a permeabilidade não saturada.

Para a realização dos ensaios, 15 corpos de provas de cada material foram moldados a partir da amostra compactada. Os ensaios foram executados em trajetórias de umedecimento, ou seja, os corpos de prova foram secados ao ar até a umidade higroscópica e, a partir desta umidade, foi adicionada água nos corpos de prova para se atingir vários níveis de umidade até a máxima saturação possível. Estas etapas da preparação do corpo de prova são representadas na Figura 3.6 e Figura 3.7

Figura 3.6 – (a) Moldagem dos copos de prova e (b) secagem das amostras moldadas.



(a)



(b)

Figura 3.7 – Umedecimento das amostras.



Após o corpo de prova atingir a umidade desejada, três papéis filtro foram colocados em contato com esse, para a determinação da sucção matricial. Então, as amostras devidamente seladas foram guardadas em um recipiente com tampa e colocados dentro de uma caixa de isopor por 14 dias para a ocorrência de equilíbrio de sucção entre o papel filtro e o material ensaiado.

Ao fim do período de equilíbrio, realizaram-se a pesagem da massa úmida do papel-filtro central de cada montagem em uma balança de precisão de 0,0001 g. Os mesmos foram secos em estufa por 24 h, e tiveram suas massas aferidas, para determinação do teor de umidade gravimétrica. Nesse procedimento, o manuseio do papel-filtro de cada montagem ocorreu em até 8 s.

Ao término do ensaio, foram realizados ensaios de balança hidrostática nos corpos de prova para a obtenção dos índices de vazios, segundo a NBR 10838 (ABNT, 1988). Ao final foi determinada a umidade das amostras. Na Figura 3.8 consta o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 3.8 - Equipamentos para ensaio de balança hidrostática.



### 3.3 ENSAIOS DE ERODIBILIDADE

Para realização dos ensaios para análise de erodibilidade dos solos foram moldados corpos de prova compactados na umidade ótima e peso específico seco máximo definido pelas curvas de compactação de cada material. Devido à percolação de água no interior da camada de solo, foram executados ensaios para analisar a erodibilidade interna, que são: ensaios de desagregação, Crumb Tests ou dispersão rápida e pinhole.test Para verificar a erodibilidade devido ao escoamento superficial foi realizado o ensaio de Inderbtizen.

#### 3.3.1 Ensaios para análise da erodibilidade interna

O ensaio de desagregação tem o objetivo de prever o comportamento do solo quando inundado por água, determinando sua capacidade de desagregar. Estes ensaios foram feitos seguindo o procedimento proposto por (HOEMGREN e FLANAGEM, 1977<sup>3</sup> *apud* SANTOS

---

<sup>3</sup> HOLMOREN, G. G. S., FLANAGAN, C. P. Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test. Dispersive Clays, Related Piping and Erosion. In: **Geotechnical Projects**, ASTM Special Technical Publication, p. 623: 218-239, 1997.

1997), que consiste na colocação de uma amostra cúbica, de 60 mm de aresta, dentro de um recipiente com água, observando-se então a sua reação ao processo da submersão com inundação total e parcial das amostras.

No ensaio com imersão total, os corpos de provas foram colocados em um recipiente que foi preenchido com água até o topo da amostra e observados por um período de 24 horas.

No ensaio com imersão parcial é estabelecida uma sequência de preenchimento no qual se coloca a amostra sobre a pedra porosa com água na altura da base, durante um intervalo de 30 minutos. Após este tempo o nível é elevado para 1/3 da altura da amostra, permanecendo por 15 minutos. Após eleva-se o nível da água para 2/3 da amostra, permanecendo também por 15 minutos. No último estágio completa-se com água até a total submersão da amostra, permanecendo até 24 horas do início do ensaio. Em cada etapa deste ensaio são realizadas anotações sobre o comportamento da amostra.

Neste ensaio além de verificar a desagregabilidade, pode-se classificar o material quanto à reação a inundação de acordo com os seguintes comportamentos apresentados por (HOLMGREN e FLANAGAN, 1977 *apud* SANTOS, 1997):

- Sem resposta: quando a amostra mantém sua forma e tamanho originais.
- Abatimento (Slumping): quando a amostra se desintegra formando uma pilha de material desestruturado.
- Fraturamento: quando a amostra se quebra em fragmentos, mantendo a forma original das faces externas.
- Dispersão: quando as paredes da amostra se tornam difusas com o surgimento de uma “nuvem” coloidal que cresce à medida que a amostra se dissolve.

O ensaio de Crumb Test ou de dispersão rápida tem o objetivo de analisar e classificar o solo qualitativamente em relação ao seu grau de dispersão quando inundado por água. Este ensaio foi realizado seguindo o descrito pela NBR 13601 (ABNT, 1996).

Pequenas amostras no formato aproximadamente esférico, de 6 mm a 10 mm de diâmetro são moldadas e colocadas em um recipiente contendo cerca de 150 ml de água destilada. Após uma hora de repouso devem-se observar as reações ocorridas e classificar o solo quanto à

dispersão por meio de análise visual conforme a Tabela 3.1 descrita na NBR 13601 (ABNT, 1996).

Tabela 3.1 – Classificação das reações ocorridas nas amostras, segundo a NBR 13601 (ABNT, 1996).

Grau 1	Não dispersivo	A amostra pode espalhar-se no fundo do recipiente, porém não se observa sinal de turvação causada por colóides em suspensão.
Grau 2	Levemente dispersivo	Indícios de turvação próximo à superfície do torrão.
Grau 3	Moderadamente dispersivo	Verifica-se uma turbidez, acompanhada de uma fina camada de partículas no fundo do béquer.
Grau 4	Fortemente dispersivo	Nuvem coloidal cobrindo toda a base do recipiente frequentemente em uma camada muito fina. Em casos extremos a água torna-se turva.

O ensaio de pinhole tests é um método de obtenção de uma medida direta e qualitativa da dispersibilidade de solos, pelo fluxo de água através de um furo feito axialmente em um corpo-de-prova. Este ensaio é normatizado pela NBR 14114 (ABNT, 1998), sendo que esta norma segue a metodologia descrita por Sherard *et al.* (1976).

Na Figura 3.9 é possível visualizar os materiais utilizados para montagem do molde do ensaio do pinhole. O número 1 é a tampa superior da câmara de ensaio, nº 2 o anel de fixação do molde, nº 3 são os parafusos da câmara de ensaio, nº 4 é a base da câmara de ensaio, nº 5 é o molde de aço inoxidável, nº 6 são os telas de arame (com abertura de malha menor de 2 mm), nº 7 é a agulha hipodérmica de aço com 1 mm de diâmetro externo e o nº 8 é a areia grossa, lavada passante na peneira de 4,8 mm e retida na peneira de 2 mm.

Figura 3.9 – Materiais utilizados na montagem do molde do ensaio de pinhole.



Na Figura 3.10 consta o equipamento pinhole test montado e na Figura 3.11 as etapas de preparação do corpo de prova.

Figura 3.10 - Equipamento do ensaio de pinhole test montado.



Figura 3.11 – Preparação do corpo de prova.



(a) Compactação do corpo de prova



(b) Amostra compactada



(c) Corpo de prova com o furo da agulha.



(d) Corpo de prova com as telas de arame.



(e) Corpo de prova com a areia grossa e anel de fixação do molde.



(f) Câmara de ensaio montada.

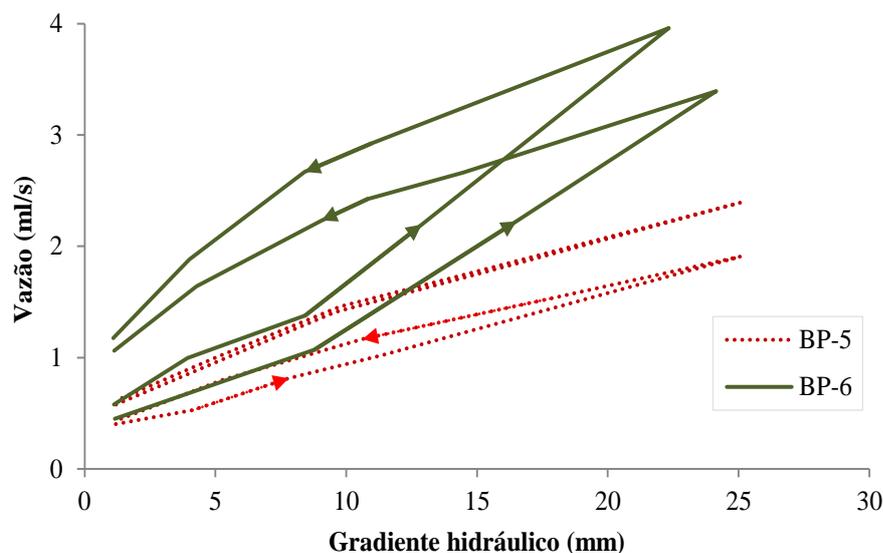
O procedimento deste ensaio consiste na aplicação de fluxo, sobre diferentes cargas hidráulicas, através de um furo de 1 mm de diâmetro, realizado em um corpo de prova. Esta amostra é submetida a uma carga hidráulica de 50 mm, permanecendo neste estado por 12 horas, para saturação. Após este tempo a amostra é submetida à carga hidráulica e em certos intervalos de tempo, sendo que as cargas hidráulicas são aumentadas para 180 mm, 380 mm e 1020 mm.

Durante o ensaio é determinada a variação da vazão e coloração da água, enquanto que ao seu término é avaliada a variação do diâmetro do furo e de acordo com o obtido se classifica o solo como dispersivo ou não, conforme a NBR 14114 (ABNT, 1998). E este grau de dispersibilidade do material é influenciado pela intensidade de turbidez da água e em quanto tempo esta condição ocorre.

Santos (1997) propôs a alteração desta metodologia de análise dos resultados de modo a estendê-la aos solos regionais, pois este ensaio foi desenvolvido para uso em solos dispersivos, que possuem alta concentração de sódio, o que não é caso dos solos lateríticos da região Centro-Oeste. Nesta nova metodologia, os ensaios prosseguem de maneira inversa, reduzindo-se gradativamente o gradiente hidráulico até os níveis iniciais. Assim, um possível aumento da porosidade do solo ou alargamento do furo, devido à desagregação física do solo e o processo de erosão interna, serão notados caso haja um aumento de vazão na fase de retorno (Figura 3.12). Neste caso os solos considerados erodíveis apresentam na curva uma inflexão bem marcante para cima a partir do momento em que começa a ocorrer erosão e os solos avaliados como não erodíveis apresentaram uma curva de comportamento quase linear, com uma pequena inflexão para baixo.

Devido sua melhor aplicabilidade aos solos tropicais, será essa a metodologia utilizada para a determinação da erodibilidade interna dos materiais apresentados nesta pesquisa.

Figura 3.12 – Ensaio do furo de agulha para solo proveniente da voçoroca do Batalhão Florestal de Polícia, Goiânia – GO (Modificado de SANTOS, 1997).



Ao termino do ensaio a amostra foi extraída e, bipartida para analisar o furo, observando se teve aumento ou não devido à variação de vazão classificando o material quanto a sua dispesibilidade. Por fim, pesa-se a amostra para verificar a umidade final.

### 3.3.2 Ensaio para análise da erodibilidade superficial

A camada de proteção pode ser combinada com a camada de superfície e é necessário que o material que a compõem apresente resistência à erodibilidade superficial. Dessa forma, foi executado o ensaio de inderbtizen, que simula a ocorrência de escoamento superficial sobre um corpo de prova sob determinadas condições previamente escolhidas de vazão, inclinação e tempo de escoamento. Para este ensaio foi utilizado o equipamento produzido por Aguiar (2009), conforme apresentado na Figura 3.13 e o procedimento de ensaio adotado foi o padronizado por Fácio (1991) e modificado por Almeida, Rocha, e Gitirana Jr. (2013).

Figura 3.13 – Equipamento de Inderbtizen.



Para a realização deste ensaio, foram feitas a pesagem e medições das dimensões do molde vazio. Posteriormente, o corpo de prova foi moldado e pesado. A seguir, colocou-se o corpo de prova no equipamento de Inderbtizen, conforme apresentado na Figura 3.14. A rampa foi inclinada em  $10^\circ$  e no final da rampa foi colocado uma peneira nº 200 (0,075 mm).

Figura 3.14 – Corpo de prova do ensaio de Inderbitzen amostra.



O ensaio se inicia com a vazão constante de 50 ml/s e, nos intervalos de tempo de 1; 2,5; 5; 7,5; 10; 15, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos, troca-se a peneira por outra de mesma abertura sem interromper o fluxo de água. Após cada troca de peneira coleta-se em um recipiente o material erodido retido em cada intervalo de tempo. A fim de desagregar as partículas finas menores que 0,075 mm, o material erodido é lavado com água corrente à baixa pressão. Em seguida, os mesmos são levados à estufa por 24 horas em temperatura de 105 a 110°C. Após este tempo todo o material passa em uma sequência de peneiras de aberturas de 2; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075 mm e pesa-se o material retido em cada peneira. Ao término dos 60 minutos, o conjunto amostrador e material ensaiado é pesado para se obter posteriormente a umidade final.

Como na metodologia descrita anteriormente não é considerado o material passante na peneira nº 200 (0,075 mm), utiliza-se neste trabalho a proposta de Almeida, Rocha, e Gitirana Jr. (2013), onde a estimativa da massa de solo perdida ( $M_T$ ), a cada intervalo de tempo é obtida por meio da comparação com a curva granulométrica, conforme a Equação 3.1.

$$M_T = \frac{100 \times M_{R200}}{100 - P_{P200}} \quad (3.1)$$

Em que:

$M_T$ : massa total erodida;

$M_{R200}$ : massa lavada retida na peneira nº 200 (0,075 mm);

$P_{P200}$ : porcentagem passante na peneira nº 200 (0,075 mm), conforme curva granulométrica.

# CAPÍTULO 4

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta resultados dos ensaios de caracterizações básicas dos materiais, curvas de compactação, comportamento hidro-mecânico e erodibilidade do solo tropical, RCC e da mistura constituída por estes dois materiais com percentual de 50% cada um.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para obter as propriedades físicas básicas dos materiais estudados foram realizados ensaios de caracterização com amostras deformadas com vistas a definir sua composição, textura e índices de consistência seguindo as normas de ensaio especificados no item 3.2.1.

Os valores da umidade higroscópica do peso específico dos grãos e dos limites de consistência obtidos nos ensaios de caracterização do Solo, do RCC e da Mistura são apresentados na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Índices físicos do Solo, RCC e Mistura.

Índices Físicos	Solo	RCC	Mistura
$W_h$ (%)	5,12	3,49	2,27
$W_L$ (%)	37	32	34
$W_P$ (%)	25	21	24
IP (%)	11	10	10
$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	27,92	27,81	27,58

A partir dos resultados dos índices físicos apresentados na, Tabela 4.1, pode-se observar que o aumento do teor de RCC reduz os valores dos limites de liquidez e plasticidade, mas praticamente não altera o valor de índice de plasticidade. Em relação à massa específica dos grãos, verifica-se que a mesma teve a variabilidade dentro do que se espera do ensaio.

Para a obtenção das curvas granulométricas foram executados ensaios com e sem defloculanmte para o solo, o RCC e a mistura, sendo que o RCC utilizado na pesquisa é o

passante na peneira de 4,8 mm. Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 visualizam-se as curvas granulométricas obtidas para cada material, além da curva teórica calculada para a mistura.

Esta curva teórica foi construída considerando-se que a porcentagem de cada partícula é a média dos valores obtidos para o solo e o RCC, visto que a mistura é composta de 50% de cada material.

Figura 4.1 – Curvas granulométricas do Solo com e sem defloculante.

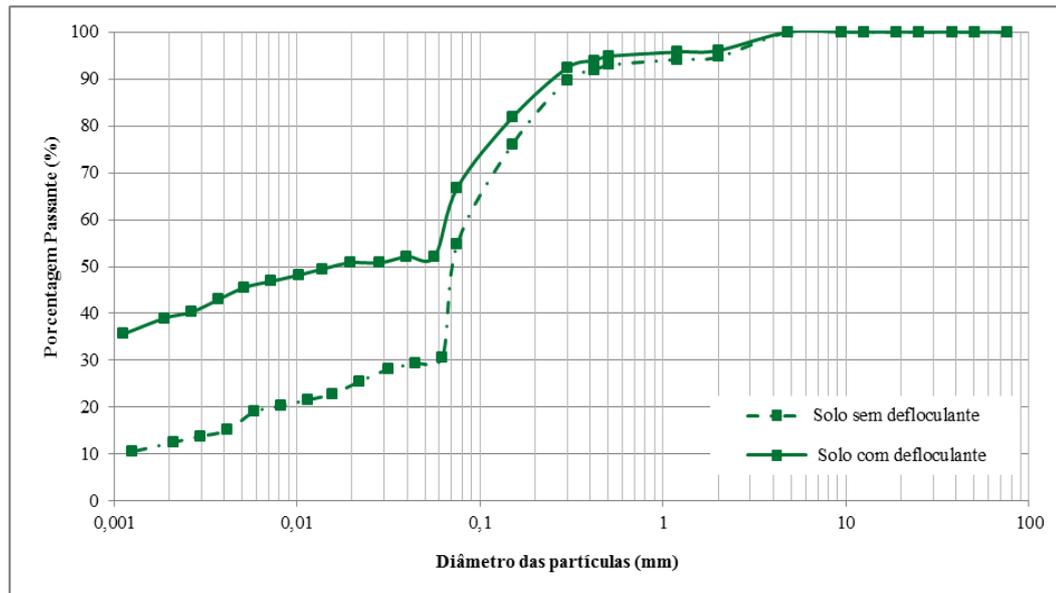


Figura 4.2 – Curvas granulométricas do RCC com e sem defloculante.

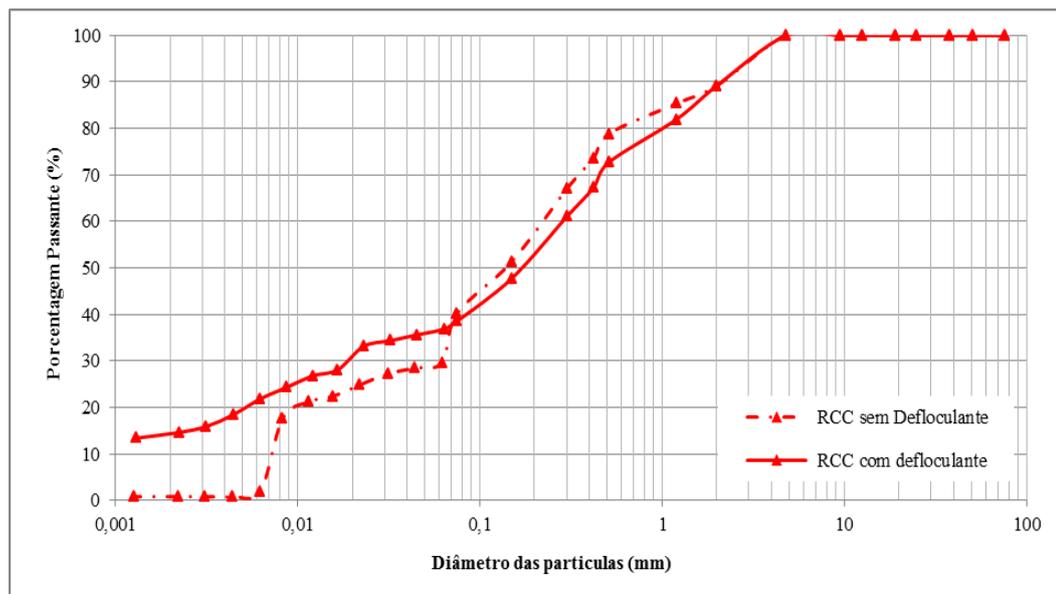
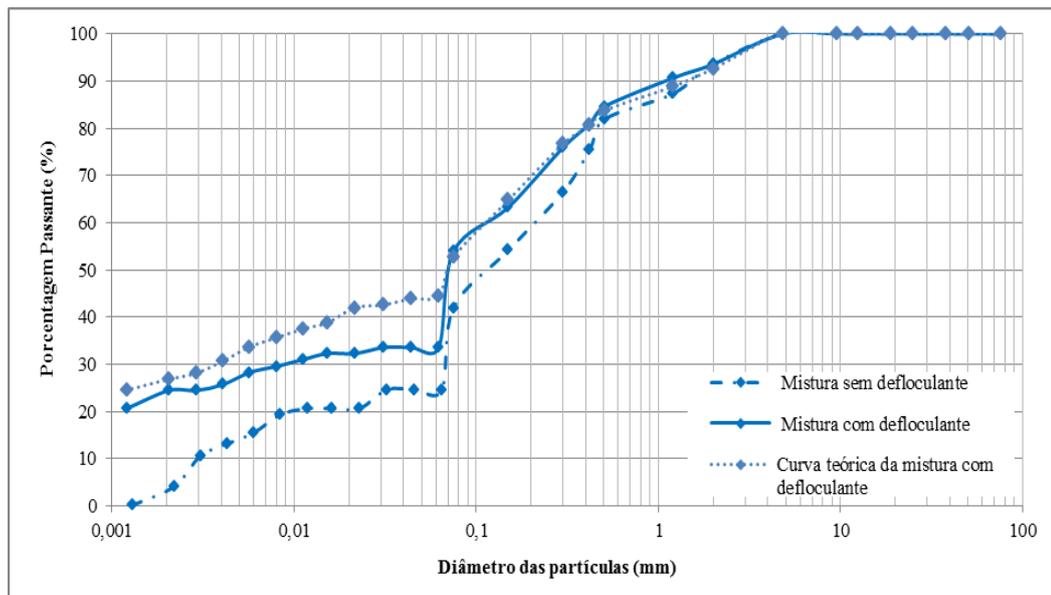


Figura 4.3 – Curvas granulométricas da mistura com e sem defloculante.



A partir das curvas granulométricas apresentadas nas Figuras 4.1, 4.2 e Figura 4.3, pode-se observar que as concreções presentes nas amostras foram desfeitas pela ação do agente dispersor utilizado, gerando as desagregações das partículas, resultando em uma porcentagem maior de frações de fino na amostra com defloculante. No entanto, o efeito do defloculante é menos acentuado no RCC, o que era de se esperar, visto que o RCC não é um solo argiloso. A partir das curvas granulométricas apresentadas nas Figuras 4.3, observa-se que a porcentagem de 50% de cada material na composição da mistura não ocorreu de forma homogênea, visto que a curva granulométrica da mistura apresenta-se deslocada da curva teórica.

A partir dos resultados dos índices físicos que constam na Tabela 4.1 e das curvas granulométrica das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 os materiais foram classificados segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUSC). Dessa forma, as amostras com defloculante do solo e a mistura foram classificados como silte com baixa compressibilidade (ML) e o RCC como areia argilosa (SC), no entanto todos estes situam-se próximo à região de transição de silte para argila. Nos ensaios executados sem defloculante o solo foi classificado como silte de baixa compressibilidade (ML), o RCC foi classificado como areia argilosa (SC) e a mistura como uma areia siltosa (SM), conforme verificado na Tabela 4.2.

Pela classificação *Transportation Research Board* (TRB), nos ensaios com defloculante e sem defloculante o solo foi classificado como solo argiloso (A6) e o RCC e a Mistura foram classificados como solos argilo-siltoso (A4-A6), pois o RCC e a mistura estão no limite de

transição.

As classificações dos materiais pelos métodos SUSC e TRB e os teores de pedregulho, areia, silte e argila de cada material analisados de acordo com a NBR 6205 (ABNT, 1995), a partir dos dados experimentais obtidos nos ensaios de granulometria executados segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984) são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3. Na Tabela 4.2 também consta o índice de atividade dos materiais.

Tabela 4.2 – Teores dos grãos e classificação dos materiais com defloculante.

Material	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação (SUSC)	Classificação (TRB)	Índice de atividade
Solo	4	44	13	39	ML	A-6	0,30
RCC	11	53	22	14	SC	A-4 e A-6	0,74
Mistura	6	60	9	24	ML	A-4 e A-6	0,48

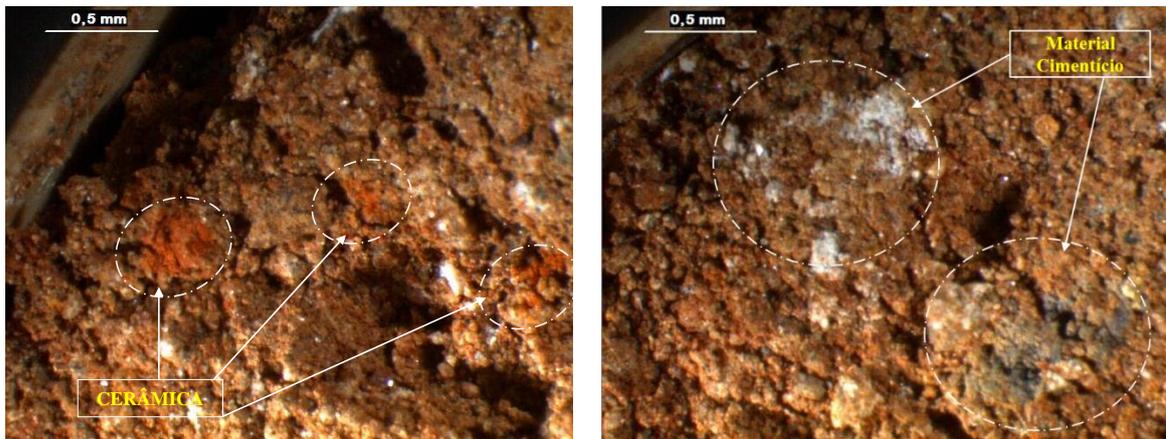
Tabela 4.3 – Teores dos grãos e classificação dos materiais sem defloculante.

Material	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação (SUSC)	Classificação (TRB)
Solo	4	65	18	12	ML	A-6
RCC	11	60	28	1	SC	A-4 e A-6
Mistura	6	69	22	2	SM	A-4 e A-6

Analisando a Tabela 4.2, pode-se observar que o solo, o RCC e a mistura possuem índices de atividade menores que 0,75, sendo que a amostra de RCC apresentou índice de atividade maior que o do solo. No entanto, ambos os solos foram classificados como de baixa atividade, conforme Sousa Pinto (2006). Segundo Bastos (2010),  $I_A$  inferior a 0,75 infere que o solo possui em sua constituição predomínio de argilas com estrutura molecular do tipo 1:1 (ex.: caulinita). Por outro lado,  $I_A$  maiores que 1,25, correlacionam-se às argilas 2:1 (ex.: micas/ilitas). Dessa forma, os resultados sugerem que ambas as amostras são compostas principalmente por caulinitas.

A composição do RCC foi determinada através da lupa estereoscópica, observando-se a presença de material cerâmico e material cimentício, conforme visualizada na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Materiais presente no RCC.



A Figura 4.5 apresenta os resultados dos ensaios de pastilha, onde verifica-se que nenhuma das amostras ensaiadas tiveram trincas e nem expansão. A partir da contração e penetração média foi possível classificar a amostra de acordo com a Carta de Classificação do Método das Pastilhas, conforme apresentada na Figura 4.6. Assim, o solo foi classificado como um solo argilo-arenoso laterítico (LA'-LG'), o RCC deste estudo teve características de um solo areno-siltoso não laterítico (NS'-NA') e a mistura com características de um solo arenoso laterítico (LA'-LA'). A classificação do RCC justifica-se pelo fato deste material apresentar maior quantidade de silte do que de argila.

Figura 4.5 – . Amostra de solo, RCC e mistura sem aparecimento de trincas e expansão.

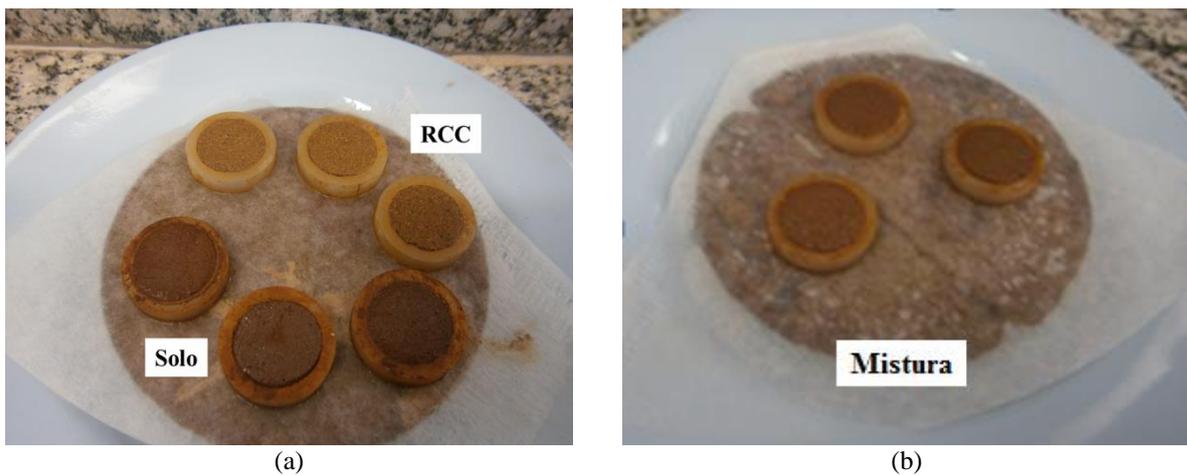
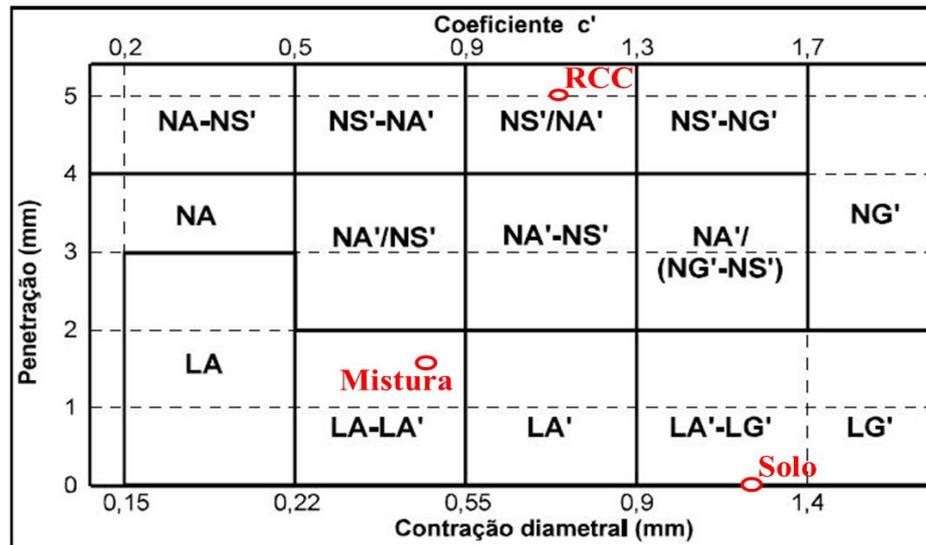
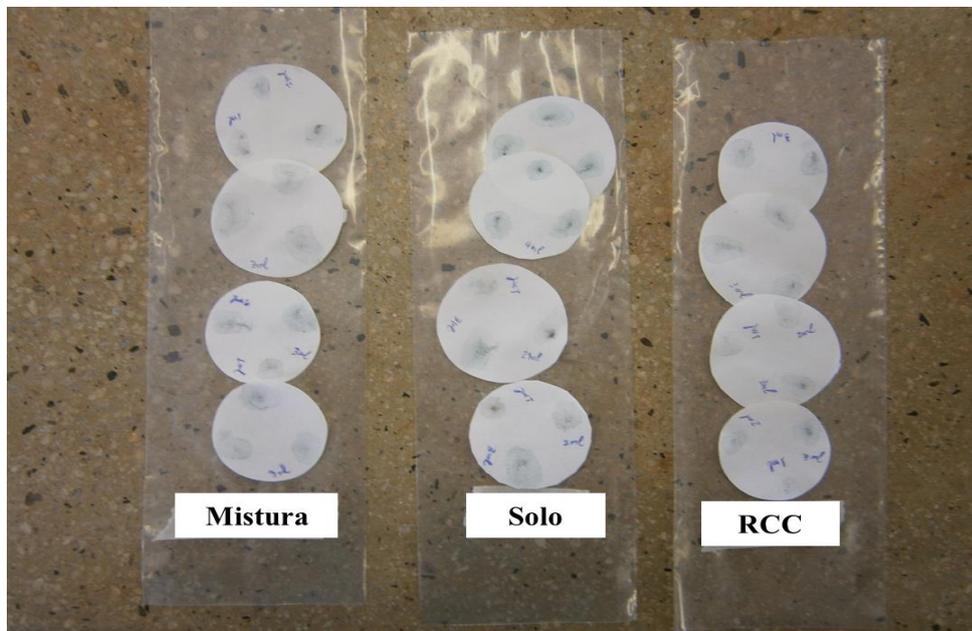


Figura 4.6 – Carta de Classificação do Método das Pastilhas.



A Figura 4.7 apresenta os papéis filtros da marca Whatman n° 42 utilizados nos ensaios para análise do consumo de azul de metileno pela fração argilosa das amostras de solo, RCC e mistura. Verifica-se que a amostra de solo consumiu 4 ml da solução de azul de metileno e o RCC e a mistura consumiram 3 ml.

Figura 4.7 – Ensaio de adsorção de azul de metileno para a amostra de solo, RCC e mistura.



A partir dos resultados obtidos no ensaio de Adsorção de Azul de Metileno foram calculados, por meio das Equações 2.1, 2.3 e 2.4 apresentadas no item 2.2.2, o Coeficiente de Atividade (CA), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Superfície Específica (SE) destes materiais, os

quais são apresentados na Tabela 4.4. Verifica-se que o solo e a mistura foram classificados como pouco ativos, visto apresentarem  $CA < 11$  e o RCC foi classificado como Ativo ( $11 > CA > 80$ ), mas é importante ressaltar que este se situa no limite inferior da faixa referente à argilo-mineral ativo.

Tabela 4.4 – Resultados obtidos no ensaio de adsorção de azul de metileno.

Material	Volume de azul de metileno consumido (ml)	CA	SE (m <sup>2</sup> /g)	CTC (meq/100g)
Solo	4	5,01	7,32	0,80
RCC	3	12,74	14,64	1,61
Mistura	3	7,56	9,76	1,07

OBS: CA= Coeficiente de atividade; SE= Superfície específica; CTC= Capacidade de troca catiônica.

Os valores de Superfície Específica (SE) e de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) das amostras, apresentados na Tabela 4.4, são valores típicos de solos com predomínio do argilomineral caulinita. Esses resultados são coerentes com os obtidos por meio do cálculo o Índice de Atividade (IA).

Na Figura 4.8 são apresentadas as curvas de compactação do solo, do RCC e da mistura executadas na Energia Proctor Normal, segundo os procedimentos da NBR 7181 (ABNT, 1986). Nessa Figura também constam as curvas de saturação e ótimas. Os valores de umidade ótima e peso específico seco máximo de cada material são apresentados na Tabela 4.5.

Figura 4.8 – Curvas de compactação do Solo, RCC e Mistura.

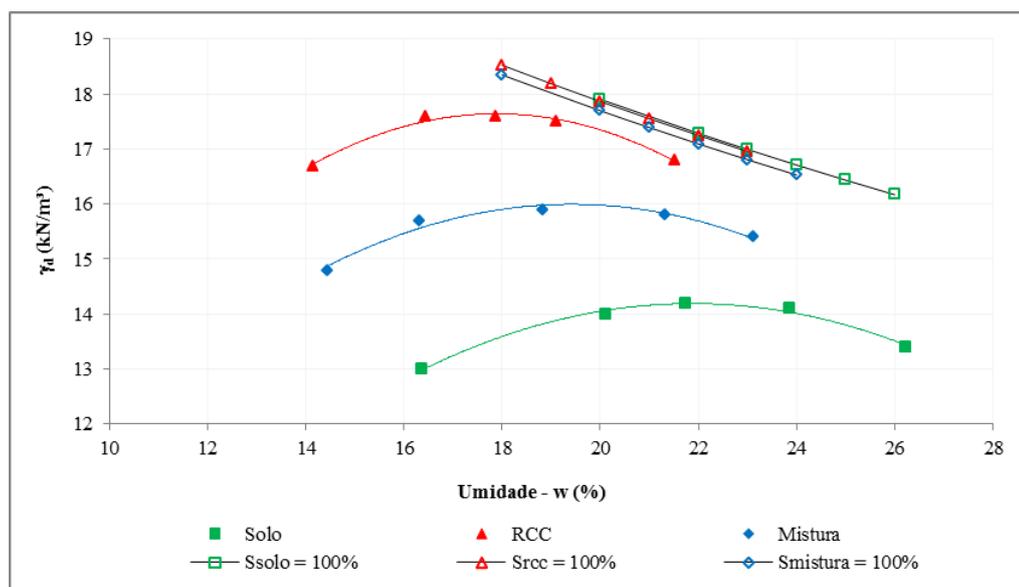


Tabela 4.5 – Valores da umidade ótima e peso específico seco máximo dos materiais.

Material	Umidade Ótima (%)	$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )
Solo	22,0	14,20
RCD	18,0	17,60
Mistura	19,0	15,90

Os resultados mostram que a adição de solo ao RCC diminui a massa específica seca máxima e aumentar o teor de umidade ótima. Além disso, o valor de saturação equivalente à umidade ótima do RCC é maior que o do solo, e a mistura possuem um valor intermediário. Esses resultados são coerentes com o comportamento esperado destes materiais.

## 4.2 COMPORTAMENTO HIDRÁULICOS DOS MATERIAIS

Neste item serão mostrados os resultados do estudo do comportamento hidráulicos dos materiais ensaiados em laboratório, sendo estes: curvas de retenção e permeabilidade saturada e não saturada.

### 4.2.1 Permeabilidade

Os valores da massa específica seca máxima, da umidade ótima, do grau de compactação e desvio do teor de umidade das amostras compactadas para execução do ensaio de permeabilidade encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de permeabilidade.

Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{comp}$ (%)	GC(%)	Desvio de w(%)
Solo	14,10	22,2	99,3	+0,23
RCC	17,70	17,6	100,5	-0,36
Mistura	15,70	20,0	98,7	+1,00

OBS:  $\gamma_d$  = massa específica seca máxima;  $w_{comp}$  = Umidade de compactação; GC = Grau de compactação; w = Umidade.

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores do coeficiente de permeabilidade de cada material. Analisando os dados desta Tabela, pode-se definir se os valores obtidos de permeabilidade

são aceitáveis para algumas das camadas que constituem o sistema de cobertura de um aterro sanitário.

Tabela 4.7 – Valores de permeabilidade dos materiais.

Material	k (cm/s)
Solo	$5,98 \times 10^{-6}$
RCC	$2,79 \times 10^{-5}$
Mistura	$8,69 \times 10^{-6}$

Segundo Koerner e Daniel (1997), a condutividade hidráulica máxima de uma camada de cobertura é  $10^{-5}$  cm/s e de uma barreira hidráulica é  $10^{-7}$  cm/s. Portanto, verifica-se que o solo e mistura atende aos requisitos de permeabilidade propostos para a camada superior da cobertura, mas não atendem para a barreira hidráulica, devido principalmente ao arranjo granulométrico que possui estes materiais. E a permeabilidade do RCC não atende o requisito para ser utilizado em nenhuma dessas camadas.

A Figura 4.9 apresenta a variação da permeabilidade com o carregamento das amostras de solo, RCC e mistura obtidos por meio da determinação destes valores durante a execução do ensaio de adensamento em função da tensão atuante e por meio da Equação 4.1, proposta por Taylor (1948)<sup>4</sup> *apud* DAS (2008), conforme comentado a seguir.

Segundo Taylor (1948) *apud* DAS (2008) o coeficiente de permeabilidade pode ser função de uma constante e do índice de vazios apresentado no ensaio de adensamento, conforme é mostrado na Equação 4.1. O valor dessa constante pode ser adquirido através do coeficiente de permeabilidade obtido pelo permeâmetro e do índice de vazios inicial ( $e_i$ ) das amostras no ensaio de adensamento. Desta maneira, serão calculados os outros coeficientes de permeabilidade em função da tensão atuante, a partir dos valores dos índice de vazios obtidos no ensaio adensamento.

$$k = C_1 \frac{(e^3)}{(1+e)} \quad (4.1)$$

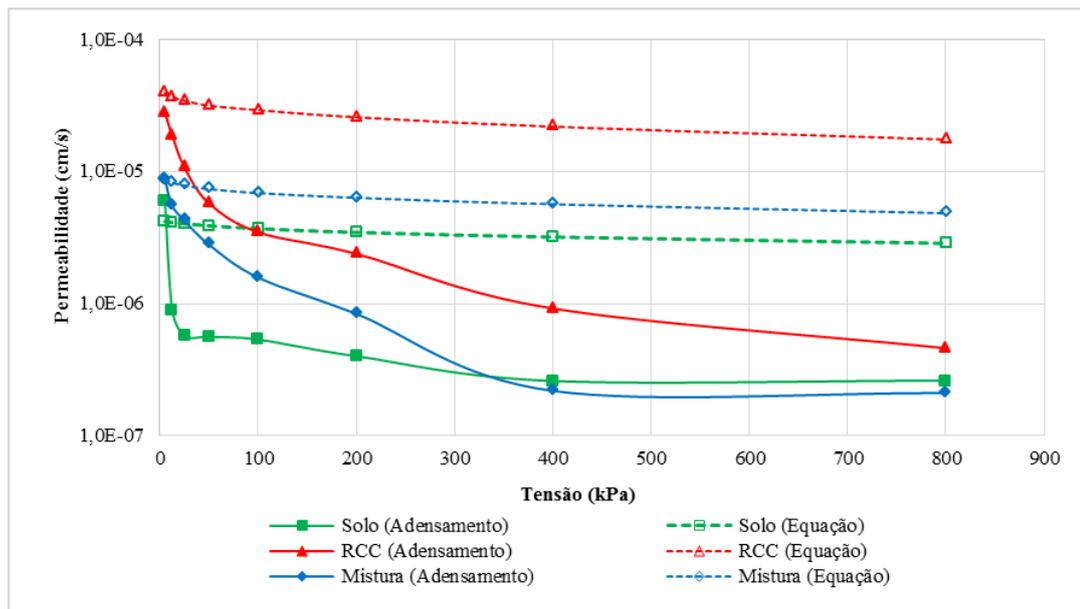
<sup>4</sup> TAYLOR, D. W., *Fundamentals of Soil Mechanics*, Wiley, New York, 1948.

Em que:

$k$ : é o coeficiente de permeabilidade;

$C_1$ : é uma constante.

Figura 4.9 – Permeabilidade ao longo do carregamento obtidas por meio da Equação 4.1 e através do ensaio de adensamento.



A partir da Figura 4.9, observa-se que os valores estimados por meio da Equação 4.1 diferem-se dos valores obtidos experimentalmente nos ensaios de adensamento. Uma justificativa para essa variação é o fato da proposta de Taylor (1948 *apud* DAS, 2008) referir a solos granulares.

Por meio da estimativa os níveis de tensões a que podem ser submetidos estes materiais na execução da camada de cobertura, é possível estimar a permeabilidade de cada material devido à influência do carregamento.

Caso esse material seja utilizado como camada de superfície e de proteção os valores de tensões que serão submetidos são 17 kPa para o Solo, 21 kPa para o RCC e 19 kPa para a Mistura. Caso o uso seja em barreira hidráulica, os valores são 58 kPa para o Solo, 69 kPa para o RCC e 63 kPa para a Mistura.

Verifica-se que independente do método utilizado para determinação da variação da permeabilidade com o carregamento (dados experimentais ou previsão teórica). A redução dos valores de permeabilidade, devido aos níveis de tensões a que podem ser submetidos estes

materiais na execução da camada de cobertura, não é suficiente para viabilizar o uso do solo e da mistura como barreira hidráulica e nem o RCC como camada de cobertura (camada de superfície associada à camada de proteção).

#### 4.2.2 Curva de retenção

Os valores do peso específico seco máximo, da umidade ótima, do grau de compactação e desvio do teor de umidade das amostras compactadas para execução do ensaio de papel filtro encontram-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de papel filtro.

Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>comp</sub> (%)	GC (%)	Desvio de w (%)
Solo	14,10	22,1	99,3	+0,11
RCC	17,50	17,6	99,4	-0,33
Mistura	16,00	19,0	100,6	+0,03

OBS:  $\gamma_d$  = massa específica seca máxima; w<sub>comp</sub> = Umidade de compactação; GC = Grau de compactação; w = Umidade.

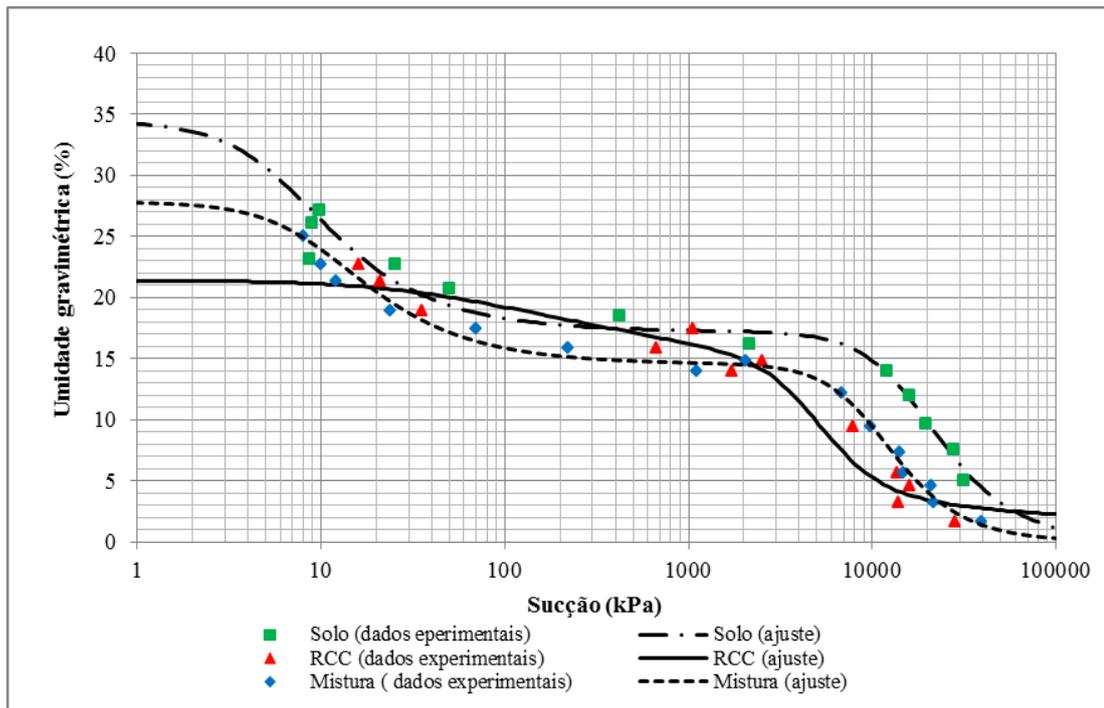
A Figura 4.10 apresentam os dados experimentais da curva de retenção de água e suas respectivas curvas de ajuste. Os dados experimentais foram obtidos por meio da técnica do papel filtro propostos por Marinho (1994) e para a representação matemática dos dados experimentais da curva de retenção utilizou-se a equação 2.6 proposta por Durner (1994), apresentada no item 2.2.3. Observa-se que a curva de retenção do solo e da mistura é bimodal, típico de solos tropicais e o RCC apresentou uma curva monomodal, o que é característico deste material. Na Tabela 4.9 estão os parâmetros adotados para a calibração da curva e estes ajustes foram feitos de maneira visual.

Tabela 4.9 – Valores utilizados no ajuste da curva de retenção.

Material	Micro			Macro		
	$e_{ws}$	$\alpha_s$	$n_s$	$e_{wL}$	$\alpha_L$	$n_L$
Solo	0,48	0,00006	2,50	0,48	0,16	2
RCC	0,30	0,0002	2,70	0,30	0,025	1,2
Mistura	0,40	0,0001	2,70	0,37	0,1	2

OBS:  $e_{ws}$  = índice de vazios dos microporos;  $\alpha_s$  = valor de entrada de ar dos microporos;  $n_s$  = inclinação da reta (umidade x sucção nos microporos);  $e_{wL}$  = índice de vazios dos macroporos;  $\alpha_L$  = valor de entrada de ar dos macroporos;  $n_L$  = inclinação da reta (umidade x sucção nos macroporos)

Figura 4.10 – Curva de retenção de água do Solo, RCC e Mistura.



A partir da curva de retenção é possível determinar a umidade gravimétrica de capacidade de campo, que é a umidade referente a um teor de sucção de 33 kPa. De posse desses valores, pode-se calcular os valores da umidade volumétrica da capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), a partir da Equação 4.2 obtendo-se a máxima capacidade de armazenamento ( $WS_{m\acute{a}x}$ ) do material por meio da Equação 4.3. Vale ressaltar que para estes cálculos considerou-se uma altura de raiz ( $H_{raiz}$ ) de 40 cm de acordo com KOERNER & DANIEL (1997).

$$\theta_{cc} = w \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (4.2)$$

Em que:

$w$  é a umidade gravimétrica,  $\gamma_d$  é o peso específico aparente seco e a  $\gamma_w$  peso específico da água.

$$WS_{m\acute{a}x} = \theta_{cc} H_{raiz} \quad (4.3)$$

A Tabela 4.10 apresenta os valores da máxima capacidade de armazenamento de água de cada material. Observa-se que os valores obtidos para os três materiais foram próximos sendo que a mistura obteve ligeiramente uma maior capacidade de armazenamento em relação aos outros dois materiais.

Tabela 4.10 – Valores da capacidade de armazenamento de água máxima.

Material	WS <sub>max</sub> (mm)
Solo	112
RCC	114
Mistura	116

### 4.2.3 Permeabilidade não saturada

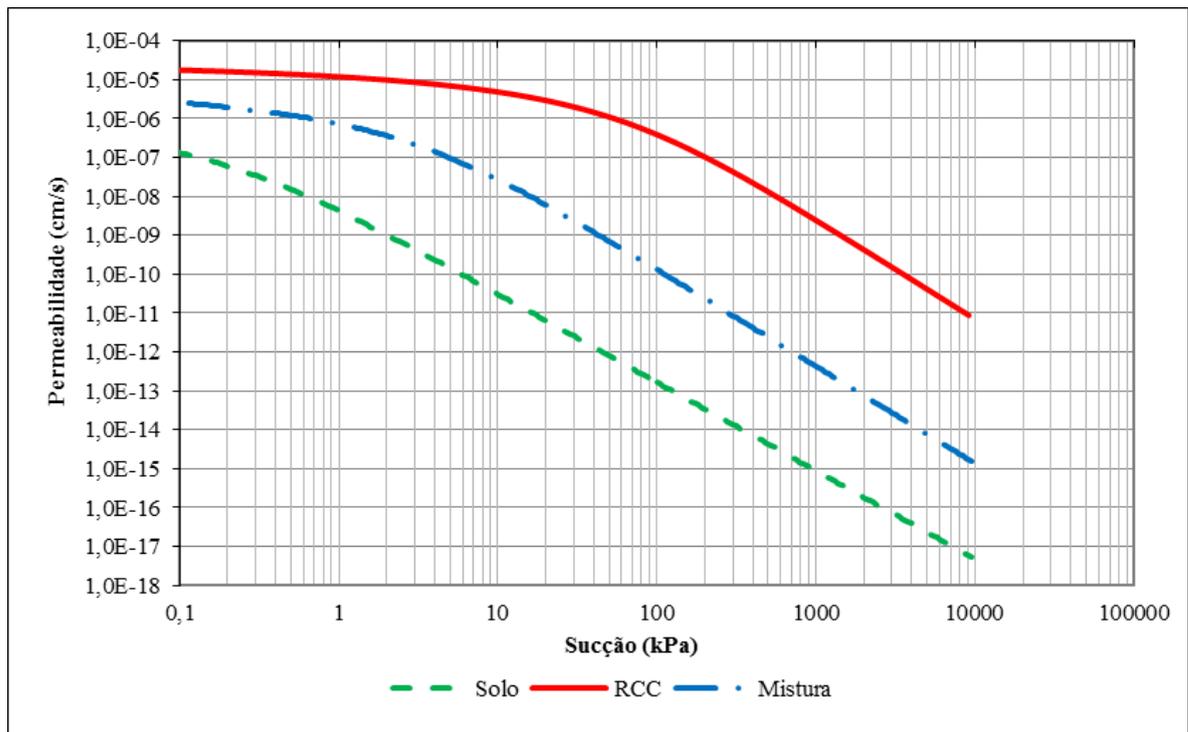
A partir da curva de retenção apresentada na Figura 4.10, e da Equação 2.8, foi possível determinar a curva da permeabilidade não saturada, a qual pode ser visualizada na Figura 4.11. Os parâmetros de ajuste são apresentados na Tabela 4.11. Vale ressaltar que para o ajuste foi considerado apenas os níveis de sucção no macroporo, visto que a equação de ajuste considera que as curvas sejam monomodais. Esta simplificação é aceitável visto que os níveis de sucção que estes materiais atingem em campo são inferiores aos valores atingidos pelos microporos.

Tabela 4.11 – Valores utilizados no ajuste da permeabilidade não saturada.

Material	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$m$
Solo	0,4885	0,0851	2,7500	1,1099	0,0990
RCC	0,3731	0,1300	0,0100	1,2300	0,1870
Mistura	0,4214	0,1100	0,2000	1,2000	0,1667

OBS:  $\theta_s$  = Umidade volumétrica saturada;  $\theta_r$  = Umidade volumétrica residual;  $n$  e  $m$  = parâmetros de ajustes.

Figura 4.11 – Curva de permeabilidade não saturada ajustada.



A partir dos valores de umidade ótima destes materiais apresentados na Tabela 4.5 e das curvas de retenção apresentadas na Figura 4.10 é possível estimar a sucção destes materiais na umidade ótima, os quais são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Valores de sucção na umidade ótima dos materiais.

Material	$w_{ot}$ (%)	$u_a - u_w$ (kPa)
Solo	22,0	20
RCC	18,0	185
Mistura	19,0	26

OBS:  $w_{ot}$  = Umidade ótima;  $u_a - u_w$  = sucção matricial.

Por meio desses valores de sucção e das curvas apresentadas na Figura 4.11 foram estimados os valores de permeabilidade destes materiais quando compactados na umidade ótima, os quais são apresentados na Tabela 4.13. Verifica-se que, caso estes materiais não atinjam teores de umidade maiores que a umidade ótima, o solo e a mistura podem ser utilizados como barreira hidráulica e o RCC apenas como camada de proteção e superfície.

Tabela 4.13 – Valores da permeabilidade não saturada na umidade ótima dos materiais.

Material	w <sub>ot</sub> (%)	u <sub>a</sub> -u <sub>w</sub> (kPa)	k (cm/s)
Solo	22	20	6,39x10 <sup>-12</sup>
RCC	18	185	1,25x10 <sup>-7</sup>
Mistura	19	26	3,24x10 <sup>-9</sup>

OBS: w<sub>ot</sub> = Umidade ótima; u<sub>a</sub>-u<sub>w</sub> = Sucção matricial; k = Permeabilidade.

## 4.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS

Neste item serão mostrados os resultados do estudo do comportamento mecânico apresentado pelos materiais ensaiados em laboratório.

### 4.3.1 Adensamento

Os valores do peso específico seco máximo, da umidade ótima, do grau de compactação e desvio do teor de umidade das amostras compactadas para execução do ensaio de adensamento encontram-se na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de adensamento.

Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>comp</sub> (%)	GC (%)	Desvio de w (%)
Solo	14,20	21,9	100,0	-0,10
RCC	17,60	18,1	100,0	+0,14
Mistura	16,00	19,5	100,6	+0,55

OBS:  $\gamma_d$  = massa específica seca máxima; w<sub>comp</sub> = Umidade de compactação; GC = Grau de compactação; w = Umidade.

Os ensaios de adensamento realizados nas amostras de solo, RCC e mistura tem a finalidade de melhor entender o desempenho mecânico destes materiais frente à atuação de forças externas. Os índices físicos como: massa específica aparente seca inicial ( $\gamma_d$ ), massa específica dos grãos ( $\gamma_s$ ), índice de vazios inicial ( $e_i$ ), grau de saturação inicial ( $S_i$ ) e altura ideal de sólidos ( $h_s$ ) dos corpos de prova são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Índices físicos iniciais dos três materiais.

Material	$\gamma_{si}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{graos}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_i$	$S_i$ (%)	$H_s$ (cm)
Solo	1,51	2,79	0,844	63,83	1,09
RCC	1,63	2,78	0,70	71,95	1,18
Mistura	1,56	2,78	0,79	65,29	1,12

Nas Figura 4.12 e Figura 4.13 são apresentadas as curva de compressibilidade dos materiais, tanto em relação à deformação volumétrica quanto em relação aos índices de vazios. A partir das curvas de compressibilidade obtidas por meio dos ensaios de adensamento foram determinados a tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_p$ ), o índice de compressão ( $C_c$ ) e o índice de recompressão ( $C_r$ ) de cada material, os quais são apresentados na Tabela 4.16.

Figura 4.12 – Curva de compressibilidade: Deformação volumétrica x Tensão.

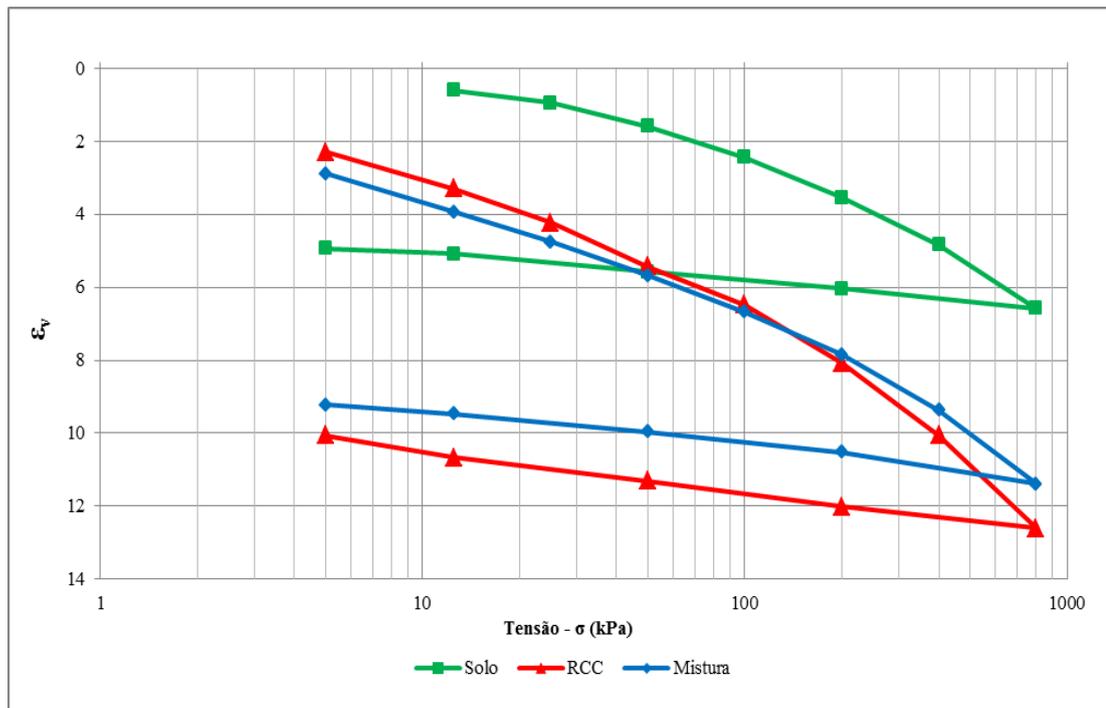


Figura 4.13 – Curva de compressibilidade: Índice de vazios x Tensão.

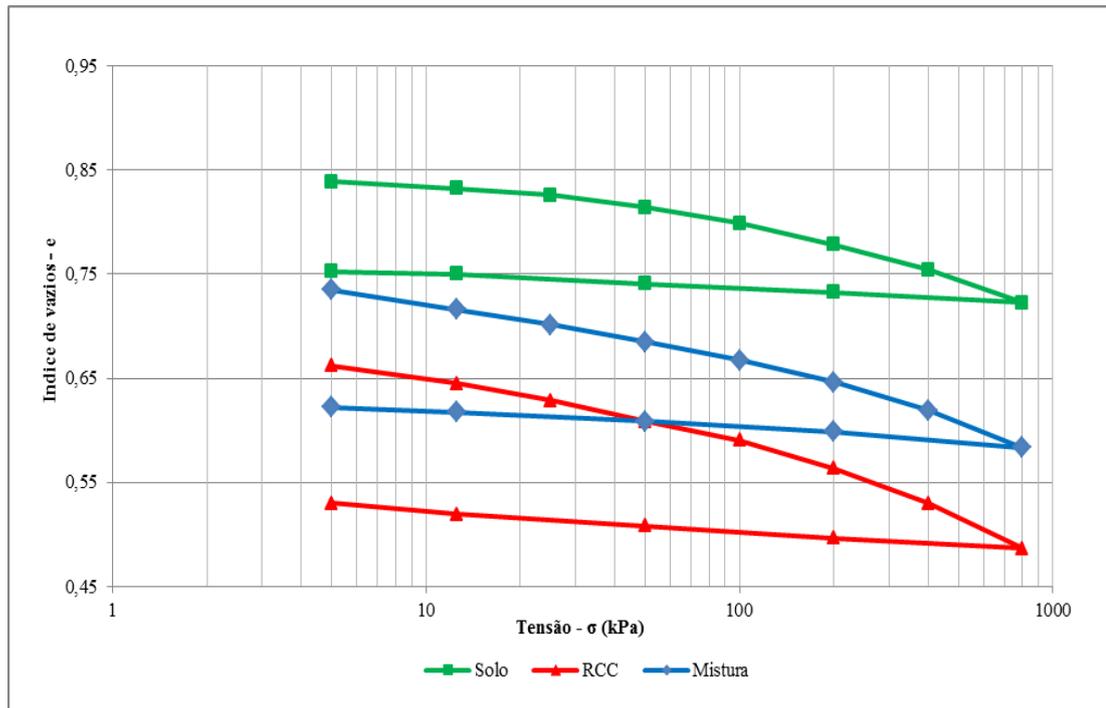


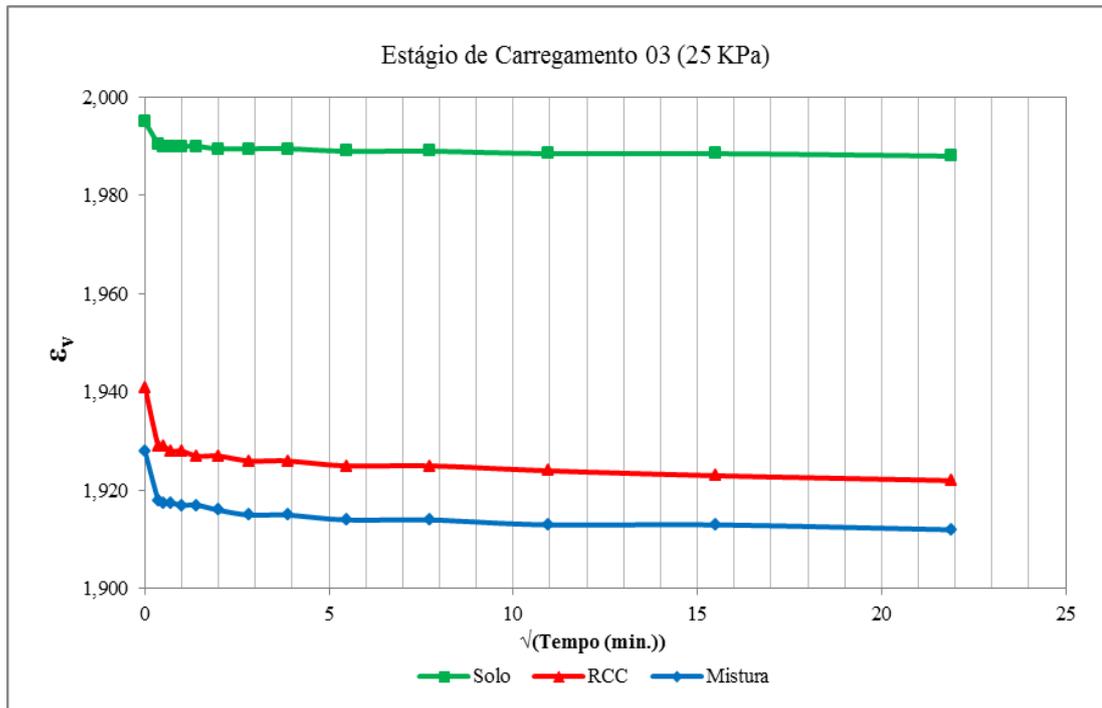
Tabela 4.16 – Parâmetros de deformabilidade do solo, RCC e Mistura.

Material	Cc	Cr	$\sigma_p$ (Pacheco Silva)
Solo	0,090	0,007	80
RCC	0,128	0,026	98
Mistura	0,105	0,011	95

Conforme o visualizado nas Figura 4.12 e Figura 4.13 e na Tabela 4.16, observa-se que os valores do coeficiente de compressão e recompressão e a tensão de pré-adensamento são maiores no RCC do que no solo, e os parâmetros da mistura possuem valores intermediários. A influência dos coeficientes de deformabilidade são maiores que da tensão de pré-adensamento, visto que a deformação no RCC é maior que a do solo e a mistura têm comportamento próximo ao do RCC.

Na Figura 4.14 visualiza-se a curva de adensamento de cada material para a tensão de 25 kPa, na qual é possível verificar a não estabilização da deformação ao longo das 24 horas. Este comportamento é verificado para todos os valores de carregamento. Dessa forma, não é possível calcular o coeficiente de adensamento vertical ( $c_v$ ).

Figura 4.14 – Deformação do Solo, RCC e Mistura ao longo do tempo com carregamento de 25 kPa.



Devido à dificuldade de se expressar o real valor de  $C_v$  das amostras, uma análise preliminar para a obtenção do coeficiente de adensamento vertical é encontrada a partir da permeabilidade corrigida ( $K_{corr}$ ) que leva em consideração a variação dos índices de vazios do ensaio de adensamento. Segundo Terzaghi (1943), pode-se determinar o  $C_v$  conforme a Equação 4.4.

$$c_v = \frac{k_{corr}}{\gamma_w \cdot m_v} \quad (4.4)$$

Em que:

$c_v$ : é o coeficiente de adensamento vertical

$k_{corr}$ : é o coeficiente de permeabilidade corrigido

$\gamma_w$ : é o peso específico da água

$m_v$ : é o coeficiente de variação volumétrica.

O coeficiente de variação volumétrica pode ser determinado pela Equação 4.5 os valores são apresentados na Tabela 4.17.

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \sigma_v} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\sigma_2 - \sigma_1} \quad (4.5)$$

Em que:

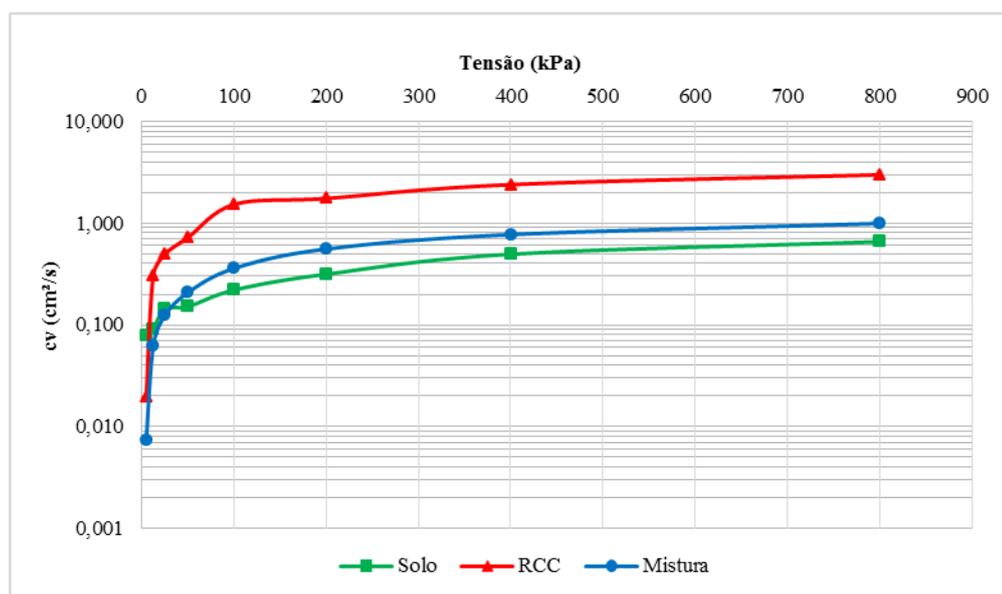
$\varepsilon_v$  é a variação da deformação volumétrica e  $\sigma_v'$  é a variação da tensão atuante.

Tabela 4.17 – Coeficiente de variação volumétrica das amostras.

Material	Solo	RCC	Mistura
Tensão (kPa)	$m_v$ (kPa <sup>-1</sup> )	$m_v$ (kPa <sup>-1</sup> )	$m_v$ (kPa <sup>-1</sup> )
5	0,000531	0,019907	0,011899
12	0,000461	0,001214	0,001339
25	0,000280	0,000701	0,000640
50	0,000258	0,000439	0,000356
100	0,000168	0,000191	0,000192
200	0,000110	0,000148	0,000114
400	0,000065	0,000092	0,000074
800	0,000044	0,000059	0,000049

A variação do coeficiente de adensamento vertical ( $c_v$ ) com a tensão é visualizada na Figura 4.15. Observa-se que ocorre um aumento do valor de  $c_v$  com o acréscimo da tensão para todos os materiais, visto que a redução dos valores dos coeficientes de variação volumétrica teve maior influência do que a redução da permeabilidade e do índice de vazios com o carregamento.

Figura 4.15 – Coeficientes de adensamento vertical obtido através da permeabilidade corrigida.



### 4.3.2 Cisalhamento Direto

Os valores do peso específico seco máximo, da umidade ótima, do grau de compactação e desvio do teor de umidade das amostras compactadas para execução do ensaio de cisalhamento encontram-se na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de cisalhamento.

Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{comp}$ (%)	GC(%)	Desvio de w(%)
Solo	14,10	21,4	99,3	0,51
RCC	17,60	18,1	100,0	0,11
Mistura	15,90	19,3	100,0	0,34

OBS:  $\gamma_d$  = massa específica seca máxima;  $w_{comp}$  = Umidade de compactação; GC = Grau de compactação; w = Umidade.

Nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 constam as curvas tensão cisalhantes *versus* deslocamento horizontal, e nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 são apresentadas as curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal. Tais envoltórias foram obtidas utilizando quatro pressões distintas atuantes no plano de cisalhamento: 25 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.

Figura 4.16 – Tensão cisalhante x deslocamento horizontal da amostra de Solo.

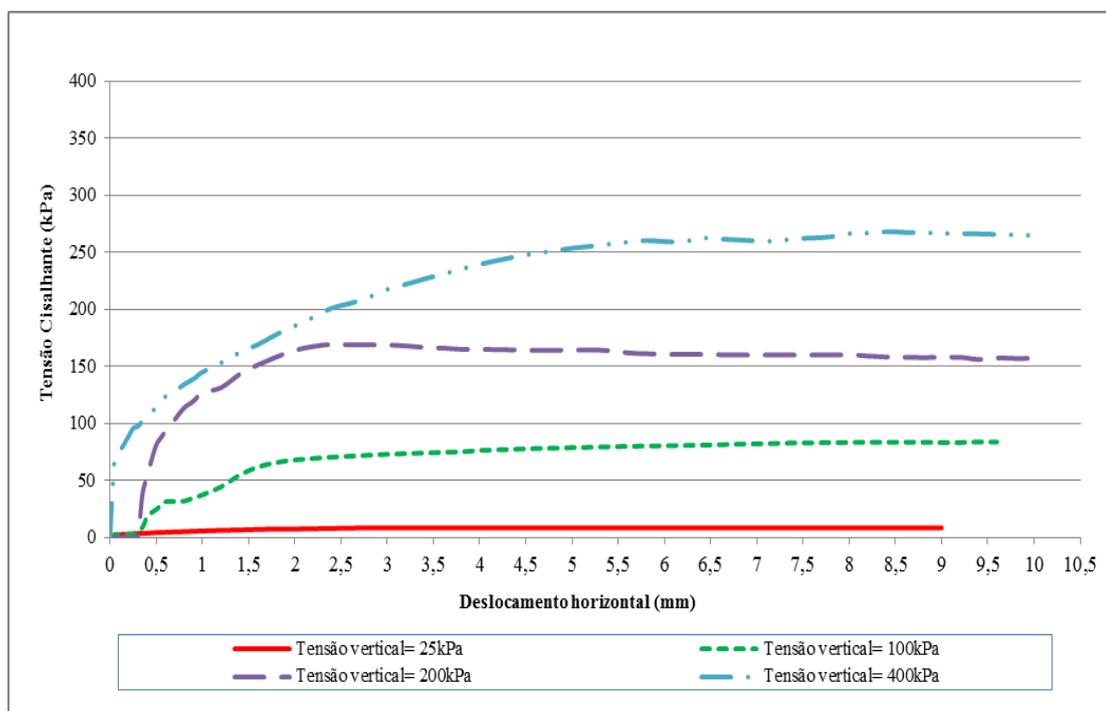


Figura 4.17 – Tensão cisalhante x deslocamento horizontal da amostra de RCC.

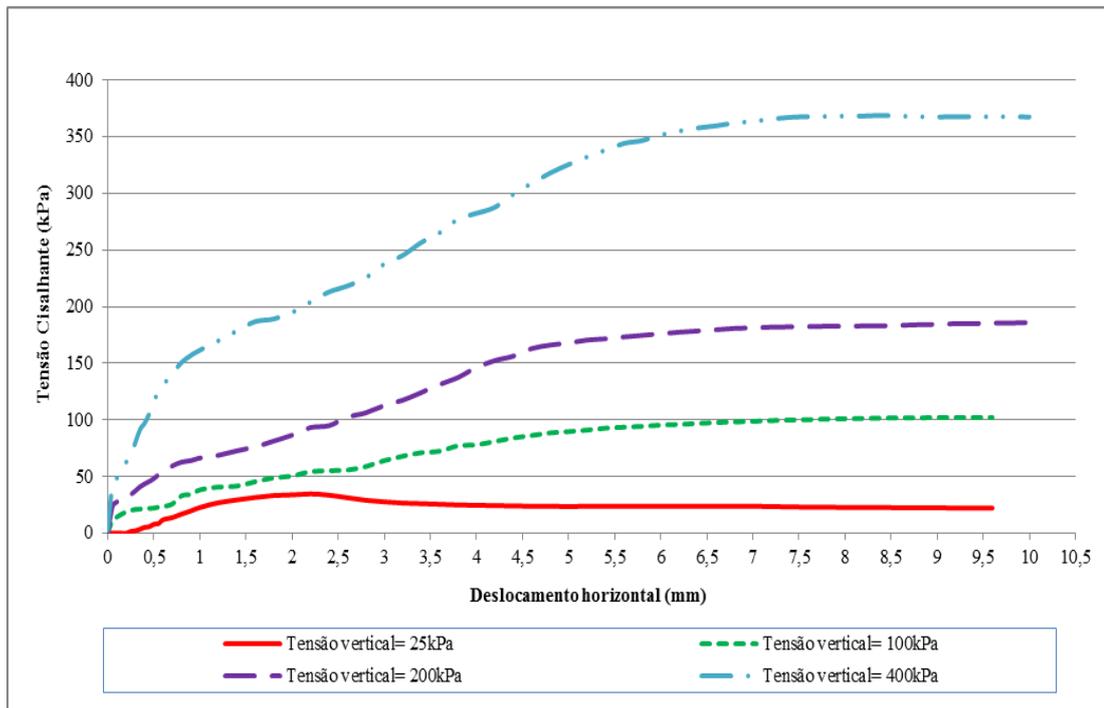
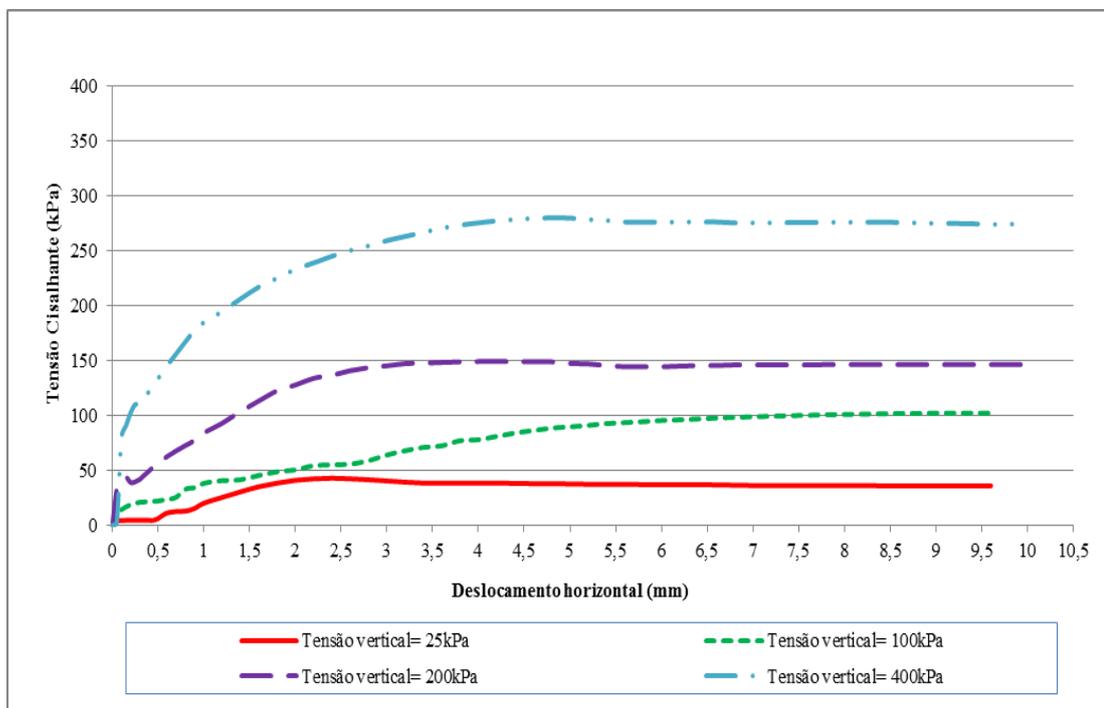


Figura 4.18 – Tensão cisalhante x deslocamento horizontal da amostra de Mistura.



Observando-se as Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 notam-se que nos ensaios executados com tensões normais menores que a de pré-adensamento (25 kPa) as curvas apresentam uma tensão de pico suave, o que é comportamento típico de argila pré-adensada. Nas curvas em que a tensão normal é maior que a tensão de pré-adensamento os valores de tensão cisalhante crescem

gradativamente com o deslocamento horizontal, atingindo valores constantes, conforme esperado para argilas normalmente adensadas. Na amostra de RCC na tensão de 400 kPa ocorreu um comportamento na curva típico de quando ocorre quebra de grãos no decorrer do ensaio.

Figura 4.19 – Deslocamento vertical x deslocamento horizontal da amostra de Solo.

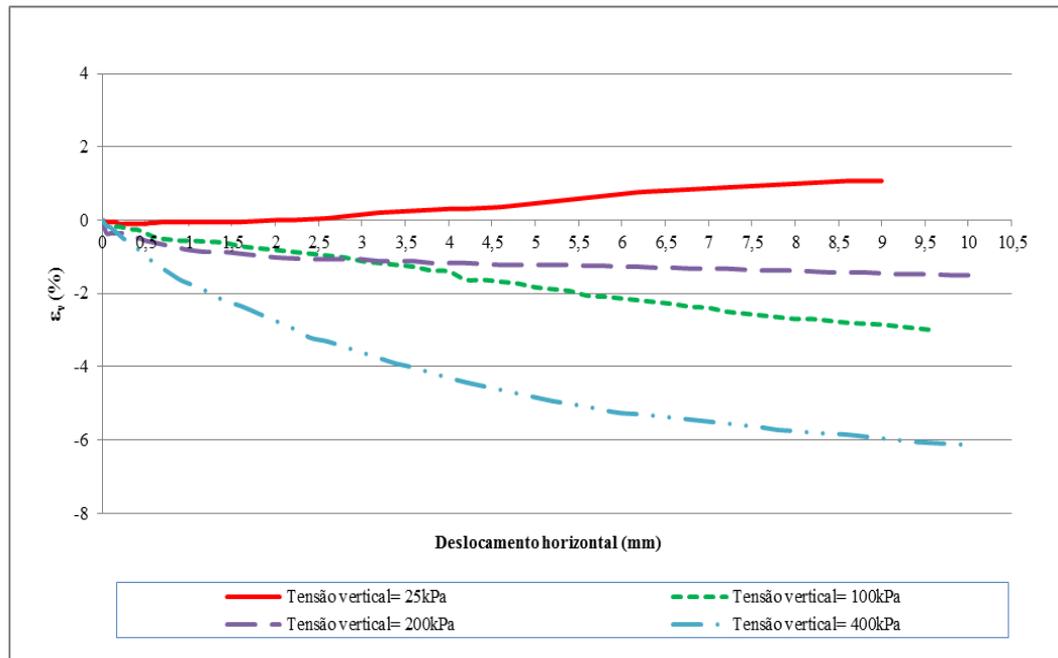


Figura 4.20 – Deslocamento vertical x deslocamento horizontal da amostra de RCC.

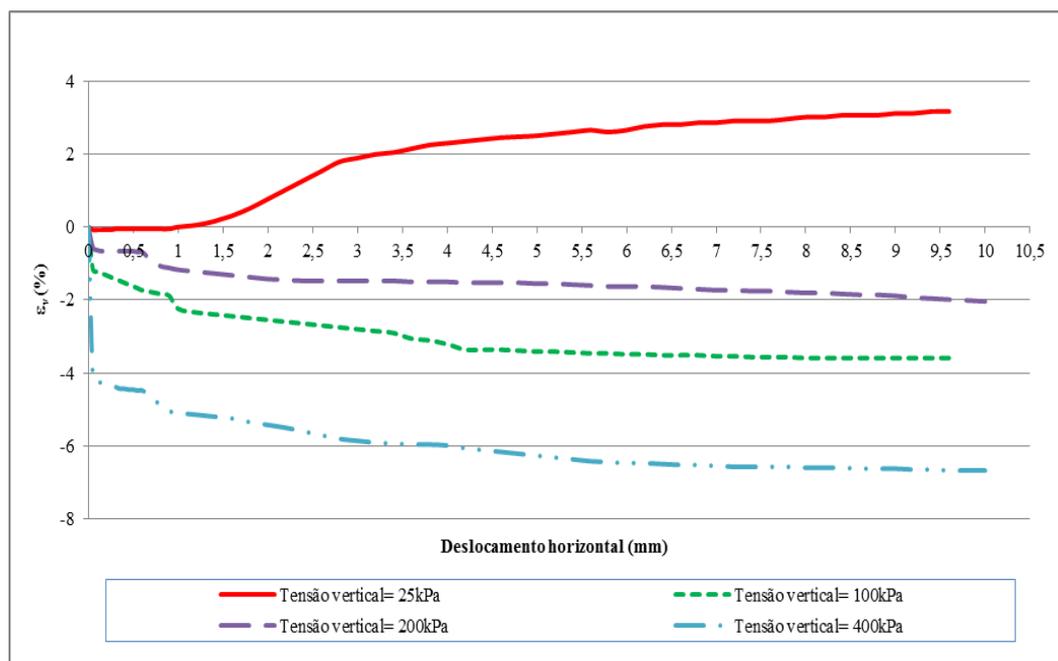
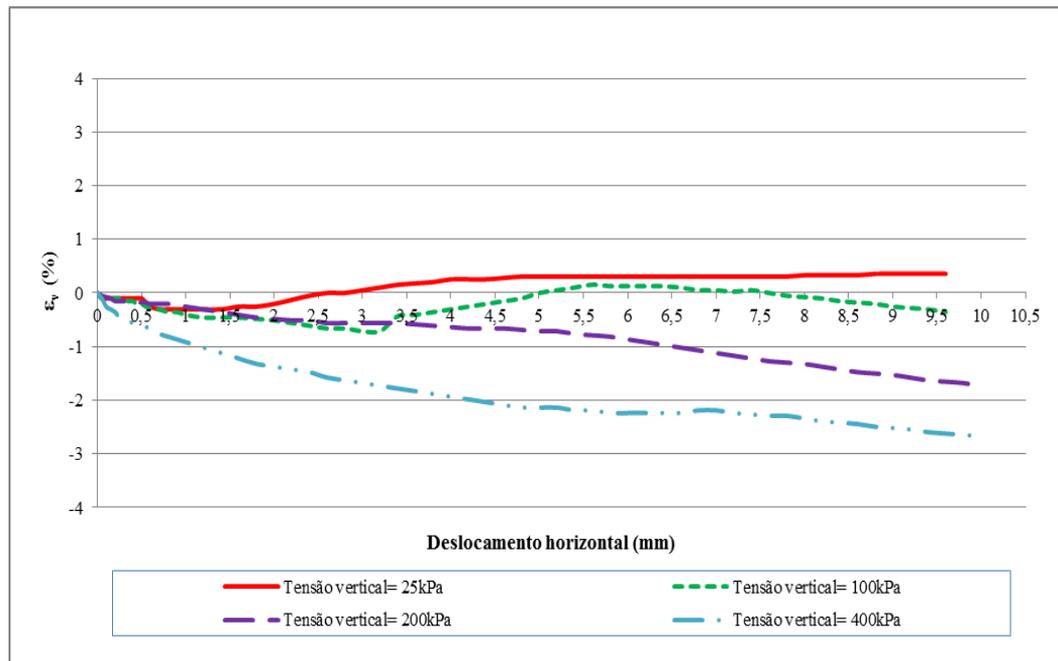


Figura 4.21 – Deslocamento vertical x deslocamento horizontal da amostra de Mistura.



Analisando as Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 visualizou-se que as amostras ensaiadas com tensões normais de 25 kPa apresentaram dilatação para o Solo, RCC e a Mistura, o que é comportamento típico argilas pré-adensadas. Para as tensões acima de 100 kPa, de maneira geral, as amostras apresentaram compressão na ruptura, o que é esperado para argilas normalmente adensadas.

Foram traçados também as envoltórias de tensões das amostras de Solo, RCC e Mistura que podem ser visualizada nas Figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 e 4.27. Nas três primeiras envoltórias foram utilizados os valores de tensão cisalhante de pico e nas três últimas os valores de tensão cisalhante residual.

Por meio das envoltórias de ruptura apresentadas anteriormente foram definidos os valores do ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ) para, os quais são apresentados na

Verifica-se que o RCC tem valores de ângulos de atrito típicos de areias e a Mistura e o Solo valores típicos de argila com baixa compressibilidade, corroborando com a classificação geotécnica.

Figura 4.22 – Envoltória de ruptura para resistência máxima do Solo.

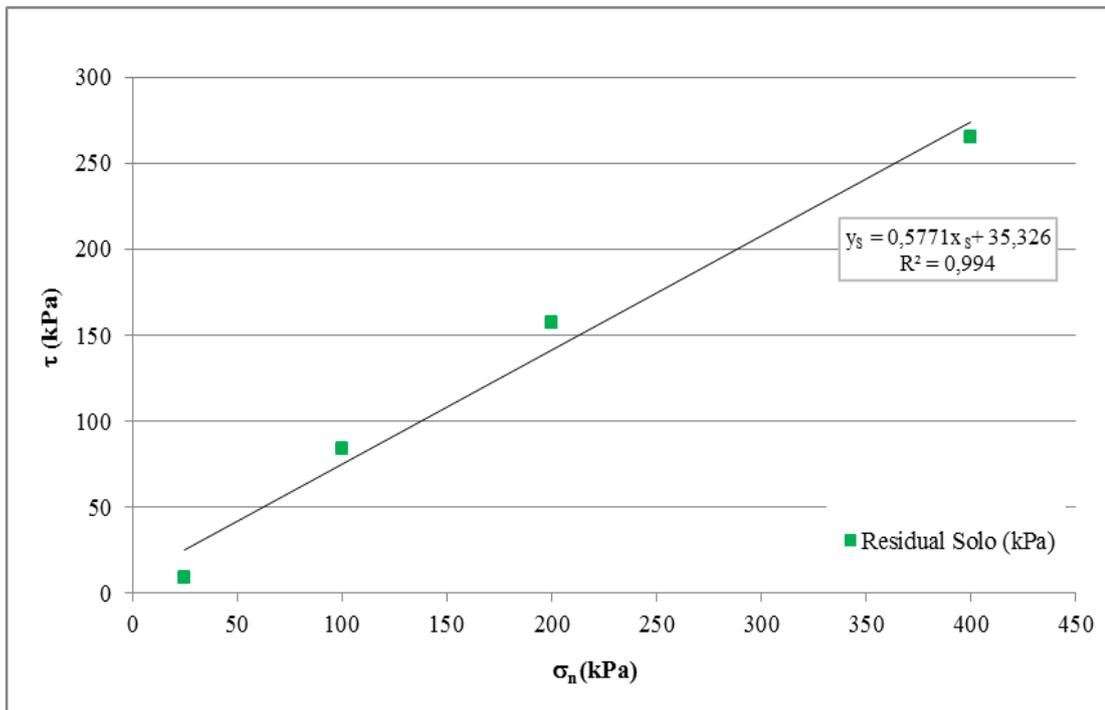


Figura 4.23 – Envoltória de ruptura para resistência máxima do RCC.

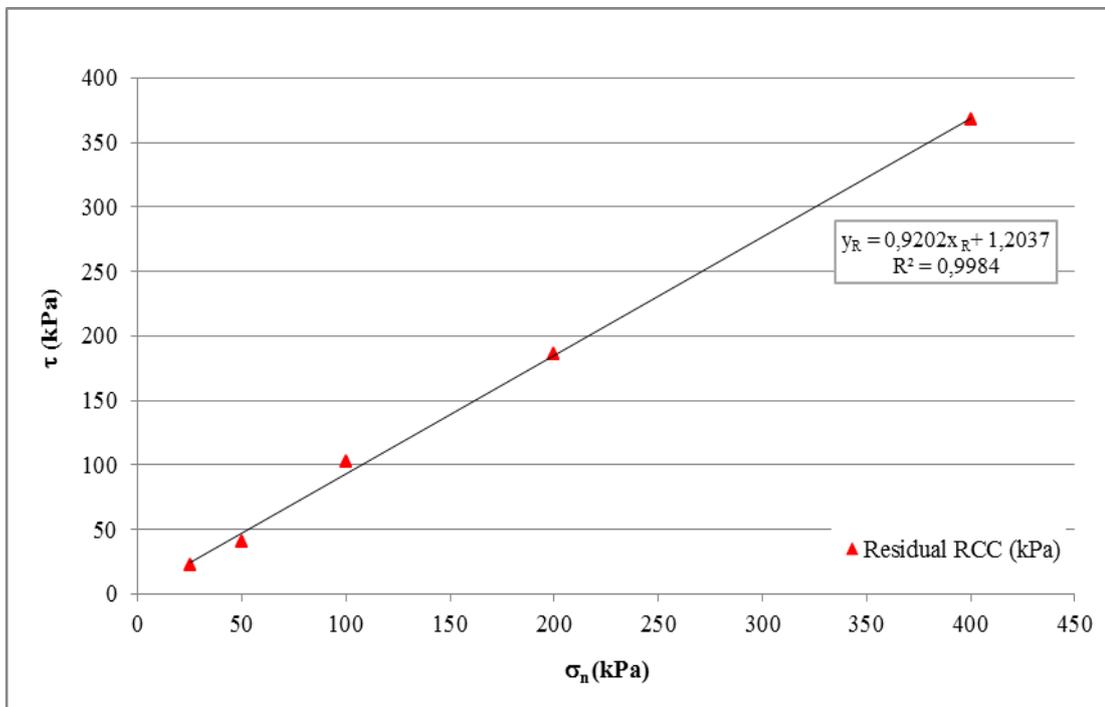


Figura 4.24 – Envoltória de ruptura para resistência máxima da Mistura.

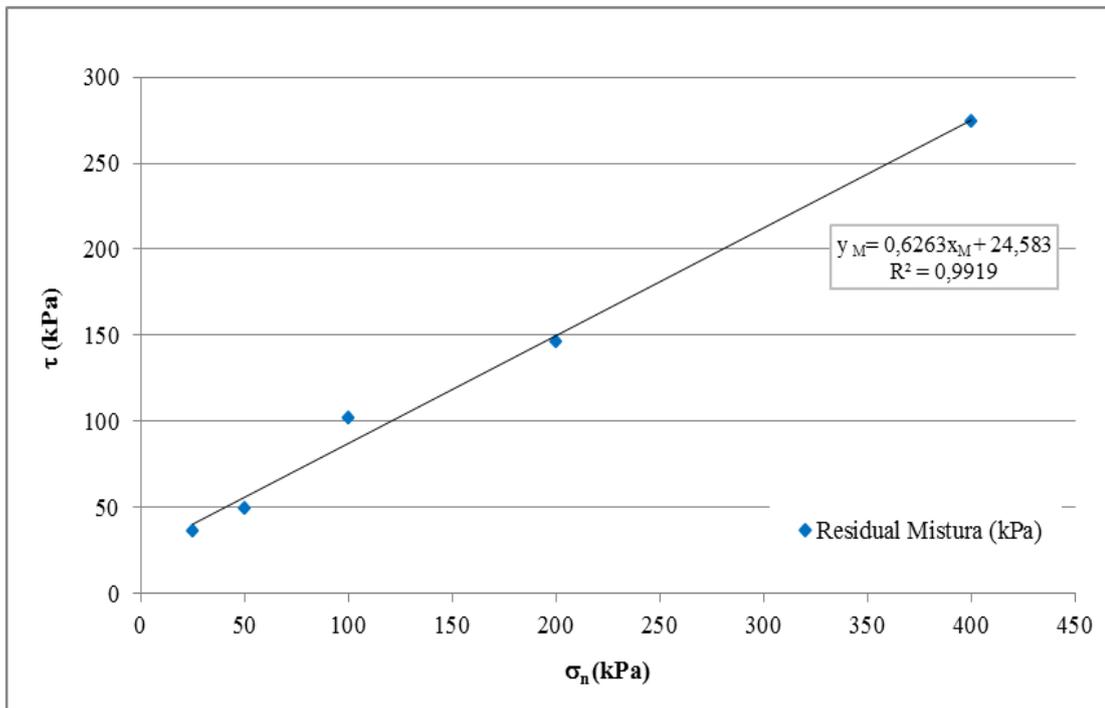


Figura 4.25 – Envoltória de ruptura para resistência residual do Solo.

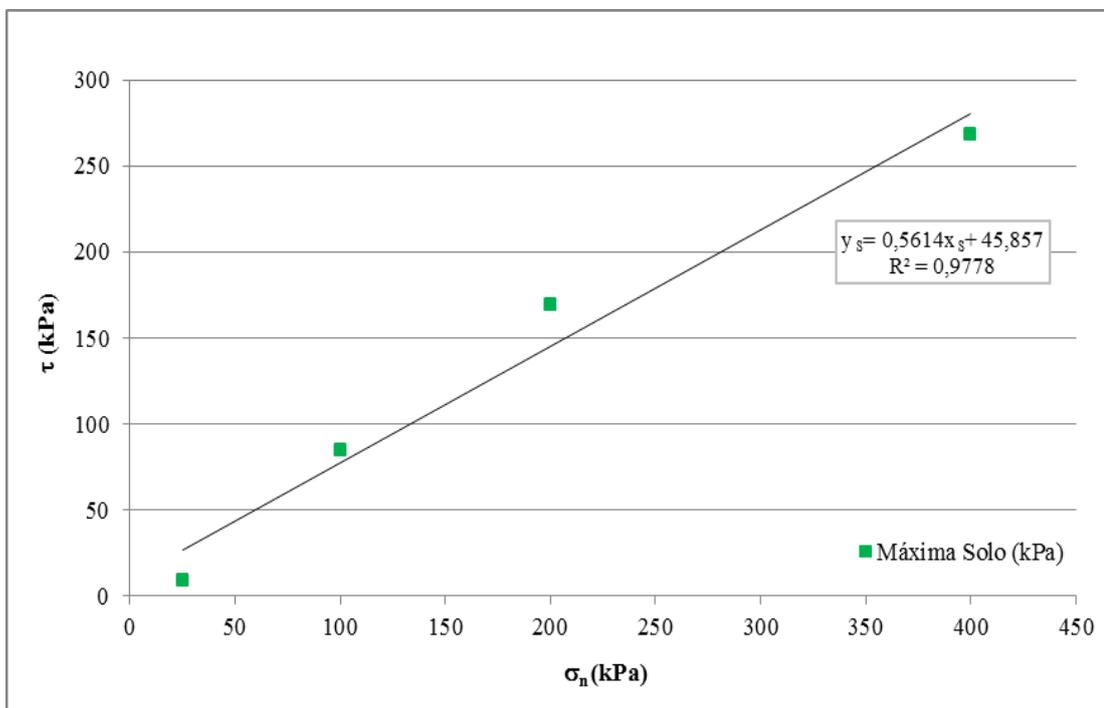


Figura 4.26 – Envoltória de ruptura para resistência residual do RCC.

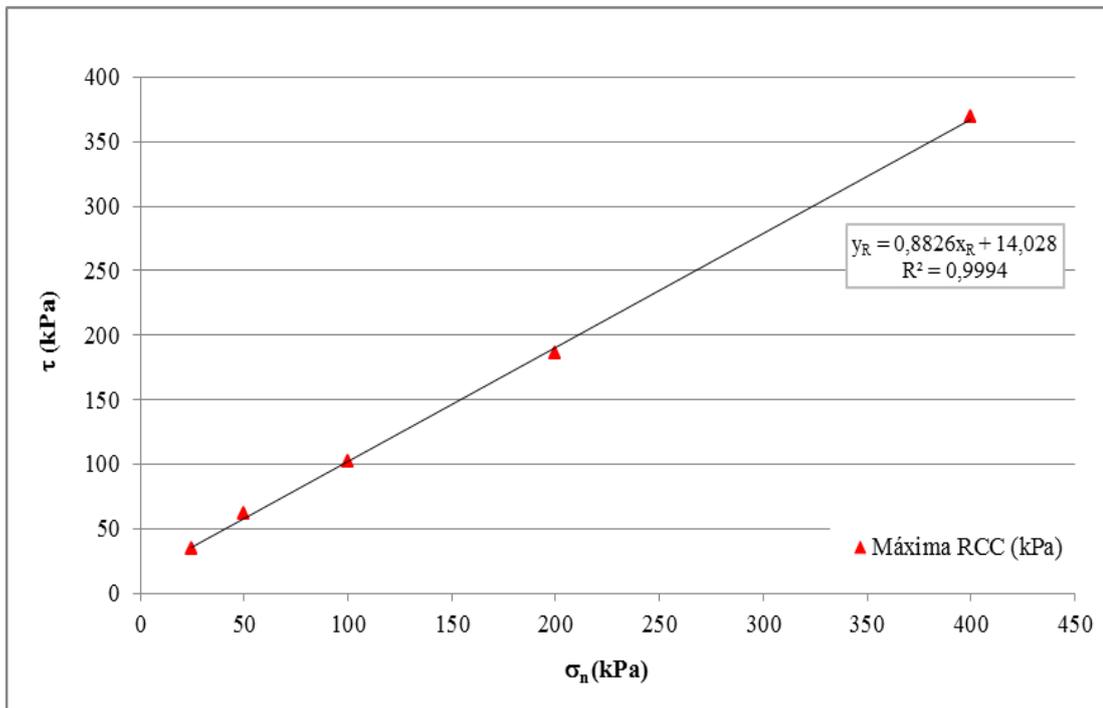


Figura 4.27 – Envoltória de ruptura para resistência residual da Mistura.

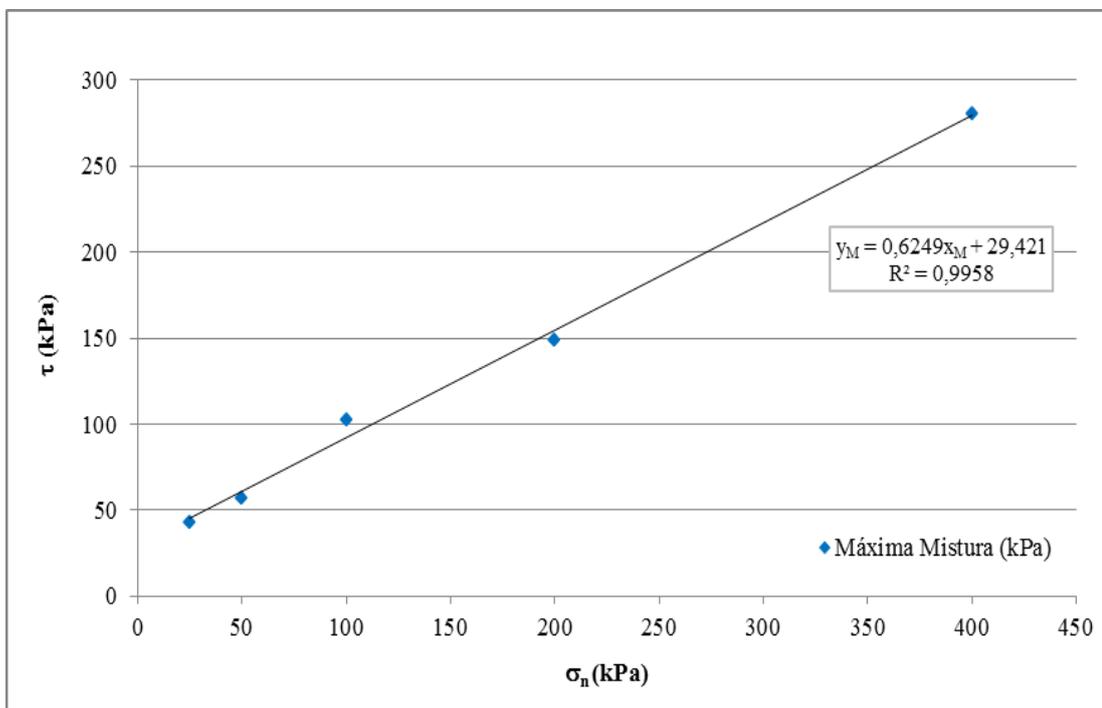


Tabela 4.19 – Valores de ângulo de atrito e coesão dos materiais.

Material	$\phi$ (°)		c (kPa)	
	Máxima	Residual	Máxima	Residual
Solo	32	32	24,49	18,18
RCC	41	43	14,03	1,20
Mistura	32	32	29,42	24,58

## 4.4 ENSAIOS DE ERODIBILIDADE

Neste item serão mostrados os resultados do estudo da erodibilidade interna e superficial apresentado pelos materiais ensaiados em laboratório.

### 4.4.1 Ensaio para análise de erodibilidade interna

Os valores do peso específico seco máximo, da umidade ótima, do grau de compactação e desvio do teor de umidade das amostras compactadas para execução do ensaio de desagregação total, desagregação parcial e crumb test encontram-se nas Tabelas 4.20 e 4.21.

Tabela 4.20 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de desagregação total e crumb test.

Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{comp}$ (%)	GC (%)	Desvio de w (%)
Solo	14,30	21,9	100,7	-0,07
RCC	17,30	17,6	98,3	-0,39
Mistura	16,00	19,1	100,6	+0,17

OBS:  $\gamma_d$  = massa específica seca máxima;  $w_{comp}$  = Umidade de compactação; GC = Grau de compactação; w = Umidade.

Tabela 4.21 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de desagregação parcial.

Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{comp}$ (%)	GC (%)	Desvio de w (%)
Solo	14,20	21,6	100,0	-0,32
RCC	17,40	18,0	98,8	+0,03
Mistura	16,00	19,1	100,6	+0,14

OBS:  $\gamma_d$  = massa específica seca máxima;  $w_{comp}$  = Umidade de compactação; GC = Grau de compactação; w = Umidade.

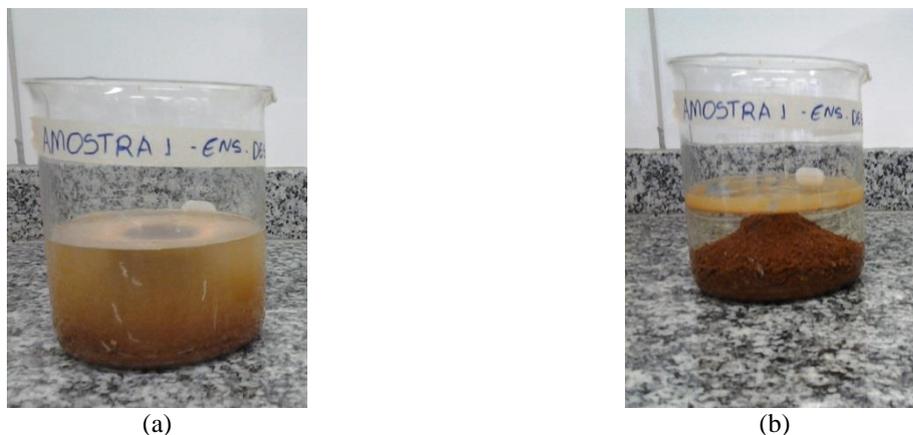
A Figura 4.28 apresenta os resultados do ensaio de desagregação por imersão total, na amostra de solo. O corpo de prova apresentou nos primeiros 30 minutos desagregação de pequenas partículas da base, sendo que no final do período de 24 h submersão, não apresentou, mas desprendimento de partículas.

Figura 4.28 – Resultado do ensaio de desagregação por imersão total da amostra de Solo: (a) CPs submergidos; (b) término do ensaio após 24h.



O ensaio de desagregação por imersão total dos CPs da amostra de RCC pode ser visualizado na Figura 4.29. A amostra apresentou desagregação quase total e uma pequena quantidade de espuma foi formada na superfície da água. Ao término do ensaio após 24 h de submersão a amostra teve desagregação total.

Figura 4.29 – Resultado do ensaio de desagregação por imersão total da amostra de RCC: (a) Corpos de prova submergidos; (b) término do ensaio após 24h.



Na Figura 4.30 consta o resultado do ensaio de desagregação por imersão total, nos corpos de prova da Mistura. O corpo de prova apresenta rompimento de pequenas partículas na base,

após alguns minutos do início do ensaio. Decorrido o tempo de 24 h a amostra apresentou desagregação da base.

Figura 4.30 – Resultado do ensaio de desagregação por imersão total da amostra de Mistura: (a) CPs submergidos; (b) término do ensaio após 24h.



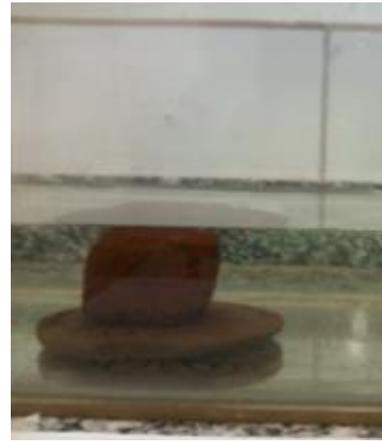
A Figura 4.31 representam os estágios do ensaio de desagregação por imersão parcial realizado na amostra de solo. Durante a etapa de saturação por ascensão capilar da amostra, não houve perdas de massa em nenhum corpo de prova. No segundo e terceiro estágio, em que a lâmina de água se encontra a 1/3 e 2/3 da altura dos corpos de prova, a amostra apresenta pequenas perdas de material. Ao ser submergido totalmente não ocorreu mais desagregação, e ao decorrer das 24h, apresentava-se no mesmo estado de quando foram submersas em água.

Figura 4.31 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial na amostra de Solo: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras, (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras, (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras e (d) final do ensaio após 24h.





(c)



(d)

As amostras de RCC são apresentadas nas Figuras 4.32. Durante a etapa de saturação por ascensão capilar da amostra, não houve perdas de massa na amostra. No estágio, em que a lâmina de água se encontra a 1/3 da altura do corpo de prova, esta sofreu desagregação de partículas na base do corpo de prova. No terceiro estágio onde a água está a 2/3 da altura do corpo de prova ocorre desagregação em quase toda base da amostra, notando-se a existência de bolhas de ar na superfície da água. No decorrer das 24h de ensaio, a amostra apresentava-se em estado de abatimento, ou seja, formando uma pilha de material desestruturado.

Figura 4.32 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial na amostra de RCC: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras, (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras, (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras e (d) final do ensaio após 24h.



(a)

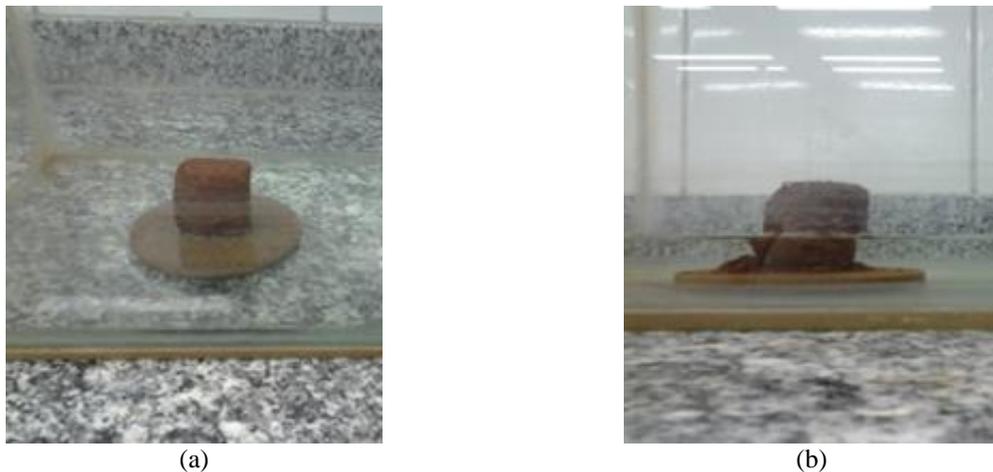


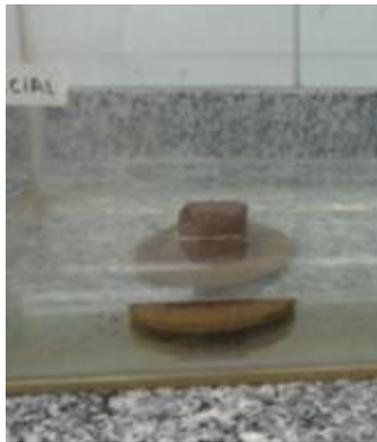
(b)



A Figura 4.33 representa os estágios do ensaio de desagregação por imersão parcial realizado na amostra da Mistura. Durante a etapa de saturação por ascensão capilar a Mistura não apresentou perdas de massa em nenhum corpo de prova. No segundo e terceiro estágio, em que a lâmina de água se encontra a 1/3 e 2/3 da altura do corpo de prova ocorreu desagregação de material na base. Ao ser submergido totalmente em água por 24 horas o corpo de prova não teve mais desagregação em relação aos estágios anteriores.

Figura 4.33 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial nas amostras de Mistura: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras, (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras, (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras e (d) final do ensaio após 24h.





(c)



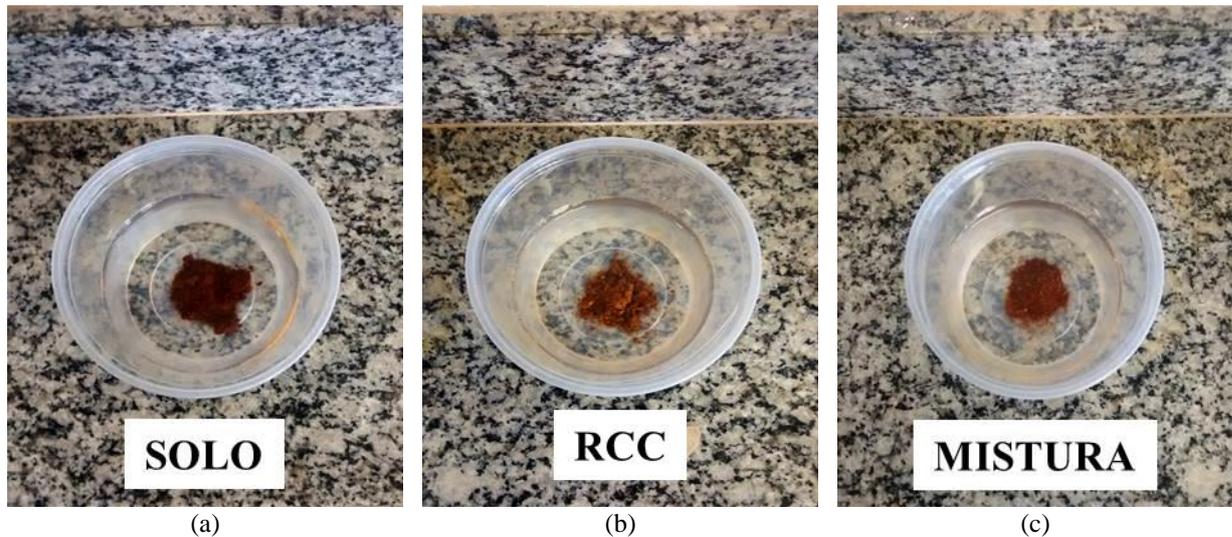
(d)

Analisando-se os resultados dos três materiais, pode-se observar que o solo não sofreu perdas de massa que seja significativa para considerar o material como não estável em presença da água ao contrário do RCC, que mostrou ser um material instável na presença de água. A mistura apresentou estabilidade próxima á obtida pelo solo, ocorrendo desagregação da base apenas na situação em que o solo foi inundado de maneira abrupta.

No ensaio de desagregação por imersão total devido à fase ar ser contínuas, ocorre geração de poropressões positivas no interior das amostras, desestruturando os corpos de prova. E no ensaio de desagregação por imersão parcial, as amostras são saturadas por capilaridade, ou seja, ao longo do ensaio, o ar é expulso e substituído por água, o que resulta em menores desagregações neste caso.

Na Figura 4.34 são apresentados os resultados do ensaio de crumb test ou dispersão rápida. Observa-se que a amostra de solo apresentou desagregação total, formando uma pilha de material desestruturado. Na amostra de RCC houve desprendimento das partículas externas ocorrendo desmoronamento nas laterais resultando na formação de uma pilha em volta da amostra. A mistura apresentou desagregação total, formando uma pilha de material desestruturado. Em nenhuma das amostras observou-se sinais de turvação na água. Sendo assim, os três materiais foram classificados como de Grau 1 (Comportamento não dispersivo) de acordo com a análise correspondente à NBR 13601 (ABNT, 1996).

Figura 4.34 – Resultados do ensaio de crumb test.



Segundo a NBR 13601 (ABNT, 1996) a susceptibilidade de ocorrer erosão interna por dispersão está associada principalmente com a relação entre a quantidade de cátions de sódio, e a quantidade de cátions de sódio, potássio, cálcio e magnésio dissolvidos na água intersticial. O sódio age no sentido de aumentar a espessura da camada dupla de água difusa, que envolve as partículas individuais de argila, daí decorrendo uma redução nas forças de atração entre as partículas, possibilitando assim que estas sejam destacadas da massa de argila com mais facilidade ocorrendo a dispersão. Como o sódio não está presente nos solos tropicais, este ensaio não é um indicativo de erodibilidade. Dessa forma, foram executados os ensaios de Pinhole test para uma melhor análise da erodibilidade interna.

Analisando os resultados dos ensaios de Pinhole test verificou que em todas as amostras a vazão não excedeu a 2,05 ml/s sob a maior carga de 1020 mm e não houve alteração da turbidez da água. Dessa forma, estas amostras foram classificadas de acordo com a NBR 14114 (ABNT 1998), como não dispersivas.

No entanto, segundo comentado no item 3.3.1, esta norma não se aplica para solos tropicais. Assim, seguindo o procedimento de Santos (1997), foram plotados gráficos de vazão versus gradiente hidráulico para cada amostra, conforme apresentados nas Figuras 4.35, 4.36 e 4.37.

Observa-se que as amostras de solo e da mistura não apresentam diferenças nos valores de vazão comparando-se as curvas quando ocorre aumento ou diminuição da carga hidráulica, o que classifica esses materiais como não erodíveis. Por outro lado, o RCC apresentou valores de vazão na curva de descarga superiores a da curva de carga, evidenciando-se a ocorrência

do processo erosivo nesta amostra.

Figura 4.35 – Resultados do ensaio de Pinhole na amostra de Solo.

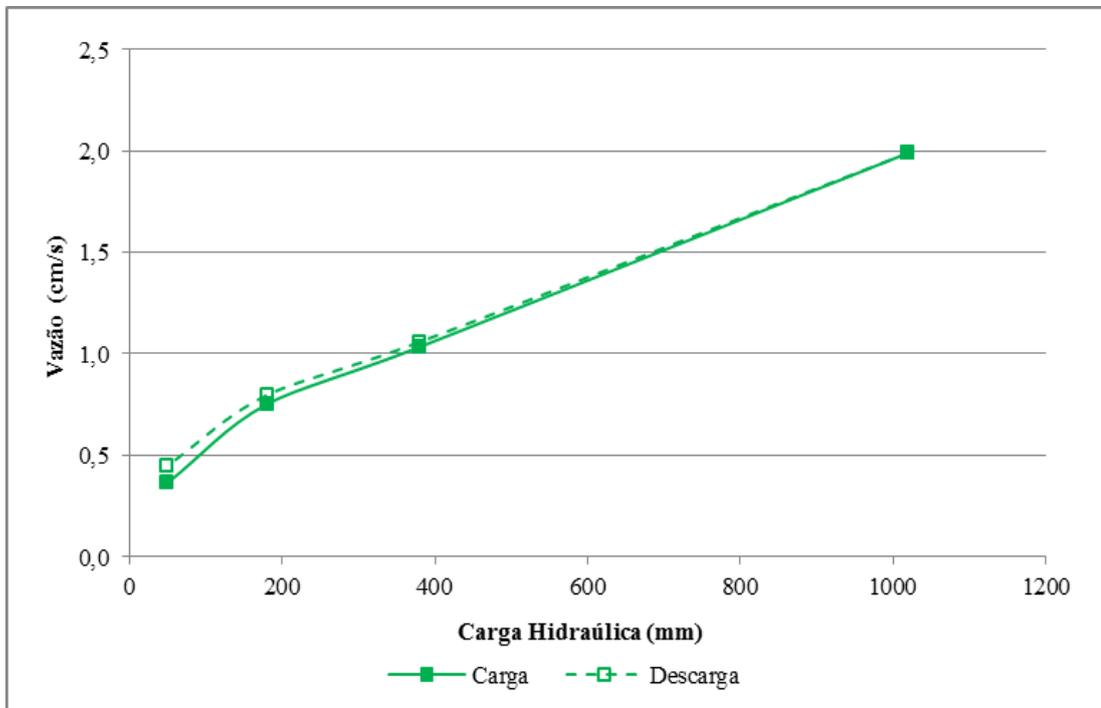


Figura 4.36 – Resultados do ensaio de Pinhole na amostra de RCC.

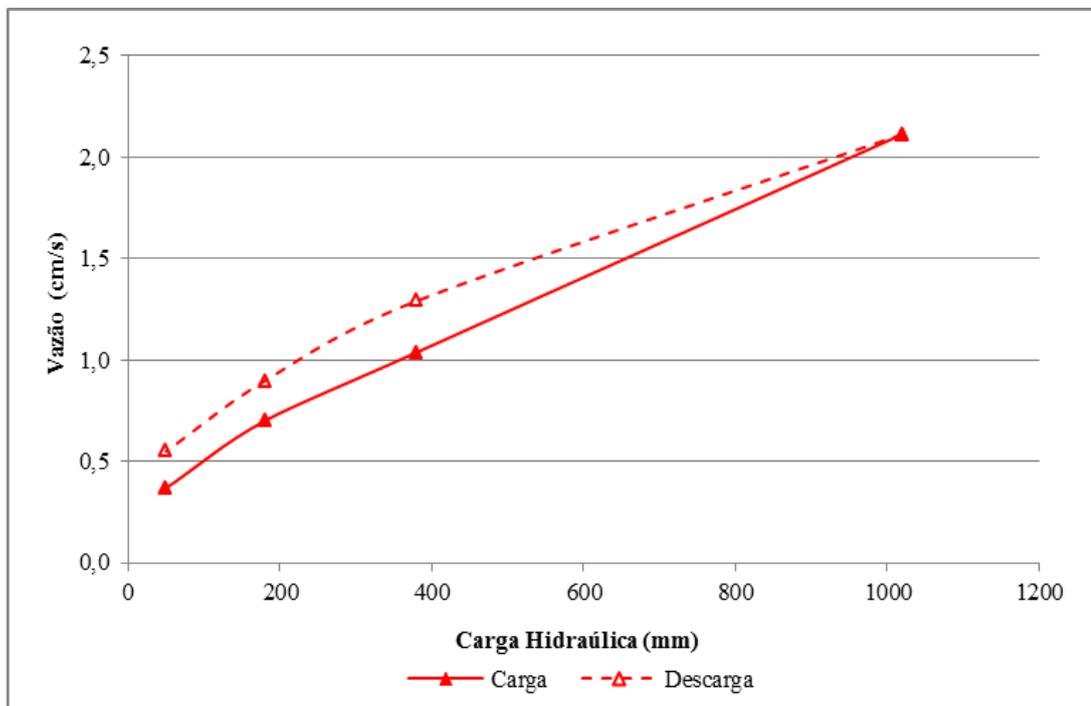
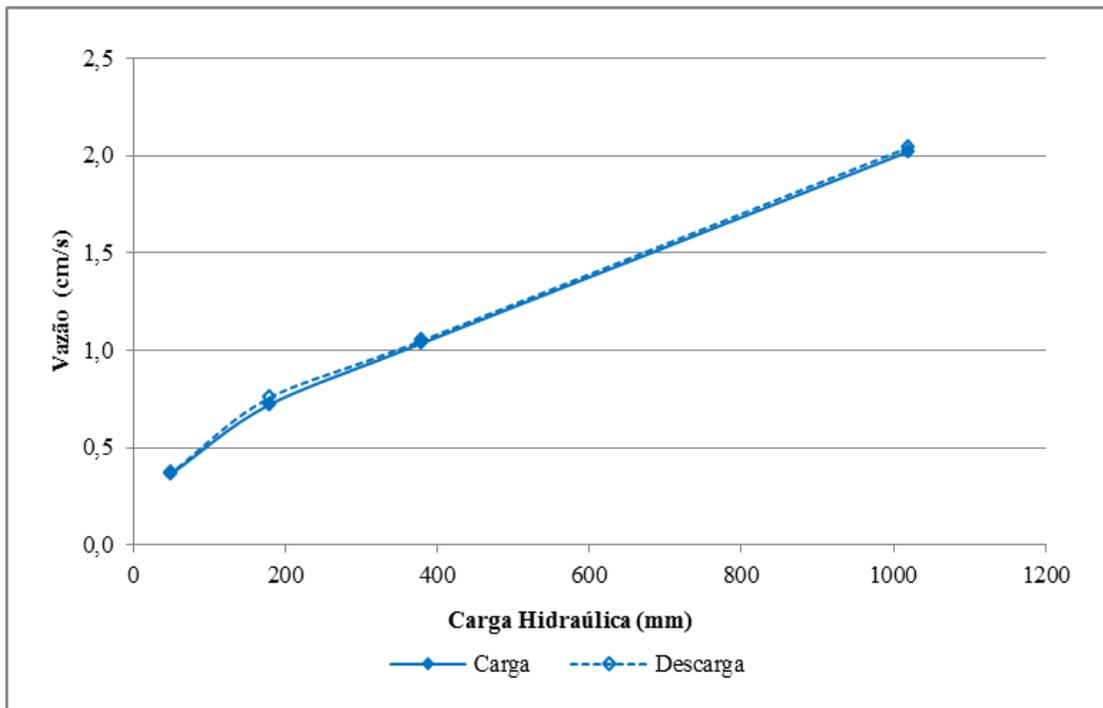
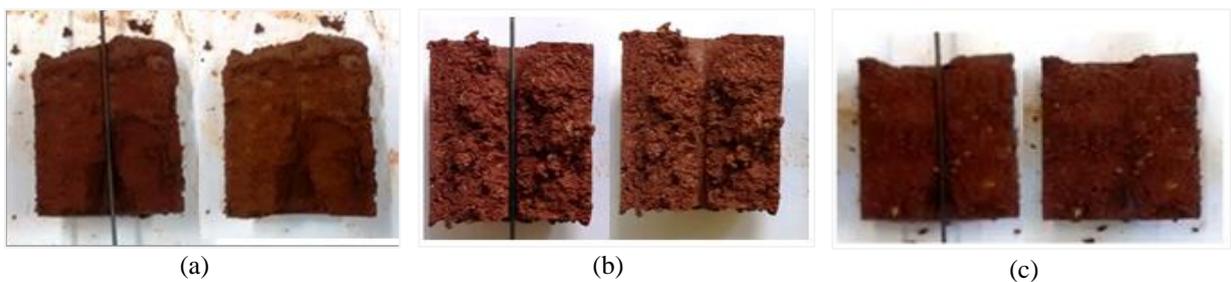


Figura 4.37 – Resultados do ensaio de Pinhole na amostra de Mistura.



Por meio da Figura 4.38 é possível visualizar os corpos de prova de cada material bipartidos após o fim do ensaio, observando-se o aumento no furo de 1 mm da amostra de RCC, corroborando com o verificado na Figura 4.41.

Figura 4.38 – Amostras de (a) solo, (b) RCC e (c) Mistura submetidas ao ensaio de Pinhole.



#### 4.4.2 Ensaio para análise da erodibilidade superficial

Os valores do peso específico seco máximo, da umidade ótima, do grau de compactação e desvio do teor de umidade das amostras compactadas para execução do ensaio de inderbitzen encontram-se na Tabela 4.22.

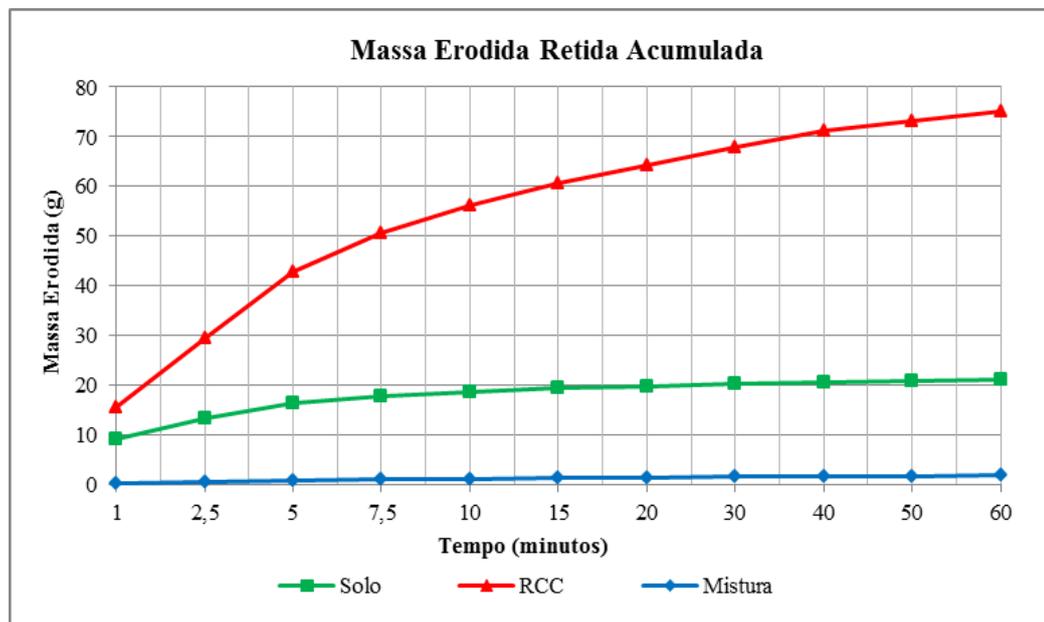
Tabela 4.22 – Características das amostras compactadas para execução do ensaio de inderbitzen.

Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{comp}$ (%)	GC (%)	Desvio de w (%)
Solo	14,20	21,6	100,0	-0,32
RCC	17,40	18,0	98,8	+0,03
Mistura	16,00	19,1	100,6	+0,14

OBS:  $\gamma_d$  = massa específica seca máxima;  $w_{comp}$  = Umidade de compactação; GC = Grau de compactação; w = Umidade.

A Figura 4.39 representa o gráfico Tempo x Massa Erodida Retida Acumulada, das amostras de Solo, RCC e Mistura respectivamente. Ressalta-se que os valores apresentados correspondem aos valores retidos na peneira de abertura igual a 0,074 mm, sem a correlação com a curva granulométrica. No entanto, considerando-se apenas os valores retidos na peneira nº 200, como normalmente são executados, desprezam-se as partículas carregadas que são menores que 0,075 mm. Dessa forma, visto que partículas menores também são carregadas, a massa erodida determinada é menor do que a real.

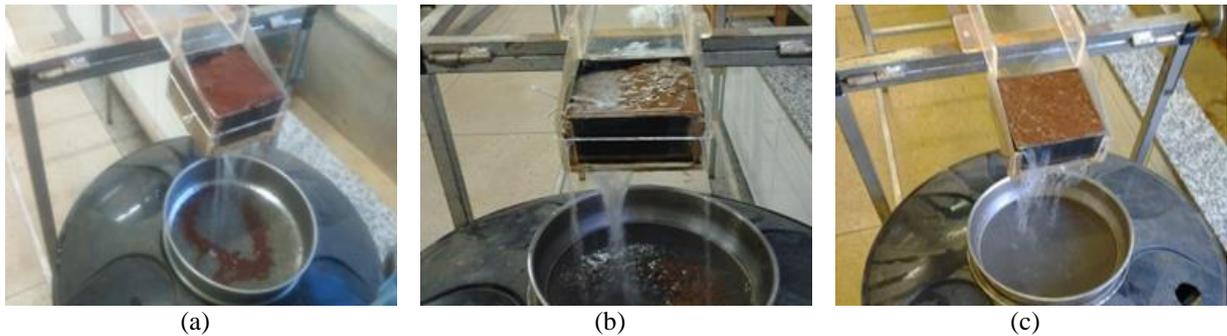
Figura 4.39 – Massa erodida acumulada, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Solo, RCC e Mistura.



Na Figura 4.40 constam as fotografias da execução do ensaio após 15 minutos de escoamento superficial para os três materiais. Pode se observar tanto no gráfico da Figura 4.39 como na Figura 4.40 que o RCC tem maiores perdas de massa que a amostra de solo, conforme o esperado por aquele ser um material não coesivo. Por outro lado a mistura apresentou menor valor de perda de massa no decorrer do ensaio.

Para considerar a massa erodida passante na peneira de abertura igual a 0,075 mm, utilizou-se a proposta de alteração da metodologia feita por Almeida, Rocha e Gitirana Jr. (2013), que consideram a existência de uma similaridade entre a porcentagem de solo erodida com a curva granulométrica.

Figura 4.40 – Execução do ensaio de Inderbitzen: (a) Solo; (b) RCC e (c) Mistura.



Nas Figuras 4.41, 4.42 e 4.43 são apresentadas as curvas granulométricas do Solo, do RCC e da Mistura e as curvas obtidas por meio do peneiramento da massa de solo erodida. Observa-se que nestes casos, não foram observadas boas correlações entre o peneiramento do material desagregado no aparelho de Inderbitzen com o peneiramento fino utilizado na construção da curva granulométrica. Analisando as três amostras verifica-se que não ocorre similaridade para tamanhos de grãos referentes à areia, o que deve estar relacionado à dificuldade de carregamento dessas partículas com a vazão aplicada no ensaio (50 ml/s). Acredita-se que este erro é menor que não considerar a fração que passa na peneira de abertura 0,075 mm.

Figura 4.41 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica da amostra de Solo.

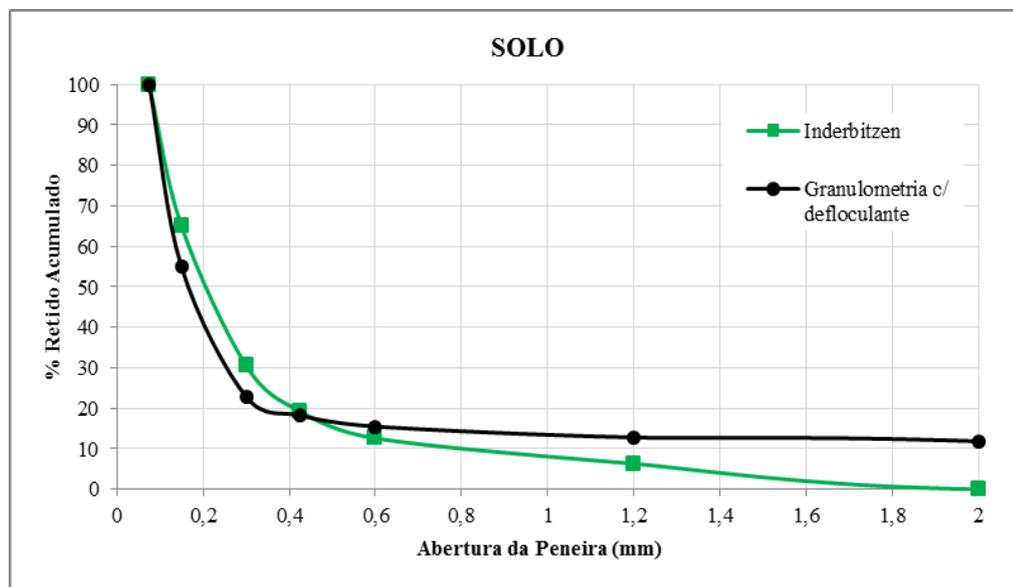


Figura 4.42 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica da amostra de RCC.

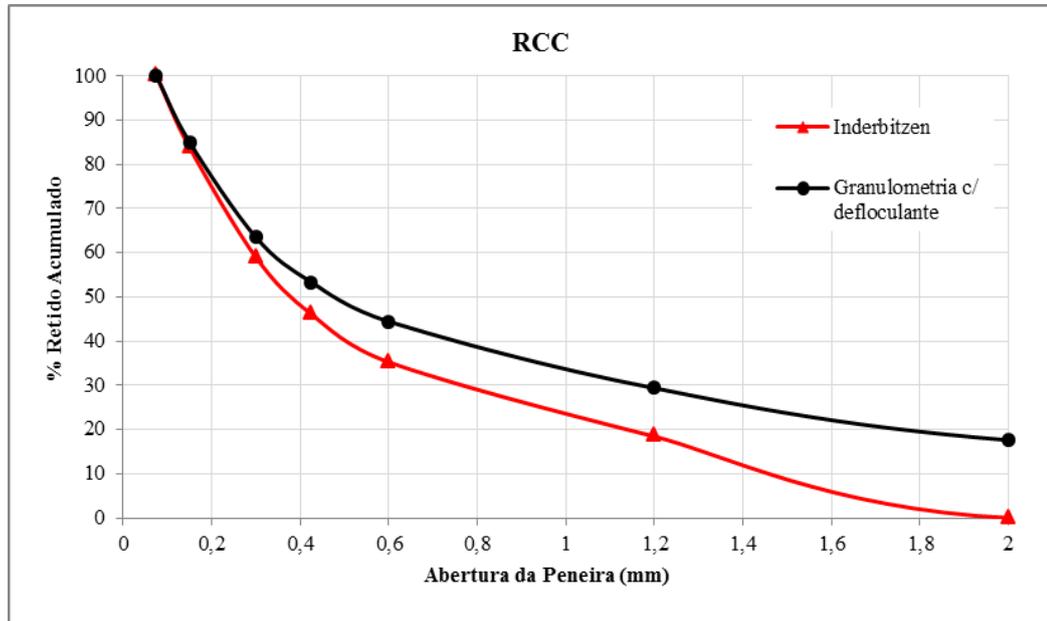
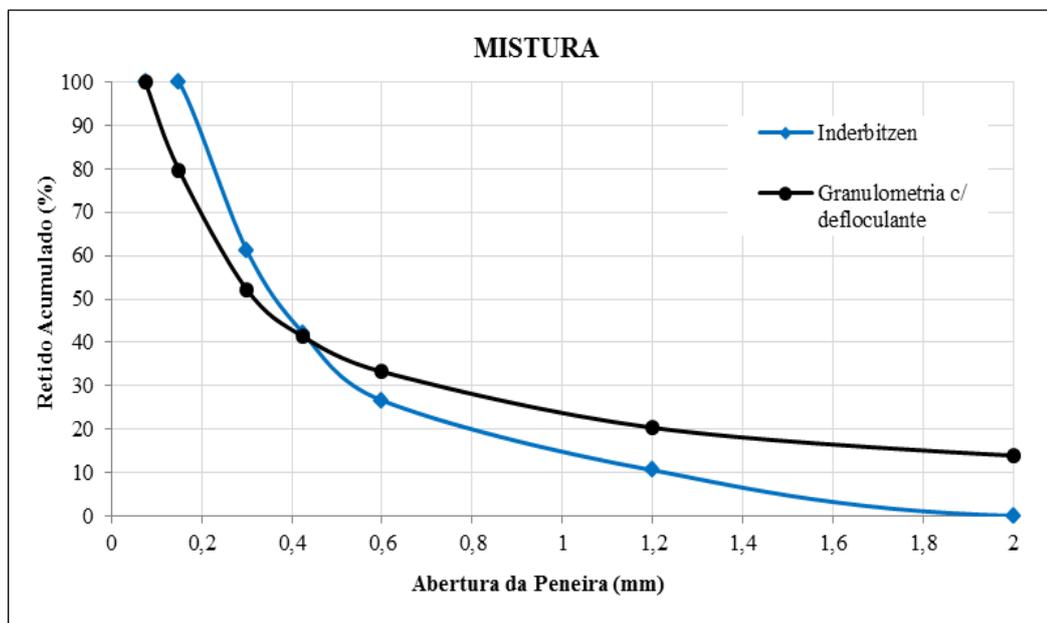
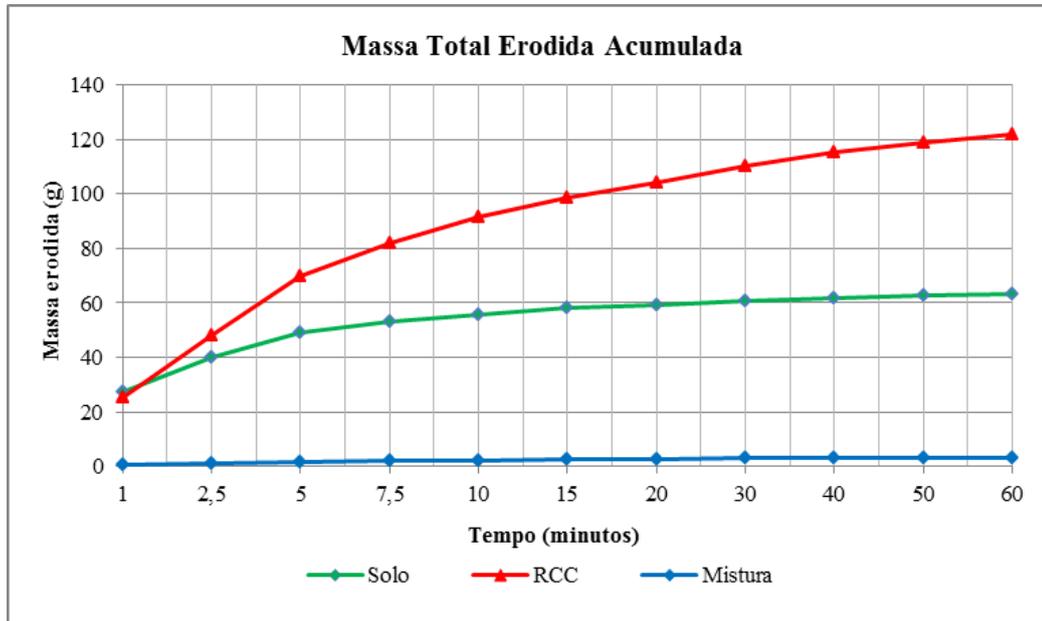


Figura 4.43 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica da amostra de Mistura.



Para considerar a massa erodida passante na peneira nº 200 foram realizadas as correções por meio da Equação 3.1 do item 3.3.2 para a amostra de solo, RCC e mistura sendo os resultados visualizados na Figura 4.44.

Figura 4.44 – Massa total erodida acumulada corrigida, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Solo, RCC e Mistura.



Observa-se na Figura 4.44 que a amostra de RCC continuou tendo uma perda de massa maior em relação ao Solo e a Mistura devido a sua composição granulométrica. E a Mistura teve uma pequena perda de material comparada aos outros materiais. Por outro lado à mistura, por ter partículas mais finas preenchendo os vazios do RCC, confere a este uma maior resistência reduzindo a erodibilidade superficial.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES**

Mediante os resultados dos ensaios e de suas análises o Solo e a Mistura foram caracterizados como um silte de baixa compressibilidade e o RCC como uma areia siltosa. Em relação á classificação para solos tropicais, os valores de Superfície Específica (SE) e de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) das amostras, obtidos por meio do ensaio de azul de metileno, são valores típicos de solos com predomínio do argilomineral caulinita e estes resultados são coerentes com os obtidos por meio do cálculo do Índice de Atividade (IA). Em relação aos ensaios de pastilha, o RCC foi classificado como não laterítico, o que se justifica pelo fato deste material apresentar maior quantidade de siltedo que de argila.

O Solo e a Mistura atendem aos requisitos de permeabilidade propostos para a camada superior da cobertura, mas não atendem para a barreira hidráulica, devido principalmente ao arranjo granulométrico que possui estes materiais. E a permeabilidade do RCC não atende o requisito para ser utilizado em nenhuma dessas camadas.

Ao se considerar os níveis de tensões a que podem ser submetidos estes materiais na execução da camada de cobertura na determinação da permeabilidade a redução destes valores não foi suficiente para viabilizar o uso do Solo e da Mistura como barreira hidráulica e nem o RCC como camada de cobertura (camada de superfície associada à camada de proteção).

Os valores de permeabilidade dos materiais reduzem-se consideravelmente com o aumento de sucção. Assim, caso estes materiais não atinjam teores de umidade maiores que a umidade ótima, o Solo e a Mistura podem ser utilizados como barreira hidráulica e o RCC apenas como camada de proteção e superfície.

A influência dos coeficientes de deformabilidade são maiores que da tensão de pré-adensamento, e que a deformação no RCC é maior que a do Solo e a Mistura têm comportamento próximo ao do RCC.

Devido a não estabilização da deformação ao longo das 24 horas verificado para todos os valores de carregamento, o coeficiente de adensamento vertical ( $C_v$ ) foi calculado a partir da

permeabilidade corrigida ( $K_{corr}$ ), onde se verificou que ocorre um aumento do valor de  $C_v$  com o acréscimo da tensão para todos os materiais. .

Quanto aos ângulos de atritos e a coesão obtidos o RCC teve valores semelhantes a de solos granulares  $41^\circ$  e 14 kPa, respectivamente. A amostra de Solo e a Mistura obtiveram valores típicos de argilas de baixa plasticidade com ângulo de atrito de  $32^\circ$  e com a coesão do Solo de 24 kPa e da Mistura de 29 kPa.

Na análise da erodibilidade interna o Solo e a Mistura são classificados como um material não desagregável e não dispersivo e o RCC é um material facilmente desagregável, mas não dispersivo. No entanto, vale ressaltar que como o sódio não está presente nos solos tropicais, a não dispersibilidade não é um indicativo de erodibilidade. Por isso que, nos ensaios de pinhole test, o RCC apresentou valores de vazão na curva de descarga superiores a da curva de carga, evidenciando-se a ocorrência do processo erosivo nesta amostra.

Em relação ao ensaio de Inderbitzen, o RCC tem maiores perdas de massa que a amostra de solo, conforme o esperado por aquele ser um material não coesivo. Por outro lado a mistura apresentou menor valor de perda de massa no decorrer do ensaio.

Por fim, a partir dos resultados encontrados verifica-se que o acréscimo de solo tropical ao RCC melhora o comportamento destes materiais assemelhando-se tecnicamente aos materiais que compõem um sistema de cobertura de aterro sanitário.

## **5.1 SUGESTÕES**

Como sugestões para trabalhos futuros recomendam-se:

A execução dos ensaios hidromecânicos e de erodibilidade em amostras com distintos teores de solos tropicais para melhor compreender a influência da adição de solo no comportamento geotécnico do RCC.

A realização de ensaios com RCC provenientes de várias usinas de reciclagem a fim de verificar a homogeneidade em relação ao comportamento geotécnico destes materiais. Neste caso, é importante quantificar e qualificar os componentes do RCC utilizado na pesquisa.

O dimensionamento de sistemas de cobertura executados com a utilização de Solo, RCC e

Mistura em suas diversas camadas a fim de definir a melhor constituição. Neste caminho, propõem-se os estudos de viabilidade do RCC graúdo como camada drenante.

Adicionar geotêxtil na Mistura a fim de verificar se é possível melhorar algumas das propriedades do material.

Por fim, recomenda-se analisar a qualidade ambiental da água que passa pelas amostras no ensaio de erodibilidade e verificar a ocorrência de quebra dos grãos após os ensaios mecânicos.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - **NBR 7181** - Solo-Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a, 13p.
- ABNT - **NBR 6459** - Solo - determinação do limite de liquidez. São Paulo, 1984b, 6p.
- ABNT - **NBR 7180** - Solo - determinação do limite de plasticidade. São Paulo, 1984c, 3p.
- ABNT - **NBR 6508** - Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984d, 8p.
- ABNT - **NBR 6457** - Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 1986a, 9p.
- ABNT - **NBR 7182** - Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986b, 10p.
- ABNT - **NBR 10838** - Solo - Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática. Rio de Janeiro, 1988, 4p.
- ABNT - **NBR 12007** - Solo - Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990, 13p.
- ABNT - **NBR 6502** - Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995, 18p.
- ABNT - **NBR 13601** - Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test). Rio de Janeiro, 1996, 2p.
- ABNT - **NBR 14114** - Solo – Solos argilosos dispersivos – Identificação e classificação por meio do ensaio de furo de agulha (pinhole test). Rio de Janeiro, 1998, 8p.
- ABNT - **NBR 14545** - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2000, 12p.
- ABNT - **NBR 10004** - Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a, 71p.
- ABNT - **NBR 15115** - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação- Procedimentos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004b, 10p.
- ABNT - **NBR 15116** - Agregados reciclados de resíduos Sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Classificação Rio de Janeiro, 2004c, 18p.
- AFFONSO, F. J. A. **Caracterização de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) Para Uso em Camadas Drenantes de Aterros de Resíduos Sólidos**. 2005. 160f. Tese. (Pós-Graduação de Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- AGUIAR, V. G. **Bacia hidrográfica do Córrego Granada – Aparecida de Goiânia – GO: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana**. 2009. 97f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Goiás, 2009.
- ALMEIDA, J. G. R.; ROCHA, M. F.; GITIRANA JR., G. de F. N. A influência da sucção na erodibilidade de um solo compactado: estudo de caso em um solo erosivo do Córrego Barreiro. In: 3º SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE E 6º SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS – GEOCENTRO, 2013, Cuiabá – MT. **Anais...** Cuiabá: KCM Editora, 2013. 302p. 62-69.

- AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzido com resíduos de construção e demolição do município de Juranda-PR.** 2011. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá, Paraná, 2011.
- AMORIM, E. F. **Viabilidade técnica econômica de misturas de solo-RCD em camadas de base de pavimentos urbanos estudo de caso: município de Campo Verde – MT.** 2013. 173f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** 2000. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012.** São Paulo, 2014, 116p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080** - Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. New York, 2004. 9p.
- BANTHIA, N.; CHAN, C. Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete. **Concrete International**, v. 22, n. 06, p. 41-45, 2000
- BARROS, M. C. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura.** 2005. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio Janeiro, 2005.
- BARROSO, I. M. **Camadas de Cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos: Estudo Preliminar de Casos.** 2008. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.
- BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica.** 2007. 172f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- BOSCOV, M. E. G. **Comportamento de Solos Tropicais em Aplicações Geoambientais.** 2004. 292f. Tese (Livre-Docência) - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J; MORTARI, D.; ARAKI, M.S; PALMEIRA, E.M. Aspectos relativos à colapsividade da argila porosa de Brasília, Distrito Federal. *In X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 1994. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Ed. ABMS. 1994, p. 1157-1163.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. C. LEROUEIL, S. Modelo de normalização da curva característica. **32º Reunião Anual de Pavimentação.** Brasília, DF, p.96-106. 2000.
- CARNEIRO, A.P.; CASSA, J.C.S.; BRUM, I.A.S. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. **Projeto entulho bom.** 2001. EDUFBA, Salvador, Caixa Economica Federal. 1º edição. 2001. p.312
- CHILDS, E. C., COLLIS-GEORGE, N. The permeability of porous materials. **Proceedings of the Royal Society**, Ser. p. 201:392-405, 1950.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil.**
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Altera o art. 3º da Resolução nº 307, de 5

de julho de 2002, Estabelecendo nova classificação para o gesso. **Resolução N. 431 do CONAMA, de 25/05/2011**, p. 123, 2011.

CORCUERA CAVALCANTI, D.K. **Políticas para reciclagem de resíduos da construção civil**. Disponível em: <[www.geocities.com/politicaparaareciclagemderesiduosdaconstrucao\\_civil.htm](http://www.geocities.com/politicaparaareciclagemderesiduosdaconstrucao_civil.htm)> Acesso em: 27/11/ 2012.

DAS, B.M. *Advanced Soil Mechanics*. **Taylor & Francis**, New York, USA, 567 p, 2008.

DERSA - DIRETRIZES PARA IDENTIFICAÇÃO EXPEDITA DO SOLO LATERÍTICO. **Método da Pastilha**. São Paulo, 2006. 10p.

DHIR, R. K.; LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T. Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. **Journal of Institution of Civil Engineering, Structures and Buildings**, v.134, n. 08, p. 257-274, 1999.

DORSTHORST, B.J.H; HENDRIKS, Ch. F. Re-use of construction and demolition waste in the EU. In: **CIB Symposium: Construction and Environment – theory into practice.**, São Paulo, 2003. Proceedings. São Paulo, EPUSP, 2003.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Researches**, v.30, p.211-223, fev.1994.

FABBRI, G.T.P. **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno**. 1994.176f. Tese (Doutorado de Engenharia de São Carlos) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo,1994.

FÁCIO, J. A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. 1991. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica). Universidade de Brasília. Brasília, 1991.

FREDLUND, D.G., & XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, 31, 521–532. 1994.

P. FILHO, R.; CHIAVINI, P. P. R.; CIMINO, R. J. P.; GUIMARÃES, S. A. V. **Gestão de resíduos da construção civil e demolição no município de São Paulo e normas existentes**. 2007. Disponível em: <[http://www.ipep.edu.br/portal/publicacoes/revista/rev07\\_01/art6\\_gestao.pdf](http://www.ipep.edu.br/portal/publicacoes/revista/rev07_01/art6_gestao.pdf)>. Acesso em: 11/04/2013.

FORTES, R.M; MERIGHI, J.V.; ZUPPOLINI NETO, A. Método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais. In: II Congresso Rodoviário Português, 2002. Lisboa. **Anais...** Lisboa. 2002.

GITIRANA G.; FREDLUND D.G. Soil-water characteristic curve equation with independent properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. ASCE. Pag. 209-212.2004.

HANSEN, T.C. *Recycled of demolished concrete and masonry*. London: Chapman & Hall, 316p. **Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete**, p. 1-160. RILEM TC Report 6. 1992.

HOOD, R. S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição com agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2006. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2006.

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. **Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps**, 1 ed. New York, ASCE PRESS,1997.

LAN, T.N. L'essai au bleu de méthylène - Avant-projet de Mode Opératoire, Laboratoire Central Des Ponts et Chaussées, Département de Géotechnique. **Section de minéralogie et pétrographie appliquées**, 16 p. 1979.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de construção e demolição**. 2001. 290f. Tese (Doutorado de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande Sul Rio Grande do Sul, 2001.

LEITE, F.C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 216f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Transporte) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LEVY, S. **Reciclagem do entulho de construção civil para utilização como agregado de argamassas e concretos**. 1997.146f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

MARINHO, F.A.M. Medida de sucção com o método do papel. filtro. In: **X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundação**, Foz do Iguaçu, p 515-522, 1994.

MARINHO, F.A.M.; OLIVEIRA, O.M. The filter paper method revisited. **Geotech. Test. J.** 29:1-9, 2006.

MASCARENHA, M. M. A. **Influência da microestrutura no comportamento hidromecânico de uma argila siltosa não saturada incluindo pequenas deformações**. 2008. 180f. Dissertação (Tese de doutorado). Departamento de Engenharia e Ambiental. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

MAULTZSCH, M.; MELLMANN, G. Properties of large scale processed building rubble with respect to the reuse as aggregate in concrete. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub, p. 99-107. 1998.

METOGO, D.A.N. **Construção e avaliação inicial de um trecho de pavimento asfáltico composto de misturas de fosfogesso, solo tropical e cal**. 2010. 191f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiás, 2010.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.

MUALEM, Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, **Water Resour. Res.**, 12,513-522,1976.

NOGAMI, J.S; VILLIBOR, D.F. **Identificação Expedita dos Grupos de Classificação MCT para Solos Tropicais**. Foz do Iguaçu, 1994. **Anais...** 10° COBRAMSEF- Ed, ABMS, Vol. 4, p 1293-1300. 1994.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. 2 ed. São Paulo, Editora Vilibor, 1995. 240p.

OLIVEIRA, D.A.F. **Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos**. 2002. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília. 2002.

OLIVEIRA, J. C. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados de resíduos**

**sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis.** 2007. 167f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília. 2007.

OLIVEIRA, J. C.; REZENDE, L. R.; GUIMARÃES, R. C.; CAMAPUM, J. C.; SILVA, A. L. A. Evaluation of a flexible pavement executed with recycled aggregates of construction and demolition waste in the municipal district of Goiânia – Goiás. *In: International Symposium On Pavement Recycling*, 2005. São Paulo. p 15. 2005.

OLIVEIRA FILHO, J.J.P. e BOSCOV, M.E.G. Estudo da viabilidade técnica de utilização de monocobertura em aterros sanitários no Estado de São Paulo. **GEOSUL**, 2004, Curitiba, PR.

PEJON, O.J. **Mapeamento geotécnico da Folha de Piracicaba - SP (Escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos.** 1992. 225f. Tese (Doutorado. em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Paulo. 1992.

PINTO, T. P. **Manual de uso dos resíduos de construção reciclados.** São Paulo: I & T, 1998.

PINTO, C. S. **Curso de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** 3. ed. São Paulo, 367p. 2006.

QUINTANILHA, F. S. **Avaliação de utilização e desempenho de resíduos de construção e demolição em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis.** 2008. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente). Escola de Engenharia Civil - Universidade Federal de Goiás. Goiás. 2008.

RAFI, M. M. QADIR, A.; SIDDIQUI, S. H. Experimental testing of hot mix asphalt mixture made of recycled aggregates. **Waste Manag Res published online**, 18 May. 2010.

RESPLANDES, H. M. S. **Estudo Ambiental e Mecânico da Aplicação do Agregado Reciclado na Estrutura de Pavimentos Flexíveis.** 2007. 283f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2007.

RIBEIRO, F. **Estudo da Aplicação do Agregado Reciclado da Base de um Pavimento Flexível.** 2006. 173f. Dissertação (Mestrado em do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás. Goiás, 2006.

ROMÃO, P. de A. **Mapeamento geotécnico da região de águas claras (DF): Utilização de recursos de geoprocessamento e de novos métodos de ensaio para caracterização de solos tropicais.** 1995. 182f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília. Brasília, 1995.

SANTOS, E. F. **Estudo Comparativo de Diferentes Sistemas de Classificações Geotécnicas Aplicadas aos Solos Tropicais.** 2006. 145f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

SANTOS, dos R. M. M. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Município de Goiânia.** 1997. 138p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** São Carlos-SP. 2007. 168f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2007.

SCHNEIDER, D. M.; PHILIPPI Jr., A. Gestão pública de resíduos da construção civil no

município de São Paulo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 21-32, out./dez. 2004.

SHACKELFORD, C. D. Modeling and Analysis in environmental geotechnics: An overview of practical applications. In: **Second International Congress on Environmental Geotechnics**. 1997. Japan, v.3, p. 1375- 1404. Disponível em:

[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/download/3571/1977](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/download/3571/1977), acessado em 03/12/2013.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; DECKER, RS; STEELE, E. F. Pinhole test for identifying dispersive soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**. ASCE, v. 102, n. 1, p.69-85. 1976.

SILVA, A. S. R.. Argamassa inorgânica com o emprego de entulho reciclado. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: UFBA/ANTAC, 1997.p. 203-206.

SILVA, M. T. M. G. S. **Metodologia para determinação de parâmetros para solos não saturados utilizando ensaios com unidade conhecida**. 2009. 297f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia e Ambiental. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Brasília. Distrito Federal. 2009.

SILVA, J. F. P. **Reciclagem de resíduos sólidos**. 2006. Unieuro – Centro Universitário Euroamericano. Brasília, Novembro de 2006. Disponível em: <<http://br.monografias.com/trabalhos2/reciclagem-residuos/reciclagem-residuos.shtml>>. Acesso em: 08/04/2013.

SIMONS, B. P.; HENDERIECKX, F. Guidelines for demolition with respect to the reuse of building materials: guidelines and experiences in Belgium. In: International Rilem Symposium, 3. 1993, Odense, Denmark. **Proceedings ...** Great Britain: E & FN Spon, p.25 – 34.

SNSA. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos**, 2010. Brasília: MCIDADES/SNSA, 2012.

TERZAGHI, K. Theoretical Soil Mechanics. **Wiley**. New York, p. 510. 1943.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VAN DER WEGEN, G.; HEVERKORT, R. Recycled construction and demolition wastes as a fine aggregate for concrete. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). Sustainable Construction. **Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 333-345.

VARGAS, M. **The concept of tropical soils. First International**. In: Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. 1985.Brasilia. **Anais: ISSMFE**. p. 101-134.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J.R.; SERRA, P.R.M; NETO, A.Z. **Pavimentação de baixo custo para vias urbanas**. 2009. São Paulo. 2º edição. p.213.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto**. 1997.140f. Dissertação (Mestrado em Meio ambiente) – Departamento de Saneamento e Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

