

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

**AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO EM CAMADAS DE  
COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS UTILIZANDO MATERIAIS  
ALTERNATIVOS**

**CONCEIÇÃO DE MARIA CARDOSO COSTA**

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

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.TD-108/15**

**BRASÍLIA/DF, JUNHO/2015**

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


**AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO EM CAMADAS DE  
COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS UTILIZANDO MATERIAIS  
ALTERNATIVOS**

**CONCEIÇÃO DE MARIA CARDOSO COSTA**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

**APROVADA POR:**

**APROVADA POR:**



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



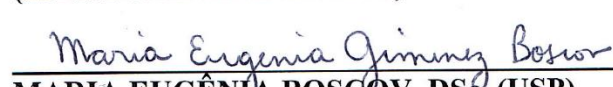
\_\_\_\_\_  
**CLÁUDIA MARCIA COUTINHO GURJÃO, PhD (UnB)**



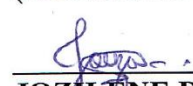
\_\_\_\_\_  
**JOSE CAMAPUM DE CARVALHO, D.Sc. - UnB**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**



\_\_\_\_\_  
**ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD. (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**



\_\_\_\_\_  
**MARIA EUGÊNIA BOSCOV, DSc. (USP)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**



\_\_\_\_\_  
**JOZILENE DE SOUZA, DSc. (IFRN)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 01 de JUNHO de 2015.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, CONCEIÇÃO DE MARIA CARDOSO	
Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos.	
xviii, 163 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2015)	
Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Aterros Sanitários	2. Camada de Cobertura
3. Materiais Alternativos	4. Ressecamento e Fissuração
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, C.M.C. (2015). Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-108/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 163 p.

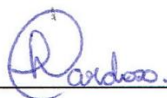
## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Conceição de Maria Cardoso Costa

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos.

GRAU: Doutor ANO: 2015

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



---

Conceição de Maria Cardoso Costa  
Quadra 208, Lote 2/4, Ap. 601 B  
Águas Claras – Brasília/DF  
CEP: 71926-500  
conceicao.costa@ifb.edu.br

*“Um sonho sonhado sozinho é um sonho. Um sonho sonhado junto é realidade e a possibilidade de realizarmos um sonho é o que torna a vida interessante.” [adaptado]*

*Raul Seixas e Paulo Coelho*

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha família, que esteve ao meu lado em todos os momentos desta longa jornada, torcendo, encorajando, construindo, pondo a mão na massa, quer dizer, no solo, e alegrando-se comigo a cada degrau dessa conquista. A vocês meu eterno agradecimento e incondicional amor.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e pela capacidade de superar, pela fé, os obstáculos que se colocaram ao longo do caminho. Acredito que precisei passar por cada momento para aprender e crescer pessoal e profissionalmente.

Ao meu esposo, Bruno, e aos meus filhos, Daniel e Micael, pelo carinho, paciência e ajuda em tantos momentos da pesquisa. Vocês são a razão do meu caminhar e não teria chegado até aqui sem o apoio de vocês.

Ao meu pai, Silvio, que vivenciou comigo momentos de avanços e retrocessos ao longo desse trabalho, executando os equipamentos projetados para pesquisa. Foram dias de muito suor. Sua ajuda e presença foram valiosas para essa conquista.

À minha mãe, Magnólia, que sonhou subir a escada da Faculdade de Engenharia, mas transformou esse sonho em dedicação às suas filhas, agradeço por todo amor, orações e torcida. Sem o seu suporte não teria chegado aqui.

A todos os meus familiares, que de tantas formas contribuíram para mais esta vitória.

Aos meus orientadores, Luís Fernando e Cláudia Marcia, pela confiança e incentivo em muitos momentos de dúvidas e desânimo. Muito mais que orientações profissionais vocês me ensinaram o valor da verdadeira amizade.

Aos alunos de Projeto Final, PIBIC, PIVIC e Jovens Talentos que integraram o grupo de pesquisa e auxiliaram na concretização deste trabalho: Gustavo, Ícaro, Allan, Guilherme, Thiago Rodrigues, Lucas, Tiago Tarquino, Amanda, César, Bruno, Pedro, Robson, Paulo Henrique, Paulo Vitor, Guilherme Amaral, Jaqueline e Tomás. Olhando para trás vejo como trabalhamos e quanto o esforço de cada um de vocês foi importante.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade de Brasília, pela disponibilização dos equipamentos laboratoriais para execução dos ensaios.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília pelo apoio e liberação de parte de minha carga horária de trabalho para realização desta pesquisa. A todos os colegas que torceram por mim e me substituíram tornando possível a conclusão da pesquisa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, nas pessoas dos Professores Ênio Fernandes Amorim e Jozilene de Souza, pela realização dos ensaios mineralógicos.

Às empresas Sete Engenharia, Areia Bela Vista, Companhia de Água e Esgoto de Brasília – CAESB e Secretaria de Limpeza Urbana de Brasília – SLU pelo apoio para realização desta pesquisa.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

## RESUMO

A produção de resíduos sólidos urbanos tem relação direta com o desenvolvimento econômico e cultural das populações. Neste sentido, diversos segmentos da sociedade têm demonstrado preocupação quanto à disposição segura e adequada dos resíduos sólidos urbanos, sendo os aterros sanitários a tecnologia mais recomendada devido ao seu maior controle construtivo e, conseqüentemente, minimização dos impactos ambientais gerados. Para garantir o bom funcionamento dos aterros é de fundamental importância que os sistemas de cobertura apresentem baixa permeabilidade e resistência aos esforços mecânicos e às intempéries. No entanto, os efeitos devido ao processo de secagem e umedecimento, aos quais estão submetidas estas estruturas, podem gerar fissuras e criar caminhos preferenciais de fluxo prejudicando a selagem do aterro e sua conseqüente sustentabilidade. Neste contexto, esta pesquisa teve por objetivo avaliar o comportamento de misturas de solo com incorporação de materiais alternativos como agregado miúdo reciclado, obtido de Resíduos da Construção Civil (RCC) britado, e fibras de PET, produzidas a partir do filetagem de garrafas de refrigerantes usadas, visando diminuir o efeito de retração e da formação de fissuras em camadas de cobertura de aterros sanitários. Para avaliação do efeito da inclusão dos resíduos nas propriedades das misturas, foram inicialmente realizados ensaios hidráulicos e mecânicos, de modo a definir o percentual adequado de adição. Foram avaliados percentuais de adição, em relação à massa de solo seco, de 10%, 20%, 30% e 40% de RCC, e os percentuais de 0,4%, 0,6%, 0,8% e 1,0% de fibras de PET, variando o comprimento e a geometria lateral dessas fibras. A primeira etapa do programa experimental constou de ensaios de caracterização, compactação, resistência a compressão simples, resistência ao cisalhamento e resistência à tração por compressão diametral, além de ensaios de permeabilidade, sucção, retração e ensaios preliminares de ressecamento. Os resultados destes ensaios permitiram a definição do percentual de adição de RCC e PET a serem utilizados nos ensaios de ressecamento. Para tanto, foi desenvolvida uma metodologia com a construção de um simulador de radiação solar e de chuva que possibilitou a avaliação comparativa das amostras quando submetidas a ciclos alternados de umedecimento e secagem (W-D). Durante os ensaios, o processo de ressecamento foi registrado por uma câmera fotográfica digital, e a amostra instrumentada com tensiômetros e sensores de temperatura e umidade. Foi avaliada ainda a perda de massa, utilizando-se sob a amostra uma balança digital. A evolução das fissuras superficiais foi analisada utilizando-se a técnica de processamento de imagens e as dimensões das fissuras na superfície foram quantificadas determinando-se o CIF (*Crack Intensity Factor*), relação entre a área de superfície das fendas e a área total da superfície da amostra. Os resultados obtidos mostraram que o comportamento quanto ao ressecamento e à formação de fissuras foi significativamente afetado pelos ciclos de umedecimento e secagem (W-D) e pela adição de materiais alternativos, alterando o padrão de fissuração, retardando a formação de fissuras e reduzindo o fator de intensidade de fissuração, quando comparado ao solo natural. Estes resultados indicam a possibilidade de utilização desses materiais como adição ao solo de cobertura de aterros sanitários.

**Palavras-chave:** camada de cobertura, ressecamento, fissuração, resíduos da construção civil, fibras de PET.

## ABSTRACT

The production of urban waste is directly related to economic and cultural population development. In this context there is a modern and real concern with the safe and adequate disposal of the solid municipal waste, being the landfill disposal the most recommended one for its higher constructive control and subsequent minimization of environmental impact. To guarantee correct function of landfills is very important that cover liner present low permeability and high strength. However, this structures are exposed to dry and wetting cycles and can crack, creating preferential paths to water flow and reducing the effectiveness of sealing. This research intend to evaluate behavior of soil mixtures using alternative materials as Recycled Construction Waste (RCW) and Polyethylene Terephthalate (PET) fiber produced from used plastic bottles, with intent to reduce retraction and cracking. A large laboratory tests were conducted to evaluate hydraulic and mechanical properties of mixtures using different percentages of alternatives materials. In sequence, compacted specimens were used to evaluate drying-wetting (D-W) cycles effects on initiation and evolution of cracks, using new proposed methodology. The tests were conducted on specimens prepared with natural soil, reinforced with 20% of RCW and 0.4% of PET fiber, 30 mm in length and profiled lateral geometry. The specimens were subjected to three subsequent D-W cycles. The surface cracks evolution were monitored and analyzed by image processing. Dimensions of surface cracks were quantified using the Crack Intensity Factor (CIF), which is ratio of cracks surface area to the total surface area of the soil. The results show that desiccation and cracking behavior was significantly affected by the applied D-W cycles and addition of alternative materials, changing cracks pattern, delaying fissures formation time and reducing CIF when compared with natural soil. These results indicate that alternative materials are feasible as materials for landfill cover liners.

**Keywords:** Alternative materials, desiccation cracking, landfill cover liners.



## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	v
AGRADECIMENTOS .....	vi
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
SUMÁRIO.....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABELAS .....	xv
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES .....	xvii
Capítulo 1 .....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONTEXTO GERAL.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESCOPO DO TRABALHO .....	3
Capítulo 2 .....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. PANORAMA MUNDIAL E NACIONAL DA GERAÇÃO E TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) .....	5
2.2. ATERRO SANITÁRIO: ELEMENTOS ESTRUTURAIS .....	8
2.3. SISTEMAS DE COBERTURA IMPERMEÁVEL PARA ATERROS SANITÁRIOS .....	9
2.4. COBERTURAS ALTERNATIVAS PARA ATERROS SANITÁRIOS ....	13
2.5. UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS EM CAMADAS DE COBERTURA .....	17
2.6. FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DE CAMADAS DE COBERTURAS DE ATERROS SANITÁRIOS .....	27
2.7. RESSECAMENTO E FISSURAÇÃO DE SOLOS.....	37
Capítulo 3 .....	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1. MATERIAIS SELECIONADOS PARA PESQUISA .....	48
3.2. 1ª ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E DAS MISTURAS .....	54

3.3.	2ª ETAPA: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS DO SOLO PURO E DAS MISTURAS .....	56
3.4.	3ª ETAPA: AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO. 65	
Capítulo 4	.....	76
4.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E HIDRO-MECÂNICOS DO SOLO PURO E DAS MISTURAS .....	76
4.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	76
4.2.	ENSAIOS HIDRÁULICOS E MECÂNICAS DO SOLO PURO E DAS MISTURAS .....	83
Capítulo 5	.....	111
5.	ENSAIO DE RESSECAMENTO .....	111
5.1.	TEMPO PARA SURGIMENTO DAS PRIMEIRAS FISSURAS .....	111
5.2.	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DAS FISSURAS .....	114
5.3.	AVALIAÇÃO QUALITATIVA DAS PROFUNDIDADES DAS FISSURAS .....	134
5.4.	RESULTADOS OBTIDOS COM A INSTRUMENTAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	140
Capítulo 6	.....	152
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	152
6.1.	CONCLUSÕES GERAIS .....	152
6.2.	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	156
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	158

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Geração per capita anual de resíduos sólidos urbanos para países pertencentes a OECD no período de 2000 a 2013.....	6
Figura 2.2. Comparação do crescimento do PIB, da População e da geração total de resíduos sólidos levantados pela OECD (1980–2030). .....	7
Figura 2.3. Crescimento da geração de RSU, população e PIB. ....	7
Figura 2.4. Componentes típicos de uma camada cobertura impermeável de acordo com a US. EPA.....	11
Figura 2.5. Perfil típico de uma camada evapotranspirativa (ET).....	15
Figura 2.6. Perfil típico de uma barreira capilar.....	16
Figura 2.7. Perfil típico de uma barreira anisotrópica. ....	16
Figura 2.8. Total de RCC coletado no Brasil e por regiões no período de 2009 a 2013. 20	
Figura 2.9. Evolução do número de usinas de reciclagem de RCC no país. ....	21
Figura 2.10. Procedimento para estabelecer zona de teor de umidade e massa específica seca que atendam ao critério de condutividade hidráulica (k).....	31
Figura 2.11. Zona de aceitação proposta por Daniel e Wu (1993). ....	32
Figura 2.12. Curva característica de sucção típica de um solo siltoso. ....	33
Figura 2.14. Relação entre a curva característica de resistência à tração e a curva característica de sucção para uma areia fina.....	35
Figura 2.13. Estados de saturação em solos não saturados .....	35
Figura 2.15. Desenho esquemático do processo de formação de fissuras.....	40
Figura 2.16. Variação da umidade e da velocidade de evaporação com o tempo de ressecamento.....	41
Figura 2.17. Estágios de desenvolvimento das fissuras, segundo Li e Zhang (2011). ...	42
Figura 2.18. Variação do índice de vazios em relação ao teor de umidade – estágios da retração. ....	43
Figura 2.19. Estágios de ressecamento proposto por Haines (1923).....	44
Figura 2.20. Representação geométrica de uma fissura. ....	47
Figura 3.1. Etapas da pesquisa.....	49
Figura 3.2. Localização do ponto de coleta do solo .....	50
Figura 3.3. Localização da Empresa Bela Vista .....	51
Figura 3.4. Fluxograma de produção do RCC.....	52
Figura 3.5 Etapas para obtenção da fibra de PET.....	53
Figura 3.6. Comparativo entre as geometrias laterais das fibras lisas e sanfonadas utilizadas na pesquisa. ....	53
Figura 3.7. Corpos de prova para ensaio de tração das fibras de PET. ....	55
Figura 3.8. Sequência da mistura para o ensaio de compactação.....	57
Figura 3.9. Montagem dos corpos de prova para o ensaio de sucção.....	60
Figura 3.10. Montagem do ensaio de absorção .....	61
Figura 3.11. Fluxo do 1º ensaio de ressecamento preliminar. ....	63
Figura 3.12. Montagem do ensaio piloto de ressecamento.....	64
Figura 3.13. Compactação manual das camadas para o ensaio de ressecamento.....	66

Figura 3.14. Curvas de calibração do simulador de irradiação solar para o espectro total, em função da distância entre o simulador e o receptor, para diferentes potências.....	67
Figura 3.15. Vistas do simulador solar construído para pesquisa. ....	67
Figura 3.16. Ensaio e curvas de calibração do simulador solar utilizado na pesquisa. ..	68
Figura 3.17. Coleta de dados de irradiação solar na área externa do laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.....	69
Figura 3.18. Esquema do mini simulador de chuva construído para pesquisa.....	70
Figura 3.19. Gráfico de calibração relacionando carga de água e intensidade da chuva	71
Figura 3.20. Fluxo do ensaio de ressecamento.....	72
Figura 3.21. Localização dos sensores instalados na amostra.....	72
Figura 3.22. Mostrador da balança e termo higrômetro durante a realização de um ensaio. ....	73
Figura 3.23. Mini simulador de chuva.....	74
Figura 4.1. Curvas granulométricas dos materiais, com e sem o uso do ultrassom. ....	77
Figura 4.2. Carta de Plasticidade com indicação dos pontos correspondentes ao solo e as misturas solo+RCC.....	78
Figura 4.3. Variação dos valores de Gs para o solo puro e para as misturas de solo+RCC. ....	79
Figura 4.4. Valores Gs para o solo puro e para as fibras de PET utilizadas na pesquisa. ....	80
Figura 4.5. Variação dos valores de Gs para o solo puro e para as misturas de solo+PET. ....	80
Figura 4.7. Análise química por difratometria de Raio-X do RCC.....	82
Figura 4.6. Análise química por difratometria de Raio-X do solo. ....	82
Figura 4.8. Imagens do ensaio de microscopia eletrônica para amostra de solo.....	82
Figura 4.9. Imagens do ensaio de microscopia eletrônica para amostra de RCC.....	83
Figura 4.10. Curvas de compactação do solo e das misturas de solo+RCC.....	84
Figura 4.11. Curvas de compactação do solo e das misturas de solo+PET para fibras de 10mm.....	84
Figura 4.12. Curvas de compactação do solo e das misturas de solo+PET para fibras de 20 mm.....	85
Figura 4.13. Curvas de compactação do solo e das misturas de solo+PET para fibras de 30 mm.....	85
Figura 4.14. Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS para o solo puro e misturas solo+RCC rompidos logo após a moldagem dos corpos de prova.....	86
Figura 4.15. Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS para o solo puro e misturas solo+RCC rompidos com 30 dias de idade. ....	86
Figura 4.16. Variação da resistência à compressão para o solo puro e misturas solo+RCC, ensaiados imediatamente e após 30 dias da moldagem.....	87
Figura 4.17. Variação do módulo de elasticidade das misturas solo+RCC.....	87
Figura 4.18. Curvas tensão x deformação para as misturas solo+PET 10mm, fibra lisa. ....	88
Figura 4.19. Curvas tensão x deformação para as misturas solo+PET 20mm, fibra lisa. ....	88

Figura 4.20. Curvas tensão x deformação para as misturas solo+PET 30mm, fibra lisa. ....	89
Figura 4.21. Comparativo entre as curvas tensão x deformação com diferentes comprimentos e com 0,4% de adição de fibra lisa de PET. ....	89
Figura 4.22. Variação do módulo de elasticidade das misturas solo+PET. ....	90
Figura 4.23. Ensaio de RCS em misturas de solo+PET, com 0,4% de adição de fibra 10mm, variando a geometria lateral. ....	90
Figura 4.24. Ensaio de RCS em misturas de solo+PET, com 0,4% de adição de fibra 30mm, variando a geometria lateral. ....	91
Figura 4.25. Variação da permeabilidade. ....	92
Figura 4.26. Envoltórias para o solo e misturas solo+RCC. ....	92
Figura 4.27. Curvas tensão cisalhante x deslocamento para o solo e misturas solo+RCC. ....	93
Figura 4.28. Curvas tensão cisalhante x deslocamento para o solo e misturas solo+PET. ....	94
Figura 4.29. Curvas características do solo e das misturas solo+RCC. ....	95
Figura 4.30. Sucção em função do grau de saturação das misturas. ....	95
Figura 4.31. Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para o solo puro. ....	96
Figura 4.32. Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para o solo+20%RCC. ....	96
Figura 4.33. Comparativo entre os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para solo puro e solo+20%RCC. ....	97
Figura 4.34. Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para as misturas solo+PET. ....	97
Figura 4.35. Relação entre a curva característica de sucção e a curva característica de resistência à tração. ....	99
Figura 4.36. Variação de massa para amostras dispostas em ambiente úmido (U.R.=95%). ....	100
Figura 4.37. Variação volumétrica para amostras dispostas em ambiente úmido. ....	101
Figura 4.38. Variação de massa das amostras dispostas em ambiente seco. ....	102
Figura 4.39. Variação volumétrica para as amostras dispostas em ambiente seco. ....	102
Figura 4.40. Variação de massa para as amostras expostas às condições ambientais do laboratório. ....	103
Figura 4.41. Variação volumétrica das amostras expostas às condições ambientais do laboratório. ....	103
Figura 4.42. Variação de massa dos corpos prova durante o 1º ciclo de ressecamento – Ensaio preliminar. ....	104
Figura 4.43. Variação de massa dos corpos de prova durante o 2º ciclo de ressecamento – Ensaio preliminar. ....	105
Figura 4.44. Variação de altura dos corpos de prova durante o 1º ciclo de ressecamento – ensaio preliminar. ....	105
Figura 4.45. Variação de altura dos corpos de prova durante o 2º ciclo de ressecamento – ensaio preliminar. ....	106

Figura 4.46. Variação do coeficiente de permeabilidade das amostras sem e após a realização do ensaio de ressecamento. ....	106
Figura 4.47. Corpo de prova de solo puro nas várias fases do ensaio de ressecamento. ....	107
Figura 4.48. Tempo para surgimento das fissuras na superfície das amostras, em minutos. ....	108
Figura 4.49. Cálculo do CIF para as misturas ensaiadas. ....	108
Figura 4.50. Imagens das amostras ao final do ensaio de ressecamento preliminar. ...	110
Figura 5.1. Primeiras fissuras da amostra de SP.....	113
Figura 5.2. Primeiras fissuras da amostra RCC.....	113
Figura 5.3. Primeiras fissuras da amostra PET.....	114
Figura 5.4. Evolução das fissuras ao longo do 1º ciclo de ressecamento do SP. ....	116
Figura 5.5. Evolução das fissuras ao longo do 2º ciclo de ressecamento do SP. ....	117
Figura 5.6. Evolução das fissuras ao longo do 3º ciclo de ressecamento do SP. ....	118
Figura 5.7. Sobreposição de fissuras ao final dos três ciclos de ressecamento para a amostra de SP. ....	120
Figura 5.8. Variação do CIF em função do tempo de ensaio (a) e do teor de umidade (b); e relação sucção x teor de umidade (c) para a amostra de SP. ....	121
Figura 5.9. Evolução das fissuras ao longo do 1º ciclo de ressecamento do RCC.....	123
Figura 5.10. Evolução das fissuras ao longo do 2º ciclo de ressecamento do RCC.....	124
Figura 5.11. Evolução das fissuras ao longo do 3º ciclo de ressecamento do RCC.....	125
Figura 5.12. Sobreposição de fissuras ao final dos três ciclos de ressecamento para a amostra RCC. ....	126
Figura 5.13. Variação do CIF em função do tempo de ensaio (a) e do teor de umidade (b); relação sucção x teor de umidade para a amostra de RCC.....	127
Figura 5.14. Variação do CIF em função do tempo de ensaio (a) e do teor de umidade (b); relação sucção x teor de umidade (c) para a amostra de PET. ....	128
Figura 5.15. Evolução das fissuras ao longo do 1º ciclo de ressecamento do PET.....	129
Figura 5.16. Evolução das fissuras ao longo do 2º ciclo de ressecamento do PET.....	130
Figura 5.17. Evolução das fissuras ao longo do 3º ciclo de ressecamento do PET.....	131
Figura 5.18. Sobreposição de fissuras ao final dos três ciclos de ressecamento para a amostra de PET.....	132
Figura 5.19. Comparação entre os valores de CIF ao longo dos ciclos de ressecamento para as amostras ensaiadas. ....	133
Figura 5.20. Superfícies tridimensionais para a amostra de solo puro.....	135
Figura 5.21. Avaliação qualitativa das profundidades das fissuras da amostra de solo puro nas seções 1 e 2, ao final dos três ciclos de ressecamento.....	136
Figura 5.22. Superfícies tridimensionais traçadas para a amostra de RCC.....	137
Figura 5.23. Avaliação qualitativa das profundidades das fissuras da amostra de RCC, ao final dos três ciclos de ressecamento.....	138
Figura 5.24. Avaliação qualitativa das profundidades das fissuras da amostra de PET, ao final dos três ciclos de ressecamento.....	138
Figura 5.25. Superfícies tridimensionais traçadas para a amostra de PET.....	139

Figura 5.26. Comparativo entre as profundidades relativas das amostras ao final do 1° ciclo. ....	140
Figura 5.27. Evolução dos parâmetros de umidade e temperatura do solo e do ar para a amostra de SP para cada ciclo de ressecamento. ....	141
Figura 5.28. Evolução dos parâmetros de umidade e temperatura do solo e do ar para a amostra de RCC para cada ciclo de ressecamento. ....	142
Figura 5.29. Evolução dos parâmetros de umidade e temperatura do solo e do ar para a amostra de RCC para cada ciclo de ressecamento. ....	143
Figura 5.30. Curvas de variação da umidade com o tempo de ensaio para todas as amostras. ....	146
Figura 5.31. Evolução da sucção nos tensiômetros ao longo dos três ciclos de ressecamento da amostra de SP. ....	147
Figura 5.32. Evolução da sucção nos tensiômetros ao longo do 1° ciclo de ressecamento da amostra de RCC. ....	148
Figura 5.33. Evolução da sucção nos tensiômetros ao longo dos ciclos de ressecamento da amostra de PET. ....	149
Figura 5.34. Correlações entre as medições do 5tm e a umidade gravimétrica das amostras. ....	150
Figura 5.35. Desmontagem da caixa e coleta de amostras. ....	151

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação dos resíduos quanto ao grau de periculosidade .	19
Tabela 3.1. Misturas solo-resíduos utilizadas na pesquisa.	54
Tabela 3.2. Resumo das misturas utilizadas no ensaio de RCS.	58
Tabela 4.1. Frações granulométricas dos materiais.	77
Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de consistência para o solo e misturas solo+RCC.	78
Tabela 4.3. Resultados das análises químicas do solo e do RCC utilizados na pesquisa.	81
Tabela 4.4. Valores de umidade ótima e peso específico seco máximo para o solo e misturas solo+RCC.	83
Tabela 4.5. Resultados do ensaio de cisalhamento direto para solo puro e misturas solo+RCC.	93
Tabela 4.6. Resultados do ensaio de cisalhamento direto para as misturas solo+PET.	94
Tabela 4.7. Resumo dos resultados dos ensaios realizados na 2ª etapa da pesquisa.	109
Tabela 5.1. Teor de umidade das amostras no momento do surgimento das primeiras fissuras visíveis.	112
Tabela 5.2. Valores do CIF obtidos no ensaio de ressecamento do SP.	119
Tabela 5.3. Valores do CIF obtidos no ensaio de ressecamento do RCC.	122
Tabela 5.4. Valores do CIF obtidos no ensaio de ressecamento do PET.	128



## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

$A_{av}$	Área média dos torrões formado entre as fissuras
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ASCOLES	Associação de Coletadoras de Entulhos e Similares do DF
CAESB	Companhia de Água e Esgoto de Brasília
CCL	<i>Compacted Clay Liner</i>
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CIF	Crack Intensity Factor
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Corpos de Prova
D	Diâmetro
DF	Distrito Federal
E	Índice de vazios
E	Módulo de elasticidade
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET	Evapotranspiração
Evapotranspirativas	EV
FS	Fibra de PET com geometria lateral sanfonada
GCL	<i>Geosynthetic Clay Liner</i>
GM	Geomembranas
Gs	Peso Específico dos Grãos
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K	Coeficiente de permeabilidade
L	Comprimento
$L_{av}$	Comprimento médio das fissuras
N	Porosidade

NBR	Norma Brasileira
$N_{int}$	Número de interseções por unidade de área
$N_{seg}$	Número de segmentos por unidade de área
$\emptyset$	Ângulo de Atrito Interno
OECD	<i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>
P	Precipitação
PET	Polietileno Tereftalano
PIB	Produto Interno Bruto
PVC	Policloreto de Polivinila
RCC	Resíduos de Construção Civil
RCS	Resistência à Compressão Simples
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UnB	Universidade de Brasília
US. EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
S	Grau de Saturação
W	Teor de umidade gravimétrico
$W_{av}$	Espessura média das fissuras
$W_{ot}$	Umidade ótima de compactação
$\Gamma$	Massa específica
$\gamma_{dmax}$	Massa específica aparente seca máxima
M	Viscosidade
$\sigma_a$	Resistência máxima à tração no regime capilar
$\sigma_N$	Tensão normal atuante
$\sigma_t$	Resistência máxima à tração no regime residual
T	Resistência máxima ao cisalhamento
$\Psi$	Sucção matricial
$\Psi_b$	Sucção de entrada de ar
$\theta$	Teor de umidade volumétrico

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTO GERAL

Com o crescimento da população mundial nas últimas décadas, aumentaram também as preocupações com a produção dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e a busca por soluções tecnológicas adequadas para seu tratamento e disposição.

Pela análise do panorama mundial quanto à geração e às formas de gerenciamento dos RSU, pode-se perceber grandes diferenças relacionadas ao grau de desenvolvimento econômico e aos aspectos culturais de cada país. No Brasil, por exemplo, é nítida a diferença no padrão de produção dos resíduos. As cidades com maior número de habitantes, naturalmente mais desenvolvidas, chegam a produzir mais que o dobro de resíduo por dia por habitante quando comparadas a uma cidade de menor porte.

Santos (2011), analisando os aspectos tecnológicos das formas de destinação/tratamento dos RSU nos Estados Unidos, Alemanha, países da União Europeia e Brasil, explica que a destinação em aterros sanitários é a mais utilizada no mundo por demandar, de forma geral, muito menos tecnologia quando comparada às plantas de incineração. Além da questão tecnológica, o autor aponta ainda outro fator crucial para a difusão dos aterros sanitários: seu custo de implantação e operação, ressaltando, no entanto, que a análise dos custos é diferenciada em relação ao estágio de desenvolvimento do país.

Dentre as possibilidades disponíveis para o tratamento dos RSU, os aterros sanitários configuram como uma solução eficaz e economicamente viável. De acordo com Boscov (1997) é consenso entre os profissionais que a segurança ambiental dos aterros de resíduos sólidos está diretamente relacionada aos sistemas de drenagem e impermeabilização.

Os sistemas de impermeabilização constituem componente essencial na proteção do meio ambiente, atuando de duas formas distintas: como sistemas de cobertura (*cover liners*), responsáveis pela restrição da infiltração de águas pluviais para o interior do aterro, e como sistemas de impermeabilização da base (*bottom liners*), responsáveis pela

redução do fluxo e atenuação dos efeitos químicos do chorume no lençol freático. Nos dois casos devem apresentar características técnicas adequadas, como baixa condutividade hidráulica, durabilidade, alta resistência mecânica e às intempéries.

Para conseguir baixa condutividade hidráulica, normalmente utilizam-se solos argilosos com alta plasticidade, que apresentam características de retração e inchamento, que dependem das condições de umidade e temperatura do ambiente. Além disso, durante as estações mais secas do ano, o ressecamento das camadas pode ocasionar o surgimento de fissuras e criar caminhos preferenciais para o transporte de fluidos provocando aumento considerável da condutividade hidráulica e a perda de sua função impermeabilizante.

Para tentar minimizar o surgimento de fissuras, uma das possibilidades é a utilização de areia associada à bentonita, como forma de aliar um material com maior trabalhabilidade a outro capaz de reduzir a condutividade hidráulica das camadas.

Outras pesquisas têm procurado buscar novos materiais alternativos que possuam características adequadas e sejam capazes de associar baixa condutividade hidráulica e maior estabilidade às variações climáticas e à formação de fissuras por ressecamento. Pode-se citar a utilização de fibras e de resíduos industriais, como cinzas de carvão, areia de fundição e resíduos da construção civil para melhorar o desempenho das camadas impermeabilizantes (HEINECK, 2002; AKBULUT *et al.*, 2006; LUKIANTCHUKI, 2007; KALKAN, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2011; AMADI & EBEREMU, 2013). A utilização desses resíduos, além de ser uma alternativa para a redução da quantidade de resíduos dispostos em aterros, pode representar uma proposta sustentável de destinação, aliando vantagens técnicas, econômicas e ambientais.

## **1.2. OBJETIVOS**

O presente estudo insere-se na linha de pesquisa sobre avaliação do comportamento hidráulico e mecânico de camadas impermeáveis e tem por objetivo analisar a viabilidade da utilização de materiais alternativos, como Resíduos da Construção Civil - RCC e fibras de Polietileno Tereftalano - PET, adicionados ao solo, para execução de camadas de cobertura de aterros sanitários, com ênfase no desempenho desses materiais quanto à formação e à propagação de fissuras por ressecamento.

Para isso procurar-se-á alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o solo, o RCC, o PET e as misturas solo-RCC e solo PET;
- Avaliar o comportamento hidráulico e mecânico das misturas de solo-RCC e solo-PET, comparando os resultados obtidos aos do solo puro;
- Escolher as misturas solo-RCC e solo-PET que melhor se ajustam aos critérios especificados para camadas impermeabilizantes de cobertura de aterros sanitários;
- Propor uma metodologia que permita simular, no ambiente do laboratório, eventos de chuva e ressecamento por radiação solar;
- Avaliar comparativamente o desempenho quanto à formação e propagação de fissuras por ressecamento do solo puro e das misturas solo-RCC e solo-PET melhor avaliadas nas etapas anteriores;
- Caracterizar o padrão de formação de fissuras utilizando técnicas de análise de imagens;
- Analisar as correlações entre sucção e formação de fissuras para as amostras ensaiadas.

### **1.3. ESCOPO DO TRABALHO**

Esta tese foi organizada em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta o contexto geral da problemática da disposição dos Resíduos Sólidos Urbanos e os desafios a serem enfrentados para construção de aterros sanitários que atendam aos requisitos técnicos e ambientais. Ainda neste capítulo, são apresentados os objetivos da pesquisa e o escopo da tese.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão geral sobre o panorama mundial e nacional da geração e tratamento dos Resíduos Sólidos Urbanos, com destaque para os elementos estruturais dos aterros sanitários. Na sequência, apresenta uma visão geral dos sistemas de coberturas impermeáveis e alternativas, bem como a possibilidade da utilização de materiais alternativos para execução dessas coberturas. Por fim, trata dos fatores que influenciam o comportamento das camadas de cobertura e dos aspectos relacionados ao ressecamento e fissuração dos solos.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e a metodologia utilizados na pesquisa. O estudo foi dividido em três fases. Seleção, preparação e caracterização dos materiais, com a realização de ensaios de caracterização física, química e mineralógica. Na segunda fase foram realizados ensaios de compactação, de resistência mecânica e hidráulicos para o solo puro e as misturas de solo e materiais alternativos, além de ensaios de ressecamento preliminares utilizando duas metodologias distintas. Na terceira e última fase foi desenvolvida uma metodologia para avaliar o ressecamento de amostras submetidas a ciclos sucessivos de ressecamento e umedecimento utilizando um simulador solar e um mini simulador de chuva desenvolvido para a pesquisa.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais e das misturas, dos ensaios de compactação e hidromecânicos e dos ensaios preliminares de ressecamento. O Capítulo 5, por sua vez, apresenta os resultados dos ensaios de ressecamento utilizando a metodologia proposta para a pesquisa, avaliando comparativamente amostras de solo puro e com adição de resíduos da construção civil e fibras de PET. As análises procuraram relacionar o comportamento hidromecânico do solo e das misturas ao processo de formação de fissuras por ressecamento, e determinando parâmetros geométricos para caracterização do padrão de fissuração das amostras ensaiadas, utilizando a técnica de análise de imagens.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas a partir das análises realizadas, incluindo ainda sugestões para trabalhos futuros.

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Poucos são os trabalhos disponíveis na literatura nacional e internacional relacionados à avaliação de desempenho hidráulico e mecânico de materiais alternativos para confecção de *liners* de cobertura, notadamente no que diz respeito à avaliação da fissuração por ressecamento.

Tendo em vista os objetivos propostos na pesquisa é imprescindível o entendimento dos efeitos da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários. Assim, a revisão bibliográfica foi estruturada de modo a abordar temas relacionados às características das camadas impermeáveis para cobertura de aterros sanitários, ao processo de formação de fissuras e aos fatores que afetam o início e a propagação dessas fissuras com o tempo, e aos desafios e possibilidades da utilização de materiais alternativos como compósitos em camadas de cobertura, subsidiando assim a proposta de metodologia a ser adotada na pesquisa.

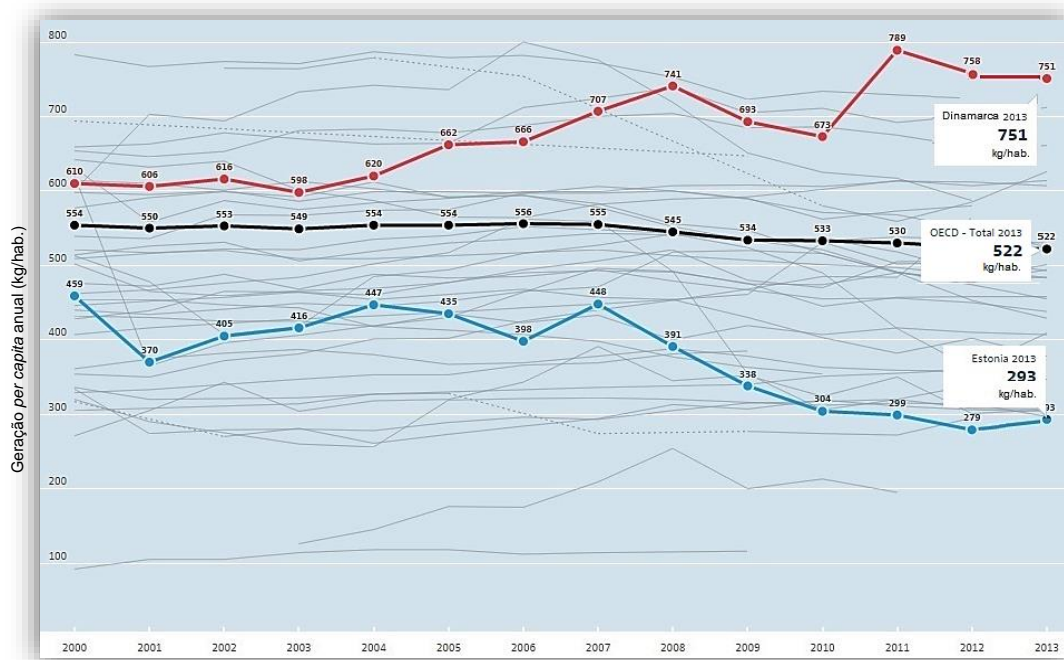
#### 2.1. PANORAMA MUNDIAL E NACIONAL DA GERAÇÃO E TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

O modo de vida urbano da atualidade produz uma diversidade cada vez maior de produtos e de resíduos que exigem sistemas de coleta e tratamentos mais complexos e dispendiosos, sendo vistos como um dos principais problemas dos dias atuais.

Embora seja consenso que a geração excessiva de resíduos sólidos afeta a sustentabilidade urbana e, que, a sua redução depende de mudanças nos padrões de produção e consumo da sociedade, a redução dos milhões de resíduos gerados vem sendo apontada como um dos maiores desafios para a maioria dos países.

Segundo a *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD), composta por 34 países membros, mais África do Sul, China e Rússia, criada para colaborar no desenvolvimento de políticas econômicas e sociais, a geração per capita anual dos resíduos sólidos urbanos em 2013 variou de 293 kg/hab./ano na Estônia a 751

kg/hab./ano na Dinamarca, enquanto a média de geração entre os países membros atingiu 522kg/hab./dia, conforme mostra a Figura 2.1 (OECD, 2014).



Fonte: OECD (2015).

Figura 2.1. Geração *per capita* anual de resíduos sólidos urbanos para países pertencentes a OECD no período de 2000 a 2013.

Para a maioria dos países avaliados pela OECD, o crescimento econômico e as mudanças nos padrões de consumo da população mundial tendem a gerar maior produção de resíduos por habitante. Até o ano 2000, quando a geração média per capita de resíduos sólidos era de 554 kg/hab./ano, a produção desse tipo de resíduo cresceu em conformidade com o aumento do Produto Interno Bruto - PIB. A partir daí percebe-se o crescimento mais acelerado do PIB e uma desaceleração no crescimento da geração de resíduos sólidos e uma redução ainda maior do crescimento populacional (Figura 2.2). Há, no entanto, apesar de todos os esforços feitos, uma estimativa de crescimento da geração per capita de resíduos sólidos dos países estudados para 611 kg/hab./ano para 2015, 635 para 2020, 664 para 2025 e 694 kg/hab./ano para 2030 (OECD, 2009 *apud* CAMPOS, 2012).

No Brasil, as variações do nível de ocupação da população e dos rendimentos médio reais são fatores relevantes para a compreensão da evolução do consumo e da consequente geração de resíduos sólidos (CAMPOS, 2012). Em especial a partir de 2005, o aumento da renda da população mais pobre resultou em aumentos de consumo proporcionalmente superiores aos das faixas de maior renda. Em 2009, houve uma inflexão no crescimento do PIB, acompanhado pela geração per capita de resíduos,



enquanto a geração total de resíduos continuou aumentando, como mostra a Figura 2.3. Nos últimos anos observa-se um crescimento mais acelerado do PIB quando comparado ao crescimento da geração dos resíduos.

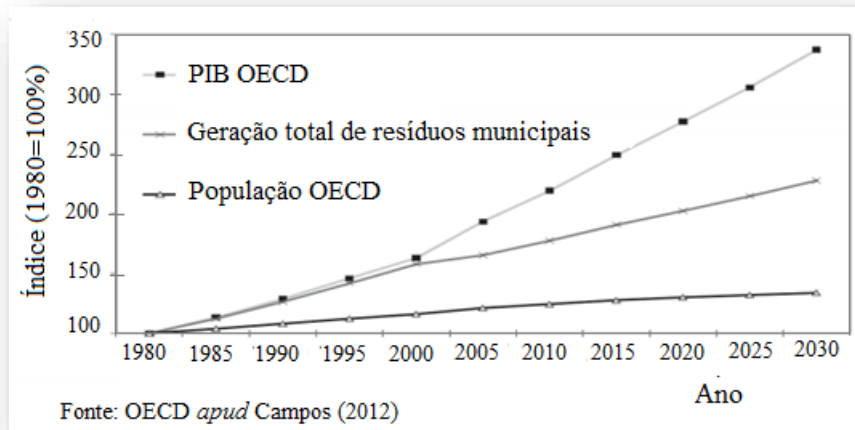


Figura 2.2. Comparação do crescimento do PIB, da População e da geração total de resíduos sólidos levantados pela OECD (1980–2030).

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2013), a média per capita de geração de resíduos sólidos, em 2013, correspondeu a 379 kg/hab./ano e a quantidade de RSU coletados aumentou 4,4% em relação ao ano anterior, mostrando uma discreta evolução na cobertura dos serviços de coleta, chegando a 90,4%, com um total de 69.064.935 toneladas coletadas no ano.

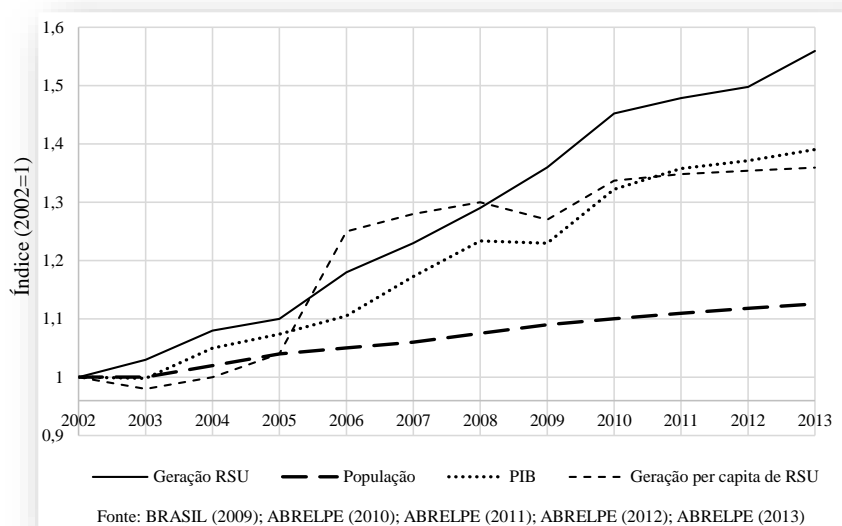


Figura 2.3. Crescimento da geração de RSU, população e PIB.

Em relação à destinação final dos RSU as práticas mais comuns são o envio para empresas de reciclagem, compostagem, incineração ou aterros sanitários. A utilização de aterros sanitários para a destinação de resíduos ainda continua sendo uma das técnicas mais populares e mais praticadas no mundo, por se consistir, atualmente, na alternativa mais barata de disposição de resíduos. No entanto, nos países menos desenvolvidos, e ainda em muitos estados brasileiros, os resíduos ainda são, predominantemente, destinados a lixões ou aterros controlados, que do ponto de vista ambiental pouco se diferenciam dos lixões, pois não possuem o conjunto de sistemas necessários para a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

Em 2013, 58,3 % dos resíduos sólidos gerados no Brasil foram destinados a locais adequados, no entanto, 28,8 milhões de toneladas (41,7%) seguiram para lixões ou aterros controlados, distribuídos por mais de 3.000 municípios, a maioria deles com menos de 10.000 habitantes e ainda sem condições técnicas e financeiras de solucionar esse problema (ABRELPE, 2013).

Ainda segundo a pesquisa da ABRELPE (2013), a carência de recursos aplicados no setor, cerca de R\$ 11,00 por habitante, por mês, para fazer frente a todos os serviços de limpeza urbana de um município (coleta, transporte, transferência, destinação, varrição de vias etc.), torna o problema ainda mais grave e demanda uma conjunção de esforços para garantir efetividade à Lei 12.305 (BRASIL, 2010), já que as mudanças exigem investimentos concretos e os avanços não acontecerão enquanto não houver garantia de sustentabilidade econômica.

## **2.2. ATERRO SANITÁRIO: ELEMENTOS ESTRUTURAIS**

O manual de gerenciamento integrado de lixo municipal (IPT/CEMPRE, 2000) define aterro sanitário como um método utilizado para a disposição de resíduos sólidos fundamentado em “critérios de engenharia e normas operacionais específicas, que permite a confinamento segura em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública”; ou “forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, por meio de confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente solo, segundo normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais”.

Lima (2004) destaca que os principais fatores limitantes para a implantação de aterros sanitários são basicamente: a disponibilidade de grandes áreas próximas aos centros urbanos que não comprometam a segurança e o conforto da população; a disponibilidade de material para a cobertura diária; condições climáticas de operação durante todo o ano; e a escassez de recursos financeiros e humanos, habilitados para operar e gerenciar o funcionamento desses aterros.

Para o bom funcionamento de um aterro é necessário um conjunto de células de resíduos que devem ser recobertas, diariamente, por uma camada de solo evitando assim a proliferação de vetores. Além deste cuidado, os principais elementos estruturais de um aterro sanitário são: sistemas de drenagem para águas superficiais, gás e líquido percolado; sistemas de tratamento do líquido percolado e do gás; sistema de revestimento de fundo impermeável; sistema de cobertura; instrumentação e controle, desde a instalação até o fechamento do aterro.

O desempenho adequado dos aterros sanitários deve-se em grande parte à eficiência dos sistemas de impermeabilização de fundo das células e dos sistemas de cobertura, intermediárias ou final. Esses sistemas são constituídos de materiais apropriados às suas finalidades. As camadas de fundo devem minimizar o fluxo de percolados para o ambiente hidro geológico subjacente. Já as camadas de cobertura são responsáveis por controlar a entrada de água e oxigênio para dentro do aterro; minimizar a migração de gases para fora do aterro; servir como elemento de redução de odores, vetores de doenças e outros inconvenientes; e facilitar a recomposição da paisagem.

### **2.3. SISTEMAS DE COBERTURA IMPERMEÁVEL PARA ATERROS SANITÁRIOS**

Os sistemas de cobertura estão sujeitos a um grande número de solicitações como variações de temperatura, ciclos de umedecimento e secagem, recalques causados pela decomposição dos resíduos, movimento de veículos, erosão por água ou vento, presença de raízes e animais. Estas solicitações podem comprometer todo o sistema de cobertura, ocasionando a perda de estanqueidade e o surgimento de fissuras e trincas, que criam caminhos preferenciais de fluxo e aumentam a permeabilidade das camadas de cobertura (BOSCOV, 2008).

Esses sistemas são projetados para minimizar o movimento de líquidos e/ou gases entre o ambiente externo e o interior das células de resíduos, utilizando barreiras físicas de baixa permeabilidade. Podem variar conforme as características geotécnicas do material utilizado e de acordo com as características climáticas da região onde se encontra instalado o aterro. Assim, para a definição do tipo mais adequado de cobertura faz-se necessário o entendimento e o estudo dessas características para que se tenha a segurança e a eficiência desejada no projeto (CATAPRETA, 2008).

Os materiais comumente utilizados para execução das camadas de cobertura são: geocomposto argiloso (geosynthetic clay liner – GCL), geomembranas (GM), solo compactado (*compacted clay liner* - CCL) ou a combinação desses materiais.

Os geocompostos argilosos (GCL) são fabricados com uma camada de bentonita, geralmente incorporada entre geotêxteis de topo e base ou ligadas a uma geomembrana ou a uma única manta de geotêxtil. Os geotêxteis que compõem os GCL geralmente são costurados ou agulhados através do núcleo argiloso para aumentar a resistência interna do produto ao cisalhamento. Quando hidratados eles atuam efetivamente como barreira para líquido ou gás e são comumente usados em conjunto com geomembranas.

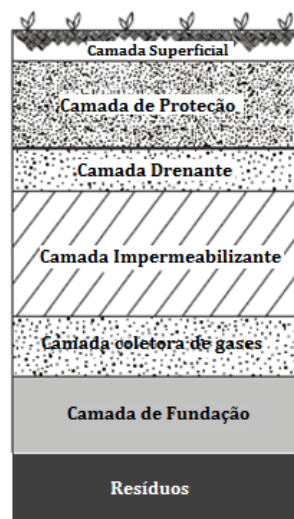
As geomembranas (GM) são mantas contínuas e flexíveis constituídas de um ou mais materiais sintéticos. Elas possuem baixíssima permeabilidade e são amplamente utilizadas como barreiras hidráulicas em sistemas de cobertura, devido à sua estrutura não porosa, à sua flexibilidade e à facilidade de instalação.

Dentre as vantagens da utilização de GM em camadas impermeáveis destacam-se a permeabilidade extremamente baixa e a possibilidade de absorver pequenas deformações. Podem ser utilizados associados às CCL para minimizar os efeitos do ressecamento e da penetração de raízes. Como desvantagens destacam-se a possibilidade de vazamentos causados por imperfeições ocasionais na GM, possibilidade de deslizamento na interface entre GM e materiais adjacentes, e, para algumas aplicações, incertezas sobre o tempo de vida útil da GM (US. EPA, 2002).

As camadas de solo compactado são construídas a partir de solos, normalmente, argilosos. O bom desempenho dessas camadas depende fundamentalmente de baixa condutividade hidráulica e baixa susceptibilidade à formação de fissuras. De acordo com o Guia Técnico da *United States Environmental Protection Agency* - US. EPA (2004), as

CCL, quando usadas sozinhas, não conseguem manter a sua baixa permeabilidade por longos períodos de tempo, principalmente quando instaladas em locais de clima árido ou semiárido e sem a proteção de uma camada de solo sobrejacente que evite a formação de fissuras por ressecamento.

De acordo com o Guia Técnico da US. EPA (2004) os componentes que podem estar presentes em um projeto de cobertura para aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos são: camada superficial para fins de vegetação; camada biótica ou de proteção, camada drenante, camada impermeabilizante ou barreira hidráulica, camada de controle de gás, camadas filtrantes/filtros e camada de fundação, conforme ilustrado na Figura 2.4. A utilização ou não de cada componente é determinada pelo tipo de aterro sanitário e pelas condições climáticas e geográficas do local de implantação. A seguir são citadas algumas características dessas camadas.



Fonte: Modificado de US. EPA (2004)

Figura 2.4. Componentes típicos de uma camada cobertura impermeável de acordo com a US. EPA.

- a) Camada superficial: tem a função de minimizar os efeitos da erosão causada pela água e pelo vento, proporcionando condições para o crescimento da vegetação, quando for o caso. Também pode servir para facilitar a evapotranspiração (ET) e atender a critérios estéticos de projeto.
- b) Camada de proteção ou biótica: está localizada imediatamente abaixo da camada superficial e tem como funções proteger as camadas subjacentes dos processos erosivos e da exposição a ciclos de umedecimento e secagem ou ciclos de gelo e degelo. Pode ainda armazenar temporariamente a água que se

infiltra pela da camada superficial, até que ela retorne à atmosfera pelo processo de ET, e ainda restringir as emissões de gases.

- c) Camada drenante: responsável por remover a água que penetra para o interior da camada de cobertura, minimizando a percolação e conduzindo-a para fora do aterro.
- d) Camada impermeabilizante: responsável pela impermeabilização superior do aterro e tem como função principal minimizar a percolação da água no sistema de cobertura, impedindo a infiltração e promovendo o armazenamento ou drenagem lateral da água proveniente das camadas superiores. Devem ainda restringir a migração de gás ou de constituintes voláteis da massa de resíduos para a atmosfera. Os materiais utilizados incluem GM, GCL e CCL, que podem ser usados sozinhos ou em combinação. Estas barreiras devem apresentar como características principais a baixa condutividade hidráulica, estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica, resistência a intempéries (LUKIANCHUKI, 2007).
- e) Camada de controle de gases: direciona os gases gerados pela massa de resíduos para os drenos de gás.
- f) Camada de fundação ou de regularização da base: componente mais inferior do sistema de cobertura e serve para proporcionar um subleito firme para compactação de camadas sobrepostas aos resíduos, devendo ainda reduzir os efeitos de possíveis recalques diferenciais.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em sua norma NBR 13896 (ABNT, 1997), não apresenta um detalhamento sobre o sistema de cobertura final de aterros sanitários, destacando apenas que seu projeto deve minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamentos sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro.

De acordo com CETESB (1993), o solo mais indicado para construção das camadas impermeabilizantes é o argiloso, devendo atender às seguintes características:

- solo classificado como CL, CH, SC ou OH, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos;

- apresentar no mínimo 30% de partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm (passante na peneira nº 200);
- coeficiente de permeabilidade inferior a  $10^{-9}$  m/s;
- LL maior ou igual a 30%;
- IP mínimo de 15%;
- pH mínimo de 7.

De acordo com a US.EPA (2004) as CCL são construídos primariamente a partir de solos naturais ricos em argila, embora possam conter também materiais processados, como bentonita. Devem apresentar condutividade hidráulica inferior a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, no caso de aterro de resíduos perigosos, e inferior a  $1 \times 10^{-7}$  m/s, quando se tratar de aterros de resíduos sólidos urbanos. Por isso, recomenda:

- percentual mínimo de finos (partículas passando na peneira nº 200 (0,075 mm de abertura)  $\geq 30-50\%$ ;
- índice de plasticidade mínimo  $\geq 7-15\%$ ; e
- percentual máximo de cascalho (partículas retidas na peneira nº 4 (4,76 mm de abertura)  $\leq 20-50\%$ .

Como dito anteriormente, os sistemas de coberturas impermeáveis são projetados para garantir uma baixa permeabilidade. No entanto, a prática tem demonstrado que nem sempre é possível encontrar disponibilidade de materiais que atendam as especificações e regulamentações vigentes. Os materiais argilosos, normalmente utilizados, apresentam elevado potencial de fissuração, podendo aumentar a permeabilidade projetada para o sistema. Além disso, a presença de raízes ou de buracos escavados por animais podem resultar no surgimento de caminhos preferenciais de fluxo, comprometendo o funcionamento do sistema ao longo de sua vida útil. Por essas razões tem se procurado soluções e materiais alternativos que possibilitem melhorar o desempenho das camadas de cobertura, aliado a ganhos econômicos e ambientais.

## **2.4. COBERTURAS ALTERNATIVAS PARA ATERROS SANITÁRIOS**

As coberturas evapotranspirativas (EV) são exemplos de sistemas de cobertura alternativos que tem se mostrado viável principalmente para regiões de clima árido e

semiárido, com as baixas taxas de precipitação e elevado potencial de evapotranspiração comuns a estes climas.

Os conceitos aplicados ao projeto de coberturas evapotranspirativas diferem daqueles utilizados para as camadas de cobertura impermeáveis. Neste caso os parâmetros principais a serem considerados são (US.EPA, 2004):

- capacidade de armazenamento de água do solo;
- potencial de evapotranspiração;
- fatores climáticos; e
- facilidade de construção e/ou reduções de custos com o uso de materiais disponíveis no local.

A novidade desses sistemas é o mecanismo de controle da percolação. A camada de cobertura não atua como uma barreira impermeável e sim como uma esponja ou um reservatório que armazena umidade durante eventos de precipitação, liberando-a, em seguida, de volta à atmosfera por evapotranspiração ou por drenagem lateral (ZORNBERG e MCCARTNEY, 2006).

As camadas evapotranspirativas podem ser divididas em três tipos: monolíticas, barreiras capilares e barreiras anisotrópicas.

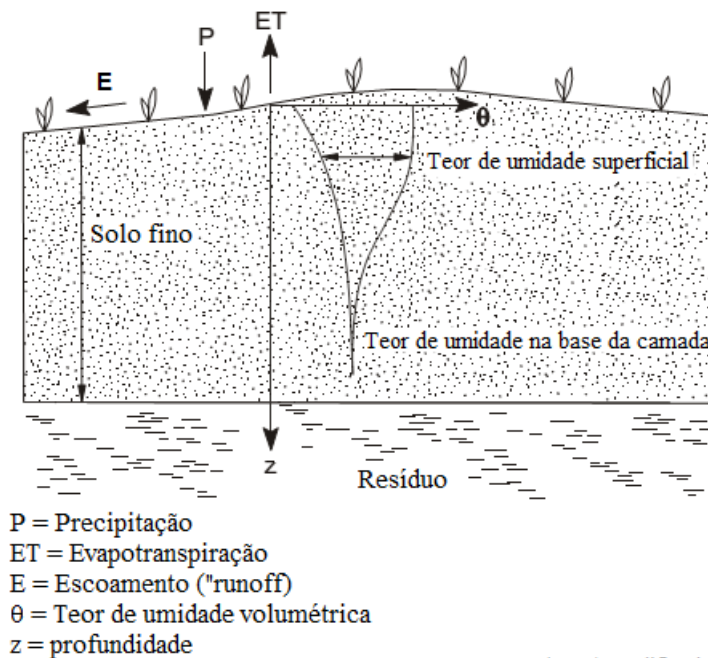
As coberturas monolíticas, mais comumente citada na literatura como evapotranspirativas, são compostas de uma única e espessa camada de solo de granulometria relativamente fina e com alta capacidade de armazenamento de água, como silte, silte arenoso e silte argiloso, recoberta por vegetação.

A espessura da camada é selecionada baseada na capacidade de retenção de água do solo e no tipo de vegetação adotada, de modo a garantir que a água que infiltra na época das chuvas seja armazenada até sua remoção por evapotranspiração, limitando a quantidade de água que atravessa a camada e infiltra na massa de resíduos, conforme mostrado na Figura 2.5.

A remoção da água ocorre por evaporação da água superficial, reduzindo o teor de umidade e a sucção matricial na parte superior da camada, resultando no fluxo no sentido ascendente. A transpiração das plantas ocorre devido a um gradiente potencial, possibilitando a remoção da água, sendo que o maior gradiente ocorre entre as folhas e a



atmosfera. Por essa razão, camadas com bastante vegetação podem ser muito efetivas em regiões áridas e semiáridas. Essas regiões são caracterizadas por potencial de evapotranspiração superior ao de precipitação.



Fonte: US.EPA (2004) modificado.

Figura 2.5. Perfil típico de uma camada evapotranspirativa (ET).

As barreiras capilares são constituídas, na sua forma mais simplificada, de uma camada de material fino, argila ou silte-argiloso, sobre uma camada de material granular, em geral areia. A camada de solo mais fino, com alta capacidade de retenção, é sobreposta a uma camada de material mais grosso, com pequena capacidade de retenção de água, utilizada para que haja quebra hidráulica entre a camada de material fino e o interior do aterro.

Na Figura 2.6 apresenta-se o princípio de funcionamento de uma barreira capilar. A água que infiltra na camada superior de solo pode ser dividida em três zonas: zona saturada, zona de transição e zona residual. Qualquer quantidade de água igual ou menor a capacidade de retenção da camada de solo ficará retida por capilaridade na camada de material mais fino, evitando assim a entrada no interior do aterro. Quando houver um volume infiltrado superior à capacidade de retenção da camada superior de solo, o excedente de água será drenado para a camada inferior. Esta camada, por sua vez, retém parte ou toda a água de acordo com sua capacidade de retenção. O restante da água é drenado para o interior do aterro.

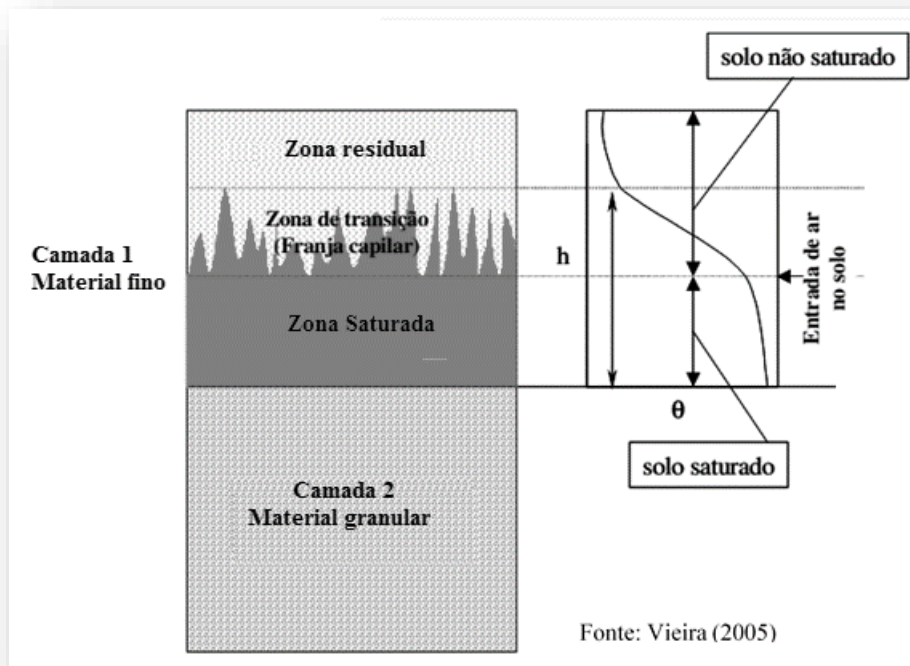


Figura 2.6. Perfil típico de uma barreira capilar.

As barreiras anisotrópicas são semelhantes às barreiras capilares. No entanto, seu projeto prevê a inclusão de uma ou mais camadas de drenagem para permitir o escoamento lateral da água no interior da barreira. A Figura 2.7 apresenta o esquema de uma barreira anisotrópica.

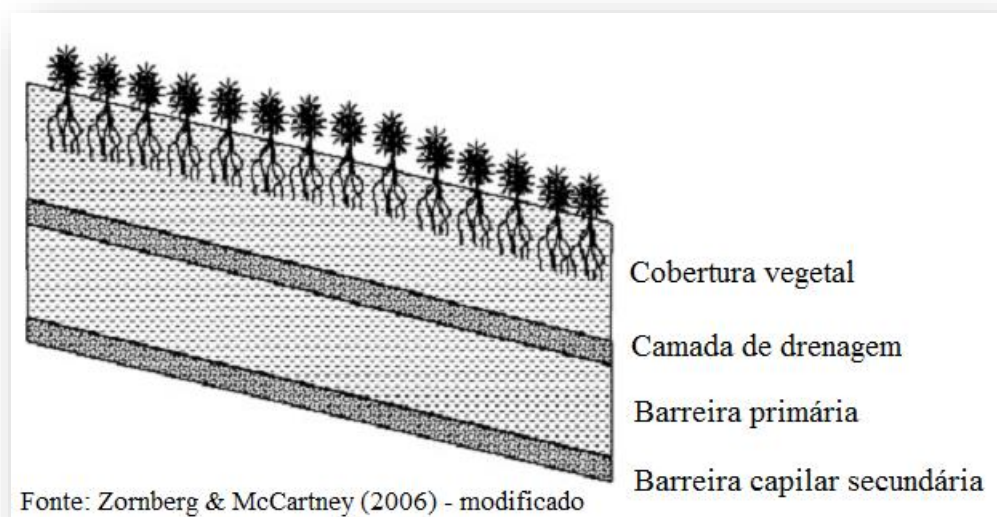


Figura 2.7. Perfil típico de uma barreira anisotrópica.

Esse tipo de barreira é composta por um substrato de solo vegetal que recobre uma camada de solo com granulometria grossa, que por sua vez é colocado sobre uma camada de solo fino, denominada de barreira primária. Sob essa barreira é colocada uma segunda

camada de grãos grossos para provocar uma ruptura capilar. A água coletada pela camada de drenagem localizada abaixo do substrato vegetal, migra lateralmente no interior da camada, sendo coletada e desviada para fora do aterro, para que não avance para as demais camadas. As demais camadas funcionam como sistema de proteção, quando a capacidade de acumulação das primeiras é ultrapassada.

## **2.5. UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS EM CAMADAS DE COBERTURA**

Quando não existe disponibilidade de solos com características e em quantidades adequadas nas proximidades do aterro, é possível utilizar outros materiais alternativos para execução das camadas de cobertura. Material arenoso em substituição a certo percentual de argila, solos arenosos e bentonita, cinzas, fibras e resíduos, com ou sem adição de bentonita, podem ser alternativas viáveis para a construção do sistema de cobertura.

As camadas de materiais alternativos diferenciam-se dos modelos convencionais por apresentarem novas opções de materiais, espessuras ou número de camadas. A pesquisa de novos materiais que minimizem impactos, reduzindo a exploração de jazidas de solos naturais e reutilizando resíduos urbanos e industriais que atendam às exigências técnicas, poderá apontar soluções viáveis do ponto de vista econômico, técnico e, principalmente, ambiental.

Alguns trabalhos utilizando resíduos da construção civil, resíduos de papel, areia de fundição descartada, cinzas da casca de arroz, resíduos de borracha e cinza de carvão demonstram a viabilidade desses materiais como compósitos para execução de camadas de cobertura para aterros sanitários (HEINECK, 2002; BARROS, 2005; HUSE, 2007; VIANA, 2007; RIBEIRO, 2007; QUISSINI, 2009).

Além da utilização de resíduos outra tendência observada foi o uso de fibras como adições ao solo ou ao resíduo (TANG *et al.*, 2006; AKBULUT, 2007; HARIANTO *et al.*, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2011), em camadas de fundo e de cobertura, para melhorar as propriedades mecânicas do solo, buscando um teor ótimo de fibras que proporcione melhor estabilidade volumétrica, sem aumentar os valores de condutividade hidráulica.

Neste contexto, para realização desta pesquisa, foram selecionados dois tipos de resíduos, sendo um com característica granular, proveniente da reciclagem de Resíduos da Construção Civil (RCC), com granulometria equivalente a uma areia fina, e outro com característica fibrosa, obtido do filetagem de garrafas de refrigerante PET usadas. A escolha desses resíduos foi motivada pela disponibilidade e facilidade de obtenção desses materiais na região da pesquisa e pelo impacto ambiental positivo que uma solução tecnicamente viável de utilização desses resíduos poderão causar.

### **2.5.1. Utilização de Resíduos da Construção Civil**

De acordo com a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, os Resíduos da Construção Civil – RCC são:

“os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc, comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.” (CONAMA, 2002)

Ainda de acordo com a Resolução CONAMA nº 307, o resíduo da construção civil pode ser classificado em:

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 infra-estrutura, 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.

Ainda é possível classificar o RCC tomando-se por base os parâmetros estabelecidos na norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004), que trata da classificação de resíduos sólidos quanto à periculosidade, agrupando-os em três categorias, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Classificação dos resíduos quanto ao grau de periculosidade (ABNT, 2004).

<b>Categoria</b>	<b>Característica</b>	
Classe I (Perigosos)	Apresentam risco à saúde pública ou ao meio ambiente, caracterizando-se por ter uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;	
Classe II (Não Perigosos)	(A) Não Inertes	Podem ter propriedades, como inflamabilidade, biodegradabilidade ou solubilidade; porém, não se enquadram como resíduo classe I ou classe II B.
	(B) Inertes	Não têm constituinte algum solubilizado, em concentração superior ao padrão de potabilidade de águas.

Com relação à quantidade de RCC produzido no Brasil, não existem dados oficiais, uma vez que, em geral, os municípios coletam apenas os resíduos de obras sob sua responsabilidade e os lançados em logradouros públicos. No entanto, esta parcela é a única que possui registros confiáveis e, portanto, é a que integra a pesquisa municipal realizada anualmente pela ABRELPE. A Figura 2.8 apresenta as quantidades coletadas entre os anos de 2009 e 2013, desconsiderando os RCC provenientes de serviços privados. Percebe-se pelos dados apresentados que há um crescimento dessas quantidades de cerca de 5% ao ano e que em 2013 a coleta de RCC ultrapassou 35 milhões de ton./ano.

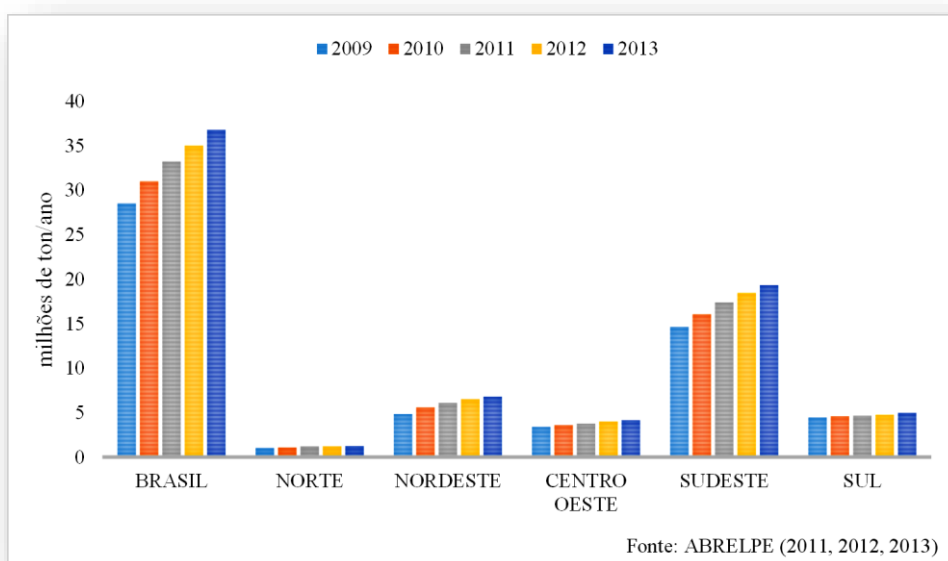


Figura 2.8. Total de RCC coletado no Brasil e por regiões no período de 2009 a 2013.

De acordo com estudo realizado por Sena *et al.* (2013), no Distrito Federal, as 17 empresas transportadoras de RCC cadastradas na Associação de Coletadoras de Entulhos e Similares do DF (ASCOLES), transportam cerca de 4.000 ton./dia, o que equivale a 120.000 ton./mês de resíduos. Esse número é ainda maior considerando que não incluem os resíduos transportados e dispostos de forma clandestina, por empresas de remoção de entulho não licenciadas ou não cadastradas na ASCOLES.

Os impactos ambientais, sociais e econômicos causados pela deposição irregular dos resíduos, demonstram a necessidade da existência de políticas públicas que incentivem a redução da geração de resíduos, avaliem os impactos gerados e forneçam subsídios ao setor da construção civil para realizar um gerenciamento eficiente voltado para uma postura ambientalmente correta (SANTOS, 2007). Neste sentido cabe destacar o impacto positivo da Resolução nº 307 – CONAMA.

De acordo com a segunda pesquisa setorial realizada pela Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2013), a partir de sua publicação, o setor de reciclagem de RCC sofreu franca expansão e o número de novas empresas recicladoras vem crescendo, chegando, em 2013, a uma taxa de 10,6 novas empresas por ano, conforme observa-se na Figura 2.9.

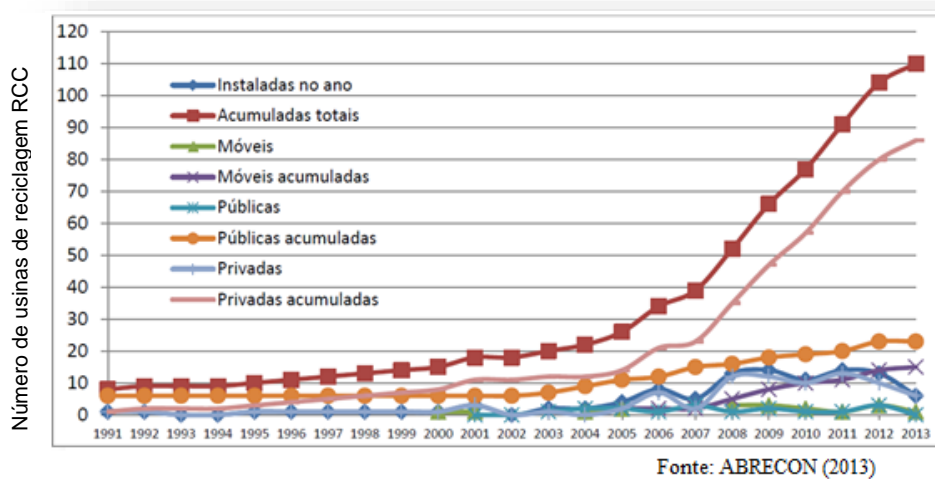


Figura 2.9. Evolução do número de usinas de reciclagem de RCC no país.

Alternativas viáveis de aplicação desses resíduos já estão sendo utilizadas em alguns países e no Brasil, como por exemplo, a produção de novos agregados reciclados para substituírem agregados naturais em concretos e argamassas. Podem ser citadas ainda aplicações de RCC em obras geotécnicas como pavimentos, contenções, solos reforçados, camadas de cobertura de aterros sanitários, motivadas pelo elevado percentual de solo e partículas finas presentes na composição do RCC reciclado.

Seguindo essa tendência de aplicação, Barros (2005) apresentou os resultados da investigação das características físicas e químicas, e ainda do comportamento geomecânico, quanto à resistência ao cisalhamento, à erodibilidade e à condutividade hidráulica do agregado reciclado miúdo proveniente do beneficiamento do entulho da cidade do Rio de Janeiro. Este autor concluiu que o material estudado apresentava características e comportamento típicos de um solo granular, com  $\gamma_{dmax}=19,3 \text{ kN/m}^3$ ,  $w_{ot}=13,5\%$ , ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) de  $35^\circ$ , coeficiente de permeabilidade saturada ( $k_{sat}$ ) da ordem de  $10^{-5} \text{ cm/s}$ , podendo atingir  $10^{-12} \text{ cm/s}$  na condição não saturada para uma sucção de 200 kPa. Mostrou ainda que o material era erodível, porém não dispersivo, com potencial de aplicação em diferentes camadas de coberturas de aterros de resíduos, principalmente em regiões de climas árido e semiárido.

Affonso (2005) caracterizou agregados graúdos reciclados, com vistas ao seu reaproveitamento como elemento de camadas drenantes, especialmente em aterros sanitários. Realizou ensaios com agregados reciclados de granulometria equivalente a britas de 1 a 4, determinando a permeabilidade horizontal e vertical e a resistência à

compressão confinada em amostras com 51 cm de diâmetro, simulando um carregamento de 100 metros de coluna de lixo. O ensaio foi escolhido para verificar se a pressão aplicada poderia causar deformações e/ou quebra de grãos de modo a comprometer a integridade e eficiência do sistema de drenagem. Os experimentos mostraram que o material era tecnicamente adequado para uso em sistemas de drenagem. A permeabilidade vertical média a água obtida foi da ordem de  $8 \times 10^{-2}$  m/s, e a horizontal da ordem de  $2,5 \times 10^{-2}$  m/s. No ensaio mecânico o material apresentou módulo médio de  $E = 8,9 \times 10^4$  kPa (E de pedra britada nº 1 =  $8,3 \times 10^5$  kPa).

Oliveira *et al.* (2011) estudaram o comportamento geotécnico de um RCC, com e sem adição de fibras de polipropileno. A metodologia utilizada constou da coleta dos resíduos da construção civil, execução de ensaios de caracterização física, mineralógica e ensaios de cisalhamento direto na condição natural e com adição de 0,25%, 0,5% e 0,75% de fibras. As fibras utilizadas na pesquisa tinham a forma de pequenos filamentos, com comprimento aproximado de 20 mm, diâmetro de 0,18 mm, peso específico igual a  $9,1 \text{ kg/m}^3$  e resistência à tração de, aproximadamente, 400 MPa. Os resultados demonstraram que o comportamento mecânico dos RCC foi influenciado pela inclusão das fibras de polipropileno, com uma tendência de aumento da tensão cisalhante máxima com a adição de fibras. Verificaram que quanto maior a quantidade de fibras adicionada ao agregado reciclado maior o acréscimo na coesão e no ângulo de atrito, encontrando valores de 14,41 kPa e  $48,15^\circ$ , respectivamente, quando incorporado 0,75% de fibras, valores 91% e 16% superiores aos encontrados para o RCC sem adição. Estes valores revelam um bom desempenho mecânico do material proporcionando assim uma boa utilização na aplicação em obras de geotecnia como estruturas de solo reforçado.

### **2.5.2. Utilização de fibras de PET reciclado**

Em geral, um solo bem compactado apresenta boa resistência à compressão e ao cisalhamento, mas baixa ou nenhuma resistência à fissuração. Assim, a inclusão de fibras ao solo pode melhorar suas propriedades.

O solo reforçado com fibras funciona como um material compósito fibroso. O solo representa a matriz do material compósito e transfere os esforços de uma fibra à outra e entre elas e à superfície adjacente. As fibras são responsáveis pela resistência e rigidez do



material compósito, controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras (CALLISTER, 2011).

As propriedades mecânicas do compósito solo-fibra dependem da porcentagem de fibras, assim como das propriedades mecânicas das fibras, do comprimento, forma e composição das mesmas e das propriedades mecânicas da matriz.

Dentre as fibras comumente utilizadas podem-se citar as naturais (fibras de juta, bambu, coco, sisal etc.), as fibras poliméricas (polipropileno, polietileno, poliéster), as fibras minerais (carbono, vidro e amianto) e as fibras metálicas. Dentre as propriedades modificadas com a adição de fibras pode-se elencar a redução da abertura de fissuras, aumento na capacidade de suporte do material, maior resistência ao impacto, aumento da resistência pós-pico, maior capacidade de absorver deformações (HEINECK, 2002).

A influência da orientação das fibras em relação ao plano de ruptura, foi analisado por algumas pesquisas, sendo possível afirmar que fibras distribuídas aleatoriamente mantêm a resistência isotrópica, limitando os planos potenciais de fragilidade que podem desenvolver-se paralelamente ao reforço orientado. Entretanto, outros trabalhos consideram que os elementos de reforço devem estar posicionados na direção das deformações de tração do solo, maximizando a contribuição do reforço (JOHNSTON, 1994; CALLISTER, 2011). No entanto, no caso de fibras curtas e com uma relação comprimento/diâmetro ( $l/d$ ) muito grande é praticamente impossível distribuir as fibras na massa de solo de maneira que fiquem posicionadas na direção dos esforços de tração.

Maher e Ho (1994) investigaram as propriedades mecânicas de composto solo-fibra. Na pesquisa foi utilizada uma argila caulínica com Limite de Liquidez de 45%, índice de plasticidade de 15% e umidade ótima de 25%. Foram utilizadas fibras de polipropileno, de celulose e de vidro como reforço, com comprimentos variando entre 0,55 e 25,4 milímetros, e teores de fibra entre 0,5 e 4%, em massa. Os resultados mostraram que a variação do teor de adição e do comprimento das fibras não causaram efeitos significativos na umidade ótima e densidade seca máxima obtidos nos ensaios de compactação utilizando energia do Proctor Normal. Observaram também que o aumento no teor de umidade das misturas reduziu o efeito da contribuição das fibras na resistência e ductilidade do compósito, causado pelo efeito lubrificante da água que reduzia a transferência de carga entre as partículas de solo e as fibras. Eles afirmaram ainda que a inclusão de fibras distribuídas aleatoriamente aumentou significativamente o pico de

resistência à compressão, a ductilidade, a resistência à tração e a resistência à flexão do solo sob carga estática. A condutividade hidráulica aumentou para todos os tipos de fibra adicionados ao solo, sendo proporcionalmente maior com a elevação do teor de fibra, razão pela qual os pesquisadores sugerem que seja analisado o teor ideal de adição de fibra para manter a condutividade hidráulica dentro dos valores permissíveis.

Al-Wahab e El-Kedrah (1995) estudaram o efeito de adição de fibras de polipropileno, com 12,7 mm de comprimento na redução de fissuras e na tendência de retração e expansão de argilas compactadas. Utilizaram uma argila com LL de 54%, LP de 28% e IP de 26%, com umidade ótima de 21%. Os teores de adição de fibra utilizados foram de 0,2%; 0,4% e 0,8%, em relação à massa de solo seco. Os resultados demonstram que o teor de fibras não teve efeito sobre a densidade seca máxima e umidade ótima, mas reduziu a variação volumétrica e o índice de fissuração, definido pela razão entre a área das fissuras, com profundidade superior a 2 mm, e a área total da superfície da amostra de solo.

Nataraj e McManis (1997) estudaram as características de resistência e de deformação de solos argilosos reforçados com fibras fibriladas distribuídas aleatoriamente, com aproximadamente 25 mm de comprimento, nas porcentagens de 0,1%; 0,2% e 0,3%, em relação à massa de solo seco. Os resultados indicaram que a adição de fibras aumentou o pico de resistência ao cisalhamento, o ângulo de atrito, a coesão e a resistência à compressão. O estudo mostrou ainda que o solo reforçado foi capaz de suportar maiores deformações.

O estudo desenvolvido por Kumar *et al.* (2006) investigou o ganho de resistência relativa em termos de compressão não confinada de uma argila mole de alta compressibilidade reforçada com fibras de poliéster. Também foi utilizada uma areia fina misturada à argila em porcentagens que variaram de 0 a 12%. As fibras de poliéster utilizadas eram de 3, 6 e 12mm de comprimento (fibras lisas) e 6mm (fibras enroladas), com diâmetro entre 30 e 40 $\mu$ m, resistência à tração entre 400 e 600 MPa e alongamento na tração superior a 100%. O teor de fibras adotado foi de 0,5%, 1%, 1,5% e 2%. Os resultados mostraram que o grau de compactação afetam os benefícios do reforço com fibras. A resistência à compressão aumentou com o acréscimo do teor de fibras e esse aumento foi ainda maior quando fibras e areias eram misturadas ao solo.

Abdi *et al.* (2008) utilizou um solo com 75% de caulinita e 25% de montmorilonita, com LL de 110%, LP de 29% e IP de 81% e com todas as partículas passando na peneira nº 200. Foi utilizado reforçado com fibras de polipropileno com 5, 10 e 15 mm de comprimento e percentuais de adição de 1, 2, 4 e 8%, em relação à massa de solo seco. Os resultados mostraram que a adição de fibras de forma aleatória resultou numa redução substancial do coeficiente de adensamento e da expansão após o descarregamento, proporcional ao aumento no teor de fibras. A variação do comprimento das fibras não exerceu influência significativa nesses parâmetros. A condutividade hidráulica aumentou ligeiramente em função do teor e do comprimento das fibras. No entanto, o aumento global não foi significativo a ponto de tornar o solo impróprio para cobertura de aterros sanitários. Com relação à fissuração por ressecamento, observaram que a inclusão de fibras reduziu significativamente o número, a profundidade e o comprimento das fissuras.

Amir-Faryar e Aggour (2014) propuseram uma metodologia para determinar o teor ótimo de fibra baseado na massa específica aparente seca máxima obtida em ensaios de compactação. Nesta pesquisa foram utilizadas misturas de um solo argiloso com adição de fibras de polipropileno, dos tipos monofilamento e fibrilada, nos percentuais de 0%; 0,2%; 0,4% e 0,6%, com 1,27 cm e 1,9 cm de comprimento, e 0,8% apenas para o comprimento de 1,27 cm. Diferentemente dos resultados apresentados por Al-Wahab e El-Kedrah (1995), tanto a massa específica seca máxima quanto a umidade ótima foram afetadas pela inclusão das fibras. Segundo os autores, a inclusão das fibras pode expulsar de forma mais eficiente o ar dos vazios do solo e aumentar sua densidade. Para os comprimentos e tipos de fibras utilizadas, o maior valor de  $\gamma_{dmax}$  foi encontrado para o percentual de adição de 0,2% de fibra. As fibras mais longas e do tipo fibrilada atuaram de forma mais efetiva na elevação do  $\gamma_{dmax}$ . A umidade ótima das misturas com adição de fibra aumentou quando comparada à do solo puro, sendo a menor umidade ótima entre todas as misturas encontrada para o percentual de 0,2% de adição.

Heineck (2002) apresenta um resumo da influência da ação das fibras no comportamento dos solos reforçados baseado no resultado de várias pesquisas.

- a) compactação: a maioria das pesquisas indicou que a adição de fibras não altera os valores de densidade seca máxima e umidade ótima dos compósitos em relação ao solo puro;

- b) resistência de pico: em geral, as fibras inibem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito, levando ao aumento da área sob as curvas tensão x deformação, ou seja, aumentam a tenacidade do compósito. Solos argilosos mostraram-se mais sensíveis ao acréscimo das resistências à compressão, à tração e ao cisalhamento com o aumento do teor de fibras. Já o aumento do comprimento das fibras não mostrou contribuição para o ganho de resistência;
- c) resistência pós-pico: praticamente todos os trabalhos analisados concluíram que a adição de fibras reduz a queda de resistência pós-pico;
- d) deformabilidade: o módulo de deformação aumentou com o aumento do teor de fibra;
- e) modo de ruptura: os compósitos reforçados com fibra demonstraram aumento da ductilidade com a adição de fibras. As pesquisas apontaram que as fibras mais maleáveis alteraram o comportamento dos compósitos de frágeis para dúcteis e que este comportamento depende, fundamentalmente, de uma boa adesão solo-fibra;
- f) condutividade hidráulica e outras propriedades: a autora destacou que vários pesquisadores relataram aumento da condutividade hidráulica ocasionado pela adição de fibras em solos argilosos. Acrescentou que a incorporação de fibras reduziu o potencial de retração e inchamento dos compósitos, sendo este efeito mais pronunciado quando a compactação era realizada no ramo seco da curva e menos pronunciada no ramo úmido.

Devido à estrutura química variada dos polímeros, as fibras poliméricas podem ser consideradas as mais promissoras para o reforço de solos, pois dão origem a diferentes tipos de fibras. Além das fibras de polipropileno já utilizada com frequência para reforço de concreto, argamassa e solo, outro polímero que merece destaque é o poliéster, por apresentar alta densidade, rigidez e resistência. O Polietileno Tereftalato de Etileno, conhecido comumente como PET, é o poliéster mais usado atualmente e pode ser uma alternativa promissora como reforço de solos. Apresenta alongamento na ruptura de 7 a 50% e densidade relativa entre 1,33 e 1,45. A temperatura de fusão é da ordem de 270°C (MANO, 1991).

O PET, como a grande maioria dos plásticos, é visto como um dos maiores responsáveis pelos prejuízos causados ao meio ambiente devido à deposição irregular, uma vez que o seu processo de decomposição demora séculos. No entanto, as possibilidades de reaproveitamento desse material são enormes. A sua transformação em novos materiais ou produtos incluem a produção de fibras multifilamento (fabricação de cordas) e monofilamento (produção de fios de costura); a moldagem de produtos para o setor de autopeças, lâminas para termo-formadores e formadores a vácuo, embalagens de detergentes; embalagens secundárias e terciárias de alimentos; tecidos, carpetes, paletes, entre outros (ABIPET, 2013).

## **2.6. FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DE CAMADAS DE COBERTURAS DE ATERROS SANITÁRIOS**

### **2.6.1. Condutividade Hidráulica**

Os solos são constituídos por partículas sólidas com vazios entre elas que, em geral, são interconectados, criando caminhos preferenciais para a passagem da água. A condutividade hidráulica é determinada pela aplicação de uma diferença de carga hidráulica através da amostra de solo, a qual é inicialmente saturada, possibilitando a medida da taxa de fluxo de água. Lambe & Whitman (1969) definiu a condutividade hidráulica como a taxa na qual um fluido, geralmente água, pode fluir através dos vazios de um solo. O coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) é a velocidade de escoamento média do fluxo de água em um solo sob a ação de um gradiente hidráulico unitário. Assim, o estudo da condutividade hidráulica é de fundamental importância em todos os casos onde ocorre fluxo nos meios porosos. No caso específico das camadas impermeabilizantes é imprescindível a escolha do material, utilizado em sua composição, uma vez que é necessária a utilização de materiais com baixíssimos valores de condutividade hidráulica.

Em solos compactados a condutividade hidráulica pode variar por diversos fatores, dentre eles:

- distribuição do tamanho de partículas;
- textura e forma da partícula;
- composição mineralógica;
- índice de vazios;

- grau de saturação;
- estrutura do solo;
- características do fluido percolante;
- tipo de fluxo;
- temperatura;
- teor de umidade na moldagem;
- o método e a energia de compactação;
- gradiente hidráulico.

A condutividade hidráulica de um solo granular é influenciada pela distribuição dos tamanhos das partículas e dos poros, e especialmente, pela atividade das partículas mais finas. Quanto menores as partículas e menores os vazios entre elas, maior a resistência ao fluxo de água.

Partículas alongadas ou irregulares criam trajetórias de fluxo mais tortuosas do que aquelas ao redor de partículas aproximadamente esféricas. Partículas de superfície áspera apresentam maior resistência por atrito ao fluxo do que partículas de superfície lisa. Ambos os efeitos tendem a reduzir a velocidade de fluxo de água através do solo, reduzindo sua condutividade hidráulica.

Com relação à composição do solo, diversos autores indicam que quanto maiores o LL e o IP do solo, menor a sua condutividade hidráulica. Considerando que os argilominerais determinam a facilidade de expansão dos solos e, conseqüentemente sua permeabilidade, pode-se afirmar que quanto mais ativas as partículas e menor a agregação entre elas, menor será o coeficiente de permeabilidade. Assim, a caulinita, que apresenta fraco poder de retenção de água e praticamente não apresenta expansibilidade, é mais permeável que a montmorillonita, mais ativa e caracterizada por sua elevada capacidade de expansão e de retenção de água. A illita apresenta um comportamento intermediário entre as duas.

A condutividade hidráulica é uma constante para um dado solo em um estado particular. O coeficiente de permeabilidade,  $k$ , depende do massa específica ( $\gamma$ ) e da viscosidade ( $\mu$ ) do líquido percolante, além dos efeitos químicos e físicos causados pelo líquido em contato com as partículas sólidas. As alterações de permeabilidade causadas pela percolação de substâncias químicas podem influenciar as forças de repulsão entre as

partículas de solo que controlam os comportamentos de floculação, dispersão, contração e expansão. Assim, se o líquido percolante age reduzindo as forças de repulsão entre as partículas, a estrutura torna-se mais floculada e, por conseguinte, mais permeável.

Uma das considerações em que a Lei de Darcy se baseia é a condição de fluxo em regime laminar, o que ocorre quando a velocidade é relativamente baixa. Acima de determinada velocidade crítica o fluxo torna-se turbulento e a Lei de Darcy, da qual dependem os cálculos de condutividade hidráulica, não é mais válida.

Um aumento na temperatura causa uma redução na viscosidade da água, ou seja, a água torna-se mais fluida, o que afeta o valor da condutividade hidráulica medida. Para um ensaio de laboratório a temperatura padrão é 20°C.

O modo como o solo é preparado para ensaio tem um efeito considerável no tamanho e disposição dos vazios entre as partículas, e conseqüentemente na condutividade hidráulica. O volume de vazios é expresso em função do índice de vazios ( $e$ ) ou da porosidade ( $n$ ).

Nos ensaios de permeabilidade são feitos esforços para eliminar o ar de modo que o solo possa ser assumido como saturado. No solo não saturado, a percolação da água não remove todo o ar que se encontra dentro do mesmo, de forma que as bolhas de ar nele contidas pela tensão superficial da água permanecem e tornam-se um obstáculo para o fluxo da água. Por isso, segundo Pinto (2000), o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado é menor do que ele apresentaria se estivesse saturado.

A estrutura do solo e a disposição relativa dos grãos também influenciam na condutividade hidráulica dos solos. Por exemplo, os solos residuais, em virtude dos macroporos de sua estrutura, tendem a apresentar maiores coeficientes de permeabilidade. Deve-se observar também a compactação, a consistência e ainda se o solo apresenta-se compactado ou encontra-se no seu estado natural, tendo em vista que o solo compactado apresenta uma condutividade hidráulica menor que no seu estado natural. Geralmente quando o solo é compactado mais seco, a disposição de suas partículas, por apresentar uma estrutura floculada, tende a apresentar uma condutividade hidráulica maior em relação a um solo compactado mais úmido, onde a estrutura encontra-se dispersa, mesmo que possuam o mesmo índice de vazios (Lambe, 1969).

A energia de compactação também influi na condutividade hidráulica. Mitchell *et al.* (1965) avaliaram essa influência realizando ensaios em amostras com diferentes energias de compactação. Os autores constataram que o incremento da energia de compactação ocasionou uma diminuição na condutividade hidráulica em até 100 vezes, principalmente para os pontos próximos ao teor de umidade ótimo.

Pode-se observar que a condutividade hidráulica em solos compactados varia diretamente em função da umidade de compactação, da massa específica seca e da energia de compactação. Em função disso, Daniel e Benson (1990) propuseram uma metodologia para definir critérios de aceitação de solos para camadas de coberturas. A metodologia consiste em determinar uma zona admissível na curva de compactação do solo, onde valores de massa específica seca e teor de umidade proporcionem condições ideais para a utilização do solo como barreira impermeável.

Segundo esses autores devem ser realizados os seguintes procedimentos:

- 1) realizar ensaios de compactação com três níveis de energia. Proctor reduzido (utilizando apenas 15 golpes por camada), normal e modificado, compactando-se de cinco a seis corpos de prova por nível de energia (Figura 2.10a);
- 2) determinar a condutividade hidráulica dos corpos de prova nas condições do ensaios de compactação, plotando-se os resultados da condutividade hidráulica em função do teor de umidade (Figura 2.10b);
- 3) plotar no gráfico massa específica x umidade de moldagem, os pontos que possuem valores de condutividade hidráulica admissíveis (inferior a  $10^{-9}$  m/s) com simbologia diferenciada dos demais, identificando a zona de aceitação considerando o critério de condutividade hidráulica (Figura 2.10c);
- 4) identificar novas zonas admissíveis em função de outros parâmetros.



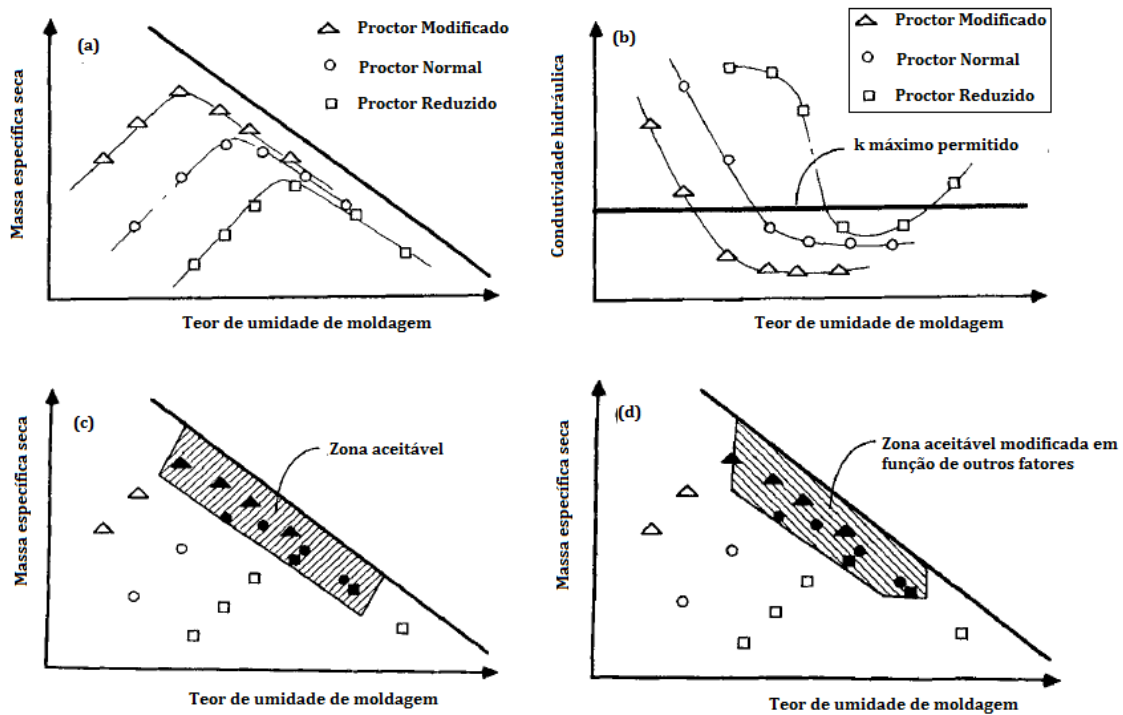


Figura 2.10. Procedimento para estabelecer zona de teor de umidade e massa específica seca que atendam ao critério de condutividade hidráulica ( $k$ ): (a) amostras compactadas em três energias distintas; (b) determinação da permeabilidade das amostras; (c) desenho da zona de aceitação (símbolos sólidos representam amostras com valores aceitáveis de  $k$ ); (d) zona aceitável considerando outros critérios além da condutividade hidráulica (Fonte: Daniel e Benson, 1990 - modificado).

Daniel e Wu (1993) aplicaram a metodologia proposta por Benson e Daniel (1990) considerando como três critérios de aceitação: condutividade hidráulica inferior a  $10^{-9}$  m/s, retração volumétrica máxima de 4% e resistência à compressão não confinada superior a 200 kPa. Cada um dos critérios era avaliado, determinando-se zonas aceitáveis para cada um deles. Posteriormente, as zonas de aceitação eram sobrepostas determinando-se a zona de aceitação final (Figura 2.11).

### 2.6.2. Sucção

Outra característica que deve ser analisada para o entendimento do comportamento das camadas de cobertura diz respeito à capacidade de armazenamento da água no solo. Como as camadas de cobertura são compactadas, normalmente na umidade ótima, seu comportamento pode ser descrito pelas teorias da Mecânica dos Solos não Saturados.

Um dos principais fatores que impõem solicitações em solos não saturados são as variações do volume de água dos poros do solo ocasionadas, no caso das coberturas, pela interação entre o solo superficial não saturado e a atmosfera. Essa interação depende de diversos mecanismos de fluxo e retenção de água, ar e calor.

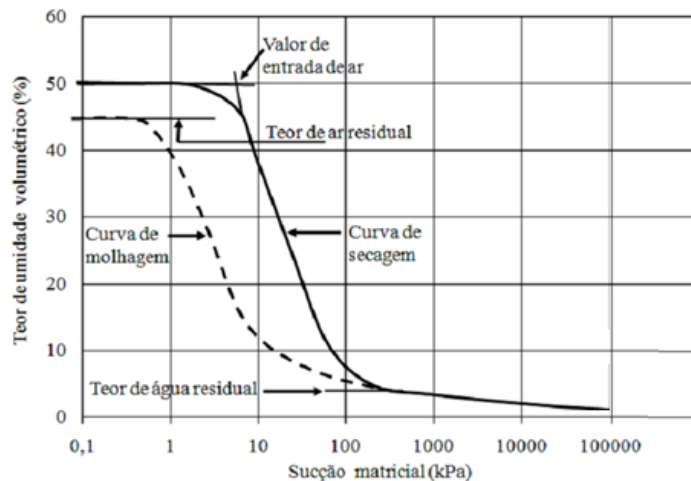
Figura 2.11. Zona de aceitação proposta por Daniel e Wu (1993).

A sucção pode ser entendida como sendo a pressão isotrópica da água intersticial que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais. A sucção total pode ser dividida em duas componentes: uma mátrica, relacionada ao tipo de partículas e ao seu arranjo estrutural, e uma osmótica, que diz respeito à concentração de sais na parte líquida do meio poroso.

A sucção matricial pode ser definida como a pressão negativa da água intersticial devido aos efeitos de capilaridade e das forças de adsorção, sendo seu valor representado pela diferença entre a pressão da água e do ar presente nos interstícios. Já a componente osmótica é a sucção equivalente relacionada à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre, função da quantidade de sais dissolvidos no interior do solo (HUSE, 2007).

A curva característica expressa graficamente a relação entre a sucção e o teor de umidade ou grau de saturação, expresso em termos de peso ou volume. Nessa relação, a sucção varia inversamente com o teor de umidade, ou seja, a sucção tende a zero quando o solo atinge o estado de saturação plena, e a um valor máximo quando o grau de saturação tende a zero. Essa relação pode ser obtida através do uso de uma ou mais técnicas.

O formato da curva de retenção de água do solo é influenciado principalmente pelo tipo de solo, teor de umidade inicial, índice de vazios, textura, mineralogia, histórico de tensões e os métodos de compactação. A Figura 2.12 apresenta uma curva típica de retenção de água de um solo siltoso inicialmente saturado sob a condição de ressecamento e, posteriormente, submetido a condição de molhagem. Na curva, destacam-se dois pontos importantes: o valor da entrada de ar e a umidade residual.



Fonte: Fredlund *et al.* (1995) - Modificado

Figura 2.12. Curva característica de sucção típica de um solo siltoso.

Na prática, se uma pequena sucção é aplicada a um solo saturado, nenhum fluxo ocorrerá até que esta ultrapasse um determinado valor crítico, capaz de fazer com que a água presente no maior vazio comece a sair. Esta sucção crítica é denominada sucção de entrada de ar ( $\psi_b$ ). Com o aumento gradual da sucção, os vazios de diâmetros menores vão se esvaziando, até que para altos valores de sucção, somente os vazios muito pequenos ainda retêm água. Esse valor é estimado pela interseção de uma reta paralela ao eixo da sucção num grau de saturação correspondente a 100% e uma reta estendendo a porção linear da curva de secagem. A umidade residual é definida como o limite inferior a partir do qual qualquer acréscimo na sucção matricial pouco afeta os valores de umidade.

A curva característica de sucção do solo pode ser utilizada na obtenção de vários parâmetros utilizados para descrever o comportamento de solos não saturados, existindo uma relação entre a curva característica de sucção do solo e as demais propriedades dos solos não saturados, como resistência à tração e fissuração.

De acordo com Li e Zhang (2011), o teor de umidade no início da fissuração devido ao ressecamento pode ser inferido a partir do valor da entrada de ar na curva característica de sucção, com uma boa aproximação.

### **2.6.3. Resistência à tração dos solos**

A resistência à tração é um parâmetro que caracteriza o comportamento coesivo e o atrito interno do solo e é um indicador da capacidade do material de suportar tensões de tração sem se romper. Desta forma, o processo de fissuração de um solo tende a iniciar no momento em que sua resistência à tração é superada.

Embora tenha se considerado até pouco tempo atrás a resistência à tração do solo como a máxima força de tração por unidade de área transversal, atualmente entende-se que a resistência à tração deve ser considerada como uma faixa de possíveis valores, que varia desde o valor da sucção no solo, considerando o valor de tensão isotrópica, até valor da tensão de tração uniaxial (LU, 2008; CABELLO, 2013).

Os mecanismos que contribuem para a resistência à tração podem ser identificados examinando-se a curva de retenção de um solo. Esta curva reflete a relação entre a sucção e o grau de saturação. Como mostrado na Figura 2.13, são três os estados de saturação do solo que apresentam poro-pressão negativa ou sucção: “estado residual”, “estado de transição” e “estado capilar”.

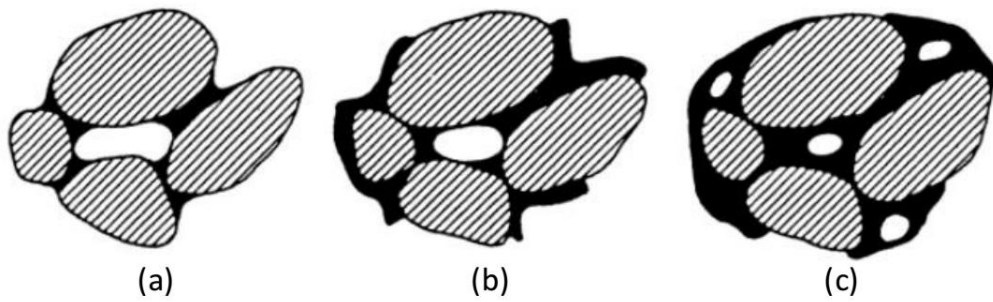
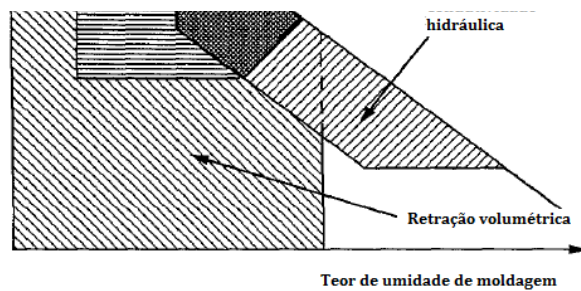


Figura 2.133. Estados de saturação em solos não saturados: (a) residual. (b) de transição. (c) capilar ou limite (Fonte: BEAR E BACHMAT, 1990).



Estudos realizados por Lu (2008) demonstraram que os mecanismos que contribuem com a resistência à tração em cada estado de saturação podem apresentar diferenças significativas. De acordo com a Figura 2.14, a curva característica e a curva de resistência à tração referente a uma areia fina mostram dois picos distintos para a resistência à tração. O primeiro próximo ao teor de umidade residual e o segundo próximo ao valor de entrada de ar do solo. Esses dois parâmetros, a máxima resistência à tração

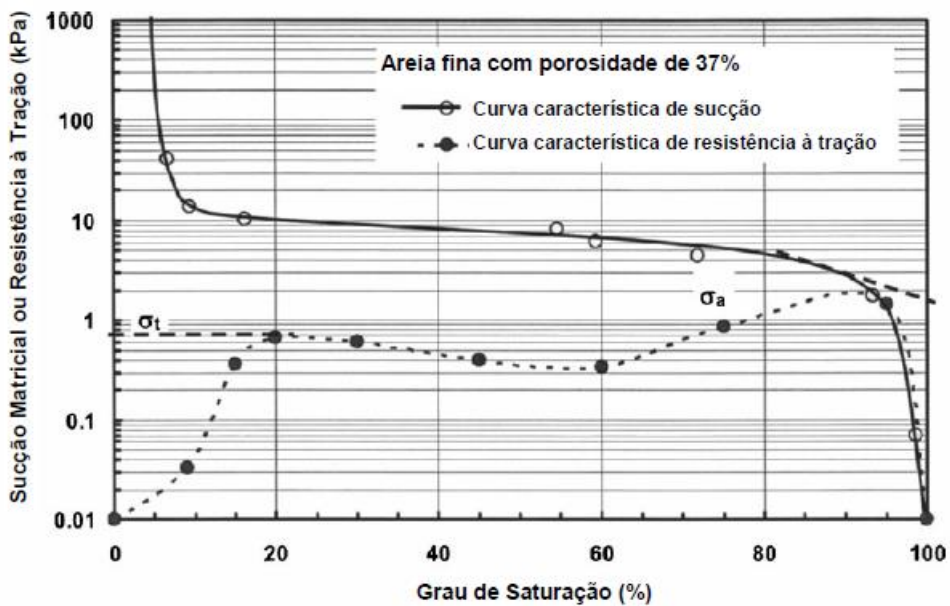


Figura 2.14. Relação entre a curva característica de resistência à tração e a curva característica de sucção para uma areia fina (Fonte: LU, 2008).

que ocorre no regime residual ( $\sigma_r$ ) e a máxima resistência à tração que ocorre no regime capilar ( $\sigma_a$ ), controlam a forma da curva característica de resistência à tração. Já no estado de transição da saturação, a resistência à tração varia de forma não linear. Este comportamento é contrário às teorias clássicas que preveem a variação linear na resistência à tração como resultado da superposição de mecanismos por  $\sigma_r$  e  $\sigma_a$ .

A máxima resistência à tração no regime capilar é observada e teorizada como sendo menor que a correspondente sucção matricial para o mesmo grau de saturação, diferentemente do que ocorre com a tração máxima no regime capilar, que alcança valores entre 85% e 90% do valor da pressão de entrada de ar (LU, 2008).

Schubert (1984) obteve para calcários a pressão de entrada de ar de 9,2 kPa e a resistência à tração máxima de 8,2 kPa e Heibrock *et al.* (2004) em ensaios de caulim o valor de entrada de ar obtido foi de 316 kPa e resistência à tração máxima de 270 kPa, confirmando a afirmação de Lu (2008).

Zeh e Witt (2007) realizaram ensaios de tração em uma argila composta por 46% de argila e 53% de silte, compactada em um teor de umidade de 17,7% e massa específica seca máxima de 1,696 g/cm<sup>3</sup>, correspondentes ao ponto ótimo da curva de compactação; em um teor de umidade de 21,5% e massa específica seca máxima de 1,645 g/cm<sup>3</sup>, correspondentes a um ponto no ramo úmido da curva de compactação; e, em um teor de umidade de 14,3% e 1,645 g/cm<sup>3</sup>, correspondentes a um ponto no ramo seco da curva de compactação. Os ensaios mostraram que para valores de sucção de até 600 kPa todas as amostras apresentaram comportamento de resistência à tração similares. Acima desse valor as amostras compactadas no ramo seco da curva de compactação tiveram um crescimento da resistência à tração inferior às amostras compactadas no teor de umidade ótimo ou no ramo úmido da curva de compactação. Os corpos-de-prova compactados acima do teor de umidade ótimo e os corpos-de-prova compactados no teor de umidade ótimo apresentaram resistência à tração similar até o valor de sucção de 1150 kPa. Acima desse valor os corpos-de-prova do ramo úmido apresentaram resistência à tração superior.

Ainda em relação à resistência à tração dos solos, o número e o tamanho dos poros conduzem a diferentes magnitudes de resistência. Em geral, solos que apresentam apenas pequenos poros exibem resistências superiores aos solos com grandes poros ou solos com diferentes tamanhos de poros. Em solos finos, a orientação das partículas também governa a resistência dos solos. Estruturas dispersas, como é o caso de argilas compactadas no

teor ótimo de umidade, apresentam preponderantemente poros pequenos, e exibem resistência maior com o aumento da sucção (ZEH E WITT, 2007).

De acordo com Barzegar *et al.* (1995) a resistência à tração também é influenciada pelo tipo e quantidade de argilomineral presente, tamanho da fração argila e quantidade de argila em estado disperso.

## **2.7. RESSECAMENTO E FISSURAÇÃO DE SOLOS**

A formação de fissuras por ressecamento na superfície do solo ocasionado pela perda de umidade é um fenômeno natural e pode afetar significativamente suas propriedades hidráulicas. Devido à complexidade dos materiais, esse fenômeno é influenciado por muitas variáveis dentre elas a composição mineralógica, quantidade de argila, variação da sucção, umidade relativa de ar e temperatura, espessura das camadas, condições de contorno, dentre outros (TANG *et al.*, 2011 b).

Segundo Lakshmikanta (2009), em um solo submetido a condições de ressecamento, o surgimento de fissuras se inicia quando as forças de tensão excedem a resistência à tração do solo. Essa resistência depende do teor de umidade do solo e da sucção. Iniciada a fissuração, a propagação das fissuras será regida pelo estado de tensões existente no interior do solo e por sua capacidade de dissipar as energias. Assim, embora a resistência à tração determine o início da fissuração, a propagação das trincas tende a ser regida pela mecânica da fratura, sendo os conceitos dessa teoria de extrema importância na definição de uma estrutura numérica e teórica para o problema.

Existem poucos estudos sobre ressecamento e fissuração que utilizam os conceitos da mecânica dos solos, menos ainda os que utilizam os conceitos da mecânica dos solos não saturados, embora seja esta teoria mais indicada para explicar os processos de fissuração, onde a sucção desempenha um papel fundamental. Os estudos existentes na área de ressecamento ainda não conseguem prever um padrão de fissuração para os solos. A maioria desses trabalhos limita-se a descrever o fenômeno e apresentam análises mais qualitativas.

Mais recentemente, técnicas para a quantificação das principais características das fissuras evoluíram da medição direta em campo para análises mais sofisticadas com a utilização de imagens processadas (MILLER *et al.*, 1998; VOGEL *et al.*, 2005). A análise

de imagens provou ser uma ferramenta poderosa, possibilitando identificar parâmetros geométricos e morfológicos, tais como, abertura e comprimento das fissuras, área, ângulo, bem como características de distribuição. Além disso, foram desenvolvidos alguns modelos e estudos teóricos sobre o fissuramento por secagem (PERÓN *et al.*, 2009; STIRLING, 2014). Mas essa é uma área que ainda demanda respostas por meio de um aprofundamento maior nas pesquisas.

Uma revisão no estado da arte do conhecimento sobre os processos de fissuração de solos por ressecamento apresentado por Cabello (2013) propõe a divisão dos tipos de estudos encontrados na literatura de acordo com seu enfoque principal, classificando-os em cinco categorias: a) estudos da morfologia e evolução das fissuras; b) estudos da fissuração associados a problemas locais específicos; c) estudo de variáveis individuais que intervêm na fissuração dos solos; d) modelos de início, propagação e distribuição espacial de fissuras; e) estudos do comportamento de solos fissurados.

Frookes e Denness (1969) *apud* Laksmikantha (2009) classificam a fissuração do solo com base no tamanho, geometria, rugosidade, intensidade e espaçamento entre as fissuras.

Outro tipo de classificação apresentada por Laksmikantha (2009), referindo-se aos estudos de Fang (1997), divide as fissuras quanto à origem em quatro tipos: efeitos de retração, variações térmicas, esforços de tração e fraturamento.

As fissuras de retração são as mais comuns e são causadas pela variação volumétrica de retração na superfície das camadas ocasionadas pela evaporação da água, fazendo surgir tensões que ao serem liberadas provocam a fissuração da superfície da camada. As fissuras causadas por variações térmicas se desenvolvem quando o material sofre variações bruscas de temperatura.

As fissuras de tração são causadas principalmente pelo acréscimo de tensões, devido a carregamentos estruturais, de chuva, gelo e neve, vegetação e carregamentos sazonais. Algumas vezes são associadas também às variações de umidade e tensões térmicas e carregamentos que provocam fratura.

Por fim, as fissuras provocadas por fraturas devido a variações diárias de umidade ou temperatura ou causadas pela variação sazonal do nível do lençol freático, chuva ou derretimento de neve que preenchem as fissuras e os vazios do solo ocasionando



acrécimo de poro-pressão da água. Essa variação da poro-pressão com as mudanças das condições ambientais resultam num aumento de tensões internas e uma correspondente elevação das forças de compressão no interior da estrutura do solo. Em solos finos esta tensão pode chegar a 300 kPa. Esse tipo de carregamento cíclico causado pela combinação de tensões de retração e térmicas e da variação da poro-pressão entre as partículas de solo é denominada de carregamento de fratura no solo e ocasiona as chamadas fissuras por fraturamento.

### **2.7.1. Processo de ressecamento e seus efeitos no comportamento do solo**

A proximidade da camada de cobertura da atmosfera e sua exposição sem proteção, deixam a camada de argila propensa aos danos causados pelo ressecamento (DANIEL E WU, 1993). Khire *et al.* (1997) demonstraram que as camadas de cobertura de argila compactada sofrem mudanças sazonais no teor de umidade, mesmo estando a uma profundidade significativa, ocasionadas pelas variações sazonais de precipitação e evapotranspiração e que o ressecamento pode induzir a formação de fissuras que afetarão de forma irreversível seu comportamento.

Tang *et al.* (2011 a) descrevem o processo de formação de fissuras conforme mostrado na Figura 2.14. Segundo os autores, quando uma argila homogênea e completamente saturada é submetida ao ressecamento, tem-se início a evaporação da água superficial. Geralmente, o filme de água sobre a superfície evapora primeiro. Durante este período, a estrutura e os estados de tensão x deformação do solo não são afetados (Figura 2.15 a). À medida que a interface água-ar alcança a superfície da camada de solo inicia-se a formação de um menisco (Figura 2.15 b). Assim, entre essa interface e as partículas de solo, a sucção capilar começa a se desenvolver na parte superior da camada (Figura 2.15 c). Com a continuação da evaporação, a curvatura do menisco capilar aumenta e é acompanhada do acréscimo da sucção capilar e da tensão efetiva entre as partículas de argila. Conseqüentemente, a camada de argila se consolida e retrai. Ao nível das partículas, pode-se imaginar que cada partícula da camada superficial sofre a ação de uma força de tração induzida pela sucção capilar desenvolvida entre as partículas vizinhas (Figura 2.15 c), criando um “campo” de tensões de tração na superfície da camada (Figura 2.15 d). Quando essas tensões ultrapassam a resistência à tração do solo surgem as primeiras fissuras (Figura 2.15 e).

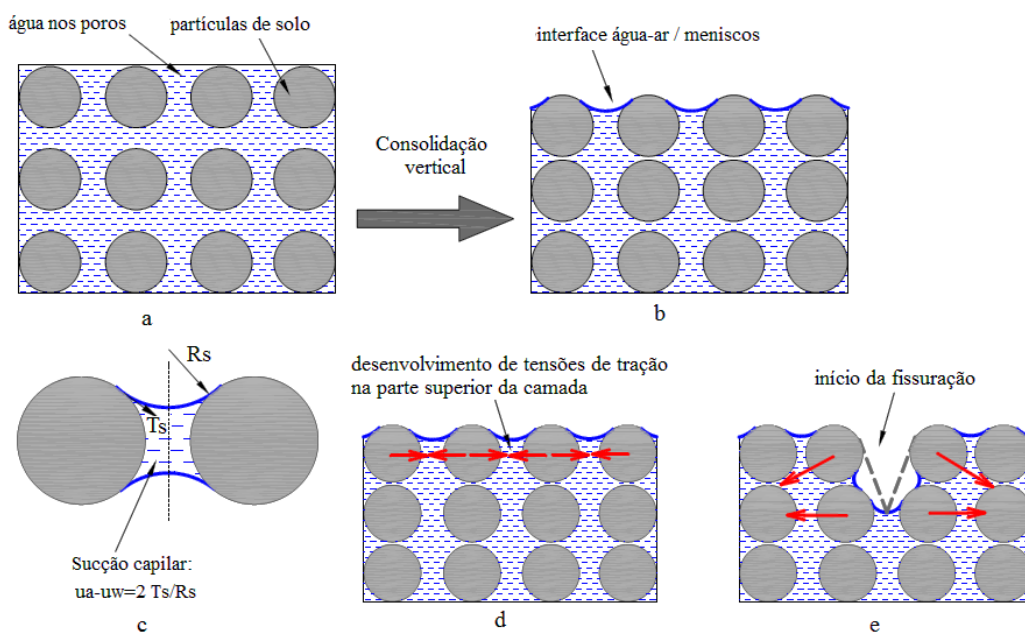
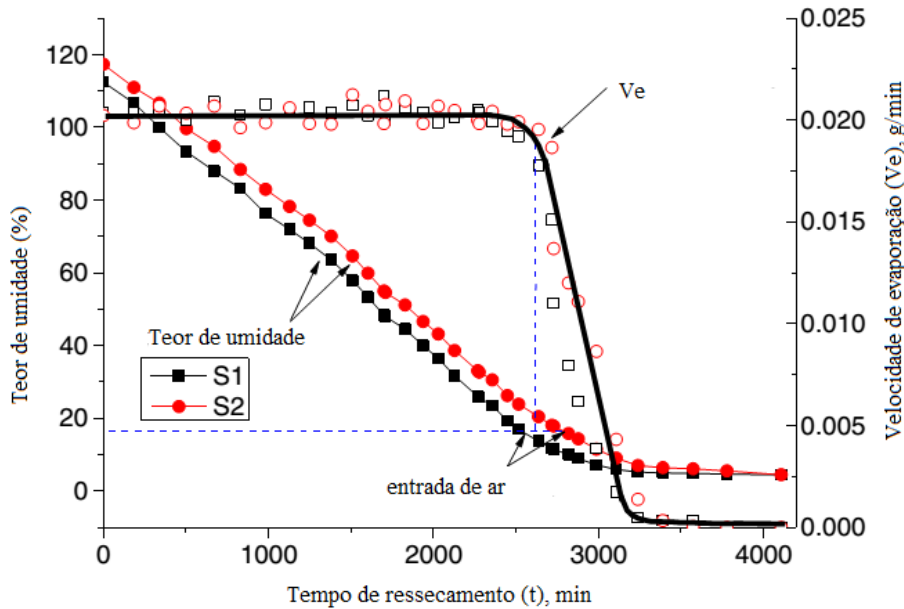


Figura 2.14. Desenho esquemático do processo de formação de fissuras. (a) solo inicialmente saturado; (b) menisco da interface água-ar desenvolvido entre as partículas de solo; (c) sucção capilar entre as partículas do solo; (d) tensão de tração desenvolvida na camada superior; e (e) início da fissuração.

Os resultados obtidos por Tang *et al.* (2011 a) indicam que a evaporação da água das amostras analisadas é composta de três estágios: uma zona inicial onde a perda de água ocorre com uma velocidade constante; uma zona com velocidade decrescente e uma zona final estabilizada, onde ressecamento adicionais não acarretam mais nenhuma perda de água (Figura 2.15). Estes resultados corroboram com os obtidos por Wilson *et al.* (1997) que realizaram ensaios de evaporação em três diferentes amostras de solo e atribuíram a velocidade decrescente da evaporação aos seguintes fatores: (a) a quantidade de água disponível nas amostras de solo reduz com o tempo; (b) o aumento da sucção que gera o aumento da aderência às moléculas de água impedindo sua saída para atmosfera; (c) a variação da pressão do vapor de água na interface solo-ar diminui com a secagem. Além disso, a redução do tamanho dos poros e da condutividade hidráulica resultante da retração do solo também reduz a velocidade de evaporação.

A zona com velocidade de evaporação constante geralmente ocorre quando as amostras encontram-se saturadas. Quando o teor de umidade chega próximo ao valor da entrada de ar, valor onde as amostras iniciam a dessaturação, a zona de evaporação com velocidade constante chega ao fim. Os poros maiores próximos à superfície se abrem e as bolhas de ar entram, resultando em uma redistribuição da umidade no sistema de poros.

Com a continuação da secagem, os poros superficiais mais finos também são esvaziados juntamente com os poros maiores da camada inferior. Este processo continua até que as bolhas de ar rompam o fluxo capilar que leva a água das camadas mais internas até a superfície de evaporação.



Fonte: Tang *et al.* (2011 a) - modificado

Figura 2.15. Variação da umidade e da velocidade de evaporação com o tempo de ressecamento.

Li e Zhang (2011) realizaram ensaios de campo em duas argilas siltosas, de média e baixa expansividade, para avaliar o processo de formação e desenvolvimento de fissuras por ressecamento. Baseado nos ensaios de campo, nos ensaios de sucção e nas propriedades retração do solo obtidos em laboratório, esses autores quantificaram os parâmetros geométricos das fissuras em função do teor de umidade e do tempo de ressecamento. Os resultados mostraram que as fissuras se desenvolvem em três estágios. No estágio inicial se desenvolvem lentamente, com a evaporação da água ocorrendo unidirecionalmente no sentido vertical e com uma pequena taxa de evaporação (Figura 2.17a). As poucas fissuras aparecem de forma aleatória, com sua localização governada pela heterogeneidade das propriedades dos solos.

Depois do aparecimento das primeiras fissuras, a água passa a evaporar também horizontalmente pelas paredes das fissuras, em adição à evaporação no sentido vertical (Figura 2.17b). Com a evaporação em duas direções, o processo de ressecamento é acelerado e o desenvolvimento das fissuras entra no estágio primário. Neste estágio, as

fissuras se desenvolvem rapidamente à medida que o teor de umidade decresce. As fissuras formadas neste estágio são denominadas de fissuras primárias, formando uma rede de polígonos. Novos ramos surgem nas extremidades e nas descontinuidades das fissuras existentes, em direção aproximadamente perpendicular.

No último estágio de ressecamento, o solo e a atmosfera circundante trocam umidade em função do gradiente de concentração do vapor de água. Quando a umidade relativa do ar se iguala a do solo, o gradiente de concentração de vapor de água zera, cessando a troca de umidade e atingindo uma condição de equilíbrio (Figura 2.17c). A taxa de evaporação dos solos é reduzida e o desenvolvimento das fissuras diminuiu até estabilizar-se.

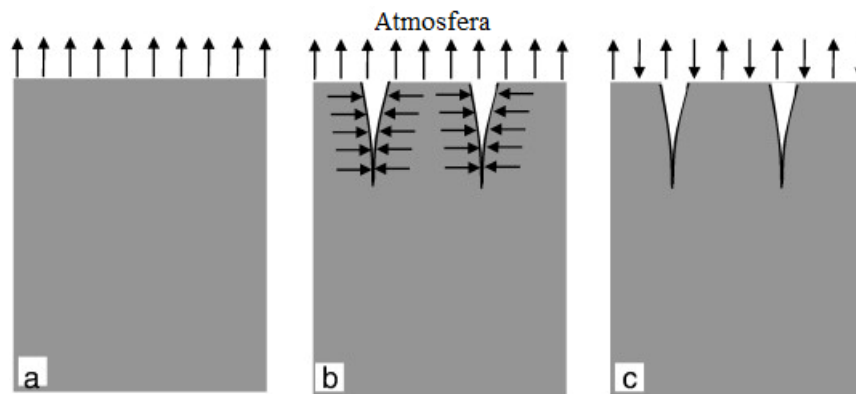
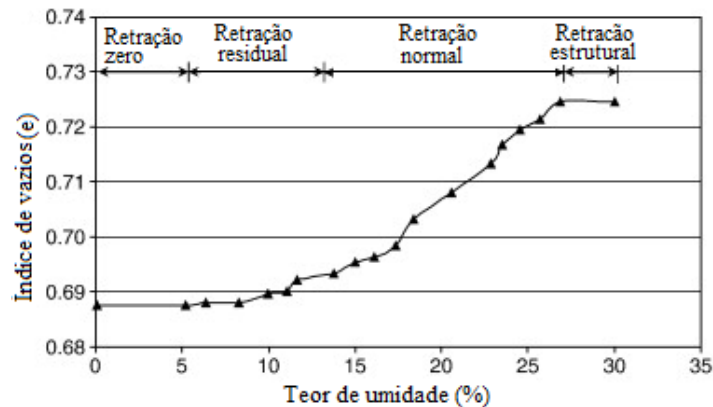


Figura 2.16. Estágios de desenvolvimento das fissuras, segundo Li e Zhang (2011). (a) Estágio Inicial. (b) Estágio Primário. (c) Estágio Estacionário.

Tang *et al.* (2011 a) compararam a formação das fissuras com os estágios de evaporação e concluíram que existem dois tipos de fissuras: aquelas que aparecem durante o período em que a velocidade de evaporação é constante e as que se desenvolvem durante o período com velocidade de evaporação decrescente. É interessante destacar que 90% das fissuras ocorreram durante a fase de evaporação constante, quando as amostras ainda estavam completamente saturadas.

A relação entre o volume de vazios e o teor de umidade foi avaliada por Li e Zhang (2011), utilizando amostras de solos com 70 mm de diâmetro e 19 mm de altura. As amostras foram inicialmente saturadas e posteriormente submetidas ao ressecamento em um ambiente com umidade e temperatura controladas. As dimensões e a massa das amostras foram medidas periodicamente para obter o volume de vazios e o teor de umidade. Na Figura 2.17 observa-se que inicialmente a mudança do índice de vazios é relativamente pequena, quando o grau de saturação do solo está alto. Com o decréscimo

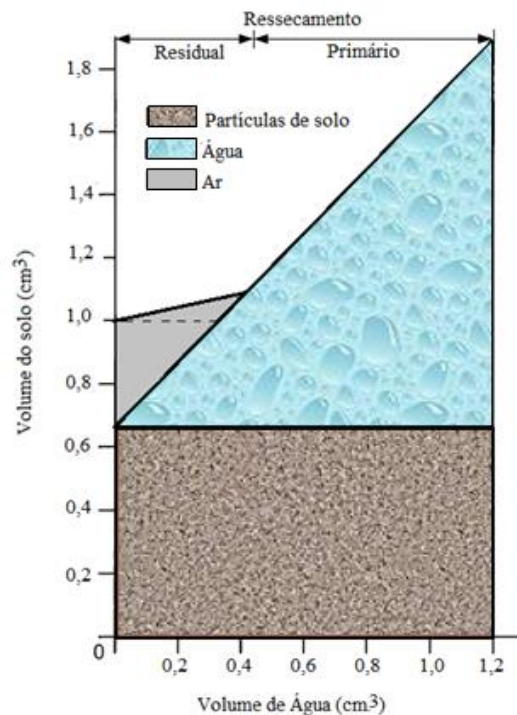
da umidade, o índice de vazios decresce mais rapidamente. Após um teor umidade específico, a alteração do índice de vazios volta a ficar lenta, até estabilizar-se. Os resultados seguem o modelo proposto por Bronswijk (1991) que divide o processo de retração das argilas em quatro estágios: estrutural, normal, residual e com retração zero.



Fonte: Li e Zhang (2011) - modificado

Figura 2.17. Variação do índice de vazios em relação ao teor de umidade – estágios da retração.

Haines (1923) *apud* Albrecht e Benson (2001) descreveu o processo de ressecamento de solos saturados em duas fases: ressecamento primário e residual (Figura 2.18). O ressecamento primário corresponde ao primeiro estágio e inicia-se a partir do momento em que o solo é exposto ao ar. A água sai do solo, sem que haja entrada de ar. Como o ar não está entrando no solo, a variação do volume é igual ao volume de água que sai do solo. A maior parte da variação do volume total ocorre neste estágio. A água que envolve as partículas individuais de solo é removida, permitindo que as partículas de solo se aproximem umas das outras. A partir de certo ponto as partículas começam a se tocar e o processo de secagem torna-se mais lento à medida que a estrutura do solo começa a resistir às variações de volume. Nesta fase do ressecamento, denominada de ressecamento residual, o ar entra no solo e ocupa os espaços deixados pela água removida. Nesta fase a variação de volume é pequena uma vez as partículas de solo já se tocam. Por conseguinte, a variação total de volume está intimamente relacionada aos volumes de água e sólidos presentes no solo no início do ressecamento.



Fonte: Haines (1923) *apud* Albrecht e Benson (2001) - modificado

Figura 2.18. Estágios de ressecamento proposto por Haines (1923).

Por esta razão, como os solos compactados na umidade ótima possuem maior volume de partículas sólidas e menor volume de água, por unidade de volume de solo, seja qual for a energia de compactação adotada, a variação volumétrica durante o ressecamento será menor. Ao contrário, quando o solo é compactado com umidades acima ou abaixo da ótima, a massa unitária seca decresce. Assim, haverá mais água e menos partículas sólidas, por unidade de volume de solo. Com a saída da água durante o ressecamento, haverá mais espaço disponível entre as partículas, possibilitando maior retração volumétrica. Desta forma, pode-se dizer que a retração é proporcional à umidade volumétrica (volume de água/volume de solo) e inversamente proporcional à massa unitária seca (volume de partículas sólidas/volume de solo).

Albrecht e Benson (2001) estudaram o comportamento de oito solos distintos, utilizados como camadas de base e cobertura de aterros, quando submetidos a ciclos de umedecimento e secagem avaliando as variações volumétricas e a formação de fissuras durante os ciclos de secagem. Após cada ciclo de secagem era avaliada a condutividade hidráulica das amostras. Os resultados indicaram que a retração era influenciada pelas propriedades do solo e pelas condições de compactação.

A retração aumentou com o aumento do índice de plasticidade e do teor de argila no solo e também para umidades de compactação acima ou abaixo da umidade ótima, e diminuiu com o aumento da energia de compactação. As amostras com maiores valores de retração volumétrica apresentaram maior intensidade de fissuração. Os ensaios de condutividade hidráulica indicaram que a fissuração de algumas amostras aumentou em até 3 vezes a magnitude do coeficiente de permeabilidade.

Os autores avaliaram a retração volumétrica e a formação de fissuras em função do número de ciclos de umedecimento e secagem. Observaram que a retração não sofreu alteração significativa com o aumento do número de ciclos de secagem. Citaram que resultados similares foram encontrados por Croney e Coleman (1954) que descreveram variação na curva característica de uma argila natural, ocorrida após o início do ressecamento e próximo à saturação. Este comportamento, entretanto, não se repetiu para os ciclos seguintes, sugerindo alguma mudança permanente na estrutura do solo ocorrida no ciclo inicial.

Além da variação da retração, o teor de umidade correspondente ao surgimento das primeiras fissuras, denominado de umidade de fissuração ( $\theta_c$ ), avaliados por Tang *et al.* (2011), mostraram que, para quatro amostras distintas, submetidas a cinco ciclos de ressecamento, a umidade de fissuração cresceu rapidamente nos três primeiros ciclos de secagem, não variando mais significativamente nos ciclos seguintes. O mesmo comportamento foi observado pelos autores para a área total fissurada e a espessura final das amostras após os ciclos de ressecamento.

Para avaliar a capacidade de recuperação das fissuras, Albrecht e Benson (2001) submetem algumas amostras a um período prolongado de umedecimento e a vários estados de tensão efetiva. Chegaram à conclusão de que a recuperação das fissuras não ocorreu mesmo quando as amostras foram submetidas a períodos de 350 dias de reidratação, não sendo observado decréscimo significativo na condutividade hidráulica. Por outro lado, o aumento da tensão efetiva em 60 kPa foi suficiente para fechar as fissuras e reduzir a condutividade hidráulica a valores inferiores a  $10^{-9}$  m/s. Destacaram ainda que esse valor de tensão efetiva é bem superior às tensões que estarão submetidas as camadas de cobertura, e que desta forma, as fissuras por ressecamento não poderão ser recuperadas nem por incremento de tensão, nem por hidratação e, uma vez abertas, serão permanentes.

### 2.7.2. Parâmetros geométricos e quantificação das fissuras

A geometria e a rede de fissuras formadas durante o ressecamento influenciam diretamente o comportamento mecânico e hidrológico dos solos fissurados e desta forma precisam ser caracterizadas adequadamente. Pesquisas recentes têm utilizado métodos diretos baseados em análises de imagens para determinar os parâmetros geométricos das fissuras. Imagens digitais destacam-se na mensuração das fissuras por possibilitar a obtenção de várias informações sem interferir no processo de ressecamento do solo.

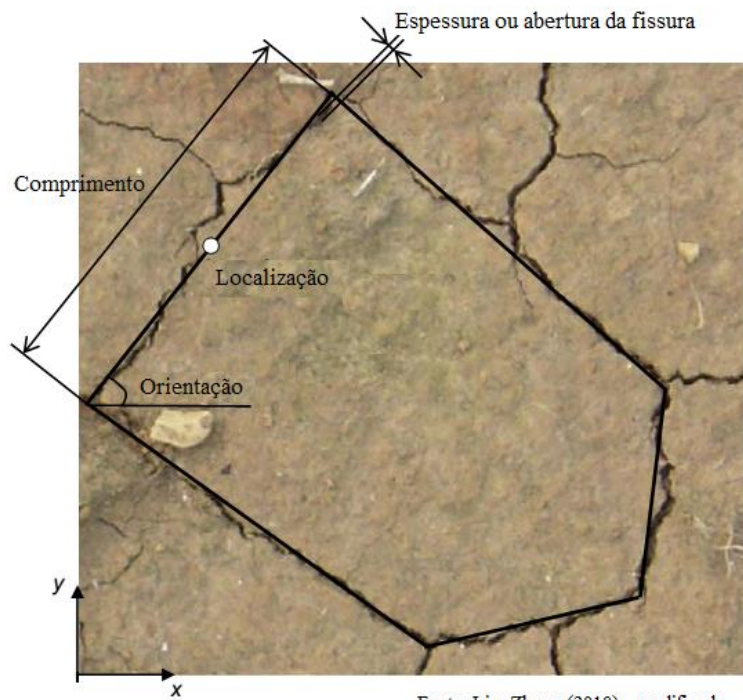
De forma geral, as pesquisas demonstram que o padrão de fissuração ao final do ressecamento apresenta uma rede de fissuras composta por três tipos de polígonos: triângulo, quadrado e pentágono. Os segmentos são quase perpendiculares entre si e os ângulos de interseção são geralmente iguais a 90°, com interseção entre as fissuras nas formas de “T” ou de “+” (TANG *et al.*, 2011 a).

Miller *et al.* (1998) definiram o Fator de Intensidade de Fissura (*Crack Intensity Factor* – CIF) como a razão entre a área total da superfície fissurada e a área total inicial da superfície analisada, representando o percentual de fissuração da amostra, podendo ser calculado em função do tempo e utilizado para descrever o processo de desenvolvimento das fissuras.

O procedimento para analisar imagens de padrões de fissuração em 2D (duas dimensões) consta das seguintes etapas: selecionar uma imagem colorida do solo representando o estado de fissuração em um determinado tempo; alterar a imagem de colorida para tons de cinza e realçar o contraste; realizar a binarização da imagem, reduzindo as cores a pixels pretos e brancos, com a cor preta representando as fissuras e a branca a área não fissuradas; calcular as áreas referentes aos pixels brancos e pretos e determinar o CIF.

Nas imagens, as fissuras aparecem como uma abertura contínua ao longo de uma certa direção e são representadas aproximadamente por uma linha reta. Li e Zhang (2011), propõem a representação geométrica da fissura a partir da determinação de seu comprimento, orientação, localização e abertura (Figura 2.19), avaliados por eles com auxílio das ferramentas disponíveis no software AutoCAD.





Fonte: Li e Zhang (2010) - modificado.

Figura 2.19. Representação geométrica de uma fissura.

Tang *et al.* (2011b) determinaram ao final de cada ciclo de umedecimento e secagem, além do CIF, outros parâmetros geométricos como número de interseções por unidade de área ( $N_{int}$ ), número de segmentos por unidade de área ( $N_{seg}$ ), comprimento médio ( $L_{av}$ ), espessura média ( $W_{av}$ ) e área média dos torrões formado entre as fissuras ( $A_{av}$ ). Com relação à variação desses parâmetros durante o ressecamento destacam que, na propagação das fissuras, o surgimento de novas interseções estabilizam primeiro, seguido pela estabilização referente ao aumento no comprimento, demorando mais a estabilizar o parâmetro referente a abertura das fissuras.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento de materiais alternativos adicionados ao solo para execução de camadas de cobertura de aterros sanitários, quando submetidos a ciclos de ressecamento e umedecimento. Para tanto foram selecionados dois tipos de resíduos. Um com característica granular, obtido em forma de agregado miúdo reciclado a partir de Resíduos da Construção Civil (RCC), e outro fibroso, obtido do filetagem de garrafas de refrigerante PET.

O programa experimental foi dividido em três etapas. Na primeira foram selecionados e caracterizados os materiais a serem utilizados na pesquisa. A seleção dos materiais alternativos levou em conta a disponibilidade dos materiais e a possibilidade de redução do impacto ambiental causado por sua disposição no meio ambiente. Na segunda etapa foram avaliadas as propriedades hidráulicas e mecânicas do solo puro e dos compósitos solo-RCC e solo-PET, com a realização de ensaios de compactação, permeabilidade, resistência à compressão, à tração e ao cisalhamento, sucção e retração. Foram ainda realizados ensaios preliminares de ressecamento, utilizando duas metodologias distintas. Os resultados desses ensaios permitiram a escolha das misturas solo+RCC e solo+PET que apresentaram melhor desempenho, para a realização dos ensaios de ressecamento. Por fim, na terceira etapa, foi desenvolvida uma metodologia para avaliação da fissuração por ressecamento, com monitoramento de sucção e da formação de fissuras superficiais ao longo do tempo. A Figura 3.1 apresenta um resumo do fluxo adotado na pesquisa.

#### 3.1. MATERIAIS SELECIONADOS PARA PESQUISA

O solo e os resíduos utilizados na pesquisa foram selecionados de modo a possibilitar a análise de materiais com reais possibilidades de utilização em camadas de cobertura de aterros, considerando disponibilidade e custos com transporte e beneficiamento, fatores que, quando não considerados, podem inviabilizar a solução sob o ponto de vista econômico.

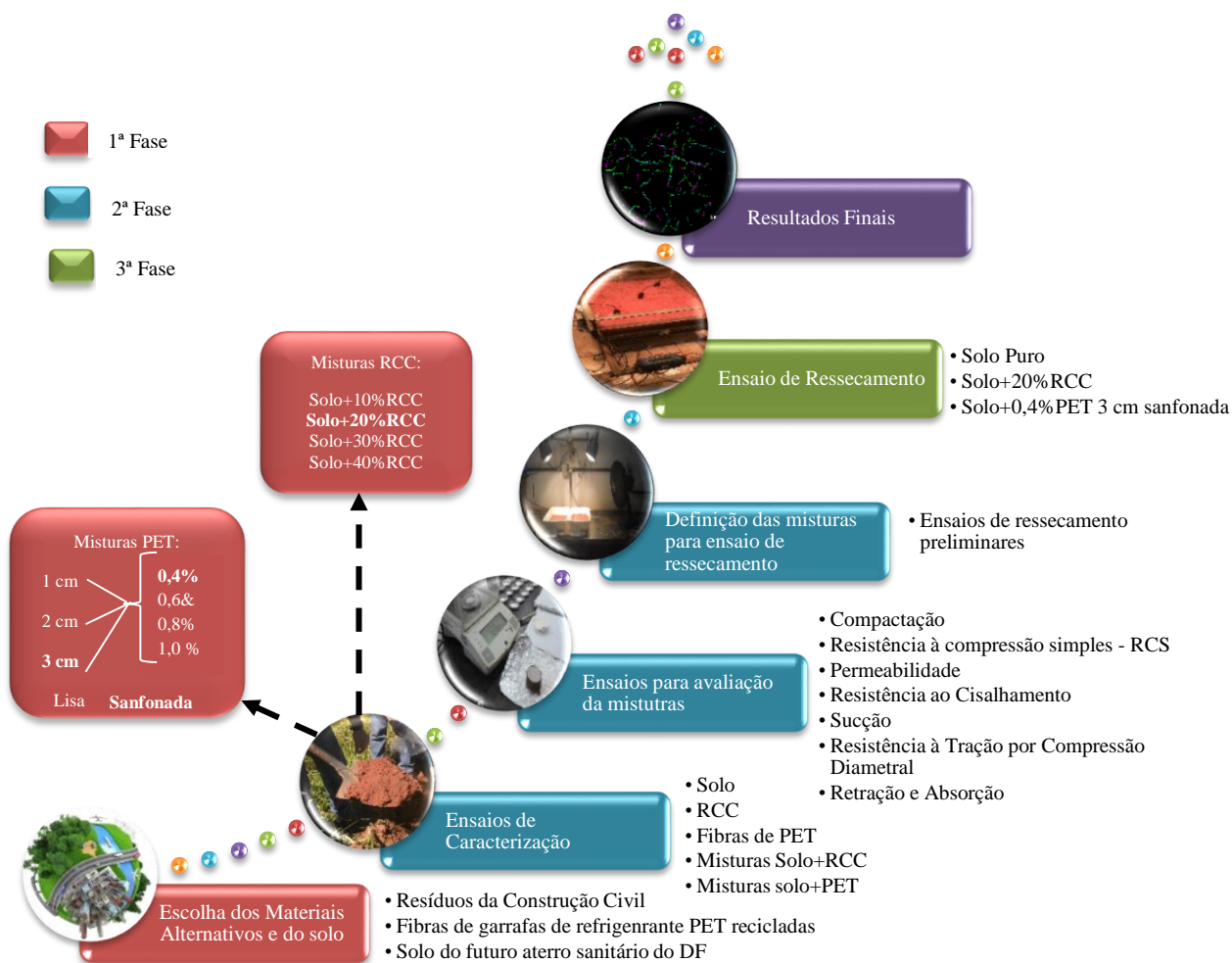


Figura 3.1. Etapas da pesquisa.

### 3.1.1. Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado na Região Administrativa de Samambaia, no local onde está sendo construído o Aterro Sanitário do Distrito Federal, situado ao lado da estação de tratamento de esgoto da Companhia de Água e Esgoto de Brasília - CAESB. A previsão é que esse aterro tenha capacidade para receber 68 mil toneladas por mês de resíduos. Além do aterro, estão previstas a construção de oito áreas destinadas a transbordo, triagem e reciclagem de RCC, sendo uma delas localizada da região de Samambaia, ainda sem localização definida.

O ponto de coleta está localizado entre o córrego Belchior e a Rodovia DF 180, km 52. As coordenadas do local são 15°51'39.9"S 48°09'13.8"W, conforme apresentado na Figura 3.2.

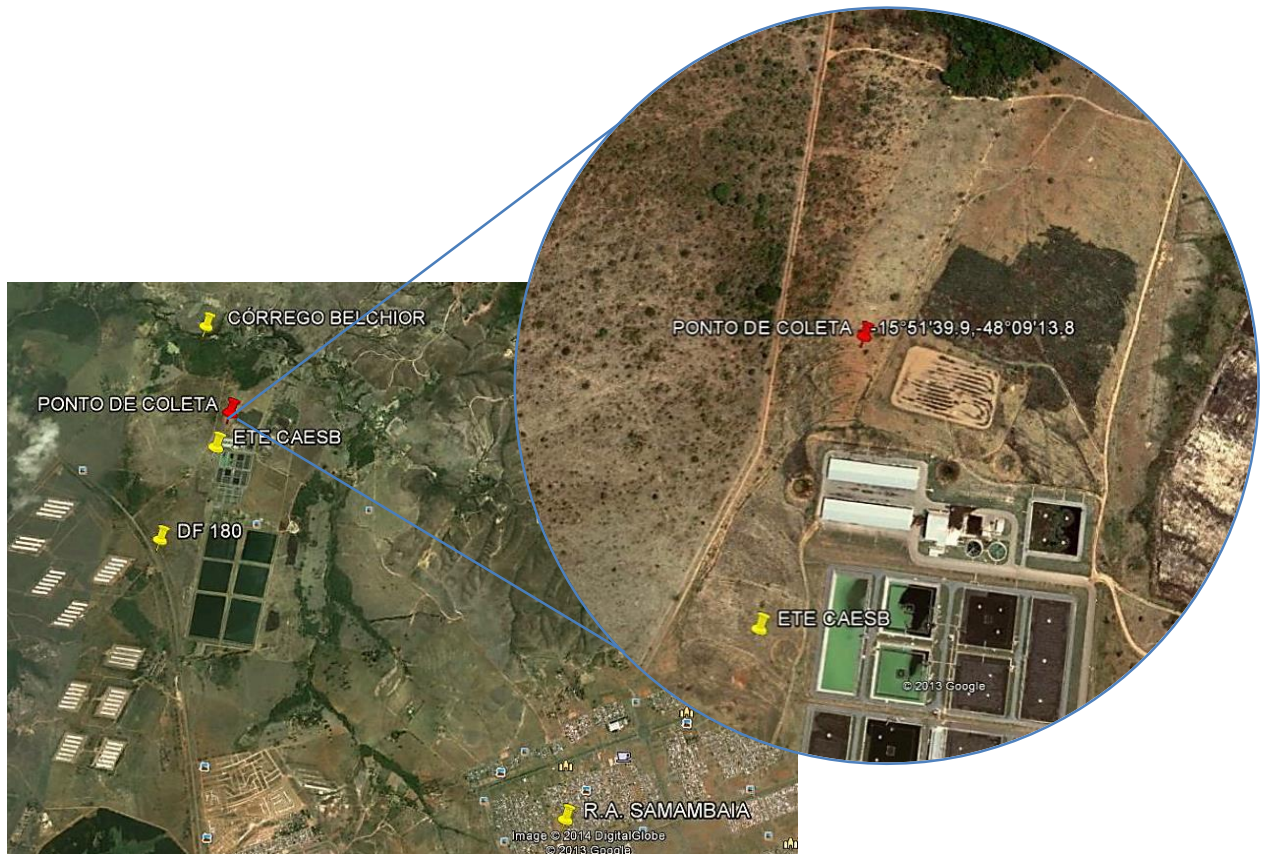


Figura 3.2. Localização do ponto de coleta do solo (Fonte: GOOGLE EARTH).

De acordo com o levantamento de solos do Distrito Federal realizado pela EMBRAPA (1978), a área da região engloba duas classes de solos: LVd2 (LATOSSOLO VERMELHO ÁLICO A moderado, textura argilosa, fase Cerrado subcaducifólio, relevo plano e suave ondulado) e Cd6 (CAMBISSOLO ÁLICO argila de atividade baixa A moderado textura argilosa fase Cerrado subcadufifólio relevo suave ondulado, substrato filito, xisto, metassilito e ardósia).

### 3.1.2. Materiais alternativos utilizados nos compósitos

Para avaliar a viabilidade de utilização de materiais alternativos como adições ao solo natural, foram selecionados dois tipos de compósitos: um de origem granular e outro de origem fibrosa. A escolha de materiais com características distintas teve por objetivo avaliar a influência do tipo de compósito na formação de fissuras por ressecamento.

Para material de natureza granular foi selecionado um agregado miúdo reciclado a partir de Resíduos da Construção Civil – RCC, produzido pela empresa Areia Bela

Vista, localizada na Região Administrativa de Sobradinho, Distrito Federal, próximo à DF-150 (Figura 3.3). A empresa produz agregado reciclado com e sem segregação dos resíduos, e em diferentes granulometrias.

Para pesquisa foi selecionado o resíduo denominado “areia rosa”, resultado da britagem de RCC, sem segregação prévia, incluindo materiais de diversas naturezas como solo, argamassa, concreto e cerâmica. Esse é o agregado de menor valor comercial produzido pela empresa. Segundo informações do proprietário o valor de venda desse resíduo varia entre R\$30,00 e R\$ 40,00/m<sup>3</sup> (referência: mês de janeiro de 2015).

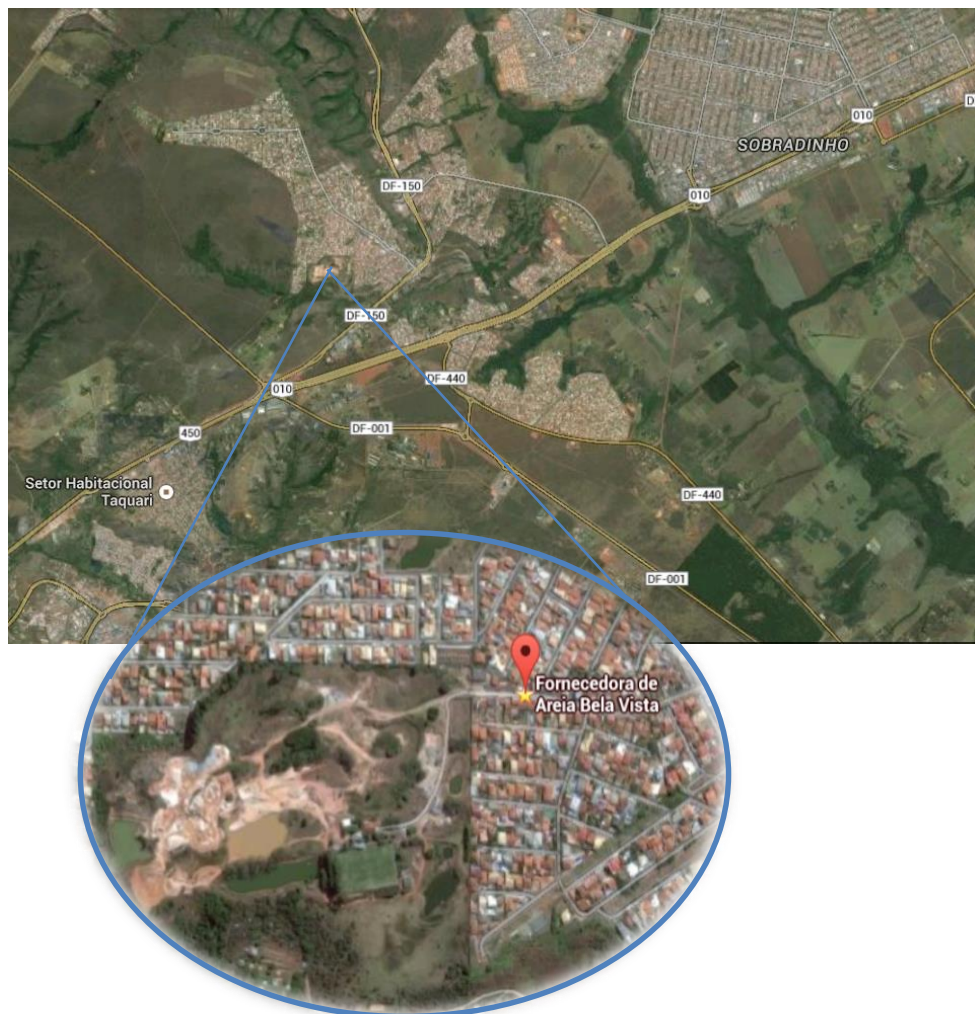


Figura 3.3. Localização da Empresa Bela Vista (Fonte: GOOGLE EARTH).

Para obtenção do agregado reciclado, o RCC passa por uma pré limpeza manual para separação dos resíduos. Os resíduos Classe B são descartados e encaminhados ao atual lixão e os Classe A seguem para o processo de britagem, passando inicialmente por uma grelha alimentadora. Em seguida são transportados por uma esteira, até um britador de mandíbulas. No percurso até o britador, um imã instalado acima da esteira retira os

elementos metálicos. Após a britagem são transportados por uma esteira para um conjunto de peneiras para classificação em função de sua granulometria. Posteriormente são armazenados em pilhas de estocagem.

A Figura 3.4 apresenta o fluxograma do processo de reciclagem do RCC realizado pela empresa Areia Bela Vista e uma vista dos equipamentos utilizados.

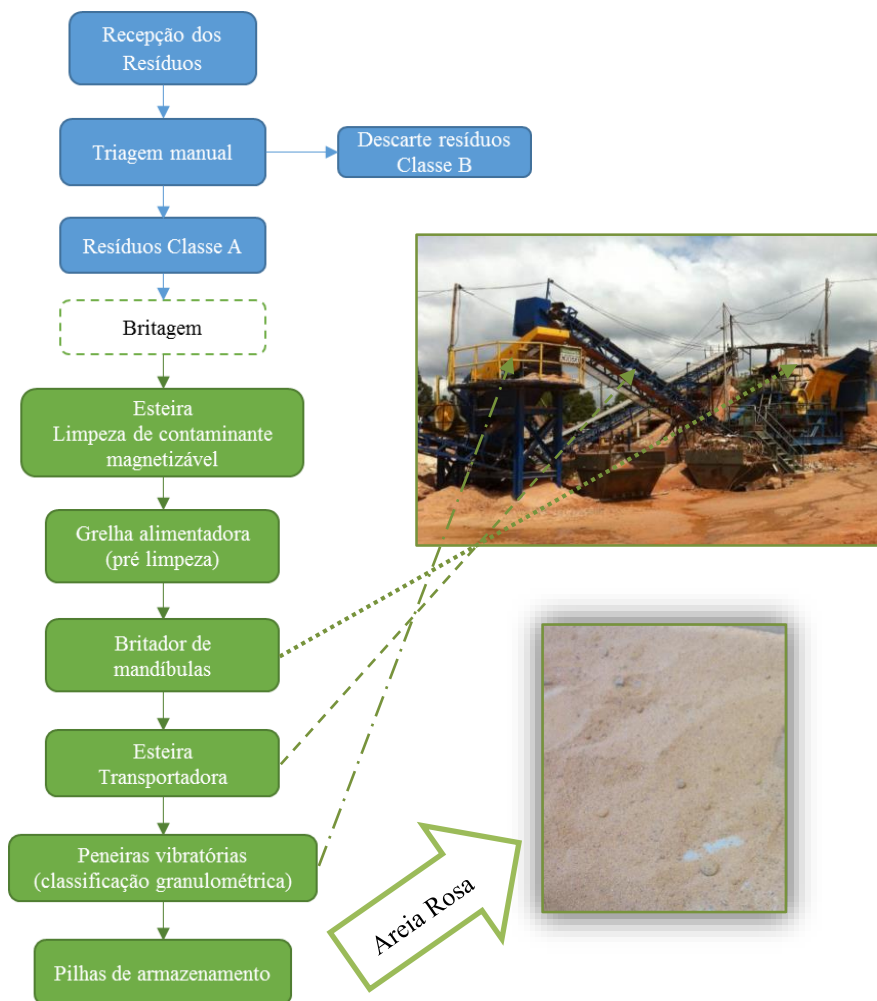


Figura 3.4. Fluxograma de produção do RCC.

O material de natureza fibrosa foi obtido a partir do filetagem de garrafas de refrigerante PET usadas. O filetador é uma ferramenta manual, de baixo custo de produção, desenvolvido para a pesquisa, e adaptado de outros modelos disponíveis na internet. Para obtenção das fibras, as garrafas eram lavadas e cortadas para retirada da parte inferior (fundo da garrafa). A parte do corpo era levada ao equipamento para o corte dos filetes, com largura média de 1,5 mm. A parte superior da garrafa (gargalo) e o fundo não foram utilizados. Posteriormente os filetes foram cortados em uma guilhotina manual para papel nos comprimentos de 10, 20 e 30 mm (Figura 3.5).

Para avaliar a influência do perfil da PET no comportamento dos compósitos, foram produzidas ainda, fibras com perfil sanfonado, nos comprimentos de 10 e 30 mm. Estas fibras foram produzidas passando-se os filetes por uma engrenagem que permitia a alteração de sua geometria lateral, conforme mostrado na Figura 3.6.

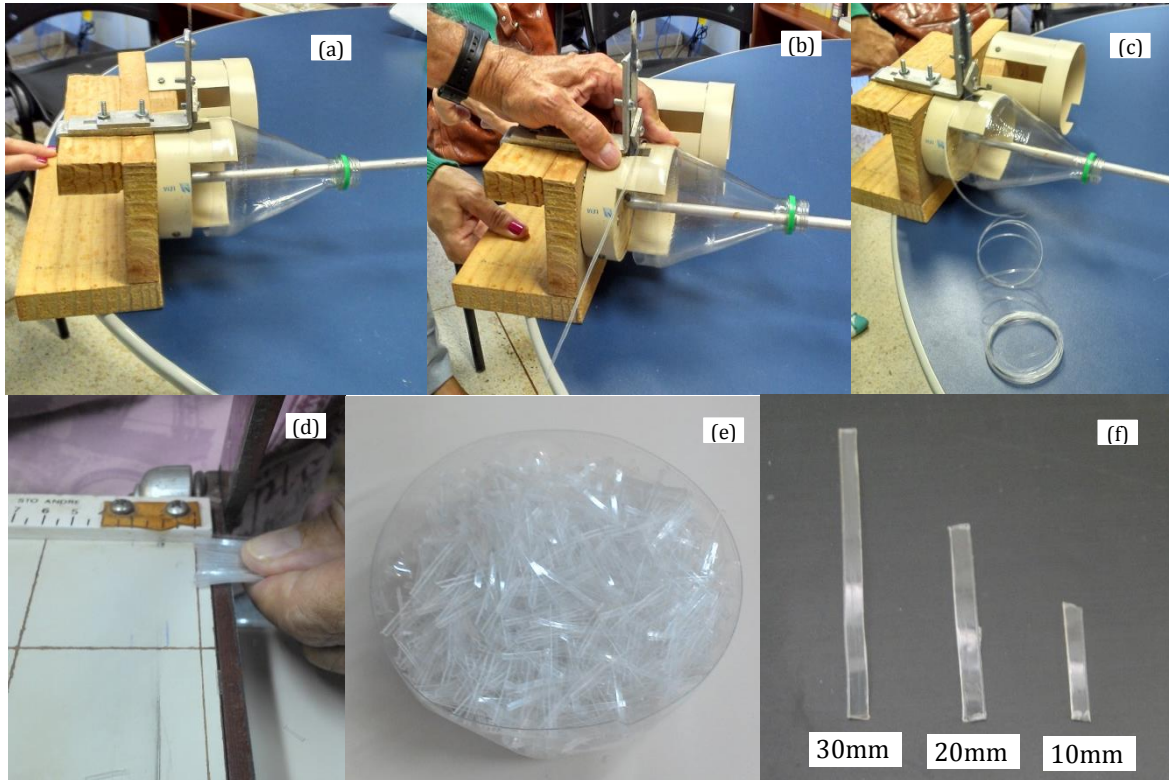
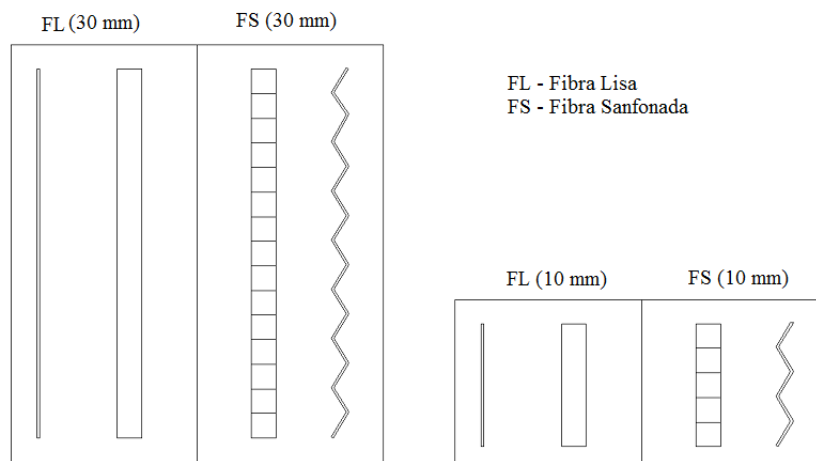


Figura 3.5 Etapas para obtenção da fibra de pet: (a) vista do equipamento; (b) garrafas sendo filetada; (c) filete de PET; (d) corte do filete em guilhotina; (e) fibra produzida; (f) detalhe dos tamanhos das fibras.



Fonte: Santos e Silva (2014)

Figura 3.6. Comparativo entre as geometrias laterais das fibras lisas e sanfonadas utilizadas na pesquisa.

### 3.2. 1ª ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E DAS MISTURAS

Para realização dos ensaios, o solo e o RCC foram inicialmente secos ao ar, destorroados, homogeneizados e preparados para os ensaios de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986).

Foram realizados ensaios de caracterização com amostras de solo puro, RCC e PET, bem como as misturas de solo-RCC e solo-PET, que foram obtidas por adição do percentual do resíduo, com relação à massa de solo seco. A Tabela 3.1 apresenta o resumo das misturas ensaiadas.

Tabela 3.1. Misturas utilizadas na pesquisa.

% de adição de resíduo em relação à massa de solo seco					
Solo Puro	RCC	PET 1 cm	PET 2 cm	PET 3 cm	
100%	-	-	-	-	
	10%	-	-	-	
	20%	-	-	-	
	30%	-	-	-	
	40%	-	-	-	
			0,4%	0,4%	0,4%
			0,6%	0,6%	0,6%
			0,8%	0,8%	0,8%
			1,0%	1,0%	1,0%

Para caracterização do solo, do RCC e das misturas solo-RCC foram realizados os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica por peneiramento, conforme recomendações da norma NBR 7181 (ABNT, 1984-a), e utilizando granulômetro a laser, modelo MICROTRAC S 3500, com e sem ultrassom;
- Determinação do Limite de Liquidez – NBR 6459 (ABNT, 1984-b) e do Limite de Plasticidade de Solos – NBR 7180 (ABNT, 1984-c);
- Absorção de água do RCC, conforme recomendações da NBR NM-30 (ABNT, 2001);
- Peso específico dos grãos realizada com equipamento penta-picnômetro, do fabricante *Quantacrome Instruments*. Neste ensaio as amostras foram previamente secas em estufa a 60°C, durante 16 horas. Posteriormente, foram colocadas em cápsulas, com determinação de suas massas com precisão de



0,0001g. O aparelho usa injeção de gás hélio, ao invés de água. O gás preenche os vazios e pelo volume de gás injetado, o volume ocupado pela massa da amostra é calculado. O aparelho permite ensaiar até cinco amostras simultaneamente. Os resultados foram obtidos a partir da média de 7 determinações por amostra. O ensaio para avaliação de cinco amostras durou cerca de duas horas. Foram ensaiadas no penta-picnômetro as amostras de solo puro, RCC, PET (1cm, 2 cm e 3 cm) e todas as misturas de solo + RCC e solo + PET. Para aferir os resultados do equipamento, foram realizados ensaios com o método convencional do picnômetro, de acordo com a NBR – 6508 (ABNT, 1984), apenas para amostra de solo.

Para caracterização das fibras de PET, além do peso específico, foi realizada ainda a determinação da resistência à tração. Para o ensaio foram utilizados os corpos de prova mostrados na Figura 3.7, de modo a permitir a fixação das fibras nas garras da prensa. Foi utilizada uma prensa servo-controlada da EMIC com capacidade de 50 kN.



Figura 3.7. Corpos de prova para ensaio de tração das fibras de PET.

As análises químicas do solo e do RCC foram realizadas no laboratório da Soloquímica, para determinação dos parâmetros de pH em H<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, troca catiônica e perda ao fogo.

Foram realizados ainda análises mineralógicas por difratometria de Raio X e microscopia eletrônica de varredura, realizados no Instituto Federal do Rio Grande do Norte. Estes ensaios foram realizados com as amostras de solo e RCC.

### **3.3. 2ª ETAPA: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS DO SOLO PURO E DAS MISTURAS**

O objetivo desta etapa da pesquisa foi analisar o comportamento hidráulico e mecânico dos materiais tendo em vista sua utilização em camadas de cobertura de aterros sanitários. Desta forma, foram realizados ensaios de compactação, permeabilidade, absorção/retração volumétrica, resistência à compressão simples, resistência ao cisalhamento, sucção e tração por compressão diametral, em amostras de solo puro e das misturas solo+RCC e solo+PET.

#### **3.3.1. Ensaio de Compactação**

O ensaio de compactação realizado para o solo puro e todas as misturas, solo+RCC e solo+PET, seguiram as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986a), utilizando a energia Proctor Normal e cilindro metálico pequeno, sem reuso de material.

Para as misturas, os materiais foram inicialmente secos ao ar e, posteriormente, suas umidades higroscópicas foram determinadas de modo a possibilitar a correção da quantidade de água a ser acrescentada às misturas, uma vez que os percentuais de adição de RCC e PET eram calculados em função da massa de solo seco.

A sequência adotada para realização das misturas foi a seguinte: pesagem do solo e do resíduo; mistura dos materiais em um saco plástico; colocação da mistura em uma bandeja metálica; adição da água necessária para atingir a umidade desejada; homogeneização manual da mistura; acondicionamento em sacos plásticos; identificação da mistura e do teor de umidade; repouso em câmara úmida por 24 horas. A Figura 3.8 mostra a preparação de uma mistura solo+PET para o ensaio de compactação.



Figura 3.8. Sequência da mistura para o ensaio de compactação.

### 3.3.2. Ensaio de Permeabilidade

Após a realização dos ensaios de compactação e com a definição da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima para cada uma das misturas, foram moldados corpos de prova utilizando o cilindro metálico pequeno do ensaio de compactação para determinação do coeficiente de permeabilidade das amostras.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados em permeômetros de parede rígida, a carga variável, conforme recomendações da NBR 14545 (ABNT, 2000). Os ensaios foram realizados imediatamente após a moldagem dos corpos de prova.

### 3.3.3. Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Para os ensaios de resistência à compressão simples foram moldados corpos de prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, compactados estaticamente em uma prensa hidráulica, em cinco camadas de aproximadamente 2 cm. Os corpos de prova foram compactados na umidade ótima e na massa específica seca máxima, controlada pela pesagem do material necessário, obtido a partir do volume conhecido de cada camada. Após a compactação eram aferidas a massa e as dimensões dos corpos de prova. Para cada mistura foram moldados 3 corpos de prova. A Tabela 3.2 apresenta um resumo das misturas utilizadas nos ensaios de RCS.

Nas misturas com adição de RCC, foram ensaiados corpos de prova imediatamente e após 30 dias da data de moldagem. Estes últimos, foram envolvidos em

papel filme plástico após a moldagem, identificados e acondicionados em caixa de isopor, mantida em câmara úmida até a data do ensaio, para evitar perda de umidade. O objetivo do ensaio em diferentes idades foi verificar a existência de possíveis reações entre o solo e o RCC ao longo do tempo de cura.

Para as misturas com adição de fibras de PET, foram avaliados inicialmente os corpos de prova com adição de fibras lisas. Posteriormente, foram realizados ensaios com fibras sanfonadas, com 0,4% de adição, teor que apresentou maiores valores de resistência, nos comprimentos de 10mm e 30mm, fibra mais curta e mais longa, para avaliar a influência da geometria lateral da fibra na resistência à compressão.

Após a ruptura foram verificadas as umidades de todos os corpos de prova.

Tabela 3.2. Resumo das misturas utilizadas no ensaio de RCS.

Mistura	Adições	Comprimento da fibra (mm)	Geometria lateral da fibra	Tempo até o ensaio	Número de CP	
SOLO PURO				Imediatamente após moldagem	3	
				30 dias após a moldagem	3	
SOLO+RCC	10%			Imediatamente após moldagem	3	
				30 dias após a moldagem	3	
	20%			Imediatamente após moldagem	3	
				30 dias após a moldagem	3	
	30%			Imediatamente após moldagem	3	
				30 dias após a moldagem	3	
	40%			Imediatamente após moldagem	3	
				30 dias após a moldagem	3	
SOLO+PET	0,40%	10	Lisa	Imediatamente após moldagem	3	
			Sanfonada		3	
		20	Lisa		3	
			Sanfonada		3	
	0,60%	10	Lisa		3	
			20		Lisa	3
					30	Lisa
	0,80%	10	Lisa		3	
			20		Lisa	3
					30	Lisa
	1,00%	10	Lisa		3	
			20		Lisa	3
					30	Lisa

### 3.3.4. Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado com amostras na condição inundada, com três níveis de tensões normais iguais a 50, 100 e 200 kPa, com velocidade de cisalhamento de 0,33 mm/min, definida em função do adensamento, para um período de 4 horas de ensaio.

Foram ensaiadas amostras de solo puro, de todas as misturas de Solo+RCC e das misturas de Solo+PET, utilizando fibras lisas nos comprimentos de 10, 20 e 30 mm de comprimento, com o percentual de adição de 0,4%. Esta escolha foi feita a partir dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples que demonstraram melhores resultados, para todos os comprimentos de fibra, nas misturas com esse percentual de adição.

As amostras foram compactadas diretamente no anel quadrado (60 x 60 mm), do equipamento de cisalhamento direto, utilizando uma prensa hidráulica em uma única camada, na umidade ótima e na massa específica aparente seca máxima obtidas no ensaio de compactação.

### **3.3.5. Ensaio de Sucção**

O ensaio de sucção foi realizado utilizando-se a técnica do papel filtro, seguindo metodologia descrita pela norma Americana D5298 (ASTM,1995), com modificação proposta por Lima (2003), utilizando-se três papéis filtro sobrepostos, o primeiro deles em contato direto com o corpo de prova, o do meio com diâmetro menor que o da base e o do topo. Utilizou-se papel filtro comum para a base e o topo e papel filtro especial Whatman nº 42, para determinação da sucção matricial.

Para a realização do ensaio foram utilizados 13 corpos-de-prova com aproximadamente 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, compactados estaticamente na umidade ótima e massa específica seca máxima. Desta forma obtiveram-se 13 pontos em cada determinação da curva característica de sucção mistas, de secagem e molhagem, com determinação da sucção matricial (papel filtro colocado em contato direto com o corpo de prova).

Como os corpos de prova foram moldados na umidade ótima, uma parte deles foi submetido ao processo de secagem e outra parte ao processo de molhagem, obtendo-se assim uma curva mista. Para efetuar a molhagem foi utilizando um conta-gotas, acrescentando-se água ao corpo de prova até se atingir o teor de umidade desejado, já calculado previamente a partir dos índices físicos. Para o processo de secagem, os corpos de prova foram deixados para secar expostos ao ar, controlando-se o teor de umidade desejado por pesagens sucessivas.

Após o corpo de prova atingir a umidade desejada, iniciou-se o processo de montagem do sistema: corpo de prova, papel filtro comum de proteção, papel filtro para medida de sucção matricial e outro papel filtro comum para proteção. Embalou-se todo o sistema com duas camadas de papel filme e, em seguida, em papel alumínio. As amostras foram identificadas e acondicionadas em uma caixa de isopor durante 14 dias, para evitar variação da temperatura (Figura 3.9). Após este período, foram determinadas as umidades dos papéis filtro. Na sequência, cada corpo de prova foi submetido ao ensaio de tração por compressão diametral e, então, foram determinados a umidade e a massa específica, pelo método da balança hidrostática.



Figura 3.9. Montagem dos corpos de prova para o ensaio de sucção.

O ensaio de sucção foi realizado com amostras de solo puro, misturas solo+RCC e solo+PET, este último apenas para fibra de 10mm, com 0,4% de adição, para avaliar a influência da fibra nos valores de sucção.

### 3.3.6. Ensaio de Tração por Compressão Diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado após o ensaio de sucção, possibilitando a avaliação da resistência em função da sucção e do teor de umidade dos corpos de prova.

Para as misturas de Solo+PET foram realizados, adicionalmente, ensaios com adição de 0,4% de fibras, nos comprimentos de 10mm e 30 mm, para as geometrias

laterais lisa e sanfonada, compactados na umidade ótima. Esse ensaio procurou avaliar a influência da geometria da fibra na resistência da mistura.

### 3.3.7. Ensaio de Absorção/Retração Volumétrica

O ensaio de absorção/retração volumétrica seguiu a metodologia proposta por Quissini (2009), e teve como objetivo avaliar o comportamento do solo e das misturas quando expostas a ambientes com diferentes umidades relativas do ar. A metodologia consistia da utilização de dois dessecadores, sendo um preparado com água, para simular um ambiente mais úmido, e outro com sílica gel, para simular um ambiente mais seco.

Na pesquisa, foram utilizadas duas caixas de isopor, com a instalação de uma tela ao fundo, de modo a possibilitar o preenchimento do espaço entre o isopor e a tela com água ou sílica gel (Figura 3.10).

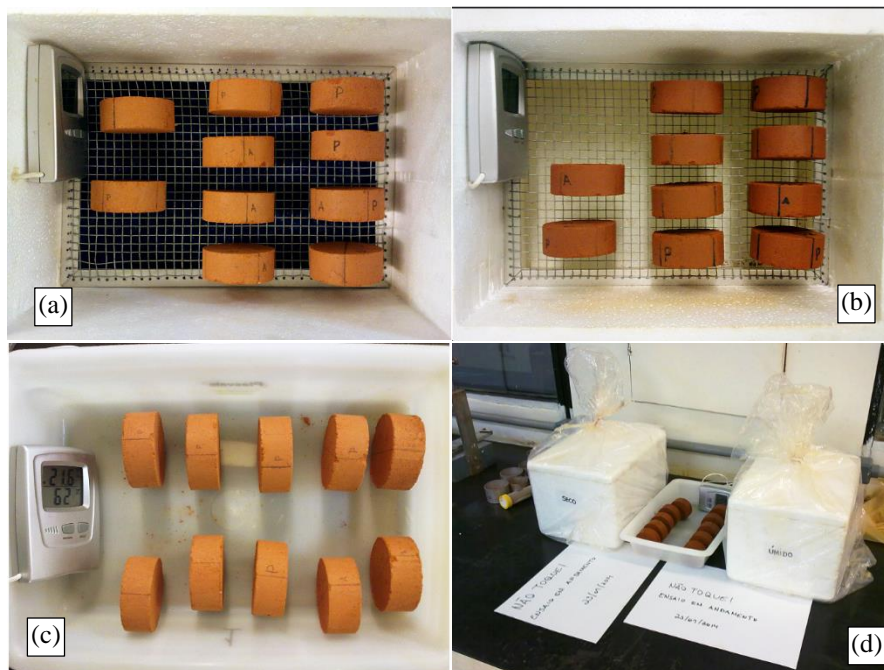


Figura 3.10. Montagem do ensaio de absorção: (a) caixa com sílica gel; (b) caixa com água; (c) amostras submetidas às condições ambientais do laboratório; (d) vista do ensaio completo.

Em cada caixa foi instalado um termo higrômetro digital para o monitoramento da umidade relativa durante o ensaio. Para cada amostra foram preparados três corpos de prova, sendo um para ser colocado na caixa com água, outro na caixa com sílica gel e, o terceiro, deixado exposto às condições ambientais do laboratório. Os corpos de prova

foram moldados no teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima, com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura. Cada corpo de prova foi identificado e marcado para que as determinações das dimensões, diâmetro e altura, fossem sempre realizadas no mesmo ponto, evitando variações das medições ocasionadas por imperfeições do corpo de prova. Além das dimensões, foram monitoradas as variações de massa dos corpos de prova. O acompanhamento foi realizado a cada 24h, até a estabilização das medidas. Ao final do ensaio determinou-se a umidade dos corpos de prova. Foram ensaiadas amostras de solo+RCC, nos percentuais de 10%, 20%, 30% e 40%, de solo+PET com adição de 0,4% de PET, geometria lisa, nos comprimentos de 10mm e 30mm.

### **3.3.8. Ensaio Preliminares de Ressecamento**

Para complementar os resultados dos ensaios hidromecânicos, foram realizados ensaios preliminares para avaliar o comportamento das misturas quando submetidas a ciclos de ressecamento e umedecimento, utilizando-se duas metodologias distintas.

A primeira metodologia seguiu proposta semelhante a utilizada por Rayhani *et al.* (2007). Para esta metodologia foram utilizadas amostras de solo puro e as misturas de solo+RCC, nos percentuais de adição de 10%, 20% e 30%, em relação à massa de solo seco. A proposta consiste da avaliação da condutividade hidráulica antes e após ciclos de ressecamento e secagem das amostras. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura (dimensões do cilindro pequeno de compactação). Os corpos de prova (CP) foram moldados na umidade ótima e na massa específica aparente seca máxima obtidas nos ensaios de compactação, utilizando-se a energia do Proctor Normal.

Foram moldados dois corpos de prova para o solo puro e dois para cada uma das misturas solo+RCC. Imediatamente após a moldagem, um dos CP foi utilizado para determinação do coeficiente de permeabilidade a carga variável, seguindo o método B, de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2010). O segundo CP de cada amostra foi utilizado para avaliar a influência do processo de ressecamento na condutividade hidráulica. Foram realizados três ciclos. O primeiro ciclo foi de ressecamento e iniciou-se logo após a compactação dos CP. Para o ressecamento foi utilizada uma estufa calibrada para manter a temperatura média em 35°C. Foi utilizado um termo higrômetro digital para aferição da temperatura e da umidade relativa do ar no interior da estufa. As faces laterais dos CP



foram revestidas com parafina para direcionar o fluxo de água pelas faces superior e inferior, de modo a se aproximar mais da condição real do solo no interior da camada.

Antes do início do ciclo e durante o processo de ressecamento, foram realizadas medições de massa, diâmetro e altura dos CP. Procurou-se realizar as medidas sempre no mesmo horário, em intervalos de 24 horas. O primeiro ciclo de ressecamento foi concluído quando a perda de massa dos CP se estabilizou, considerando-se que nesse momento a amostra havia perdido toda a água possível de ser evaporada para a temperatura do ensaio.

Após a conclusão do primeiro ciclo de ressecamento os corpos foram submetidos ao ciclo de umedecimento. Para tanto, as amostras foram imersas em água, ainda revestidos com parafina, para também simular a entrada de água apenas pelas faces superior e inferior das amostras. O ciclo de umedecimento foi realizado até o equilíbrio do peso das amostras, admitindo-se que nesse momento o solo encontrava-se saturado.

Por fim, no terceiro ciclo, os CP foram novamente ressecados em estufa seguindo o mesmo procedimento do primeiro ciclo. Após a conclusão do terceiro ciclo, foram determinados os coeficientes de permeabilidade pós-ressecamento. A Figura 3.11 apresenta o fluxo seguido nesta metodologia.

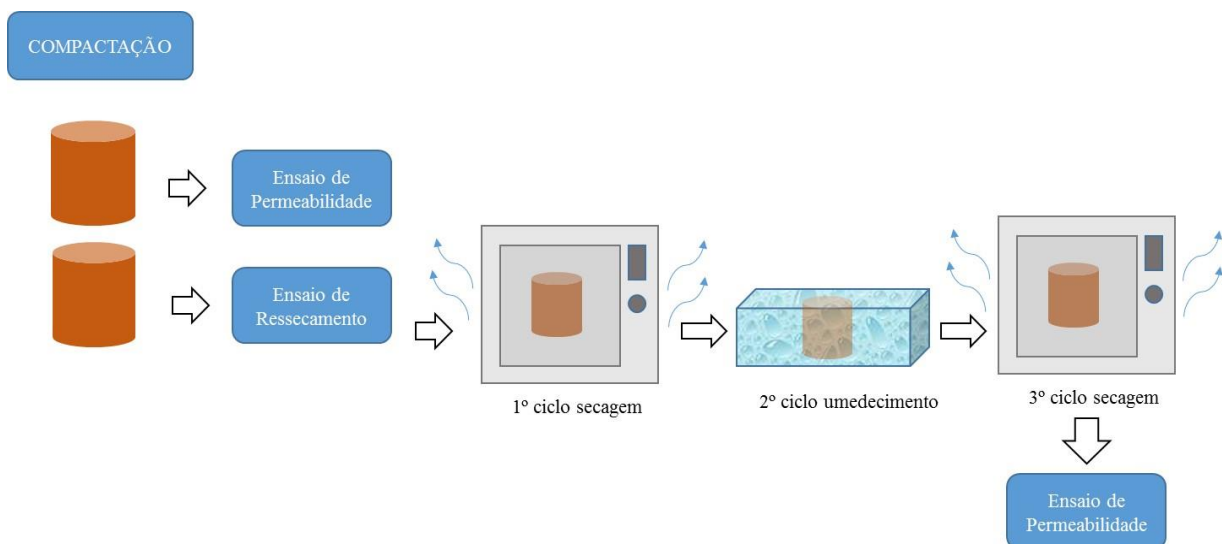


Figura 3.11. Fluxo do 1º ensaio de ressecamento preliminar.

A segunda metodologia constou de um projeto piloto simplificado de ressecamento. Neste piloto, amostras de solo, solo+RCC e solo+PET foram submetidas a um ciclo de ressecamento. Foram ensaiadas amostras de solo+RCC, com 10%, 20%, 30% e 40% de adição, e de solo+PET mantendo-se fixo o percentual de adição em 0,4% e

variando-se o comprimento das fibras entre 10mm e 30 mm, com geometria sanfonada. Posteriormente foram realizados ensaios com a fibra de 30 mm, sanfonada, variando-se o percentual de adição para 0,8% e 1%. A geometria sanfonada foi escolhida em função dos melhores resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração.

As amostras foram preparadas na forma de pasta, com teor de umidade próximo ao Limite de Liquidez e depositadas nos recipientes de modo que a altura média da amostra fosse de 8 mm, tomando-se o cuidado de nivelar o material e retirar possíveis bolhas de ar.

Para o ensaio, foram utilizados recipientes de PVC nas dimensões de 25 cm de comprimento, 15 cm de largura e 5 cm de altura. Para o ressecamento dessas amostras foi montado um aparato constituído por um suporte metálico, onde foram instaladas duas lâmpadas de secagem de 250 W e uma câmera digital, modelo GoPro Hero 3, programada para fotografar as amostras em intervalos regulares de 1 minuto. Além das lâmpadas, foi utilizado um ventilador comum para acelerar o processo de ressecamento. Um termo higrômetro digital foi instalado próximo as amostras para monitorar a temperatura e a umidade relativa do ar durante o ensaio. O aparato permitiu o ensaio de duas amostras simultaneamente. A Figura 3.12 ilustra a montagem do ensaio.

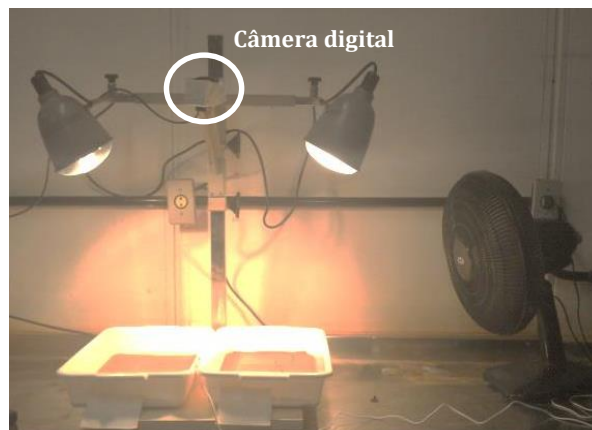


Figura 3.12. Montagem do ensaio piloto de ressecamento.

A análise das imagens permitiu realizar um comparativo dos padrões de fissuração das amostras, determinar o tempo para o surgimento das primeiras fissuras e calcular o fator de intensidade de fissura (CIF).

Após a conclusão desta etapa da pesquisa foram definidas as composições de solo+RCC e de solo+PET que apresentaram melhor desempenho mecânico e hidráulico, e que atendam aos critérios prescritos para camadas de cobertura de aterros sanitários. Estas composições, juntamente com o solo puro, foram avaliadas quanto à formação de fissuras por ressecamento, quando submetidos a ciclos de umedecimento e secagem, seguindo a metodologia descrita a seguir.

### **3.4. 3ª ETAPA: AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO**

Por se tratar de uma área ainda pouco estudada e ainda sem uma metodologia de ensaio normalizada, propôs-se uma metodologia de ensaio para avaliação da fissuração de amostras em laboratório.

A metodologia proposta consiste na utilização de um aparato capaz de simular, no ambiente do laboratório, a exposição de uma amostra a radiação solar e a chuva, desenvolvido e construído para a pesquisa. Durante o processo de ressecamento sensores de sucção e temperatura instalados em diferentes pontos da amostra possibilitam o acompanhamento das variações de tensão no interior da amostra. A perda de umidade pode ser acompanhada por uma balança digital, com capacidade de 300 kg e sensibilidade de 50g, instalada sob a amostra. Durante o processo de ressecamento uma câmera digital, instalada acima da amostra, permite monitoramento de todas as etapas do ressecamento, permitindo a determinação do padrão de fissuração na superfície da amostra. Termo higrômetros registram ainda dados de temperatura e umidade relativa do ar durante as etapas do ensaio.

#### **3.4.1. Compactação das amostras**

As amostras foram compactadas dentro de uma caixa de acrílico transparente quadrada, com 60 cm de lado e 30 cm de altura. O material foi seco ao ar, destorroado e passado na peneira de 4,8 mm de abertura da malha, umedecido até o teor de umidade ótimo, ficando em repouso por 12 h em câmera úmida. Posteriormente, foi compactado manualmente, em três camadas, com auxílio de um soquete, de modo a alcançar a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação, controlada pela massa do material e altura de cada camada (Figura 3.13). A quantidade de material foi calculada

para que ao final da compactação a amostra atingisse 15 cm de altura. Logo após a compactação foi iniciado o primeiro ciclo de ressecamento.



Figura 3.13. Compactação manual das camadas para o ensaio de ressecamento.

### 3.4.2. Simulador de Radiação Solar para o Processo de Ressecamento

O processo de ressecamento foi realizado com a utilização de um simulador de radiação solar de baixo custo proposto por Grilo (1999) adaptado para a pesquisa. O projeto original do simulador propõe a substituição da radiação solar por uma radiação equivalente de fonte artificial, utilizando lâmpadas incandescentes de 200 W. O simulador apresenta baixo custo de fabricação e facilidade para manutenção e operação. O equipamento possui base de uma chapa de ferro galvanizada, nas dimensões de 1,40 x 1,40 m, com 36 pontos de luz apropriadamente posicionados, com soquetes de porcelana para resistir a altas temperaturas. Para calibrar o simulador, o autor utilizou um Piranômetro Eppley, modelo PSP, com constante igual a  $8,75 \times 10^{-6} \text{ J/Wm}^2$ . Grilo (1999) apresenta uma curva de calibração que permite, conhecendo-se a faixa de irradiação que se deseja simular, ajustar a distância entre o simulador e o receptor (Figura 3.14).

Para a pesquisa o simulador foi adaptado, substituindo-se as lâmpadas incandescentes de 200 W, não mais fabricadas no Brasil. Desta forma, fez-se necessário ajustar as dimensões originais. O simulador construído para a pesquisa foi executado em chapa de aço galvanizada lisa nº 20, nas dimensões 0,90 x 0,90 m, reforçado com chapa

de madeira, com 10 mm de espessura. As 36 lâmpadas incandescentes de 200W foram substituídas por 16 lâmpadas brancas de secagem de 250 W, instaladas com bocal de cerâmica.

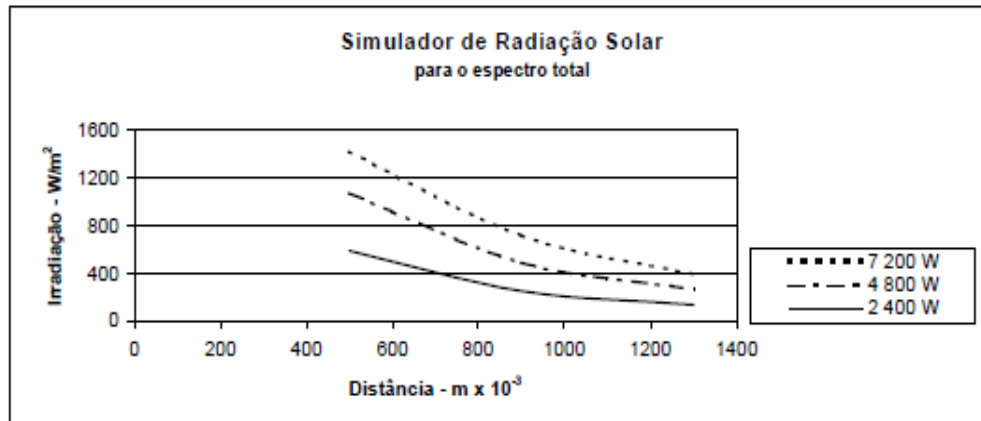


Figura 3.14. Curvas de calibração do simulador de irradiação solar para o espectro total, em função da distância entre o simulador e o receptor, para diferentes potências (Grilo,1999).

O simulador é suportado por correntes presas a uma estrutura metálica com 3,0 m de altura, permitindo variar a distância entre o simulador e a superfície da amostra a ser ressecada. A Figura 3.15 mostra diferentes vistas do simulador construído para pesquisa.

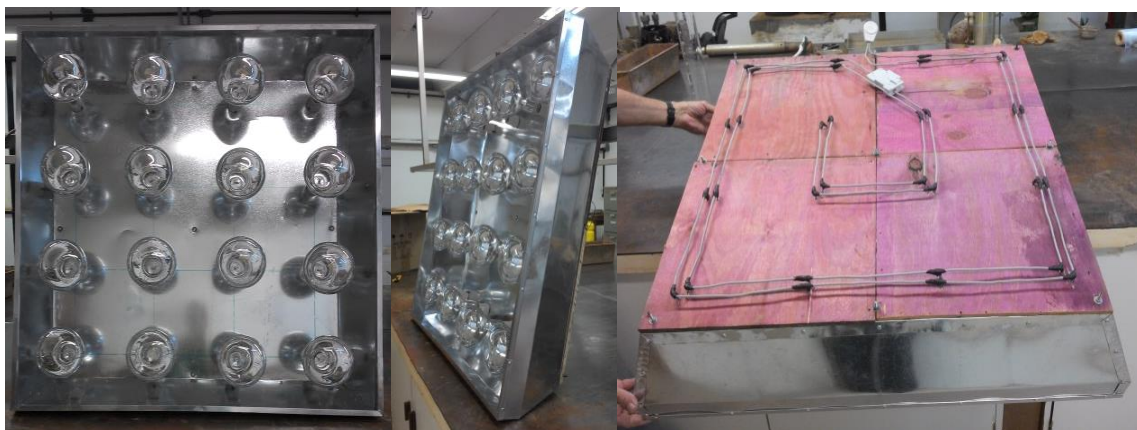


Figura 3.15. Vistas do simulador solar construído para pesquisa.

Devido às alterações em relação ao projeto original, foi necessária nova calibração do simulador solar. Para isto foram utilizados dois piranômetros PH. SCHENK, Sternpyranometer, Modelo 8101, disponibilizados pelo Departamento de Engenharia Elétrica da UnB (fator de calibração: 1mV =72,8 W/m<sup>2</sup>).

Para a calibração do simulador, foram utilizadas três distâncias entre o simulador e a superfície do piranômetro, instalado a 15 cm do fundo da caixa, altura correspondente

a superfície da amostra a ser ensaiada. As distâncias foram de 65 cm, 50 cm e 35 cm. Da mesma forma, foram avaliadas as irradiações para 3 potências diferentes: 4000 W, que corresponde a 16 lâmpadas acesas, 3000 W, 12 lâmpadas acesas, e 2000 W, 8 lâmpadas acesas. A Figura 3.16 apresenta o ensaio em andamento e as curvas de calibração do simulador.

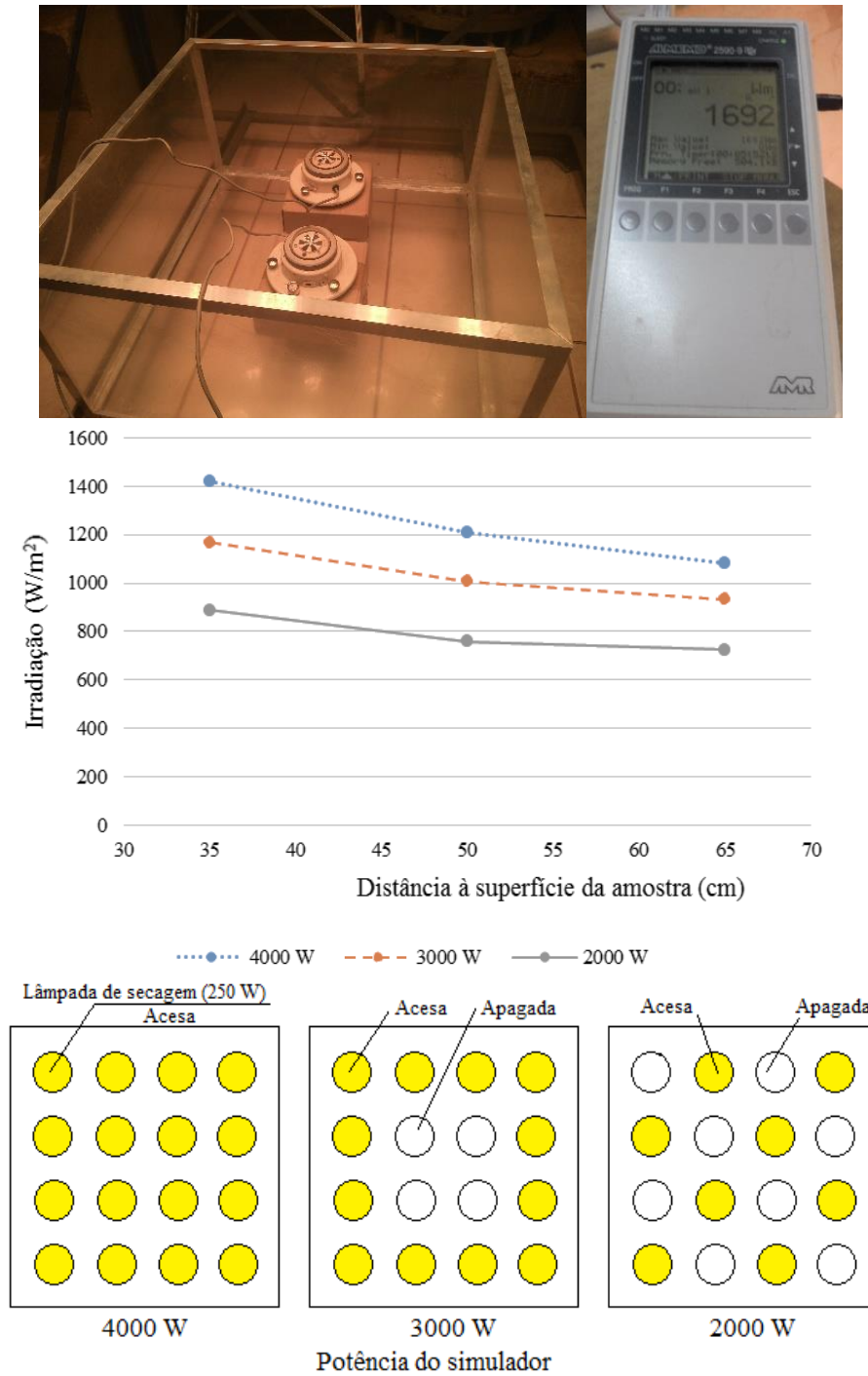


Figura 3.16. Ensaio e curvas de calibração do simulador solar utilizado na pesquisa.

Para definir a irradiação a ser utilizada nos ensaios de ressecamento, foram realizadas coletas de dados de irradiação solar na área externa do laboratório, em dias de sol e no horário de maior incidência solar, entre 11 h e 13h, de modo a possibilitar o ajuste do simulador para obter valores semelhantes. As coletas foram realizadas entre dezembro de 2014 e janeiro de 2015, em sete dias alternados e aleatórios, na mesma faixa de horário. Os resultados das coletas estão apresentados na Figura 3.17. O valor médio da irradiação solar foi de  $718 \text{ W/m}^2$ .

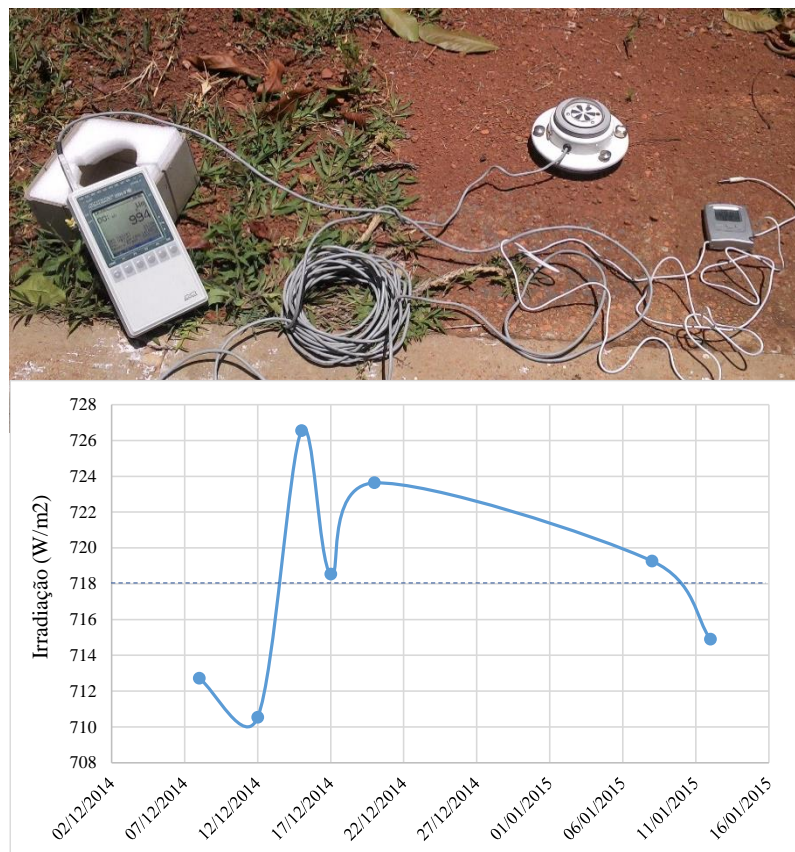


Figura 3.17. Coleta de dados de irradiação solar na área externa do laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

### 3.4.3. Mini Simulador de Chuva

Para os ciclos de umedecimento das amostras, em condições próximas ao que ocorre na natureza, foi construído um mini simulador de chuva, adaptado da proposta apresentada por Ribeiro *et al.* (2007). O simulador original consistia de um reservatório de aço inox, com 0,88 m de comprimento, 0,88 m de largura e 0,2 m de altura, montado sobre uma torre de 3 m construída em metal. O fundo desse reservatório apresentava 1849 furos de 0,5 mm de diâmetro, dispostos em uma malha quadrada, espaçados 1,5 cm um

do outro. Em cada um desses furos, era inserida uma agulha hipodérmica da marca Nipro (20 x 5,5), essa nomenclatura refere-se ao comprimento da injeção, em milímetros, e ao diâmetro da agulha, em décimos de milímetros, respectivamente. Esse dispositivo é responsável pela formação das gotas. Esse reservatório era interligado a outro reservatório de dimensões de 0,60 m de comprimento, 0,60 m de largura e 0,20 m de altura, com capacidade 72 litros de água, também em aço inox, posicionado no topo da torre, estabelecendo-se um sistema de vasos comunicantes (sistema de Mariotte).

Na proposta do simulador desenvolvido para pesquisa, o material do reservatório formador de gotas foi alterado para acrílico transparente, sendo mantidos as dimensões e o número de agulhas. O sistema de abastecimento do mini simulador foi alterado, retirando-se o reservatório superior e substituindo-o por alimentação direta.

A estrutura metálica de apoio ao reservatório formador de gotas possui as mesmas dimensões propostas por Ribeiro *et al.* (2007), conforme ilustra a Figura 3.18. Essa estrutura também serve de suporte para fixação do simulador de radiação solar.

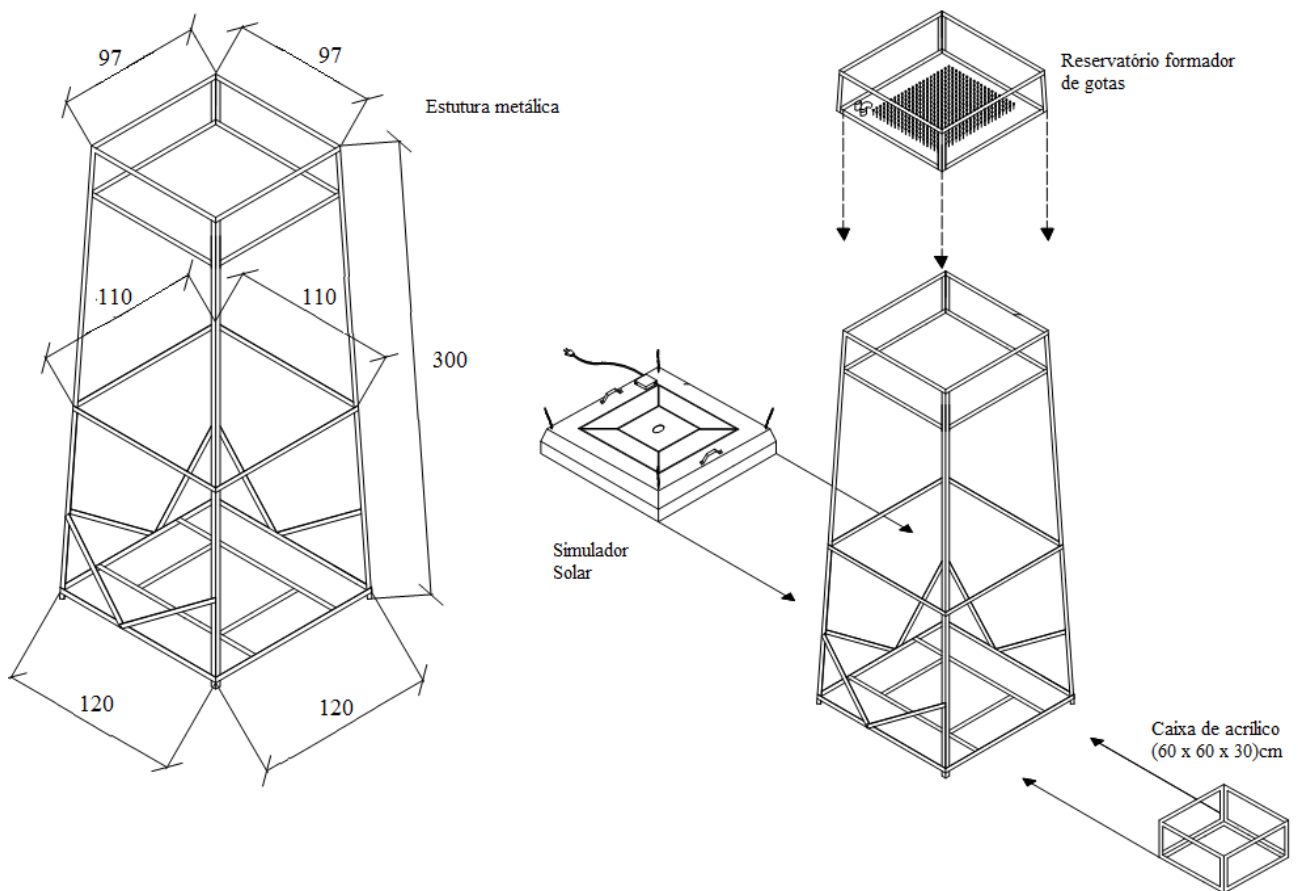


Figura 3.18. Esquema do mini simulador de chuva construído para pesquisa.



Durante a formação de chuvas, há necessidade de manutenção de uma carga de água constante dentro do reservatório formador de gotas. Para isso, tubos de PVC em diferentes tamanhos regulam o nível do reservatório, de forma que a distância (h) entre a extremidade do tubo e o fundo do reservatório corresponda à carga de água desejada. O abastecimento e o esgotamento acontecem pelo fundo do reservatório. Nessas condições, poderão ser simuladas chuvas com diferentes intensidades variando-se a altura da água no reservatório formador de gotas. Na Figura 3.19 apresenta-se o gráfico que correlaciona a variação da intensidade da chuva simulada em função da carga de água no reservatório formador de gotas (RIBEIRO *et al.*, 2007).

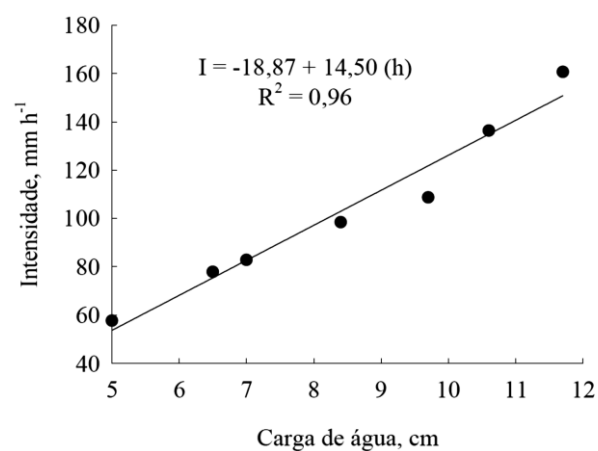


Figura 3.19. Gráfico de calibração relacionando carga de água e intensidade da chuva (RIBEIRO *et al.*, 2007).

#### 3.4.4. Metodologia do Ensaio de Ressecamento

A realização do ensaio iniciou-se logo após a compactação da amostra. Foram ensaiadas três amostras sendo uma de solo puro, a segunda de Solo+RCC, com 20% de adição, e a terceira de Solo+PET, com 0,4% de adição de fibra com 30 mm de comprimento e geometria lateral sanfonada. A escolha destas misturas foi realizada tomando-se como base os resultados dos ensaios realizados na 2ª etapa da pesquisa.

Foram realizados três ciclos de ressecamento, alternados por ciclos umedecimento, totalizando cinco ciclos, para cada amostra ensaiada, com exceção do solo puro que foi submetido a mais um ciclo de umedecimento e um de secagem. A Figura 3.20 mostra o fluxo do ensaio de ressecamento.

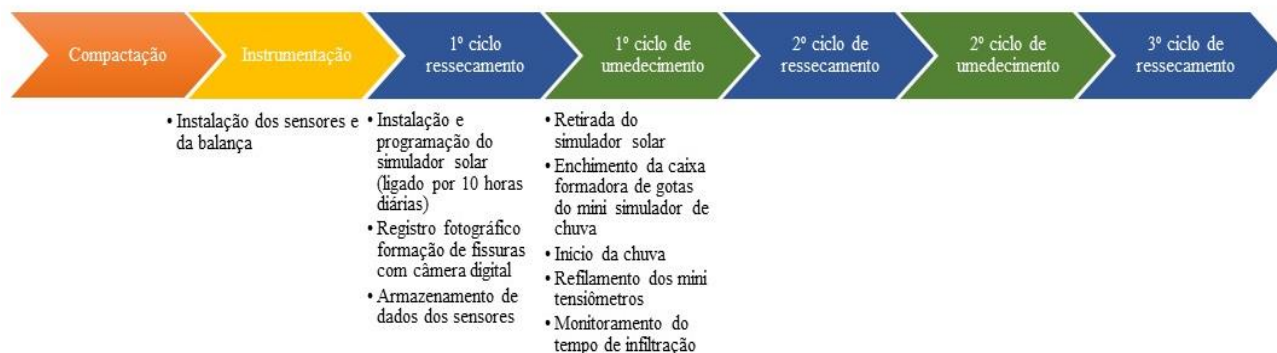


Figura 3.20. Fluxo do ensaio de ressecamento.

Antes do início dos ensaios foram instalados os sensores conforme apresentado na Figura 3.21. Para avaliar a variação da sucção e da temperatura ao longo do processo de ressecamento, foram instalados três mini tensiômetros, modelo T5 da *PD Instruments*. Os tensiômetros T5-1, T5-2 e T5-3 foram instalados a 4 cm, 7 cm e 12 cm do fundo da caixa, respectivamente, sendo um em cada lateral da caixa com a amostra. Além dos tensiômetros foram instalados três sensores de umidade e temperatura, modelo 5TM da *Decagon*, na superfície da amostra. Os dados coletados pelos sensores foram armazenados em *datalogger* e, posteriormente, transferidos para o computador.

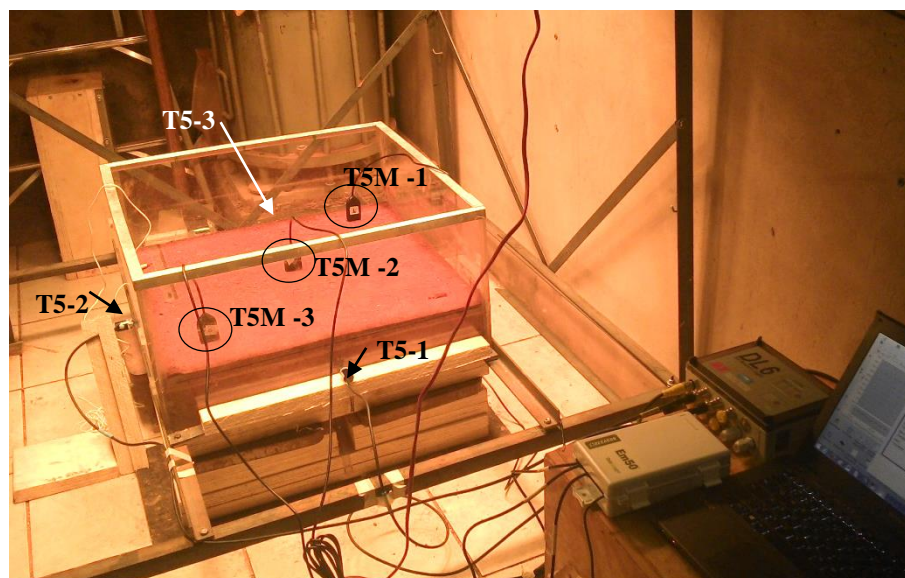


Figura 3.21. Localização dos sensores instalados na amostra.

Todo o processo de ressecamento foi monitorado por uma câmera digital, da marca GoPro Hero 3, resistente à água e a temperaturas elevadas, programada para registrar uma foto por minuto, instalada sobre o simulador solar.

Sob a amostra foi instalada uma balança digital, com capacidade de 300 kg e sensibilidade de 50g, de modo a permitir o monitoramento contínuo da perda de massa da amostra. Também foi instalado um termo higrômetro para monitorar a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar. Os dados da balança e do termo higrômetros foram registrados pela câmera digital e posteriormente transcritos para uma tabela, de modo a permitir a posterior análise dos dados. A Figura 3.22 apresenta um detalhe do mostrador da balança e do termo higrômetro durante um ensaio.

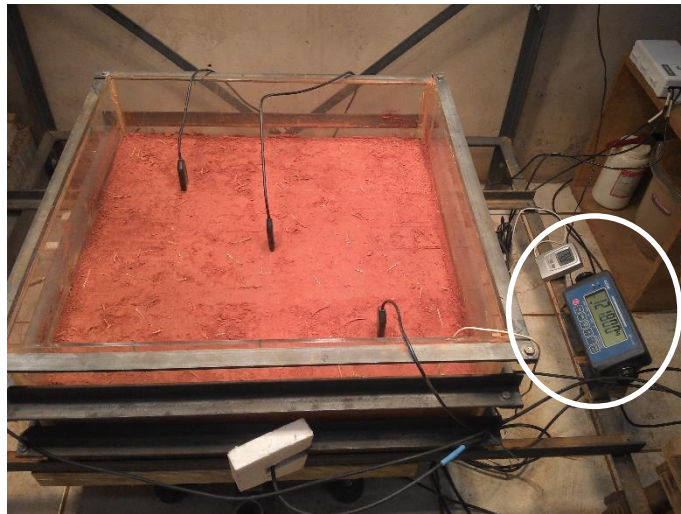


Figura 3.22. Mostrador da balança e termo higrômetro durante a realização de um ensaio.

O primeiro ciclo de ressecamento foi iniciado logo após a compactação e a instalação dos sensores. Considerando o valor médio de irradiação solar encontrado durante a calibração do simulador, os ensaios de ressecamento foram realizados com 8 lâmpadas acesas (potência de 2000 W), posicionando o simulador a 65 cm da superfície da amostra. As lâmpadas permaneceram ligadas durante 10 horas por dia, das 8h às 18h, com acionamento e desligamento controlados por um timer digital.

O ressecamento foi interrompido quando a massa registrada pela balança digital estabilizou-se. O simulador solar foi removido e deu-se início ao ciclo de umedecimento.

Para o ciclo de umedecimento utilizou-se o mini simulador de chuva com uma carga de água de 7 cm, o que corresponde a uma intensidade de 80mm/h, aproximadamente, conforme curva de calibração apresentada na Figura 3.19. Para iniciar a chuva, a amostra de solo foi coberta e o sistema de abastecimento do reservatório formador de gotas conectado a uma torneira. Ao atingir a carga desejada, a amostra foi descoberta, iniciando-se a chuva. Durante a chuva foi instalado um dispositivo em volta

da amostra para coletar a água excedente (Figura 3.23). Foi estabelecido que a chuva cessaria quando a lâmina de água atingisse 2 cm de altura acima da amostra. O tempo de chuva e de infiltração foram medidos em cada ensaio.



Figura 3.23. Mini simulador de chuva. (a) Enchimento do reservatório formador de gotas com amostra coberta; (b) Amostra descoberta para início da chuva; (c) lâmina d'água acima da amostra ao final da chuva.

Após o término da chuva o simulador era novamente instalado para o 2º ciclo de ressecamento e assim, sucessivamente, até o final do último ciclo de ressecamento.

Ao final de cada ciclo de ressecamento era necessário realizar o refileamento dos mini tensiômetros que secavam durante o ensaio, seguindo as orientações do fabricante do equipamento. Para não danificá-los, eles só eram retirados após o final da chuva, quando a amostra estava mais úmida, facilitando o arrancamento. Após o refileamento e antes de iniciar novo ciclo de ressecamento, os tensiômetros eram reinstalados,

mantendo-se a mesma posição inicial. Já os sensores de umidade e temperatura T5M só foram retirados ao final do ensaio.

Concluído cada ciclo de ressecamento, era realizado o backup da câmera digital para a análise das imagens e determinação dos parâmetros geométricos das fissuras ao longo do ensaio. Para isso, as imagens foram tratadas utilizando-se o software livre GIMP, versão 2.8, para realce das fissuras. Posteriormente as imagens foram analisadas por outro software livre (IMAGEJ, versão 2.0), que possibilitou os ajustes necessários para binarização e determinação da área das fissuras necessárias ao cálculo do CIF (Crack Intensity Factor), resultado da relação entre a área fissurada e a área total da amostra. O IMAGEJ também possibilitou a construção de superfícies tridimensionais. Esse é um processo onde uma região específica dentro da imagem analisada é transformada em uma superfície com profundidade e largura relativas, permitindo a avaliação qualitativa da profundidade das fissuras ao longo do processo de ressecamento.

Após a conclusão do ensaio foram coletadas amostras de cada uma das camadas, para determinação da umidade e da massa específica aparente seca pelo método da balança hidrostática, seguindo as recomendações da NBR MB 2887 (ABNT, 1988).

### **4. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E HIDRO-MECÂNICOS DO SOLO PURO E DAS MISTURAS**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados na segunda fase da pesquisa, de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3. Esses ensaios foram realizados para caracterizar os materiais utilizados e avaliar o comportamento hidráulico e mecânico do solo e das misturas, possibilitando a definição dos percentuais de adição de RCC e fibras de PET a serem utilizados nos ensaios de ressecamento, etapa final desta pesquisa.

#### **4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**

##### **4.1.1. Ensaio de granulometria**

Os resultados dos ensaios de granulometria, incluindo a análise por peneiramento e com o uso do granulômetro a laser, com e sem o uso do ultrassom, estão apresentados na Figura 4.1. Os resultados mostram que nas amostras de solo puro e solo+RCC existem agregações que se desfazem pela ação física do ultrassom, observado pelo deslocamento das curvas para a esquerda. Para a amostra de RCC puro não se observa influência do uso do ultrassom.

Na Tabela 4.1 pode-se observar que o solo apresenta, nos ensaios sem ultrassom, apenas 8,0% das partículas com diâmetro inferior a 0,06 mm de diâmetro, passando para 77% após o uso do ultrassom. O mesmo comportamento repete-se para as misturas de solo+RCC, que apresentaram mais 70% de partículas com diâmetro inferior a 0,06 mm, após o uso do ultrassom, para todos os percentuais de adição. O RCC apresentou 57% das partículas compreendidas entre 0,06 e 0,20 mm de diâmetro.

##### **4.1.2. Limites de Liquidez e Plasticidade**

A Tabela 4.2 apresenta os valores obtidos nos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade e os valores de índice de plasticidade do solo natural e das misturas solo+RCC. Observa-se que os valores de  $w_L$  e  $w_P$  reduziram com o acréscimo do

percentual de RCC nas misturas, o que era de se esperar devido a característica granular do RCC.

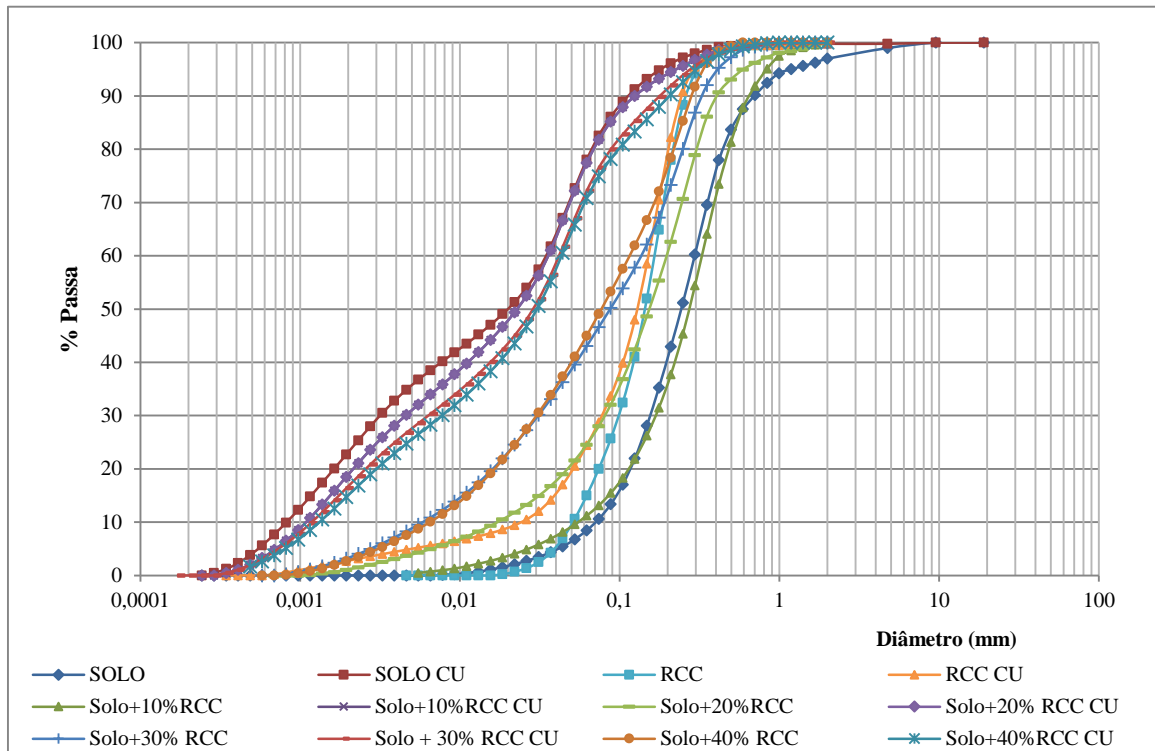


Figura 4.1. Curvas granulométricas dos materiais, com e sem o uso do ultrassom.

Tabela 4.1. Frações granulométricas dos materiais.

MATERIAL	SOLO	RCC	SOLO+10%RCC	SOLO+20%RCC	SOLO+30%RCC	SOLO+40%RCC
Faixa granulométrica	% do material					
<b>ENSAIO SEM ULTRASSOM</b>						
20<Pedregulho grosso<60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,0<Pedregulho médio<20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,0<Pedregulho fino<6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,60<Areia grossa<2,0	12,0	1,0	12,0	5,0	1,5	0,0
0,20<Areia média<0,6	48,0	28,0	50,0	35,0	28,5	25,0
0,06< Areia fina <0,20	32,0	58,0	26,5	37,0	28,0	32,0
0,002 < Silte < 0,06	8,0	13,0	11,5	22,0	38,0	39,0
Argila < 0,002	0,0	0,0	0,0	1,0	4,0	4,0
<b>ENSAIO COM ULTRASSOM (CU)</b>						
20<Pedregulho grosso<60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,0<Pedregulho médio<20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,0<Pedregulho fino<6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,60<Areia grossa<2,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0
0,20<Areia média<0,6	5,0	19,0	5,0	5,0	8,0	8,0
0,06< Areia fina <0,20	18,0	57,0	19,0	19,0	21,0	20,0
0,002 < Silte < 0,06	54,0	19,0	56,0	56,0	53,0	55,0
Argila < 0,002	23,0	4,0	19,0	19,0	17,0	15,0

Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de consistência para o solo e misturas solo+RCC.

	WL (%)	WP (%)	IP(%)
SOLO	52%	35%	17%
SOLO+10%RCC	49%	33%	16%
SOLO+20%RCC	47%	32%	15%
SOLO+30%RCC	44%	31%	13%
SOLO+40%RCC	41%	29%	12%

Com base nos resultados da análise granulométrica e nos limites de Atterberg foi estabelecida uma classificação para o solo natural e misturas utilizando a carta de plasticidade (Figura 4.2). As misturas solo+RCC se enquadrariam na classificação de solos tipo ML, com comportamento semelhante a de silte de baixa compressibilidade. O solo puro, com valores muito próximos aos encontrados para as misturas, estaria praticamente na divisa entre os solos ML e MH (silte de alta compressibilidade).

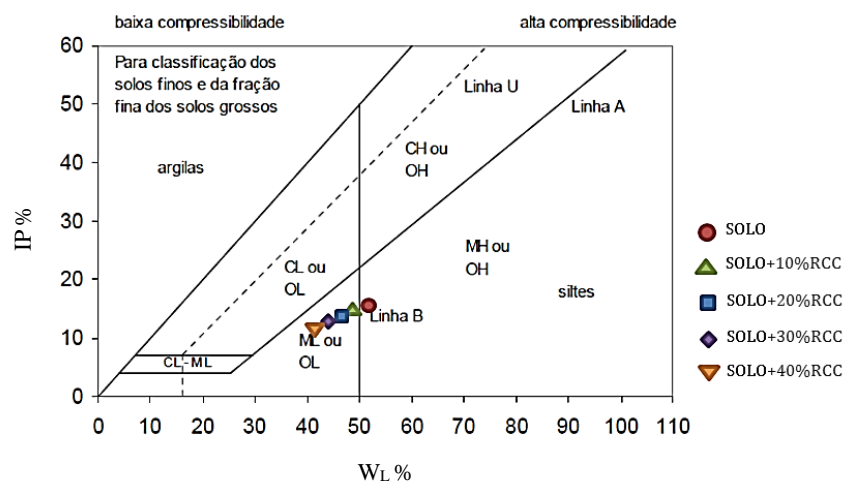


Figura 4.2. Carta de Plasticidade com indicação dos pontos correspondentes ao solo e as misturas solo+RCC.

#### 4.1.3. Absorção de Água do RCC

Este ensaio foi realizado apenas para amostras de RCC a fim de verificar o nível de absorção de água pelo resíduo, tendo em vista que, em algumas situações, a presença de materiais cerâmicos costuma elevar os teores de absorção destes resíduos.

Foram encontrados valores de 1,5% de absorção para o RCC utilizado na pesquisa, valores próximos aos encontrados para a areia natural. Este valor foi utilizado na avaliação da quantidade de água adicionada para preparação das misturas nos ensaios de compactação e compressão simples.



#### 4.1.4. Peso Específico dos Grãos (Gs)

Os resultados obtidos nos ensaios de peso específico dos grãos demonstram que o RCC apresenta um valor de peso específico muito próximo ao obtido para o solo. No caso das misturas, pode-se observar uma ligeira tendência de elevação com o aumento dos percentuais de adição de RCC ao solo (Figura 4.3).

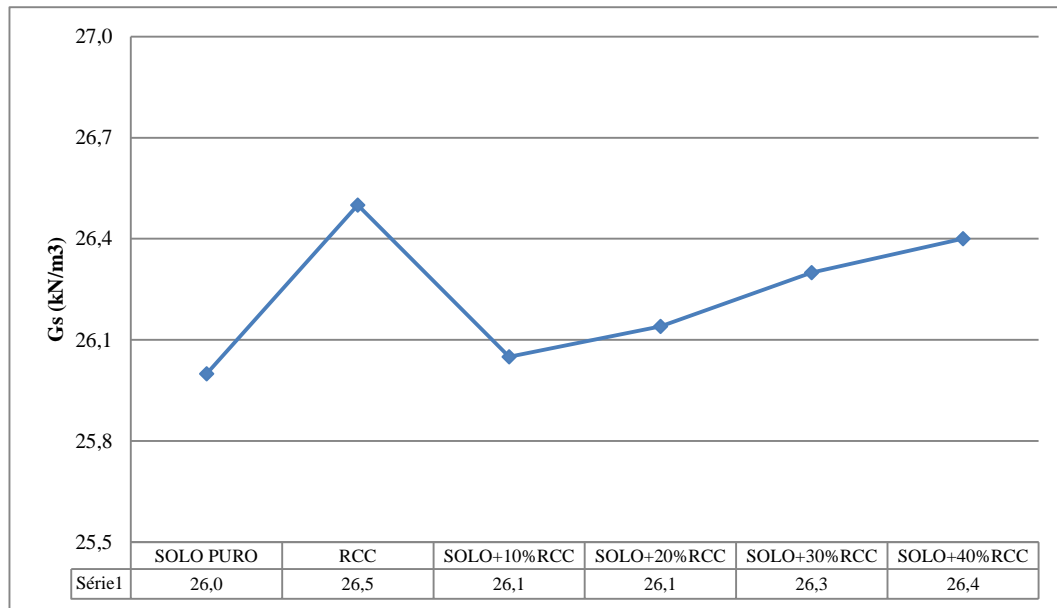


Figura 4.3. Variação dos valores de Gs para o solo puro e para as misturas de solo+RCC.

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam os valores de Gs para as fibras de PET e das misturas Solo+PET. As variações do Gs para os diferentes comprimentos de fibras podem estar associadas às variações de densidade do PET das garrafas de refrigerante utilizadas, que variaram de marca e coloração. Para as misturas praticamente não houve alteração do peso específico do solo com as adições de PET, percebendo-se um leve decréscimo dos valores com o aumento do teor de fibras nas misturas.

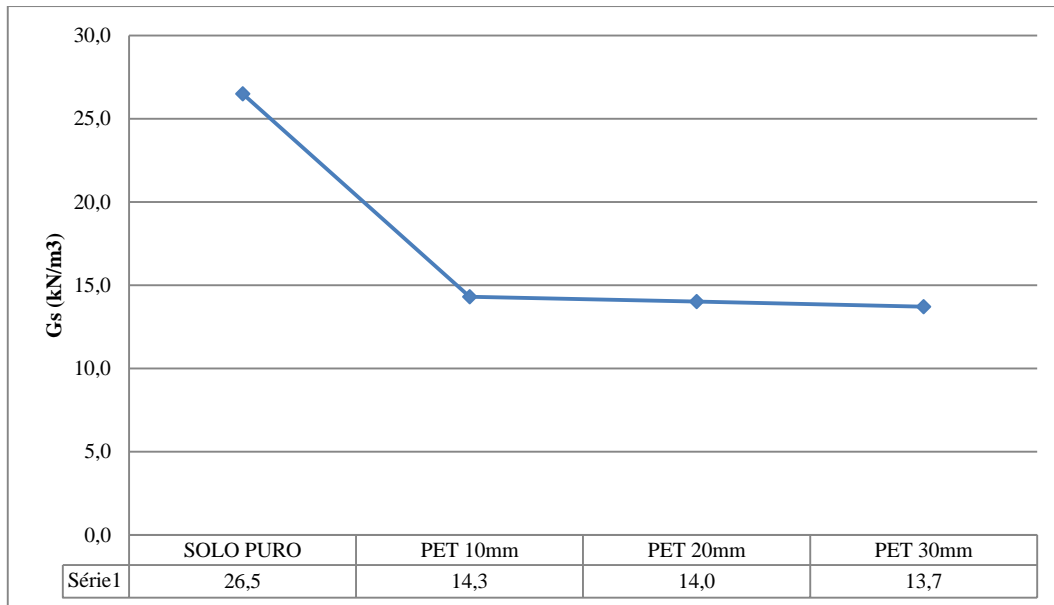


Figura 4.4. Valores Gs para o solo puro e para as fibras de PET utilizadas na pesquisa.



Figura 4.5. Variação dos valores de Gs para o solo puro e para as misturas de solo+PET.

#### 4.1.5. Análises Químicas e Mineralógicas

A análise química total do solo e do RCC foram realizadas para os elementos majoritários Al, Si, Fe, Ti, Ca, Mg e K que são os mais importantes na composição dos solos. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.3, onde os elementos são quantificados sob a forma de óxidos.

Tabela 4.3. Resultados das análises químicas do solo e do RCC utilizados na pesquisa.

Elemento	Solo	RCC
	(%)	
SiO <sub>2</sub>	57,43	65,08
CaO	0,25	10,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,56	6,20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,39	3,66
MgO	0,16	1,84
K <sub>2</sub> O	1,08	0,67
SO <sub>3</sub>	0,05	0,55
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,29
TiO <sub>2</sub>	1,18	0,67
P.F.	9,87	10,80
Total	100	

Observa-se que o solo apresentou maiores percentuais dos elementos sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), com percentuais de 57,43% e 25,56%, respectivamente. Esse elevado percentual de óxido de alumina é uma das características típicas dos solos lateríticos.

No RCC, a sílica é o principal óxido constituinte, com teor de 65,08%. Sua origem pode estar associada à presença de resíduos de concreto e da argamassa. O óxido de cálcio (CaO) e a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), também estão presentes de forma representativa, com teores de 10,24% e 6,20%, respectivamente. Esses elementos estariam relacionados, principalmente, à presença de resíduos de cerâmica vermelha e do solo e, secundariamente, à presença de feldspatos e do cimento, cal e gesso.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam os resultados das análises químicas por Difractometria de Raio-X do solo e do RCC. No solo percebe-se a presença dos minerais de quartzo, caulinita, mica/muscovita e feldspato. No RCC os minerais identificados são o quartzo e a caulinita.

Os resultados dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura estão apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9. Pode-se observar pelas imagens que o solo apresenta partículas mais finas e arredondadas, revestidas por micropartículas agregadas. Nas imagens da amostra de RCC observa-se que as superfícies das partículas são irregulares, com forma angular, consequência do processo de geração e produção do RCC.

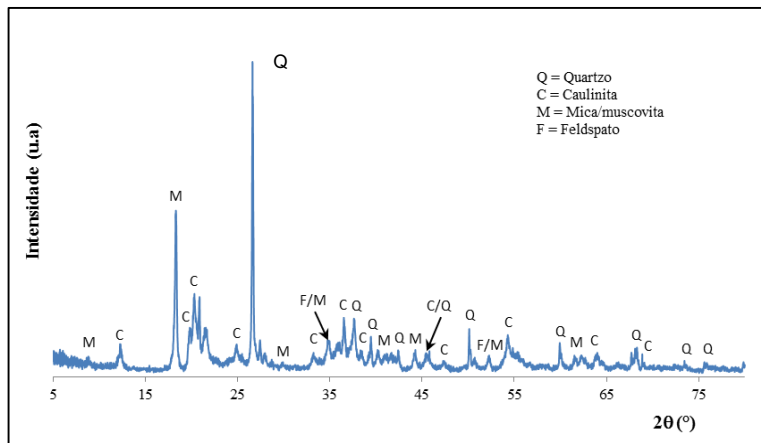


Figura 4.6. Análise química por difratometria de Raio-X do solo.

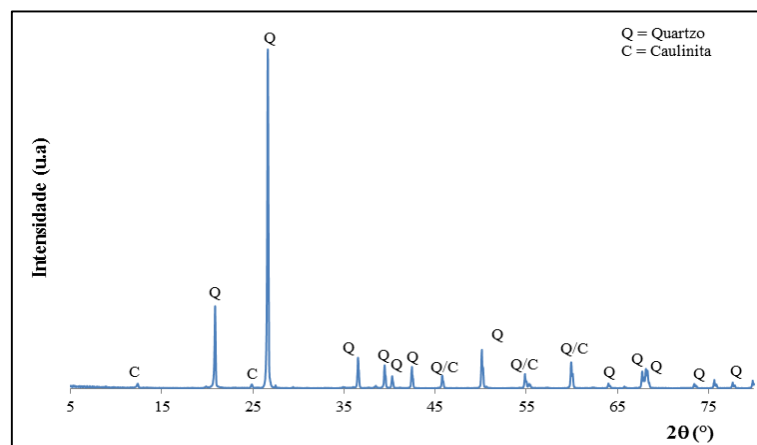


Figura 4.7. Análise química por difratometria de Raio-X do RCC.

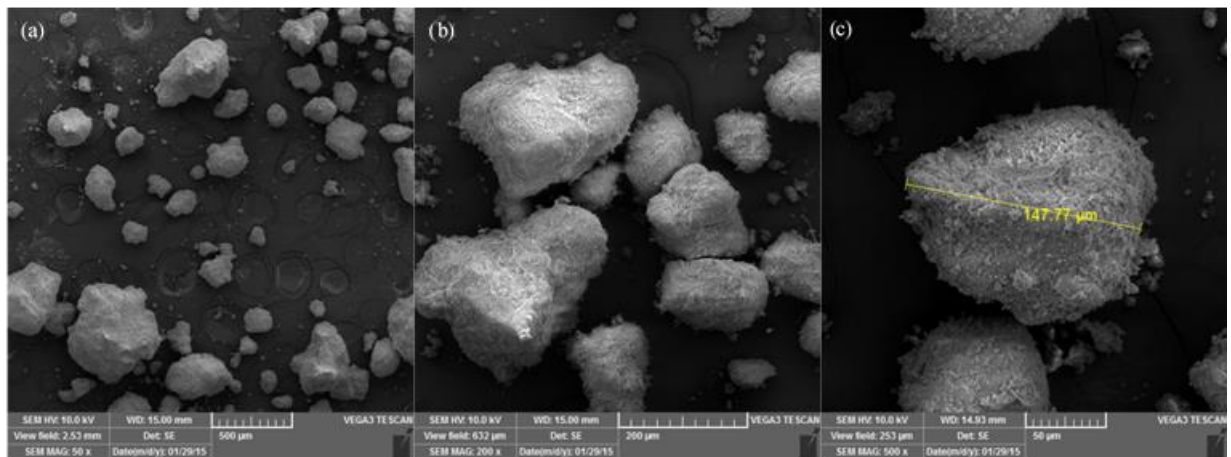


Figura 4.8. Imagens do ensaio de microscopia eletrônica para amostra de solo. (a) aumento de 50x; (b) aumento de 200x; (c) aumento de 500 x.

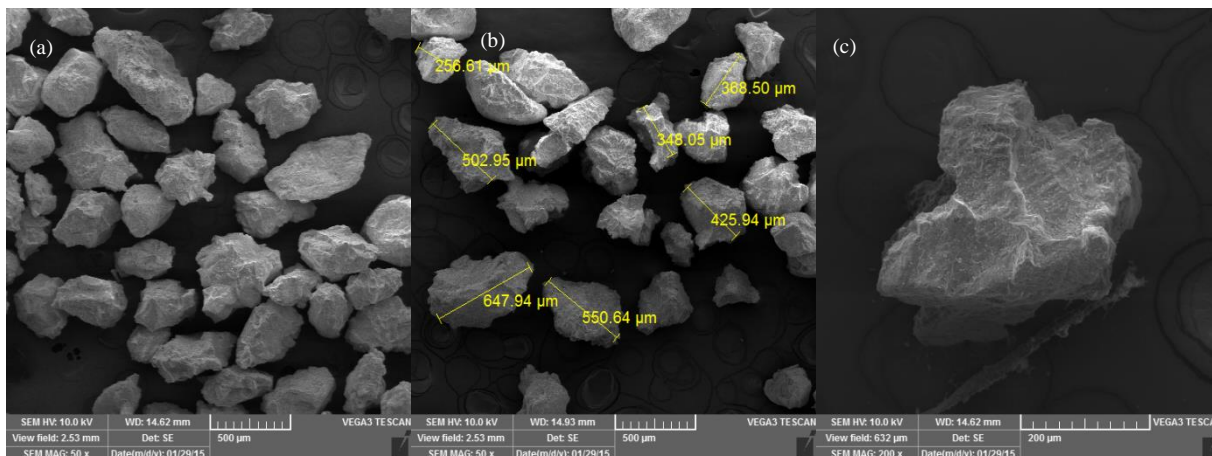


Figura 4.9. Imagens do ensaio de microscopia eletrônica para amostra de RCC. (a) e (b) aumento de 50x; (c) aumento de 200x.

## 4.2. ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E MECÂNICO DO SOLO PURO E DAS MISTURAS

### 4.2.1. Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados com amostras de solo puro e para todas as misturas solo+RCC e solo+PET,

Nas misturas com adição de RCC, percebe-se elevação do peso específico aparente seco máximo e redução da umidade ótima à medida que se eleva o percentual de RCC das misturas. A Tabela 4.4 e a Figura 4.10 evidenciam essa tendência.

Tabela 4.4. Valores de umidade ótima e peso específico seco máximo para o solo e as misturas solo+RCC.

Mistura	Umidade Ótima (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
Solo Puro	30,8	13,4
Solo+10%RCC	30,2	14,0
Solo +20% RCC	27,8	14,4
Solo+30%RCC	25,8	14,8
Solo+40%RCC	24,4	15,1

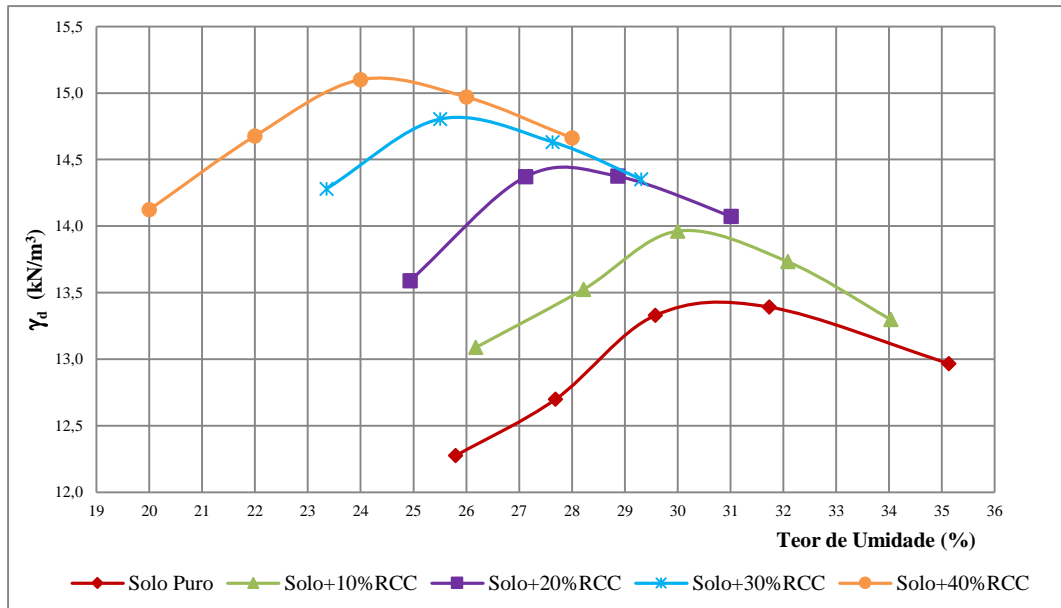


Figura 4.10. Curvas de compactação do solo e das misturas de solo+RCC.

Diferentemente das misturas com RCC as misturas de solo+PET, para os três comprimentos de fibra (10mm, 20mm e 30mm), e para todos os percentuais de adição (0,4%, 0,6%, 0,8% e 1,0%), não apresentaram variação em relação ao teor de umidade ótimo e peso específico seco máximo, conforme observa-se nas Figuras 4.11 a 4.13. Resultados semelhantes aos encontrados por Maher e Ho (1994) e Al-Wahab e El-Kedrah (1995).

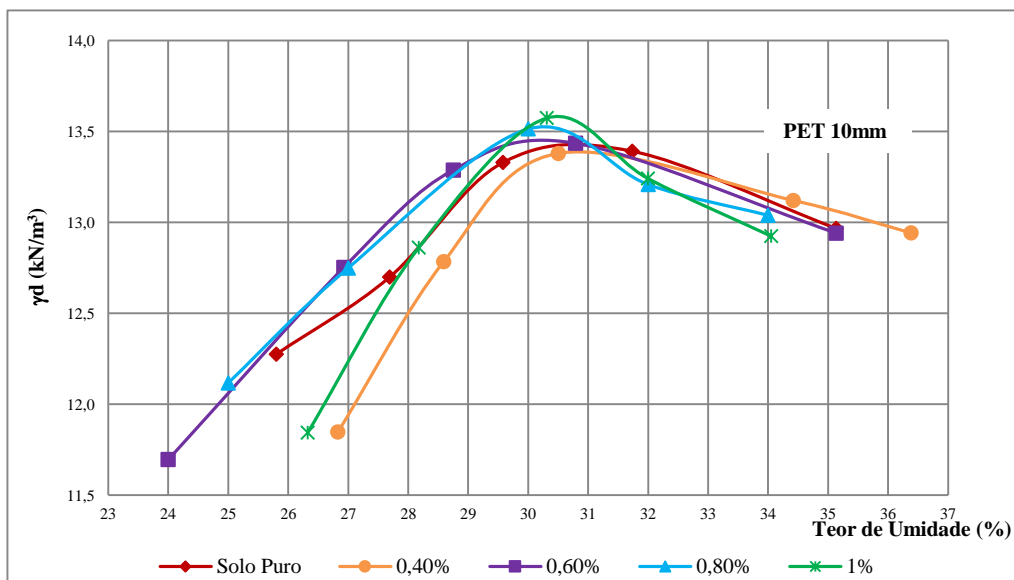


Figura 4.11. Curvas de compactação do solo e das misturas de solo+PET para fibras de 10mm.

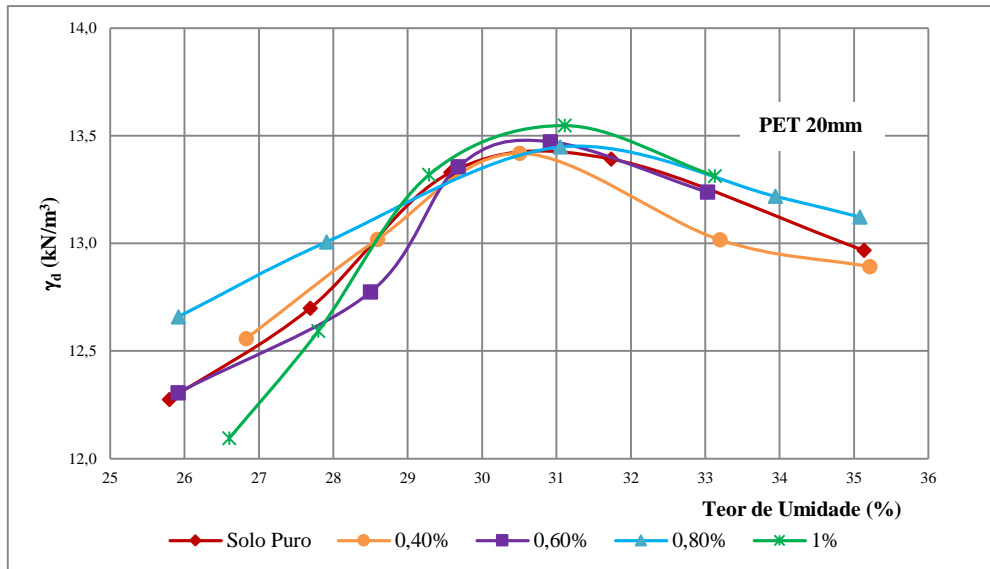


Figura 4.12. Curvas de compactação do solo e das misturas de solo+PET para fibras de 20mm.

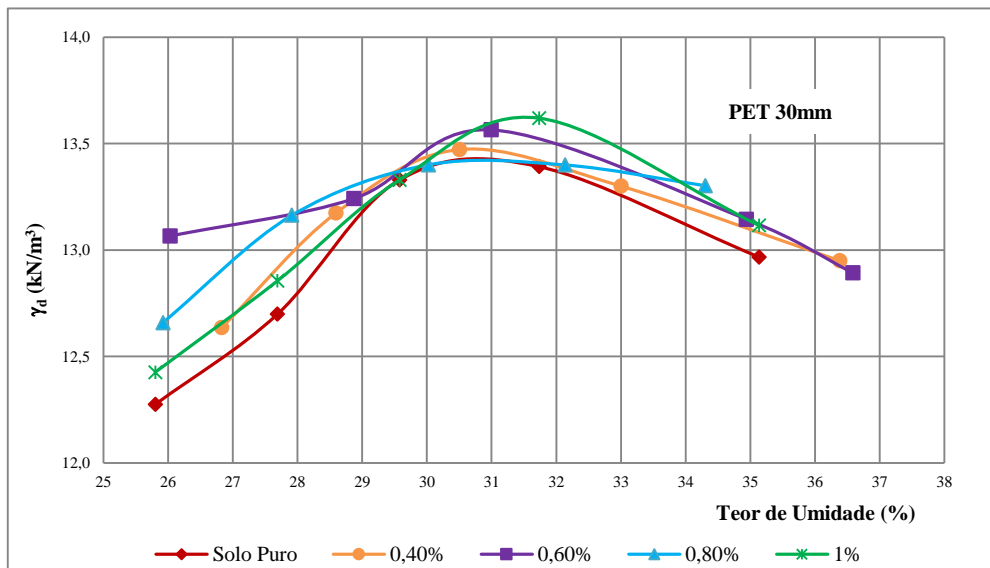


Figura 4.13. Curvas de compactação do solo e das misturas de solo+PET para fibras de 30mm.

#### 4.2.2. Resistência à Compressão Simples (RCS)

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para solo puro e para as misturas solo+RCC, em duas idades distintas de rompimento, e para as misturas solo+PET.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam as curvas tensão x deformação para as misturas de solo+RCC. Observa-se que, para os corpos de prova ensaiados imediatamente após a compactação, os valores de resistência máximas à compressão não apresentaram diferenças significativas, apresentando valores próximos a 200 kPa (Figura 4.14).

Para corpos de prova com 30 dias de idade, a tendência foi a elevação da resistência com o aumento do teor de RCC, com exceção da mistura com 10% de adição, que apresentou resistência 6% inferior a do solo puro. Para as demais adições o acréscimo de resistência foi de 10%, 29% e 38%, respectivamente para as misturas com 20%, 30% e 40% de adição de RCC (Figura 4.15). Essa elevação de resistência com o tempo em misturas que utilizam RCC já foi observada por outros pesquisadores e são ocasionados, na maioria da vezes, pela presença de materiais aglomerantes presentes no resíduo, oriundos das parcelas de argamassas, concretos e materiais cerâmicos. Na Figura 4.16 pode-se observar a variação das resistências à compressão máximas para as diferentes idades de rompimento e percentuais de adição de RCC.

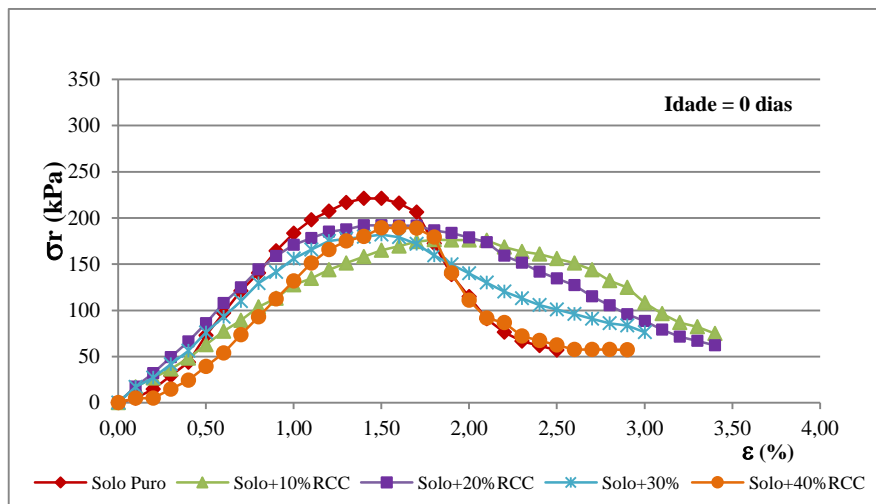


Figura 4.14. Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS para o solo puro e misturas solo+RCC rompido logo após a moldagem dos corpos de prova.

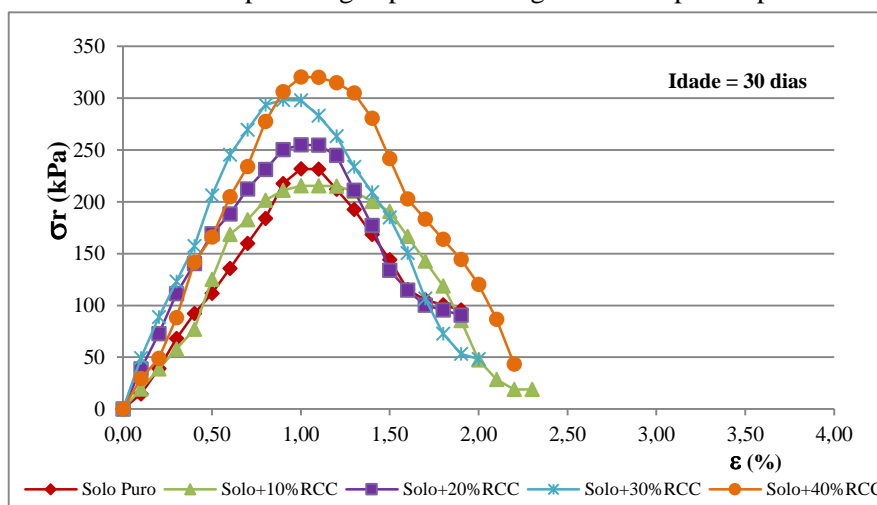


Figura 4.15. Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS para o solo puro e misturas solo+RCC rompido com 30 dias de idade.



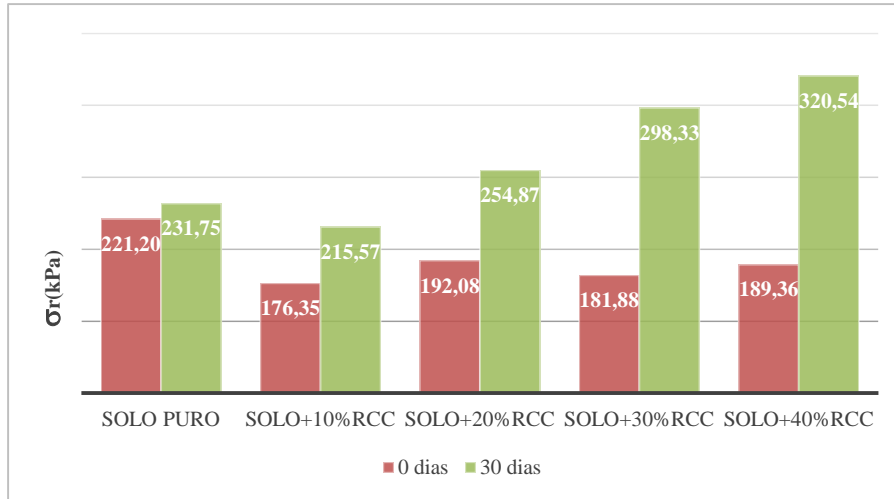


Figura 4.16. Variação da resistência à compressão para o solo puro e misturas solo+RCC, ensaiados imediatamente e após 30 dias da moldagem.

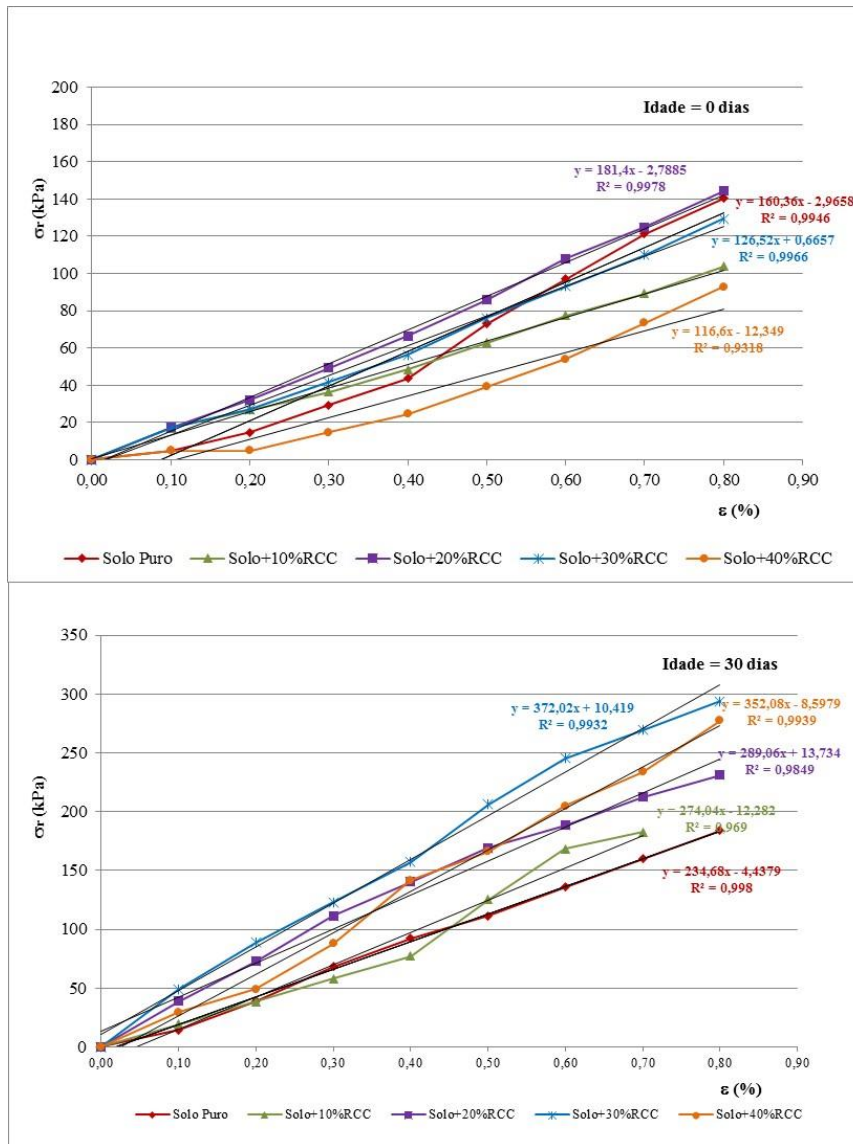


Figura 4.17. Variação do módulo de elasticidade das misturas solo+RCC.

Analisando-se o trecho elástico das curvas tensão x deformação, mostrados na Figura 4.17 observa-se que as misturas com 30 dias de idade apresentaram maior módulo de elasticidade. O maior módulo encontrado foi para mistura com 30% de adição de RCC, aos 30 dias de idade.

Para as misturas de solo+PET, primeiramente, foram realizados ensaios com as fibras lisas, variando-se o comprimento e o percentual de adição. Os resultados dos ensaios são apresentados nas Figuras 4.18 a 4.20.

Analisando-se os valores de resistência máxima observa-se que, para todos os comprimentos de fibra, as misturas com o percentual de adição de 0,4% foram as que apresentaram os maiores valores de resistência de pico, indicando que este percentual seria o percentual ótimo de adição, acima do qual há perda de resistência, quando comparado ao solo puro. Observa-se ainda a adição das fibras elevou a resistência pós-pico para todas as misturas.

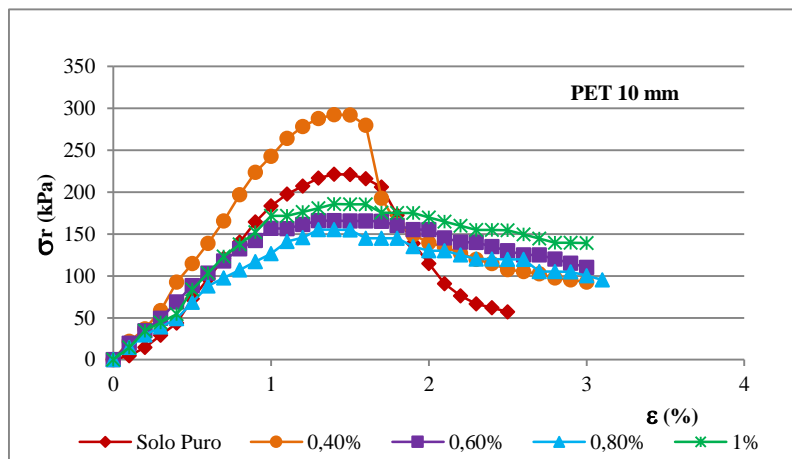


Figura 4.18. Curvas tensão x deformação para as misturas solo+PET 10mm, fibra lisa.

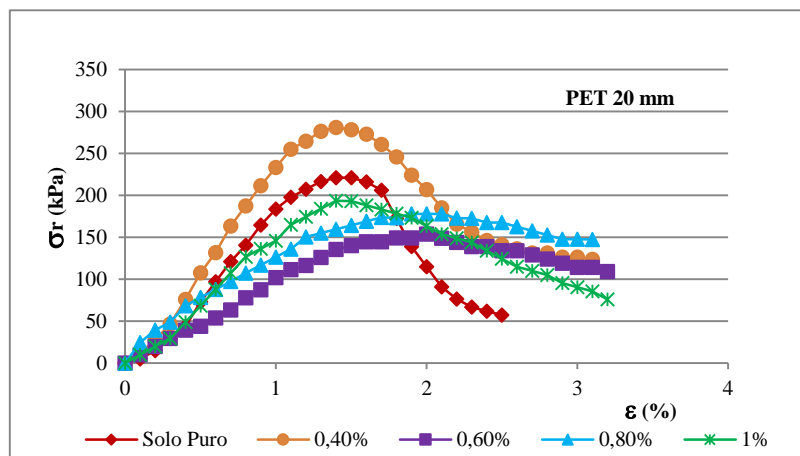


Figura 4.19. Curvas tensão x deformação para as misturas solo+PET 20mm, fibra lisa.

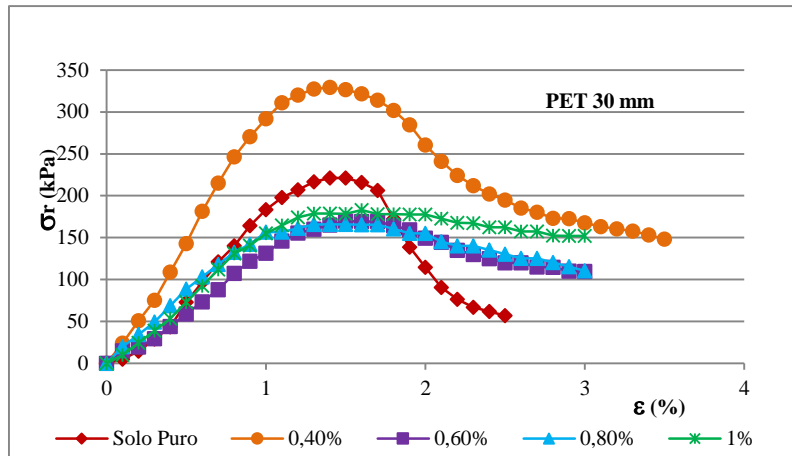


Figura 4.20. Curvas tensão x deformação para as misturas solo+PET 30mm, fibra lisa.

Na Figura 4.21 estão plotadas apenas as curvas com 0,4% de adição de PET, com geometria lateral lisa. De acordo com essas curvas, existe uma tendência de ganho de resistência com o aumento do comprimento da fibra. A fibra de 30mm apresentou valor de resistência a compressão de 329,3 kPa, 48,9% superior à resistência do solo sem adição de fibras.

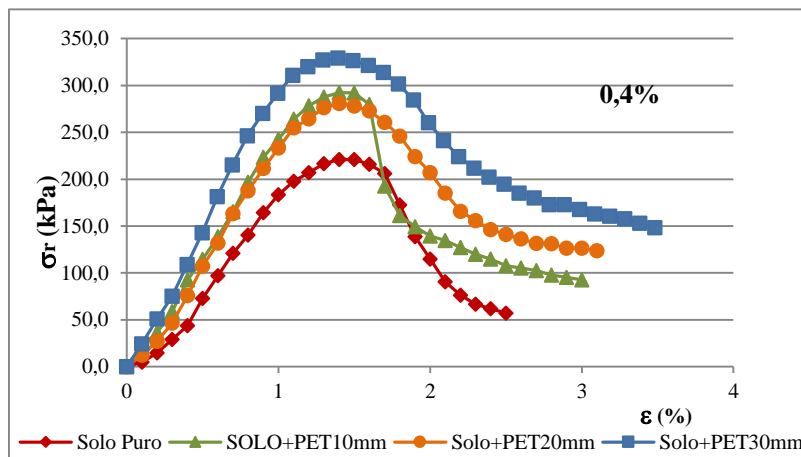


Figura 4.21. Comparativo entre as curvas tensão x deformação com diferentes comprimentos e com 0,4% de adição de fibra lisa de PET.

Da mesma forma que nas misturas com RCC, a adição de fibras elevou o módulo de elasticidade das misturas. Como pode ser observado na Figura 4.22 a mistura mais rígida foi aquela com adição de fibras de 30mm.

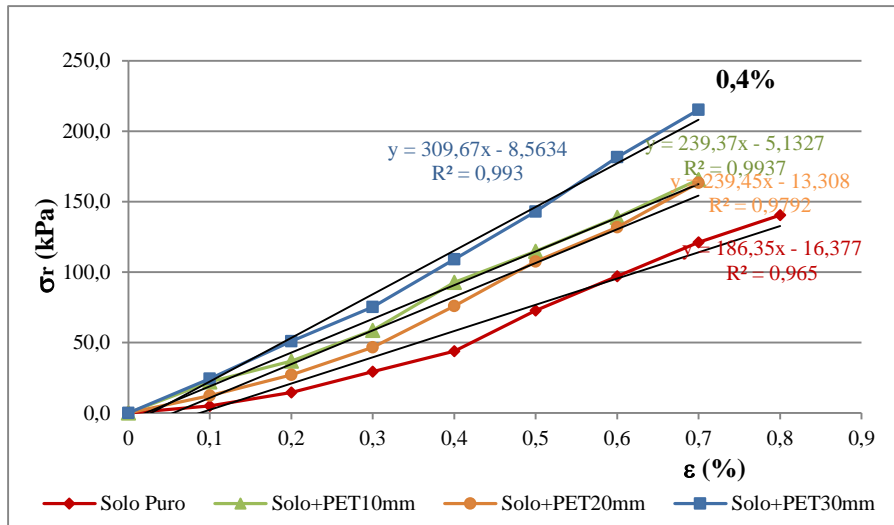


Figura 4.22. Variação do módulo de elasticidade das misturas solo+PET.

Na sequência foram realizados ensaios com as fibras de 10 mm e 30 mm com geometria lateral lisa (FL) e sanfonada (FS), de modo a avaliar a influência da geometria da fibra na resistência à compressão das misturas. As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam as curvas para as misturas com 0,4% de adição de fibras, com 10 mm e 30 mm de comprimento, respectivamente. Observa-se que a variação na geometria da fibra não demonstrou influência significativa na resistência, provavelmente porque no ensaio de resistência à compressão, a resistência da fibra não chega a ser mobilizada, mesmo para valores próximos à ruptura da amostra.

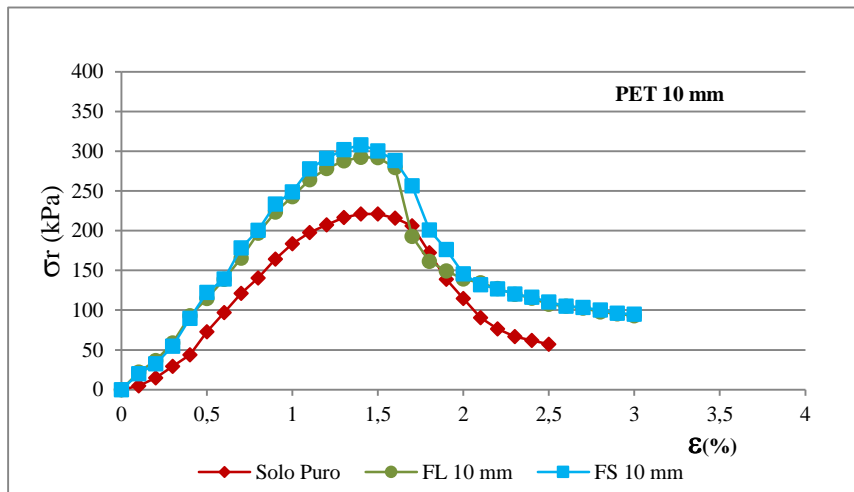


Figura 4.23. Ensaio de RCS em misturas de solo+PET, com 0,4% de adição de fibra 10mm, variando a geometria lateral.

A partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e considerando o parâmetro mínimo de resistência desejável para os materiais de cobertura proposto por Daniel e Benson (1990) de 200 kPa, observa-se que as amostras com adição de RCC só atenderiam ao critério no ensaio realizado aos 30 dias de idade. No caso das

misturas com PET, apenas as amostras com percentual de 0,4% atingiram o valor recomendado, para os três comprimentos ensaiados.

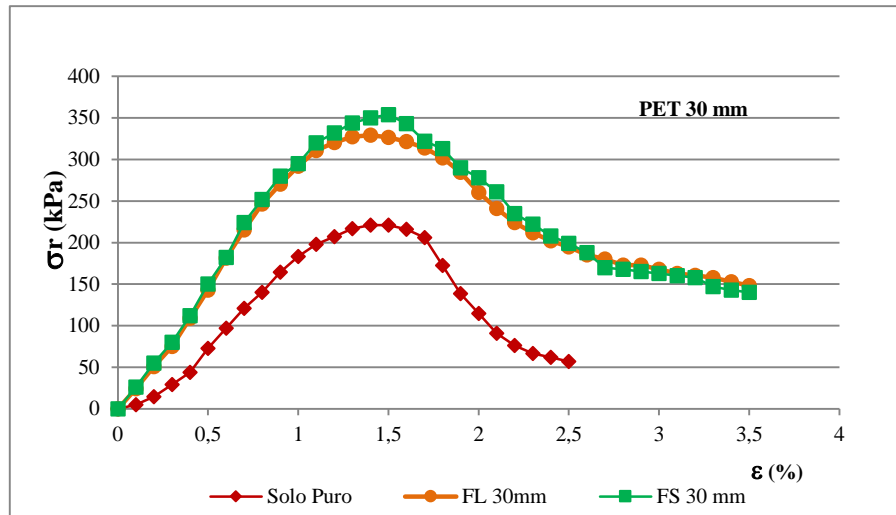


Figura 4.24. Ensaio de RCS em misturas de solo+PET, com 0,4% de adição de fibra 30mm, variando a geometria lateral.

### 4.2.3. Permeabilidade

Os resultados dos ensaios de permeabilidade estão apresentados na Figura 4.25. Observa-se que a condutividade hidráulica apresentou uma tendência de elevação com o acréscimo de resíduo, seja ele de origem granular (RCC) ou fibroso (PET). No entanto, no caso do RCC, as condutividades mantiveram a mesma ordem de grandeza do solo puro para todas as misturas, com exceção daquela com 40% de adição, onde houve elevação do valor da condutividade hidráulica (k) em uma ordem de grandeza.

Para as misturas com adição de fibras de PET, os ensaios foram realizados apenas para o percentual de adição de 0,4%, escolhido em função do ensaio de resistência à compressão simples, que apresentou melhores resultados para este percentual de adição. Variando-se o comprimento das fibras, observou-se o aumento de uma ordem de grandeza na condutividade hidráulica para os três comprimentos analisados.

Desta forma, tendo em vista o valor limite especificado para a condutividade hidráulica em camadas de cobertura de  $10^{-7}$  m/s, quando se trata de aterros para resíduos não perigosos, todas as amostras atenderiam a este critério.

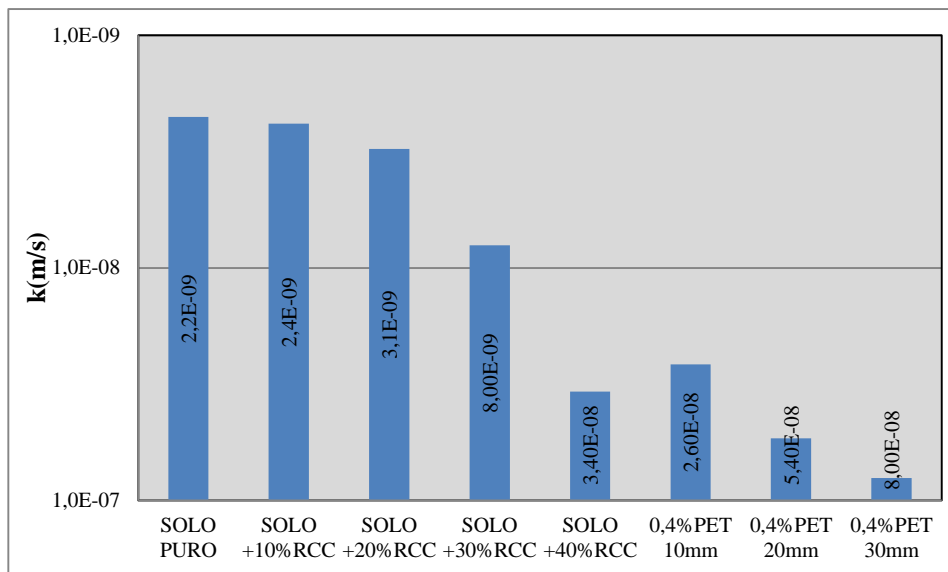


Figura 4.25. Variação da permeabilidade.

#### 4.2.4. Resistência ao Cisalhamento

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, na condição inundada e para tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, permitiram o traçado de envoltórias de Mohr-Coulomb e a determinação dos parâmetros: ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão (C).

A Figura 4.26 apresenta as envoltórias para o solo e misturas solo+RCC. Observa-se que a adição de RCC ao solo não alterou significativamente os parâmetros de resistência. Na Tabela 4.5 são apresentados os parâmetros obtidos para as misturas com RCC.

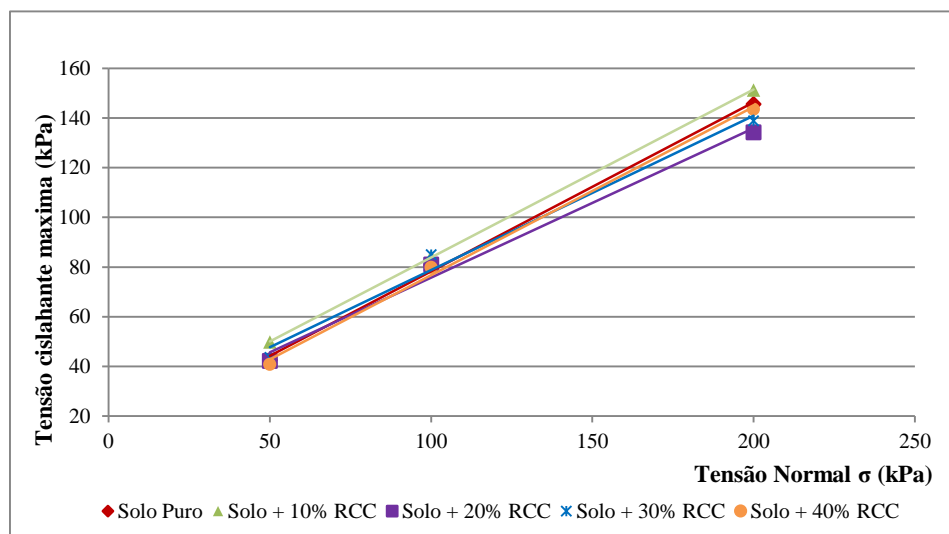


Figura 4.26. Envoltórias para o solo e misturas solo+RCC.

Tabela 4.5. Resultados do ensaio de cisalhamento direto para solo puro e misturas solo+RCC.

	SOLO PURO	SOLO+10%RCC	SOLO+20%RCC	SOLO+30%RCC	SOLO+40%RCC
Envoltor de Mohr Coulomb	$\tau=10,221+0,68\sigma_N$	$\tau=16,32+0,675\sigma_N$	$\tau=15,61+0,601\sigma_N$	$\tau=16,73+0,621\sigma_N$	$\tau=9+0,68\sigma_N$
Coesão (kPa)	10	16	16	17	9
Ângulo de Atrito ( $\phi$ )	34	34	31	32	34

As curvas tensão x deslocamento (Figura 4.27) mostram que a adição do RCC exerce maior influência na resistência ao cisalhamento quando se eleva a tensão normal atuante. Para tensões normais de 100 kPa e 200 kPa o maior pico de resistência ocorreu para a mistura com 20% de adição de RCC.

Para as amostras de solo+PET foram ensaiadas apenas as adições de 0,4%, escolhidas em função dos resultados do ensaio de RCS. Na Tabela 4.6 pode-se observar que os valores de coesão e ângulo de atrito praticamente não variaram com o aumento do comprimento da fibra de PET. Da mesma forma que nas misturas com RCC, a ação da fibra foi mais efetiva para maiores valores de tensão normal, com a fibra de 30mm de comprimento apresentando maiores resistências de pico (Figura 4.28).

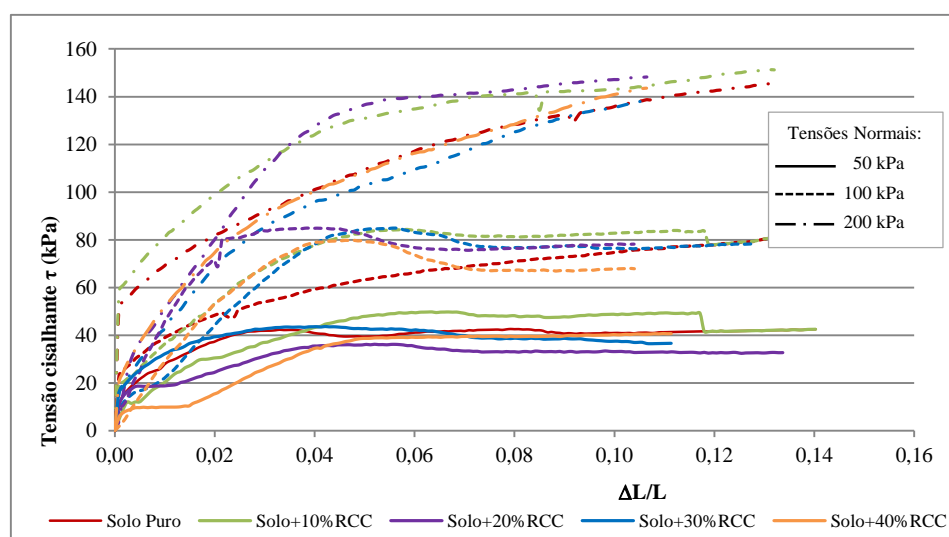


Figura 4.27. Curvas tensão cisalhante x deslocamento para o solo e misturas solo+RCC.

Tabela 4.6. Resultados do ensaio de cisalhamento direto para as misturas solo+PET.

	0,4% PET 10mm	0,4% PET 20mm	0,4% PET 30mm
Evolvente de Mohr Coulomb	$\tau = 7,27 + 0,7654\sigma_N$	$\tau = 6 + 0,664\sigma_N$	$\tau = 5,67 + 0,66\sigma_N$
Coesão (kPa)	7	6	6
Ângulo de atrito ( $\phi$ )	37	34	35

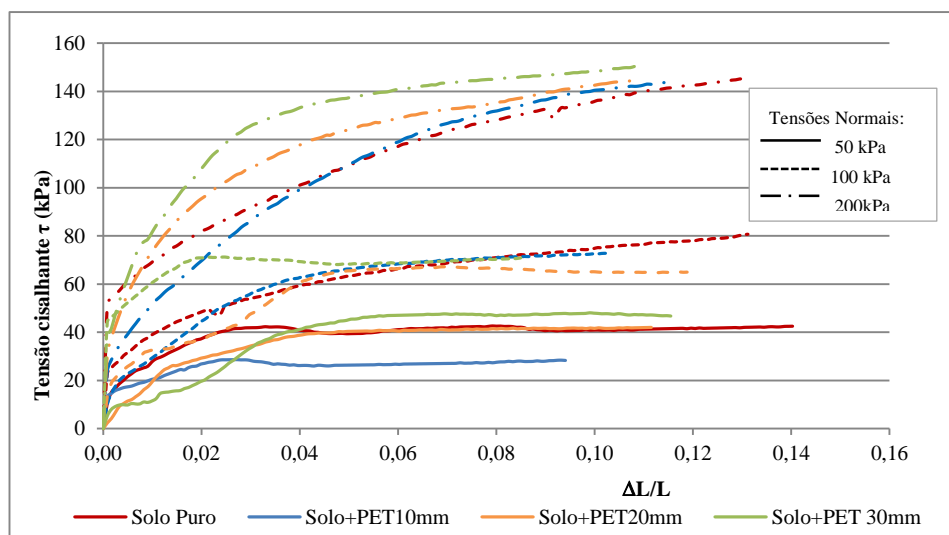


Figura 4.28. Curvas tensão cisalhante x deslocamento para o solo e misturas solo+PET.

#### 4.2.5. Ensaio de Sucção

Para avaliar o comportamento do solo e das misturas com adição de RCC e PET, foram realizados ensaios de sucção utilizando-se a técnica do papel filtro, traçando-se curvas mistas, de secagem e molhagem, tendo em vista ser essa a condição mais próxima daquela que ocorre em campo.

As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam os resultados dos ensaios de sucção, utilizando a técnica do papel filtro, para o solo puro, todas as misturas de solo+RCC e para a mistura de solo+0,4%PET10mm. Observa-se que as curvas apresentam um formato bimodal. Para sucções mais baixas, o acréscimo de RCC ao solo provocou uma redução na capacidade de retenção da mistura. Da mesma forma, a adição da fibra de PET também reduziu a capacidade de retenção. Para sucções altas o comportamento foi semelhante para todas as



misturas. O valor de entrada de ar nos macroporos variou entre 10 e 50 kPa, sendo menor para a mistura com 40% RCC, e o valor de entrada de ar nos microporos foi da ordem de 10.000 kPa.

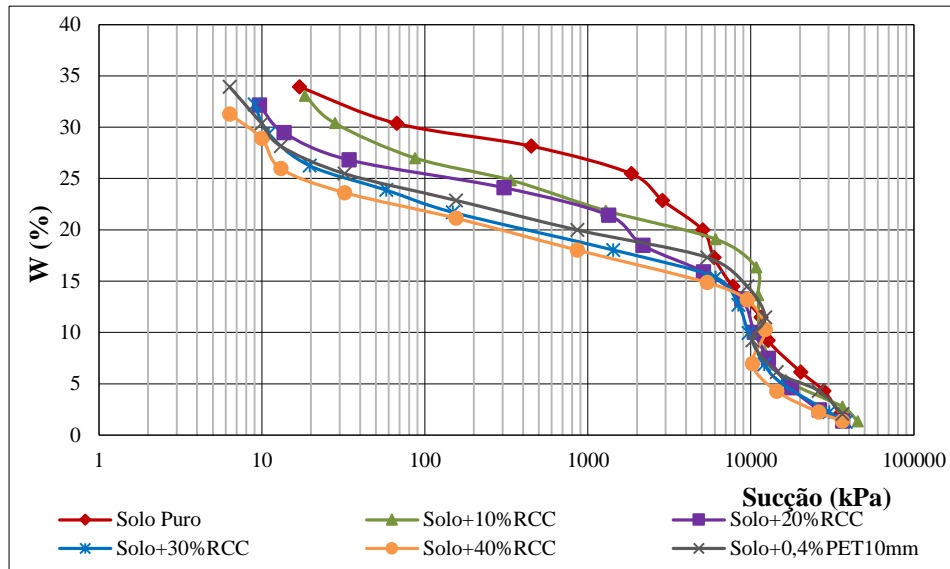


Figura 4.29. Curvas características do solo e das misturas solo+RCC.

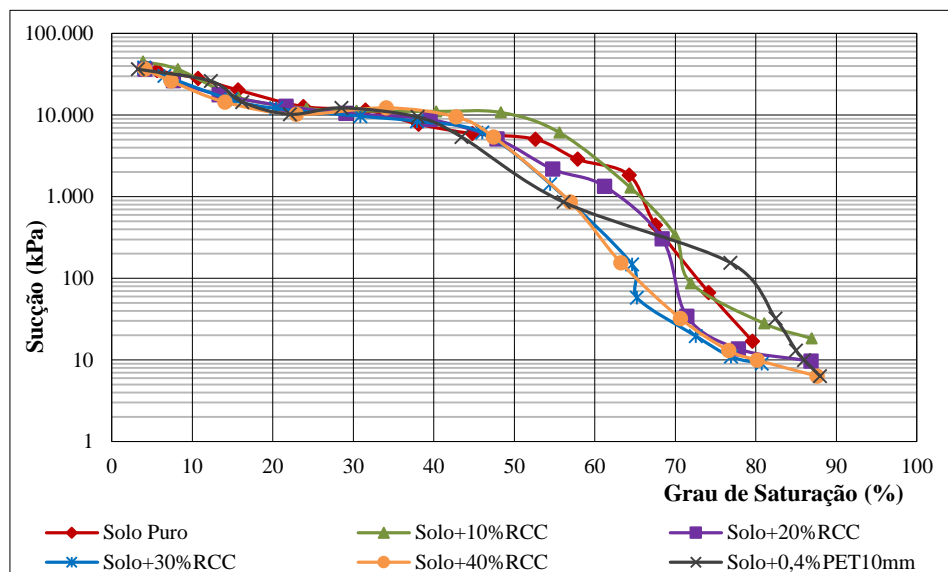


Figura 4.30. Sucção em função do grau de saturação das misturas.

#### 4.2.6. Tração por Compressão Diametral

Os ensaios de tração por compressão diametral para as misturas solo+RCC foram realizados com os mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de sucção, rompidos para diferentes teores de umidade. A seguir são apresentados os resultados dos ensaios para as amostras de solo puro e com adição de 20%RCC.

Para o solo puro o valor máximo de resistência encontrado foi de 21,41 kPa, para o teor de umidade de 10%. Para a mistura solo+20% RCC a resistência máxima à tração foi de 23,90 kPa, correspondente ao teor de umidade de 3% (Figuras 4.31 e 4.32). Para comparar o efeito da adição do RCC nos valores de resistência à tração, foram plotadas algumas curvas, referentes a diferentes teores de umidade (Figura 4.33). Pode-se observar que, para praticamente todos os teores de umidade, a resistência da mistura com adição de RCC foi superior a do solo puro. Todas as amostras apresentaram um comportamento frágil na ruptura. As amostras de solo puro apresentaram deformações maiores do que as de solo+RCC.

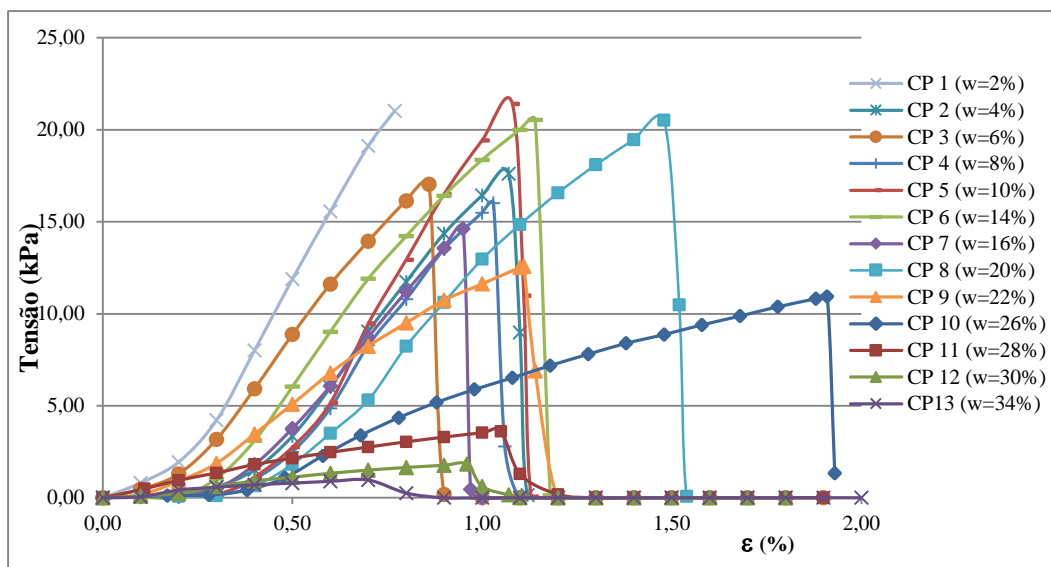


Figura 4.31. Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para o solo puro.

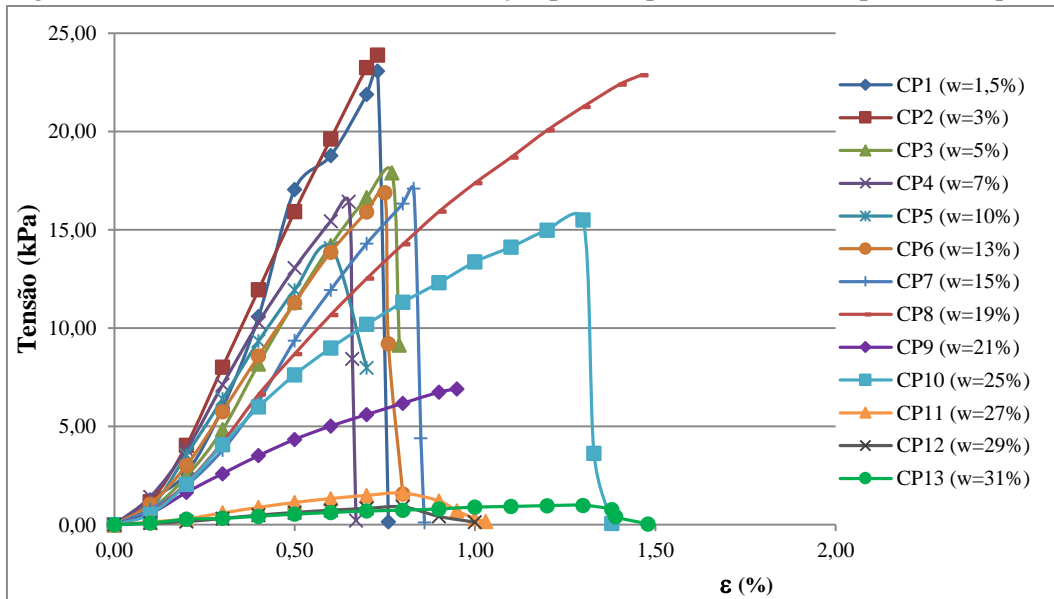


Figura 4.32. Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para o solo+20%RCC.

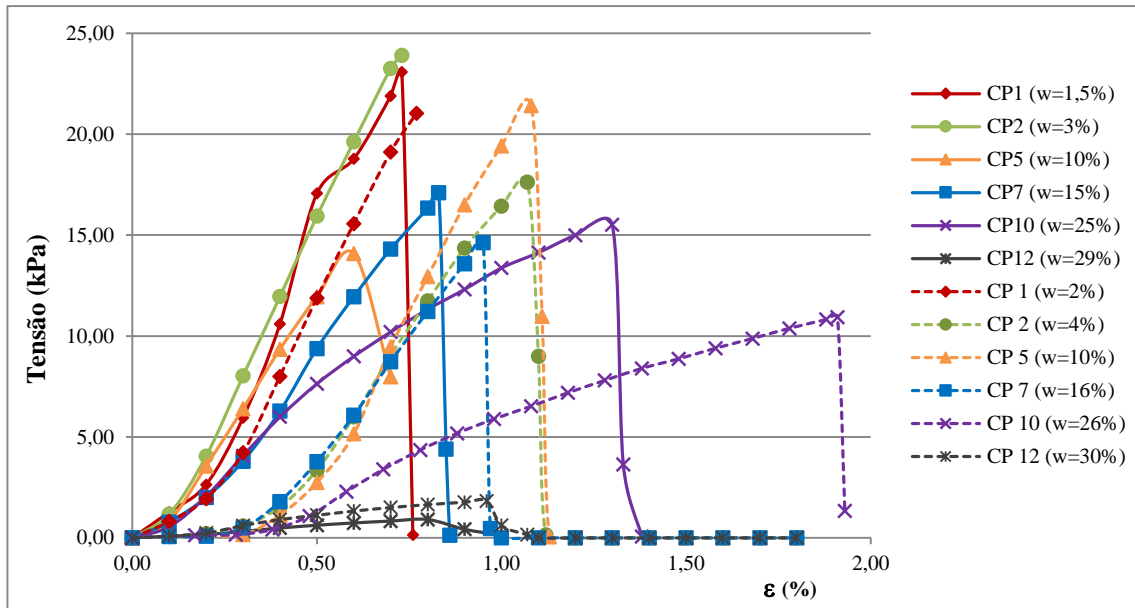


Figura 4.33. Comparativo entre os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para solo puro e solo+20%RCC.

Para as amostras de solo+PET foram moldados corpos de prova com 0,4% de adição de fibras, variando-se o comprimento entre 10mm e 30mm e a geometria lateral, utilizando-se fibras lisas (FL) e sanfonadas (FS). A fibra de 20mm não foi ensaiada, por ser um comprimento intermediário. Os resultados estão apresentados na Figura 4.34.

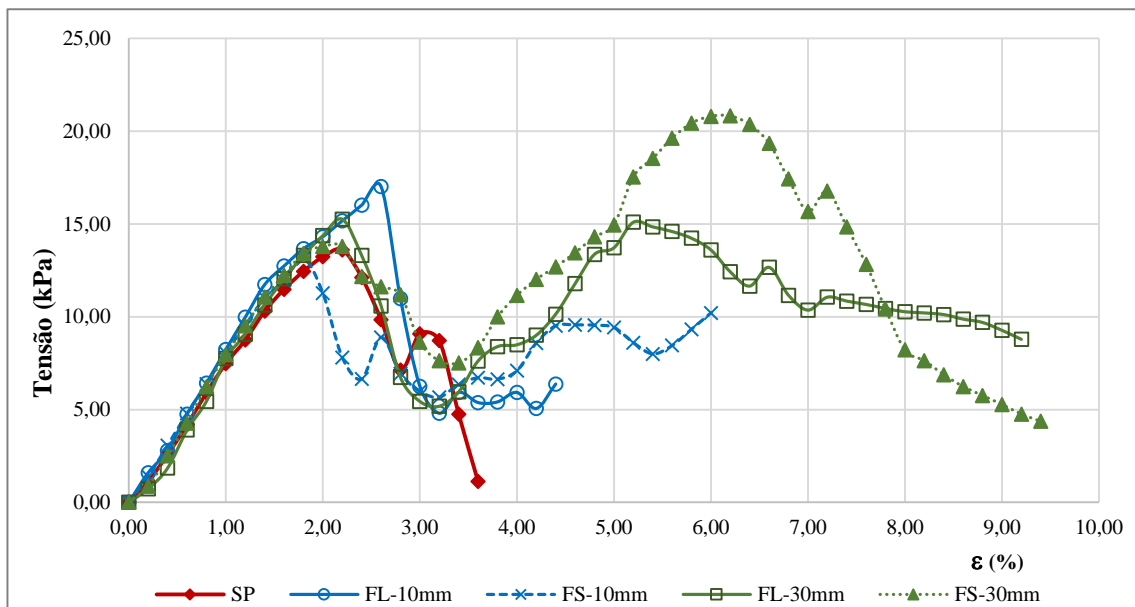


Figura 4.34. Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para as misturas solo+PET (SANTOS e SILVA, 2015).

Como é possível observar na Figura 4.34, o solo puro apresentou um comportamento frágil, sem um intervalo de plastificação sensível, rompendo assim que a resistência última foi atingida. Já os corpos de prova com adição de fibra apresentaram

um comportamento diferente, com uma zona de deformação secundária influenciada pelas interações das fibras com o solo.

Nos corpos de prova com adição de fibras de PET, a curva tensão x deformação apresentou um pico de resistência inicial, seguidos por outros picos de resistência secundários. Para as fibras de menor comprimento (10mm) ocorreram vários picos secundários de menor resistência. As misturas com as fibras mais longas (30mm) apresentaram picos secundários maiores que o pico de resistência inicial, com maiores valores de deformação específica.

Esse comportamento pode estar relacionado à disposição aleatória das fibras e a forma como cada fibra individualmente é solicitada ao longo do ensaio, de modo que as tensões internas não se distribuíssem de forma homogênea entre as fibras. Uma fibra ou grupo de fibras era solicitado e isso elevava a resistência. Superada a aderência na interface solo-fibra, a resistência caía até que outra fibra ou novo grupo de fibras fosse solicitado. Isso pode explicar ainda a forma cíclica das curvas de resistência ao longo do ensaio. Como a ancoragem nas fibras mais curtas é menor, mais fácil o seu arrancamento, explicando ciclos mais curtos, quando comparados aos ciclos observados para as fibras mais longas.

Com relação a influência da geometria das fibras, observa-se que as fibras sanfonadas, por terem uma melhor ancoragem, começaram a redistribuir tensões em um estado anterior às das fibras lisas. E em comparação com as fibras lisas, o solo dosado com fibras sanfonadas apresentou maior resistência na região secundária e patamares ou regiões de plastificação mais largas que as geradas pelas fibras lisas.

No primeiro pico de resistência secundária, o solo dosado com a fibra de 30mm sanfonada teve um resultado 86,88% superior ao da fibra lisa, e a fibra sanfonada de 10mm foi 13,14% melhor que o da fibra lisa. Em termos de resistência secundária, a fibra sanfonada apresentou melhores resultados para os dois comprimentos comparativamente à fibra lisa.

Para verificar a existência de correlações entre a resistência à tração e à sucção, foram plotadas em um mesmo gráfico as curvas características de resistência à tração por compressão diametral e as curvas características de sucção, apresentadas no item anterior (Figura 4.35). Pode-se observar que as curvas apresentam comportamento semelhante com um ponto de inflexão próximo ao grau de saturação de 60%, a partir do qual os valores de sucção e resistência à tração decrescem rapidamente, este comportamento tende a seguir a tendência apresentada por Lu *et al.* (2007), como pode ser observado na Figura 2.14, apresentado no Capítulo 2.

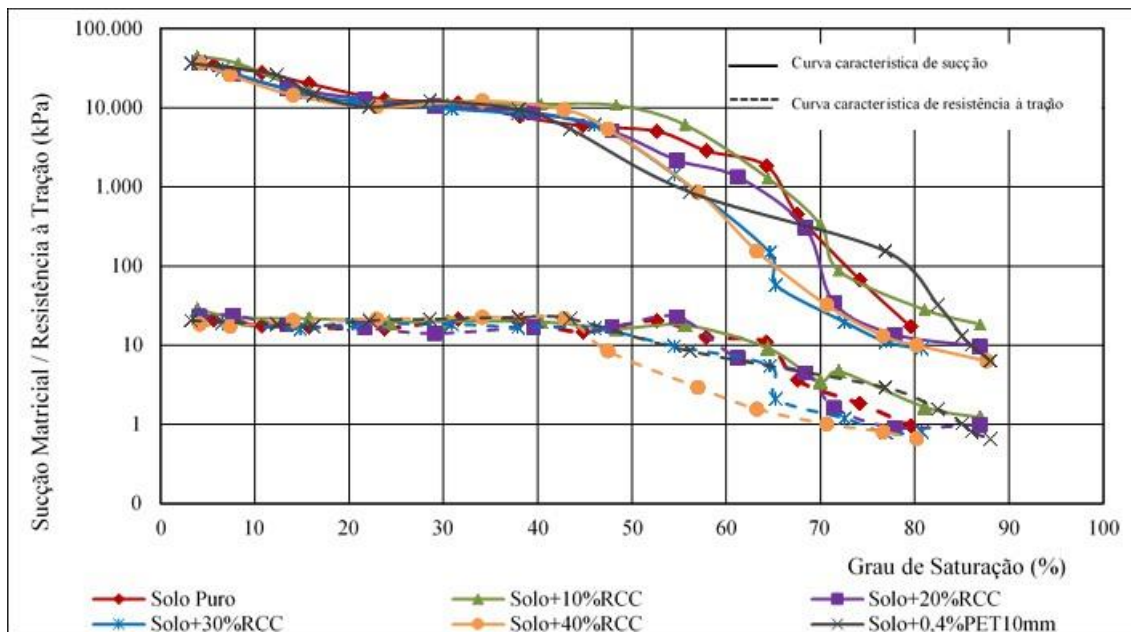


Figura 4.35. Relação entre a curva característica de sucção e a curva característica de resistência à tração.

#### 4.2.7. Ensaio de Absorção/Retração

O ensaio de absorção/retração teve por objetivo avaliar a perda de massa e a variação volumétrica das diferentes misturas quando dispostas em ambientes com diferentes umidades relativas do ar. Os ensaios tiveram duração de 15 dias, quando as perdas de massa e as variações volumétricas praticamente estabilizaram-se.

As amostras foram submetidas a três ambientes distintos. Os resultados das amostras submetidas ao ambiente úmido estão apresentados nas Figuras 4.36 e 4.37. Observa-se que a perda de massa durante o ensaio foi pequena, atingindo valor máximo de -2% para as amostras com 10% e 40% de adição de RCC. Este comportamento demonstra uma leve queda da massa das amostras ao longo do tempo de execução do

ensaio, que pode ser explicada pela perda de umidade das amostras durante o tempo em que elas ficaram fora do ambiente interno da caixa de isopor para que fossem medidas e pesadas. As misturas com adição de PET apresentaram menores perdas de massa no período inicial de ensaio, estabilizando-se com valores muito próximos aos das misturas com 20% e 30% de adição de RCC.

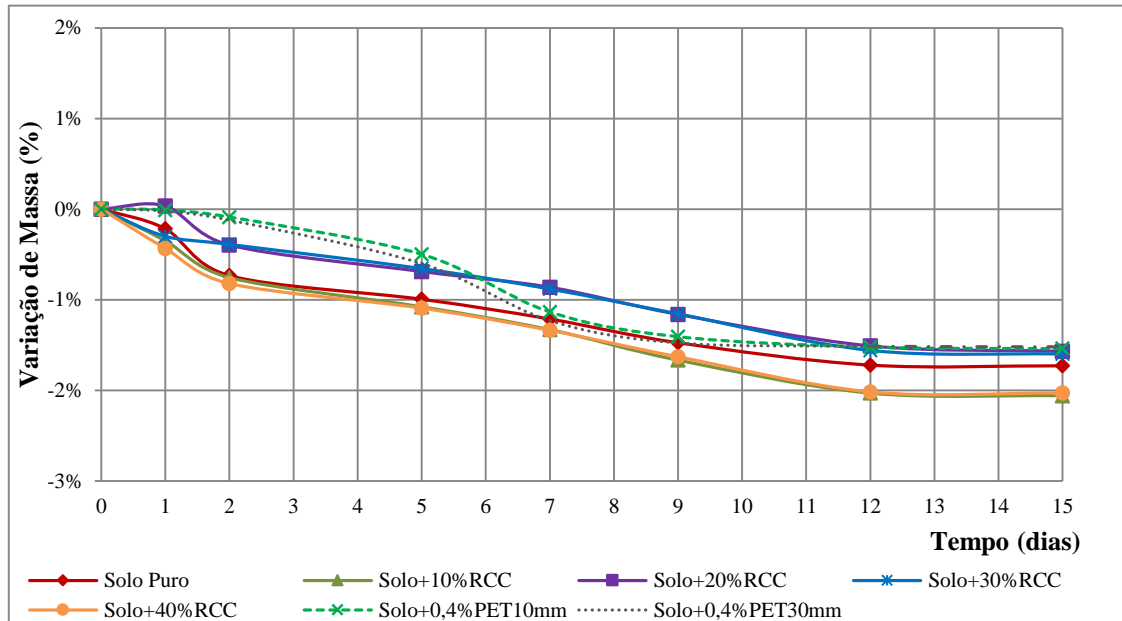


Figura 4.36. Variação de massa para amostras dispostas em ambiente úmido (U.R.=95%) (SOUZA, 2014 – Modificado).

As variações volumétricas no ambiente úmido (Figura 4.37) também foram pequenas, com valores inferiores a 2%, e não apresentaram diferenças significativas quando comparadas ao solo natural. A menor retração ocorreu para a amostra de solo+PET com 30mm de comprimento. A umidade relativa do ar durante o ensaio manteve-se estável em 95%, que é o limite superior da escala do modelo de termo higrômetro utilizado no ensaio.

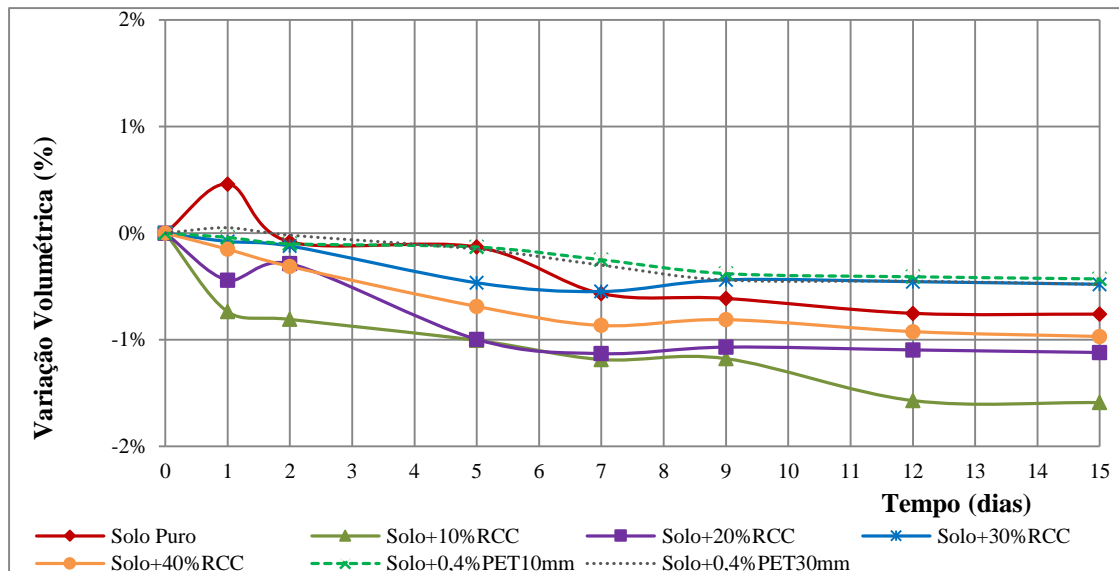


Figura 4.37. Variação volumétrica para amostras dispostas em ambiente úmido (SOUZA, 2014 – Modificado).

Considerando os resultados das variações de massa das amostras dispostas em ambiente seco, pode-se observar que a perda de massa provocada pela secagem do material ocorreu de forma mais acelerada nos dois primeiros dias, estabilizando-se a partir do sétimo dia de ensaio. As amostras com adição de PET e com 30% e 40% de adição de RCC foram as que sofreram menor redução percentual de massa. Já o solo puro e a mistura com 10% de adição de RCC sofreram as maiores perdas de massa, atingindo 23% de redução em relação à massa inicial das amostras ao longo dos 15 dias de ensaio (Figura 4.38). As umidades relativas variaram entre 67%, no início, e 17% no 12º dia de ensaio.

Com relação à variação volumétrica das amostras no ambiente seco, observa-se na Figura 4.39 que as amostras retraíram rapidamente nos dois primeiros dias de ensaio, cerca de 3%, atingindo valores máximos de retração da ordem de 3,5%, com exceção da amostra de solo puro que, no primeiro dia de ensaio, retraiu 4,5%, atingindo uma retração máxima de 5,5% a partir do sétimo dia. Considerando as recomendações de Daniel e Benson (1990) para materiais de cobertura, a retração máxima de 4% seria atendida por todas as misturas alternativas, exceto pela amostra de solo puro.

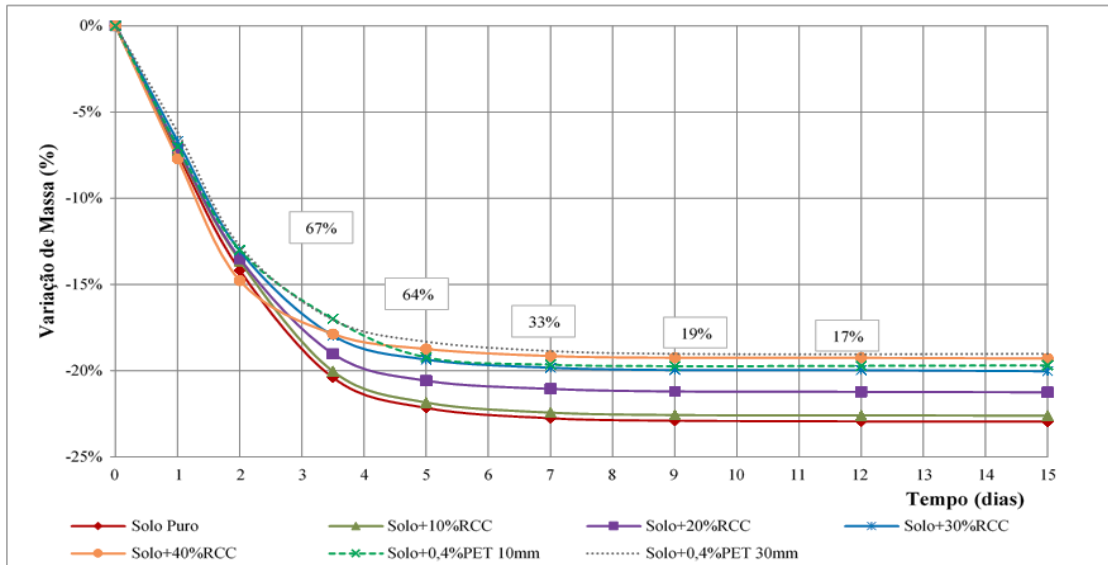


Figura 4.38. Variação de massa das amostras dispostas em ambiente seco (SOUZA, 2014 – Modificado).

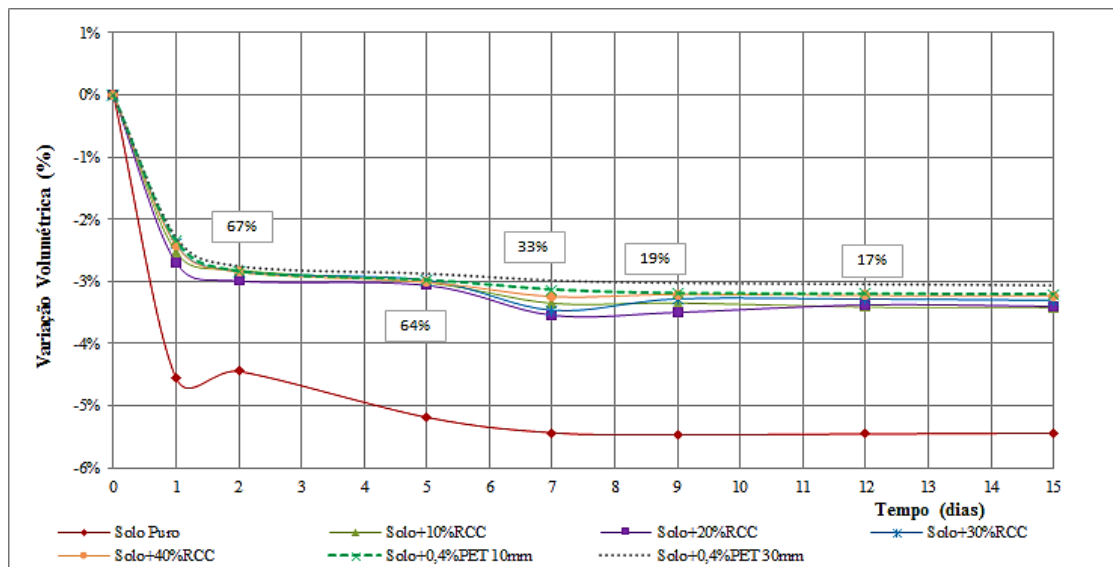


Figura 4.39. Variação volumétrica para as amostras dispostas em ambiente seco (SOUZA, 2014 – Modificado).

As amostras submetidas às condições de umidade do laboratório apresentaram comportamento muito semelhante às amostras mantidas no ambiente seco, conforme apresentado nas Figuras 4.40 e 4.41.



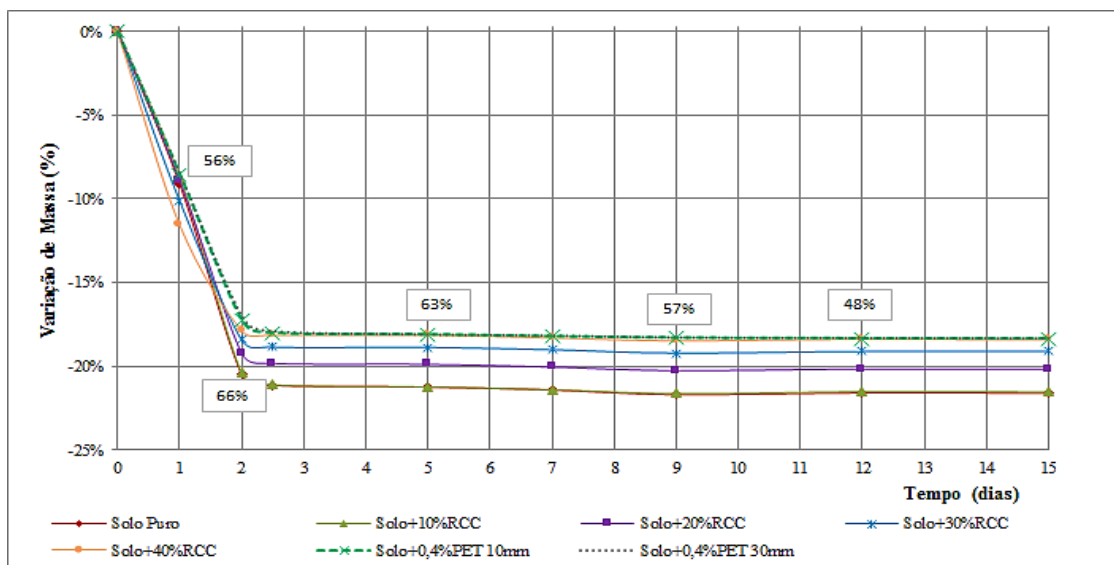


Figura 4.40. Variação de massa para as amostras expostas às condições ambientais do laboratório (SOUZA, 2014 – Modificado).

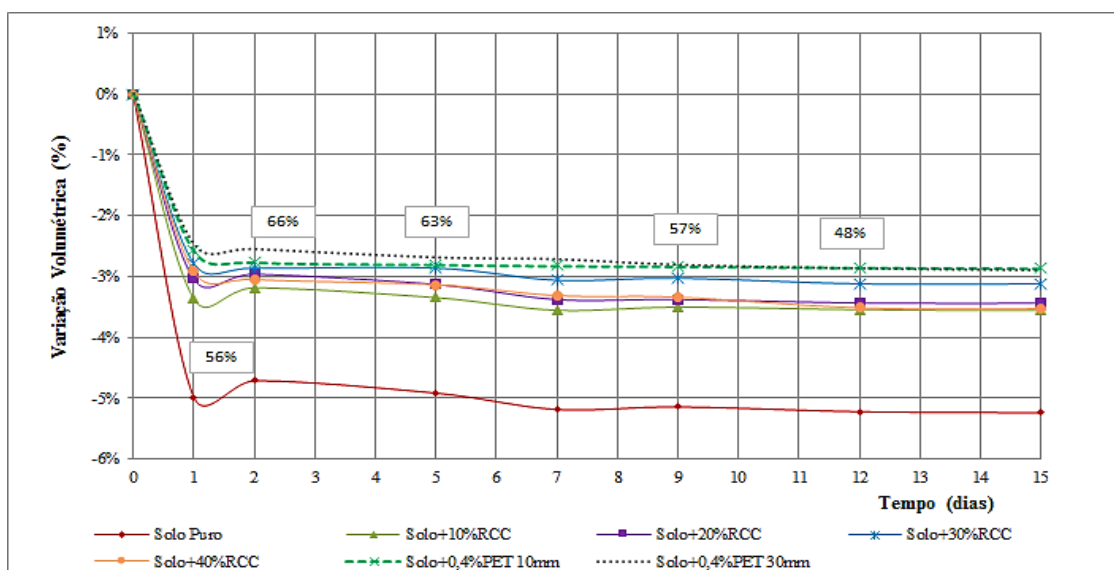


Figura 4.41. Variação volumétrica das amostras expostas às condições ambientais do laboratório (SOUZA, 2014 – Modificado).

#### 4.2.8. Ensaios Preliminares de Ressecamento

Nos ensaios preliminares de ressecamento foram utilizadas duas metodologias distintas. A primeira metodologia utilizou corpos de prova cilíndricos submetidos a três ciclos de umedecimento e secagem, conforme descrito no capítulo de metodologia.

Nas Figuras 4.42 a 4.45 são apresentados os gráficos obtidos para perda de massa e variação de altura dos corpos de prova durante o ensaio. Não foi possível determinar a

variação volumétrica, uma vez que a mensuração do diâmetro da amostra foi prejudicada pela irregularidade da camada de parafina, sendo, portanto, desconsiderada.

Com relação à variação de massa observa-se que não houve diferenças significativas entre as amostras ensaiadas. A perda ocorreu de forma mais lenta ao longo do 1º ciclo de ressecamento, provavelmente devido à formação de caminhos preferenciais de fluxo e ao surgimento de microfissuras que favoreceram a evaporação da água no 2º ciclo (Figuras 4.42 e 4.43).

Inversamente à perda de massa, a redução da altura dos corpos de prova devido ao processo de ressecamento foi maior no 1º ciclo, atingindo valores próximos a 3,4% para as amostras com adição de 20% e 30% de RCC, e de 2,6% para as amostras de solo puro e com 10% de RCC. No segundo ciclo, estes valores foram de 2,5% e 1,8%, respectivamente (Figuras 4.44 e 4.45).

Para avaliar os efeitos do ressecamento na condutividade hidráulica das amostras, foram realizados ensaios para determinação do coeficiente de permeabilidade após os ciclos de ressecamento e umedecimento, comparando-se os resultados aos coeficientes encontrados para amostras não ressecadas.

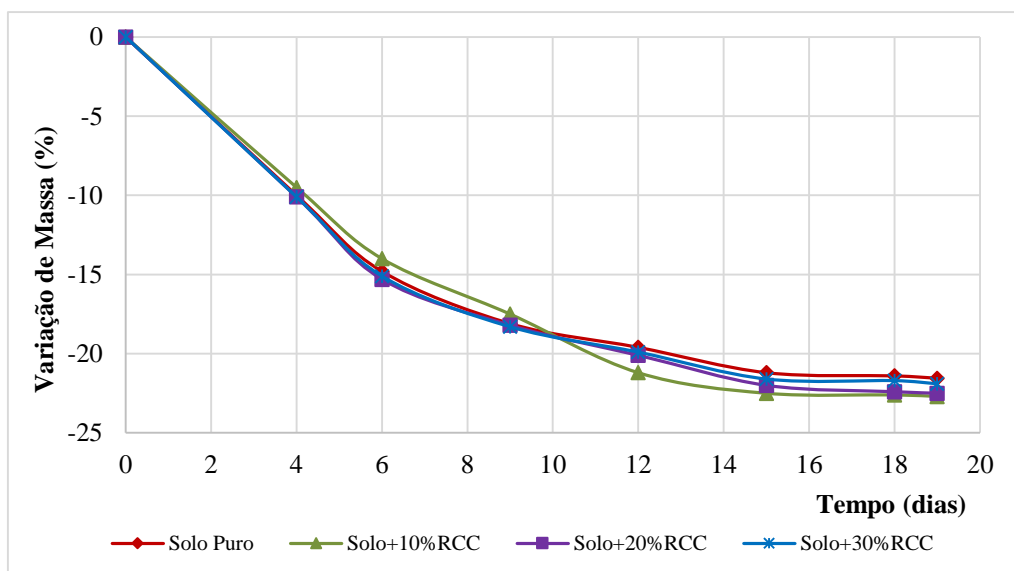


Figura 4.42. Variação de massa dos corpos prova durante o 1º ciclo de ressecamento – Ensaio preliminar (SOUZA e RODRIGUES, 2014).

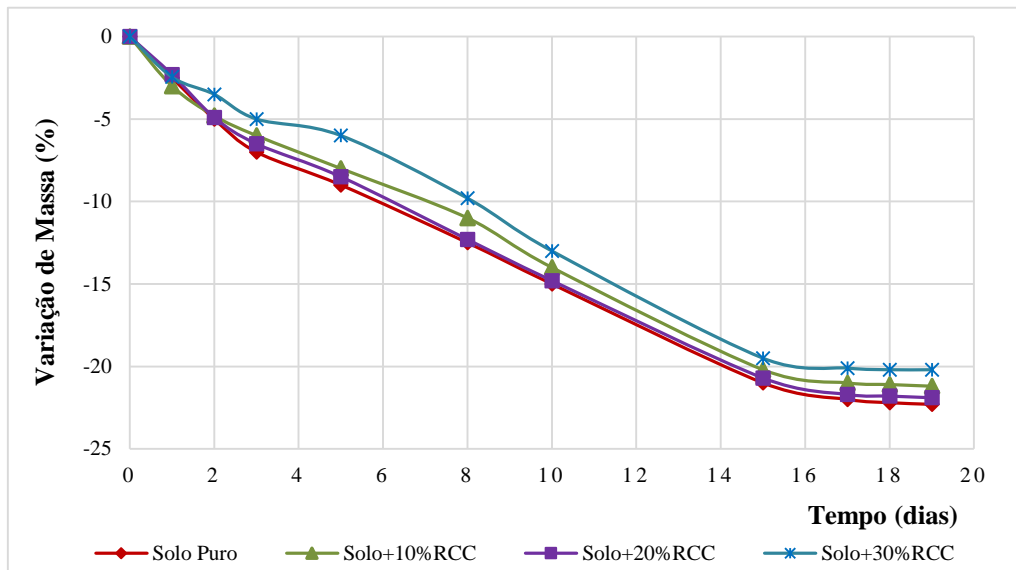


Figura 4.43. Variação de massa dos corpos de prova durante o 2º ciclo de ressecamento – Ensaio preliminar (SOUZA e RODRIGUES, 2014).

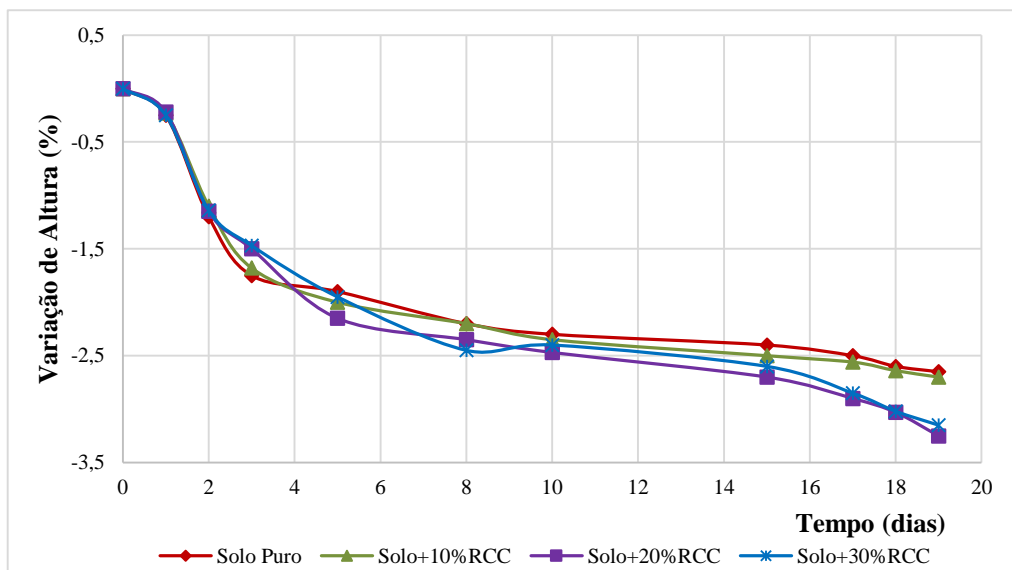


Figura 4.44. Variação de altura dos corpos de prova durante o 1º ciclo de ressecamento – ensaio preliminar (SOUZA e RODRIGUES, 2014).

Os resultados obtidos para as diferentes misturas ensaiadas estão apresentadas na Figura 4.46. Os resultados dos ensaios confirmam a tendência de aumento da condutividade hidráulica com o aumento da porcentagem de RCC incorporado ao solo, mantendo, no entanto, a mesma ordem de grandeza.

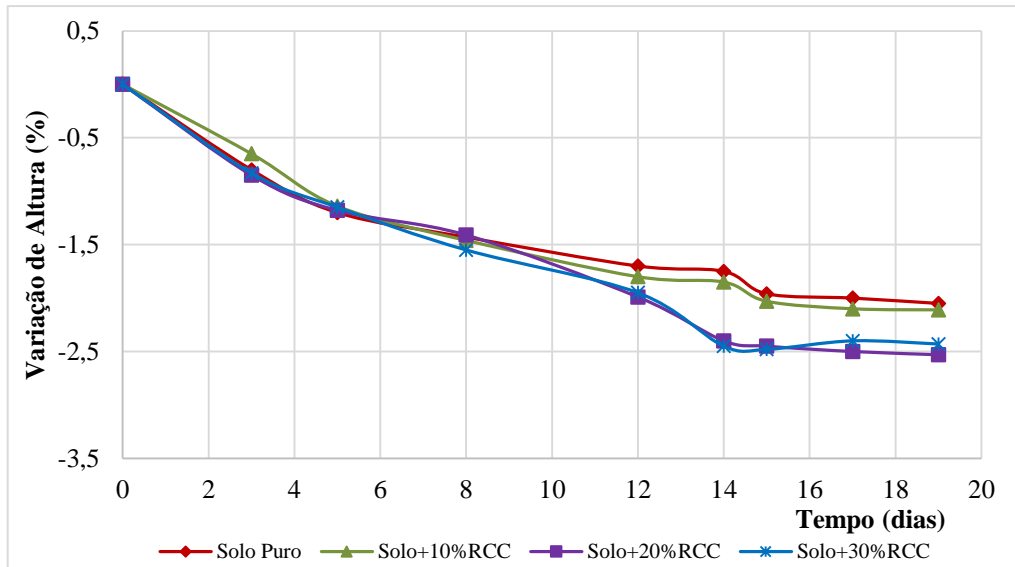


Figura 4.45. Variação de altura dos corpos de prova durante o 2º ciclo de ressecamento – ensaio preliminar (SOUZA e RODRIGUES, 2014).

Quanto ao impacto do ressecamento na condutividade hidráulica, observa-se a elevação do coeficiente de permeabilidade em uma ordem de grandeza para as amostras ensaiadas após os ciclos de secagem. Este aumento pode ser explicado pelo surgimento de trincas internas devido às tensões geradas durante o processo de ressecamento.

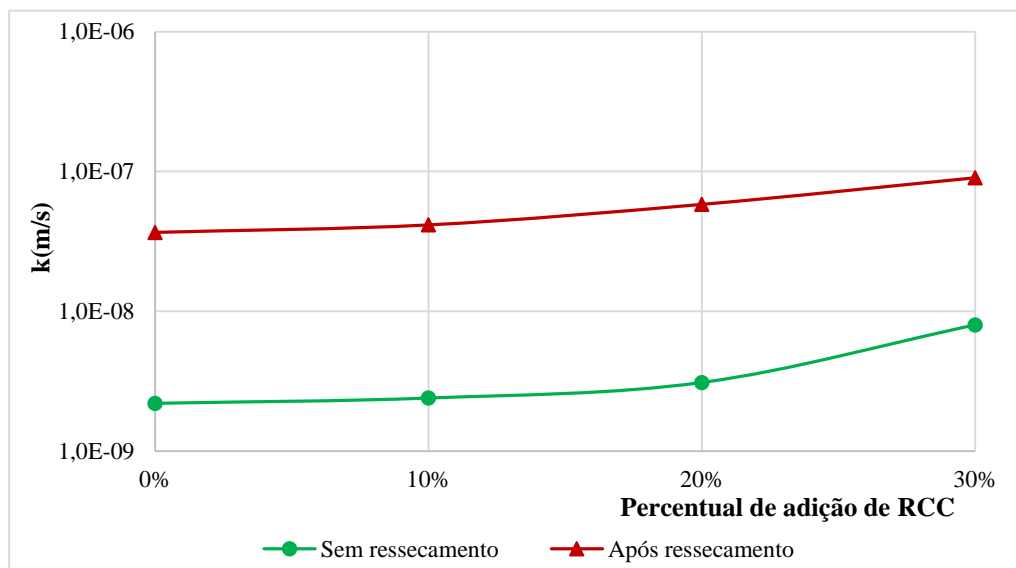


Figura 4.46. Variação do coeficiente de permeabilidade das amostras sem e após a realização do ensaio de ressecamento (SOUZA e RODRIGUES, 2014).

Apesar de não ser possível perceber o surgimento de fissuras visíveis nas superfícies dos corpos de prova, como pode ser observado na Figura 4.47, o efeito do fisuramento interno ou a existência de micro fissuras devido ao ressecamento alterou a estrutura original da amostra e por consequência a permeabilidade.

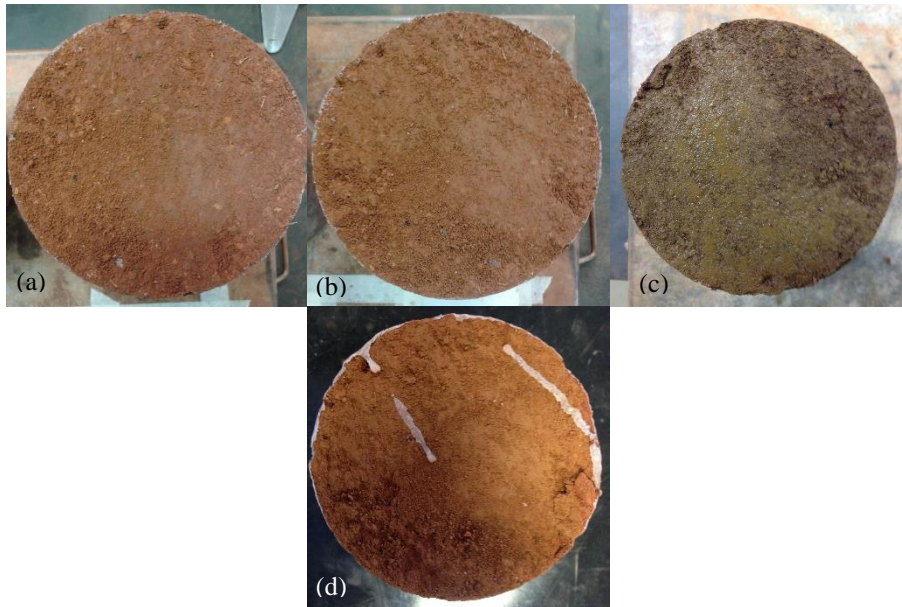


Figura 4.47. Corpo de prova de solo puro nas várias fases do ensaio de ressecamento: (a) logo após a compactação; (b) ao final do 1º ciclo de ressecamento; (c) após o ciclo de umedecimento; (d) ao final do 2º ciclo de ressecamento (SOUZA e RODRIGUES, 2014).

Na segunda metodologia utilizada para avaliar o ressecamento das misturas, cada amostra foi submetida a um único ciclo de ressecamento, comparando-se inicialmente o tempo de surgimento da primeira fissura na superfície das amostras. De acordo com a Figura 4.48 observa-se que nas misturas com adição de RCC, os percentuais de 10% e 40% reduziram o tempo de surgimento das primeiras fissuras, quando comparado ao do solo puro. O percentual de adição de 20% de RCC foi o que demorou mais tempo para fissurar, cerca de 112 minutos (1h52min).

Nas misturas com adição de PET, os tempos para o surgimento das primeiras fissuras foram superiores ao do solo puro. O maior tempo ocorreu para a adição de 0,4% de PET com 30 mm de comprimento, 55 minutos.

Para avaliar o padrão de fissuração das amostras foram calculados os Coeficientes de Intensidade de Fissuração (CIF) dividindo-se a área das fissuras pela área total da amostra. Os valores obtidos a partir desta análise estão apresentados na Figura 4.49.

Os resultados do CIF mostram que a amostra de solo puro apresentou maior área de fissuração (CIF=5,10%). Contudo, a adição do RCC ao solo demonstrou a tendência de

redução da área fissurada com o aumento do percentual de adição. Para essas misturas, o menor valor foi obtido para o teor de 20% de adição, com CIF= 0,95%.

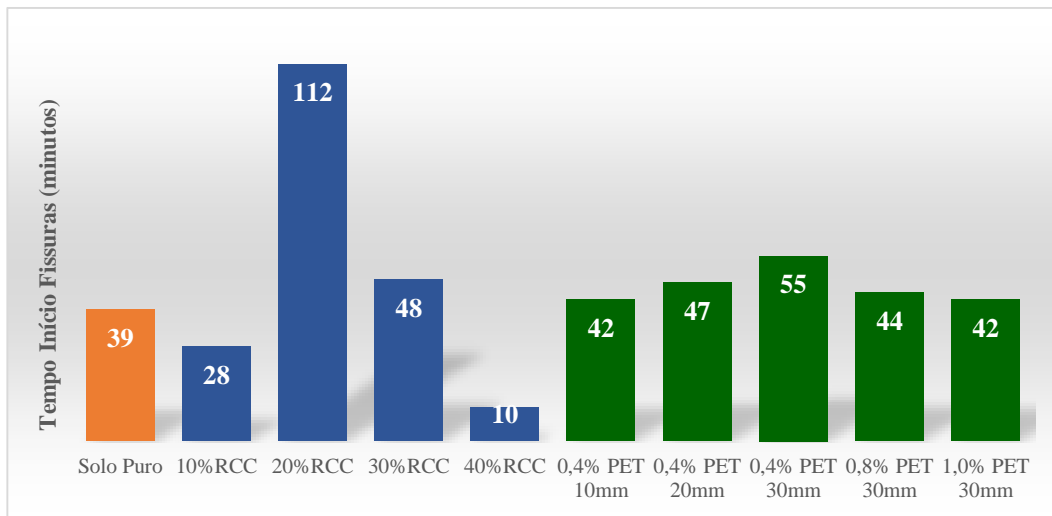


Figura 4.48. Tempo para surgimento das fissuras na superfície das amostras, em minutos.

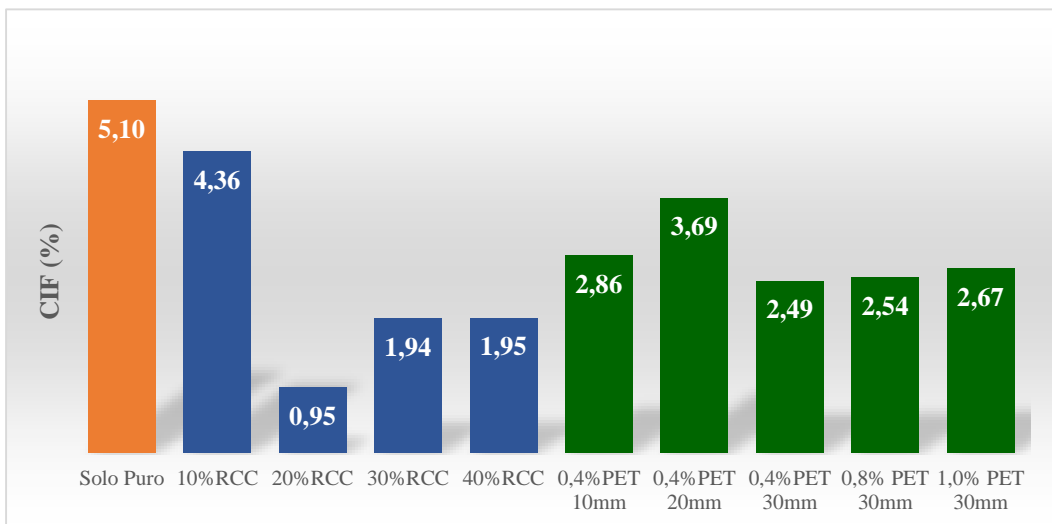


Figura 4.49. Cálculo do CIF para as misturas ensaiadas.

Nas misturas com adição de PET foram avaliadas a influência do comprimento da fibra e o teor de adição na área fissurada. Pode-se observar que a adição das fibras também reduziu o CIF das misturas quando comparadas ao solo puro. As misturas com 0,4% de adição demonstraram que a variação do comprimento não influenciou significativamente a área de fissuração, apresentando menor valor para o comprimento de 30mm (CIF=2,49%) e maior valor para as fibras com 20mm (CIF=3,69%). Ao se comparar fibras do mesmo comprimento (30mm), variando o teor de fibras, observa-se que os valores do CIF foram muito próximos, demonstrando que, para a área fissurada, a elevação do teor de fibras não influenciou o comportamento dos compósitos.

Comparando-se o comportamento das misturas com adição de RCC e de PET, percebe-se que o RCC atuou de forma mais efetiva na redução da área fissurada. Considerando os melhores resultados de cada compósito, observa-se que a redução do CIF quando comparado ao do solo puro foi de 81,4%, para a mistura com 20% de RCC, e de 51,1%, para a mistura com 0,4% de PET, com 30mm de comprimento.

A seguir são apresentadas as imagens obtidas com as amostras contendo diferentes teores de RCC e fibras PET ao final do ciclo de ressecamento (Figura 4.50). Analisando-se as imagens percebe-se que o padrão de fissuração altera-se com a adição dos dois tipos de resíduos. A adição do RCC reduziu a espessura das fissuras e aumentou a área dos polígonos delimitados pelas fissuras. No caso da fibra de PET, o efeito foi mais significativo sobre a espessura das fissuras, observando-se que os polígonos formados apresentam áreas menores, delimitadas por fissuras de pequena espessura.

A partir dos resultados dos primeiros ensaios realizados nesta 2ª etapa da pesquisa e, conforme resumo apresentado na Tabela 4.7, observa-se que as amostras com percentual de adição de PET superior a 0,4% apresentaram resultados de resistência à compressão abaixo das recomendações propostas na literatura pesquisada. Desta forma, os ensaios seguintes foram realizados apenas para o percentual de 0,4% de adição e com comprimento de 10mm e 30 mm, para avaliar possíveis diferenças de comportamento em função da adição de uma fibra mais curta ou mais longa. No caso da adição de RCC, os ensaios foram realizados para todos os percentuais de adição.

Tabela 4.7. Resumo dos resultados dos ensaios realizados na 2ª etapa da pesquisa.

AMOSTRA		ENSAIO						
		RESISTÊNCIA À COMpressão	PERMEABILIDADE	RESISTÊNCIA AO CISCALHAMENTO	SUCÇÃO	TRAÇÃO	RETRAÇÃO	RESSECAMENTO PRELIMINAR
SOLO PURO								
RCC	10%							
	20%							
	30%							
	40%							
PET	10mm	0,40%						
		0,60%						
		0,80%						
		1,00%						
	20mm	0,40%						
		0,60%						
		0,80%						
		1,00%						
	30mm	0,40%						
		0,60%						
		0,80%						
		1,00%						

■ Resultado satisfatório  
■ Resultado insatisfatório  
■ Ensaio não realizado

Para a escolha das misturas para os ensaios finais de ressecamento, apresentados no capítulo a seguir, procurou-se sobrepor os melhores resultados obtidos nos ensaios. Desta forma, foram escolhidas as misturas Solo+20%RCC e Solo+0,4%PET30mm sanfonada.

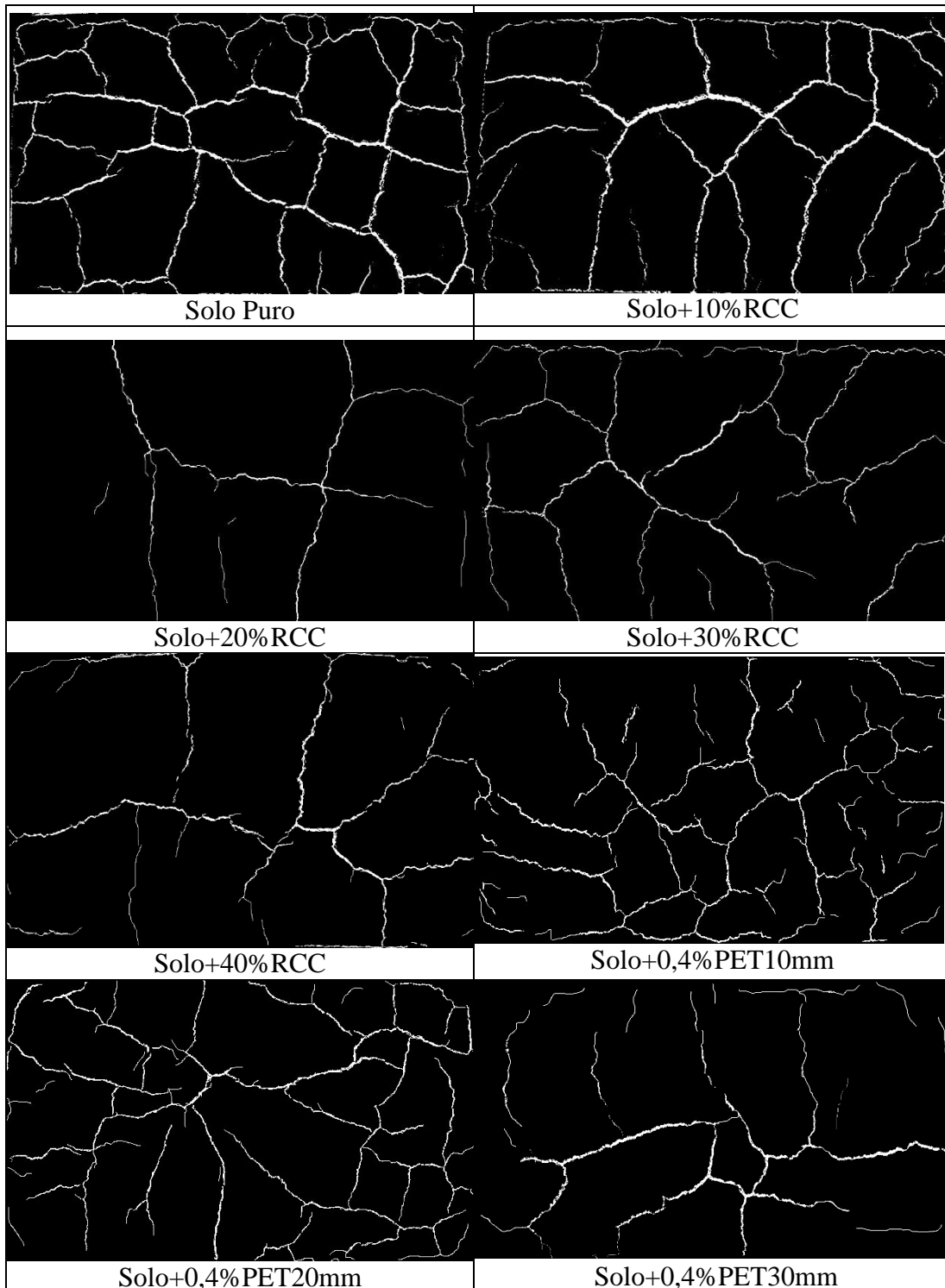


Figura 4.50. Imagens das amostras ao final do ensaio de ressecamento preliminar.



### 5. ENSAIO DE RESSECAMENTO

Na última fase da pesquisa foram avaliados os comportamentos de três amostras distintas quando submetidas a ciclos de ressecamento e umedecimento, utilizando um simulador atmosférico projetado e desenvolvido para possibilitar condições controladas de radiação solar e chuva no ambiente do laboratório apresentado no Capítulo 3. Foram ensaiadas, conforme justificado no Capítulo 4, amostras de Solo Puro (SP), Solo+20%RCC (RCC) e Solo+0,4%PET 30mm sanfonada (PET).

Para o acompanhamento do processo de ressecamento e formação de fissuras todo o ensaio foi fotografado continuamente, em intervalos de 1 minuto. Essas imagens foram tratadas e analisadas para determinação do tempo de aparecimento das primeiras fissuras e dos seus parâmetros geométricos. Foi realizado ainda o monitoramento da perda de massa, da sucção, da temperatura e umidade no solo e no ar, durante o ensaio, utilizando-se sensores instalados na amostra, conforme detalhado no Capítulo 3. A seguir são apresentados os resultados obtidos nesta fase da pesquisa.

#### 5.1. TEMPO PARA SURGIMENTO DAS PRIMEIRAS FISSURAS

Na Tabela 5.1 estão apresentados os valores  $w_{ot}$  e  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  tomados como referência para preparação e moldagem das amostras, utilizadas no simulador atmosférico, o valor da umidade aferida no momento da compactação ( $w_{caixa}$ ) e a massa específica aparente seca determinada ao final da fase de compactação ( $\gamma_{dcaixa}$ ). Podem ser vistos ainda os valores correspondentes ao tempo para o surgimento das primeiras fissuras ( $t_{fi}$ ), o teor de umidade da amostra no momento inicial da fissuração ( $w_{fi}$ ) e a relação entre a umidade de fissuração e o teor de umidade inicial da amostra.

Tabela 5.1. Teor de umidade das amostras no momento do surgimento das primeiras fissuras visíveis.

Amostra	$w_{ot}$ (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{caixa}$ (%)	$\gamma_{dcaixa}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$t_{fi}$ (h)	$w_{fi}$ (%)	$w_{fi}/w_{caixa}$ (%)
SP	30,8	13,4	31,49	13,2	9,8	26	17,4
RCC	27,8	14,4	28,50	14,0	15,2	26,6	6,7
PET	30,5	13,5	29,81	13,3	0,8	29,5	1,0

Com base na Tabela 5.1, observa-se que a amostra com adiao de fibras de PET fissurou para o menor tempo de ensaio (47 minutos), seguida pela amostra de solo puro, fissurada apos 9 horas e 47 minutos, e pela amostra com adiao de RCC que levou 15 horas e 12 minutos para o que as primeiras fissuras visíveis surgissem na superfície da amostra.

A amostra de SP foi a que perdeu mais umidade antes do surgimento das primeiras fissuras, 17,4% em relaao à umidade inicial. Já a amostra de PET fissurou com apenas 1% de perda de umidade. O menor tempo para o início da fissuraao na amostra com adiao de PET pode estar associado  presena de fibras na superfície da amostra que poderia ter facilitado a entrada de ar na camada mais superficial da amostra.

As Figuras 5.1 a 5.3 apresentam as imagens com realce das primeiras fissuras para cada uma das amostras. As imagens mostram que as fissuras iniciais das amostras de SP e PET localizaram-se mais próximas do centro da caixa, enquanto na amostra de RCC as fissuras surgiram mais próximas às laterais.



Figura 5.1. Primeiras fissuras da amostra de SP.



Figura 5.2. Primeiras fissuras da amostra RCC.

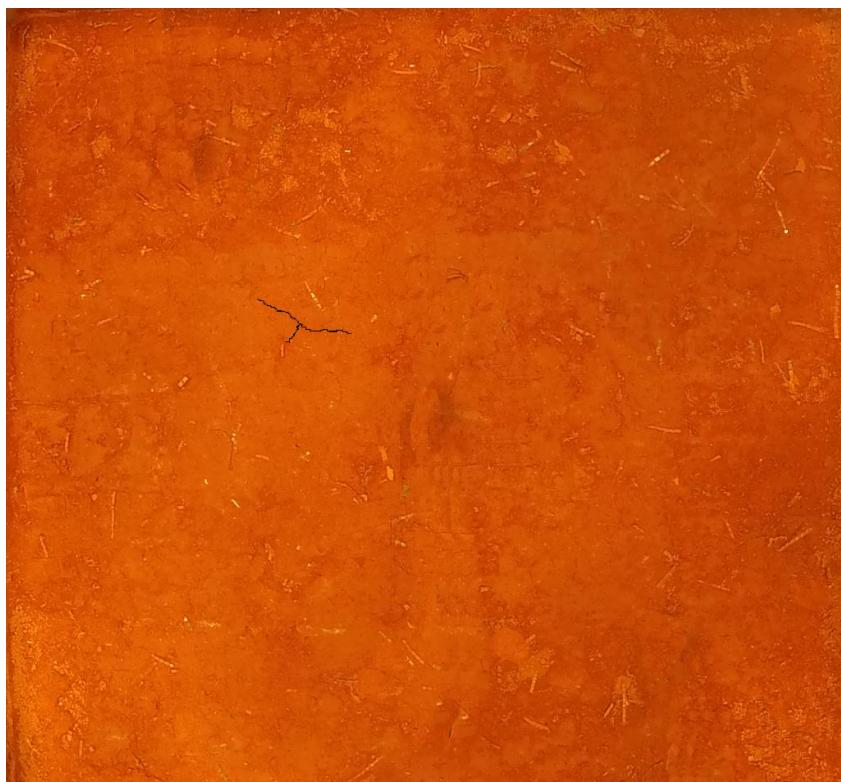


Figura 5.3. Primeiras fissuras da amostra PET.

## 5.2. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DAS FISSURAS

As imagens tratadas e binarizadas nas cores preto e branco, para cada uma das amostras, são apresentadas a seguir. Foram selecionadas imagens para avaliar a evolução das fissuras e a determinação do CIF ao longo de cada ciclo de ressecamento.

Para o ensaio realizado com o solo puro observou-se que as fissuras do 1º ciclo de secagem, iniciado logo após a compactação da amostra (Figura 5.4), desenvolveram-se a partir do centro da caixa, com padrão de fissuração que segue a tendência do surgimento de ramificações centrais de pequena espessura que se ampliam em direção às laterais, dividindo a área da amostra em oito grandes regiões. À medida que a amostra perde umidade, as fissuras centrais tornam-se cada vez mais espessas e profundas, sem que haja variação significativa no comprimento total dessas fissuras.

Concluído o primeiro ciclo de ressecamento a amostra foi umedecida utilizando-se o simulador de chuva descrito no Capítulo 3. O primeiro ciclo de umedecimento teve a duração de 37 minutos, tempo necessário para que a lâmina d'água atingisse 2 cm de altura acima da amostra na caixa. Foi medido ainda o tempo para o início de escoamento

da água pelo dreno localizado na parte inferior da amostra, correspondente a 20 minutos, tempo para que a água percorresse a amostra e atingisse o fundo da caixa. Embora a água possa ter percolado por possíveis caminhos preferenciais existentes entre as laterais da caixa e a amostra, minimizados pela compactação realizada na própria caixa, este valor foi considerado um indicador qualitativo do efeito da fissuração. Finalizada a chuva, aguardou-se o final da infiltração para dar início ao segundo ciclo de ressecamento. O tempo necessário para infiltração completa neste 1º ciclo foi de 18h30min, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Na sequência foram realizados mais três ciclos de ressecamento, intercalados por ciclos de umedecimento. O último ciclo (quarto) foi realizado para observar o comportamento final da amostra e avaliar as alterações no padrão de fissuração. No entanto, observou-se que a superfície do solo tornou-se muito quebradiça, com muitas escamações, impossibilitando a visualização das fissuras e dificultando as análises. Desta forma, os resultados deste ciclo foram desconsiderados e, para as demais amostras, foram realizados apenas três ciclos de ressecamento.

No 2º ciclo de umedecimento realizado entre o 2º e 3º ciclos de ressecamento, o tempo de chuva foi de 27 minutos e o tempo para início do escoamento pelo dreno foi de 63 minutos. Neste ciclo, observou-se que a infiltração ocorreu de forma mais lenta, totalizando cerca de 29 horas para completa infiltração da lâmina d'água. Esta elevação no tempo de infiltração pode estar relacionada ao fechamento parcial e superficial da amostra observado ao longo dos ciclos, conforme será visto posteriormente.

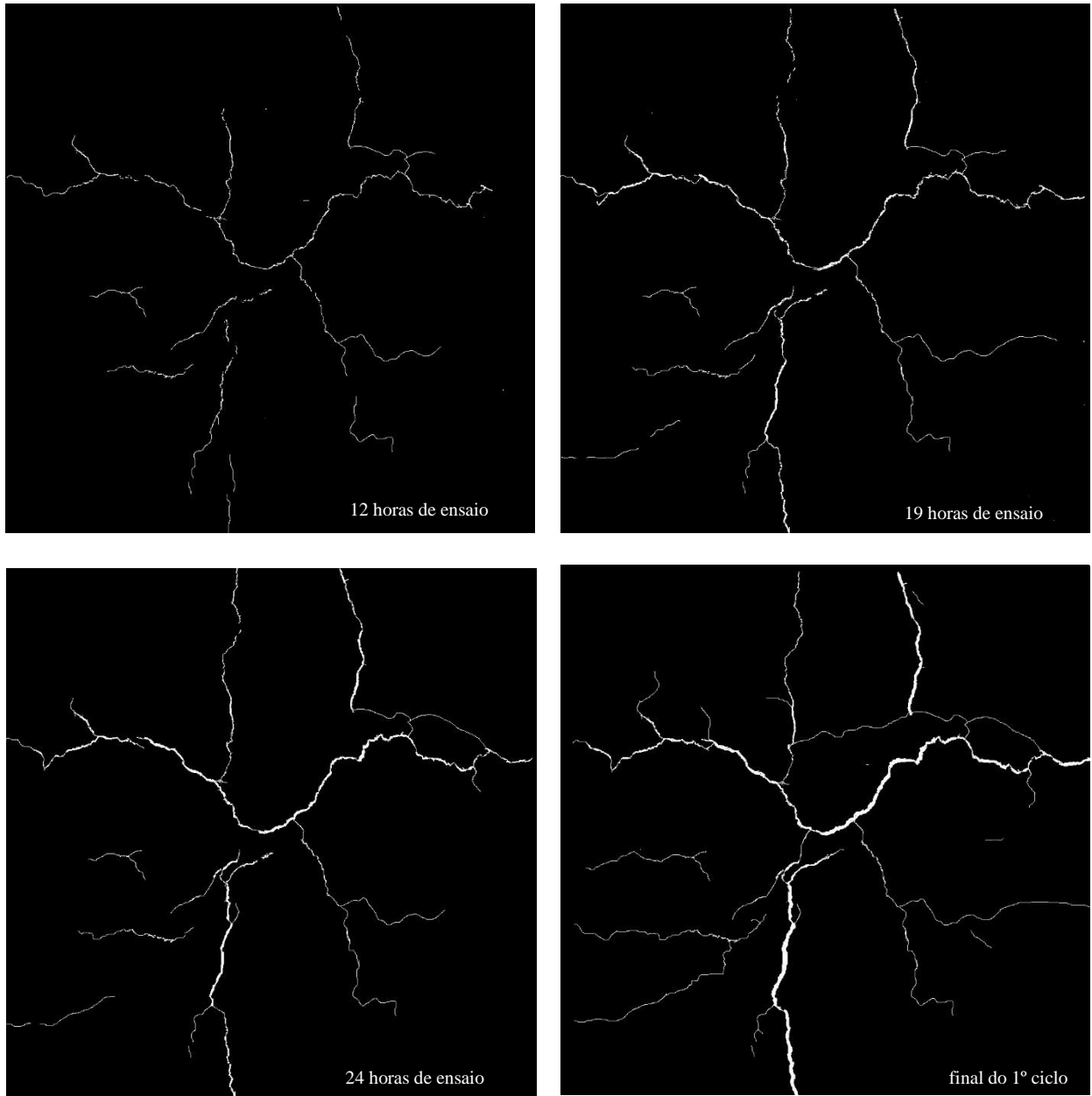


Figura 5.4. Evolução das fissuras ao longo do 1º ciclo de ressecamento do SP.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam a evolução das fissuras para o 2º e 3º ciclos de ressecamento da amostra de SP. É possível observar alterações no padrão de fissuração. Algumas fissuras fecham-se e não reaparecem na superfície da amostra de um ciclo para outro. As fissuras mais espessas do primeiro ciclo tornam-se menos visíveis e surgem novas fissuras mais finas e distribuídas na superfície da amostra à medida que ocorrem os novos ciclos.

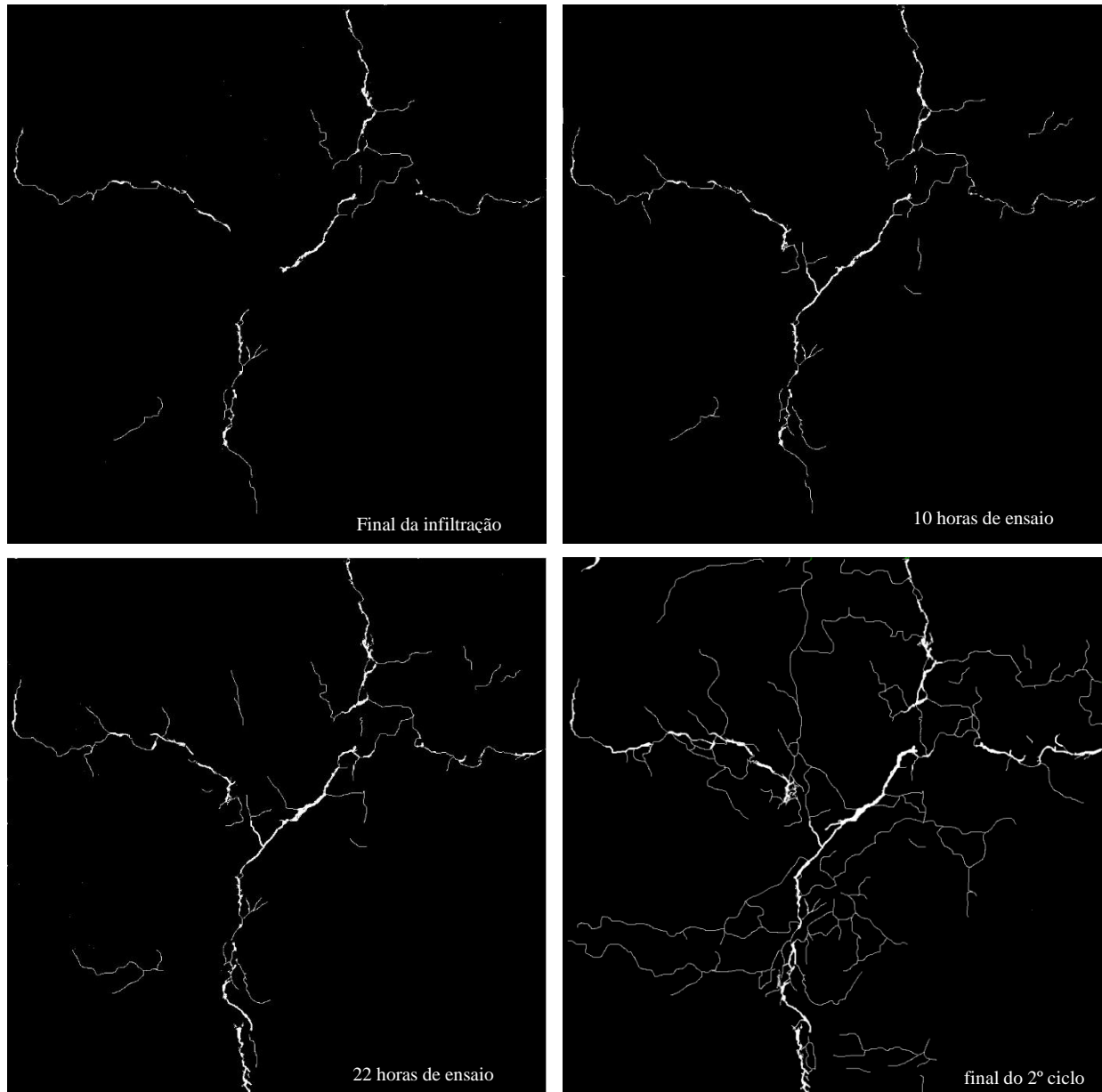


Figura 5.5. Evolução das fissuras ao longo do 2º ciclo de ressecamento do SP.

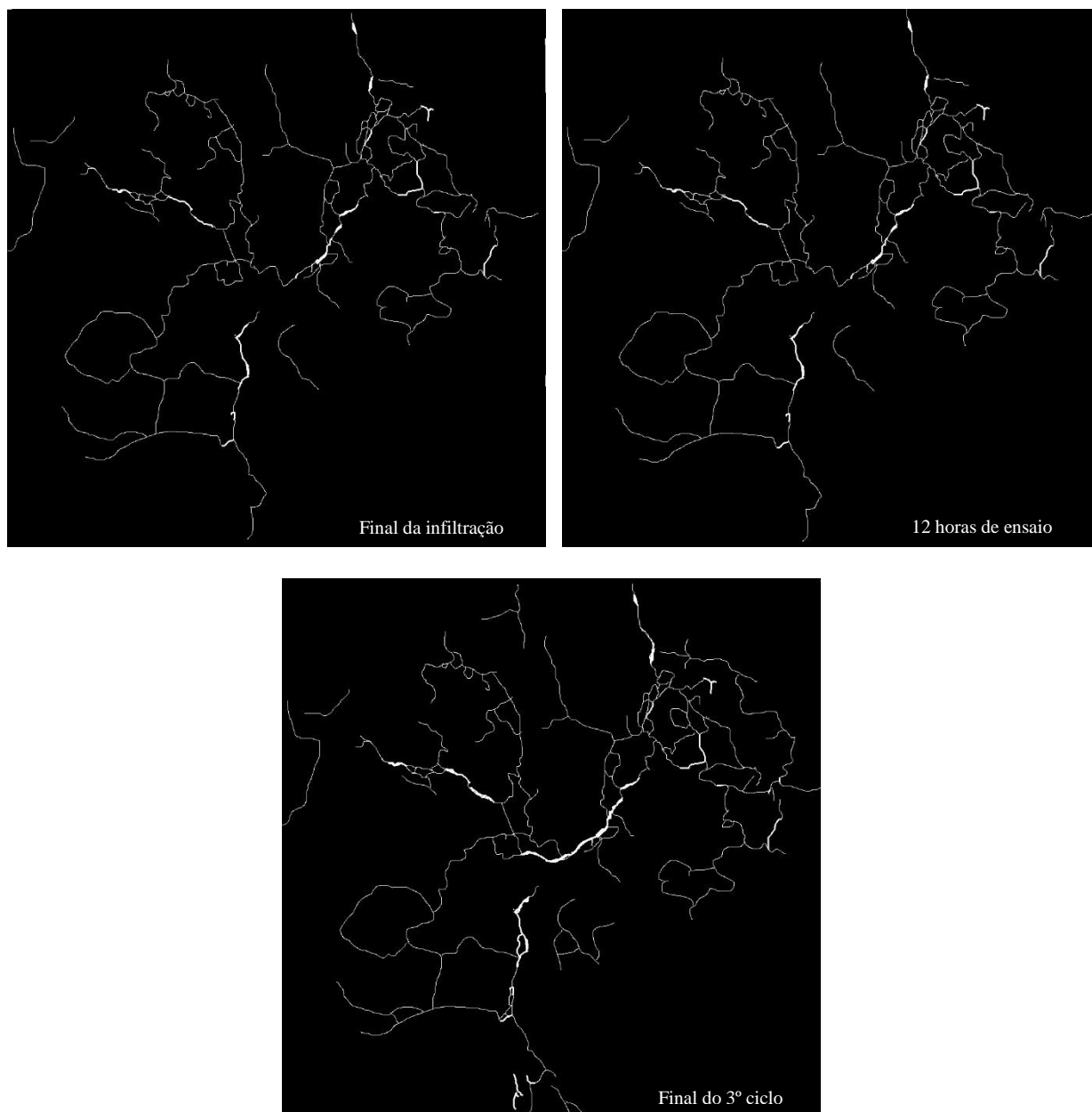


Figura 5.6. Evolução das fissuras ao longo do 3º ciclo de ressecamento do SP.

Ao final do ensaio observa-se que as fissuras iniciais dão lugar a um novo padrão de fissuramento, mais denso e com a manutenção de algumas fissuras que apareceram no início do processo de ressecamento. O grau de alteração da superfície da amostra e o rompimento da estrutura original do solo tenderam a dificultar a avaliação do padrão de fissuramento na superfície da amostra após o 3º ciclo de ressecamento. Contudo, em nível menos superficial estas fissuras iniciais tendem a manter o mesmo padrão evoluindo em profundidade.



A variação da fissuração pode ser observada na Tabela 5.2 onde são apresentados os valores do CIF (*Crack Intensity Factor*) calculado ao longo dos ciclos. No 1º ciclo o valor do CIF dobra nas primeiras 24 horas de ensaio, comportamento que se repete no 2º ciclo. No último ciclo, a superfície da amostra apresenta muitas escamações e as fissuras mais espessas são preenchidas superficialmente, surgindo novas fissuras mais finas, como pode ser observado na Figura 5.7 onde foram superpostas as fissuras dos três ciclos de ressecamento. Observa-se assim uma redução no valor do CIF no último ciclo. Ressalta-se que esta redução é aparente, uma vez que as fissuras continuaram presentes ultrapassando toda a espessura da amostra, fato comprovado durante a desmontagem do ensaio.

Tabela 5.2. Valores do CIF obtidos no ensaio de ressecamento do SP.

1º Ciclo					
Tempo de Ensaio (h)	12,00	19,00	24,00	72,00	98,50
CIF (%)	0,50	0,89	1,03	1,40	1,55
w(%)	30,50	29,78	29,19	21,77	20,00
S (%)	74,74	73,03	71,63	54,01	49,81
Varição da Umidade (%)	-3,13	-5,42	-7,29	-30,86	-36,48
2º Ciclo					
Tempo de Ensaio (h)	18,50 <sup>1</sup>	28,00	54,00	68,00	174,00
CIF (%)	0,45	0,66	1,34	1,63	1,93
w(%)	38,64	38,05	26,28	21,77	21,31
S (%)	94,08	92,67	64,72	54,01	52,92
Varição da Umidade (%)	22,72	20,85	-16,54	-30,86	-32,32
3º Ciclo					
Tempo de Ensaio (h)	29,33 <sup>1</sup>	45,00	90,00	150,00	220,50
CIF (%)	1,11	1,11	1,15	1,23	1,42
w(%)	38,40	35,81	22,65	21,77	19,80
S (%)	93,51	87,35	56,10	54,01	49,33
Varição da Umidade (%)	21,96	13,73	-28,06	-30,86	-37,12

<sup>1</sup>Tempo para infiltração da água na amostra após realização da chuva.

Na Figura 5.7 pode-se observar a manutenção e o preenchimento das primeiras trincas bem como o aparecimento de novas trincas. Também é perceptível a manutenção do padrão de fissuração iniciado no 1º ciclo.

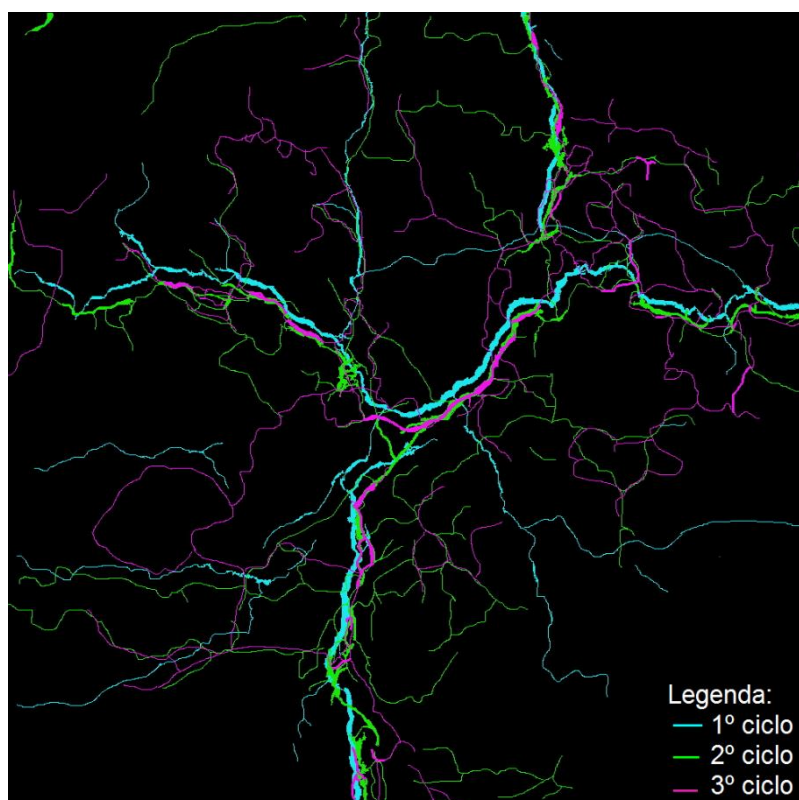


Figura 5.7. Sobreposição de fissuras ao final dos três ciclos de ressecamento para a amostra de SP.

A Figura 5.8 apresenta a variação do CIF ao longo dos ciclos em função do tempo de ensaio e do teor de umidade da amostra no momento da análise. Pode-se observar que a elevação do CIF ocorre de forma mais acelerada nas primeiras horas de ressecamento, tendendo à estabilização. Essa velocidade de fissuração diminui com o aumento do número de ciclos. No 1º ciclo o ponto de mudança na curva de fissuração (Umidade x CIF) ocorre para um teor de umidade da ordem de 29%, próximo ao ponto de entrada de ar nos macro poros obtido no ensaio de sucção.

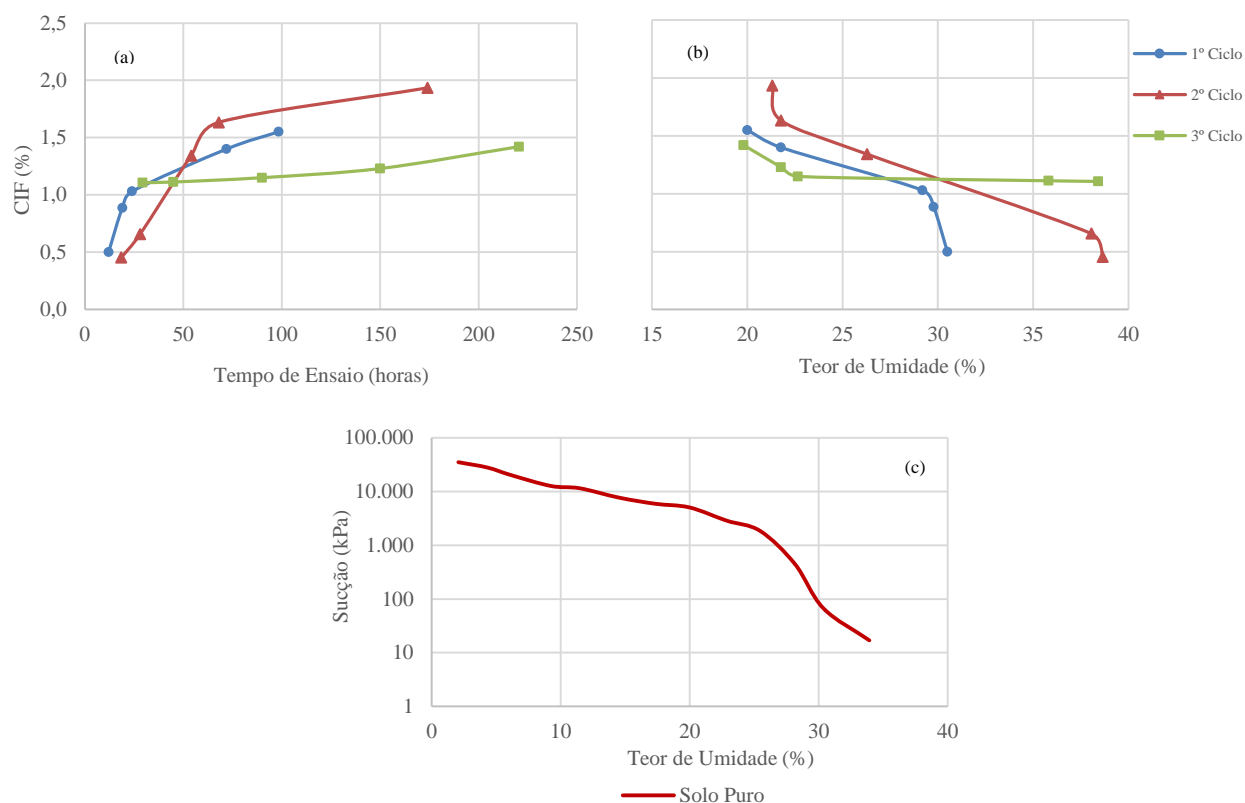


Figura 5.8. Variação do CIF em função do tempo de ensaio (a) e do teor de umidade (b); e relação sucção x teor de umidade (c) para a amostra de SP.

Analisando-se as imagens do ensaio com amostra de solo com adição de RCC, conforme apresentado nas Figuras 5.9 a 5.11, percebe-se que as fissuras seguem um padrão diferente da amostra de solo puro. No 1º ciclo as fissuras surgem de forma distribuídas ao longo da superfície, dividindo a área em pequenas regiões. Não é possível identificar fissuras principais e secundárias, como o padrão de fissuração presente no solo puro. As fissuras apresentaram pequenas espessuras que se mantiveram da mesma forma até o final do ciclo.

Na Tabela 5.3 observa-se que o valor máximo de fissuração (CIF) ocorreu no final do 1º ciclo e decresceu nos ciclos seguintes. O valor máximo do CIF para o RCC foi de 1,26%, 34 % menor do que o valor máximo encontrado para o SP (1,93%). Os tempos de infiltração da água após os ciclos de umedecimento foram de 6h6min e 9h20min, para o 1º e 2º ciclos de umedecimento, respectivamente. Esses tempos foram menores que os observados para o SP (18h30min e 29h20min).

Tabela 5.3. Valores do CIF obtidos no ensaio de ressecamento do RCC.

1º Ciclo				
Tempo de Ensaio (h)	19,50	28,50	76,50	140,50
CIF (%)	0,30	0,95	1,26	1,26
w (%)	26,69	23,14	17,41	14,80
S (%)	73,54	64,06	48,77	41,80
Varição da Umidade (%)	-6,35	-18,81	-38,91	-48,07
2º Ciclo				
Tempo de Ensaio (h)	6,10 <sup>1</sup>	25,00	50,00	123,70
CIF (%)	0,28	0,44	0,70	0,87
w (%)	30,12	26,76	21,59	13,18
S (%)	82,70	73,73	59,93	37,47
Varição da Umidade (%)	5,68	-6,11	-24,25	-53,75
3º Ciclo				
Tempo de Ensaio (h)	9,33 <sup>1</sup>	24,00	48,00	215,80
CIF (%)	0,00	0,42	0,67	0,90
w (%)	31,61	27,50	23,08	12,55
S (%)	86,68	75,70	63,90	35,79
Varição da Umidade (%)	10,91	-3,51	-19,02	-55,97

<sup>1</sup>Tempo para infiltração da água na amostra após realização da chuva.

Conforme apresentado na Tabela 5.3, nos ciclos 2 e 3, observa-se uma redução da área fissurada, que praticamente não variou entre os dois últimos ciclos. Essa redução pode estar associada aos processos de cimentação observados nos ensaios de resistência à compressão que demonstraram ganho de resistência da mistura com o passar do tempo, provavelmente ocasionado pela presença de materiais cimentícios oriundos das frações de argamassa e concreto presentes no resíduo e comprovado pelo teor de sílica apresentados nos ensaios de caracterização do RCC.

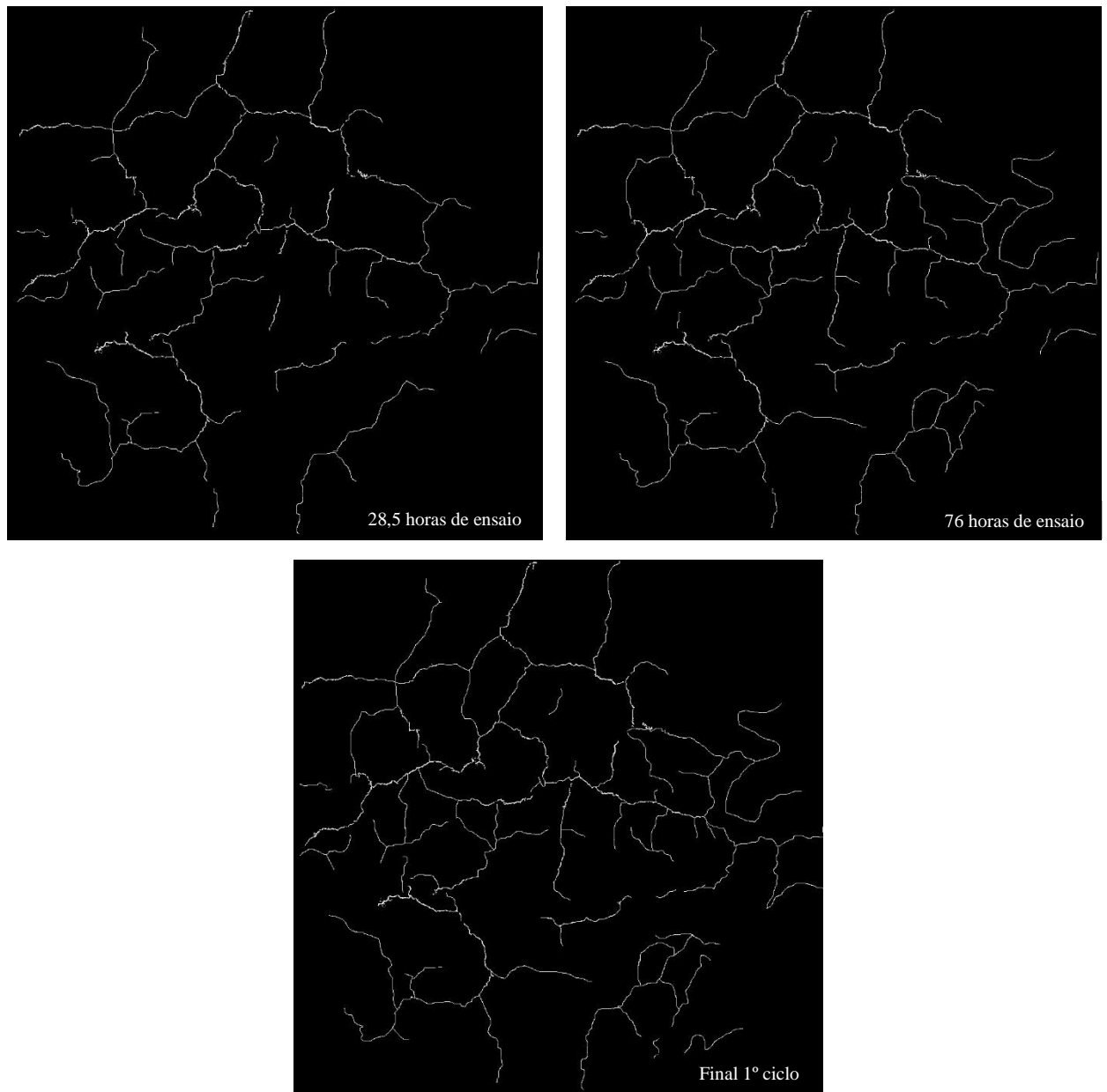


Figura 5.9. Evolução das fissuras ao longo do 1º ciclo de ressecamento do RCC.

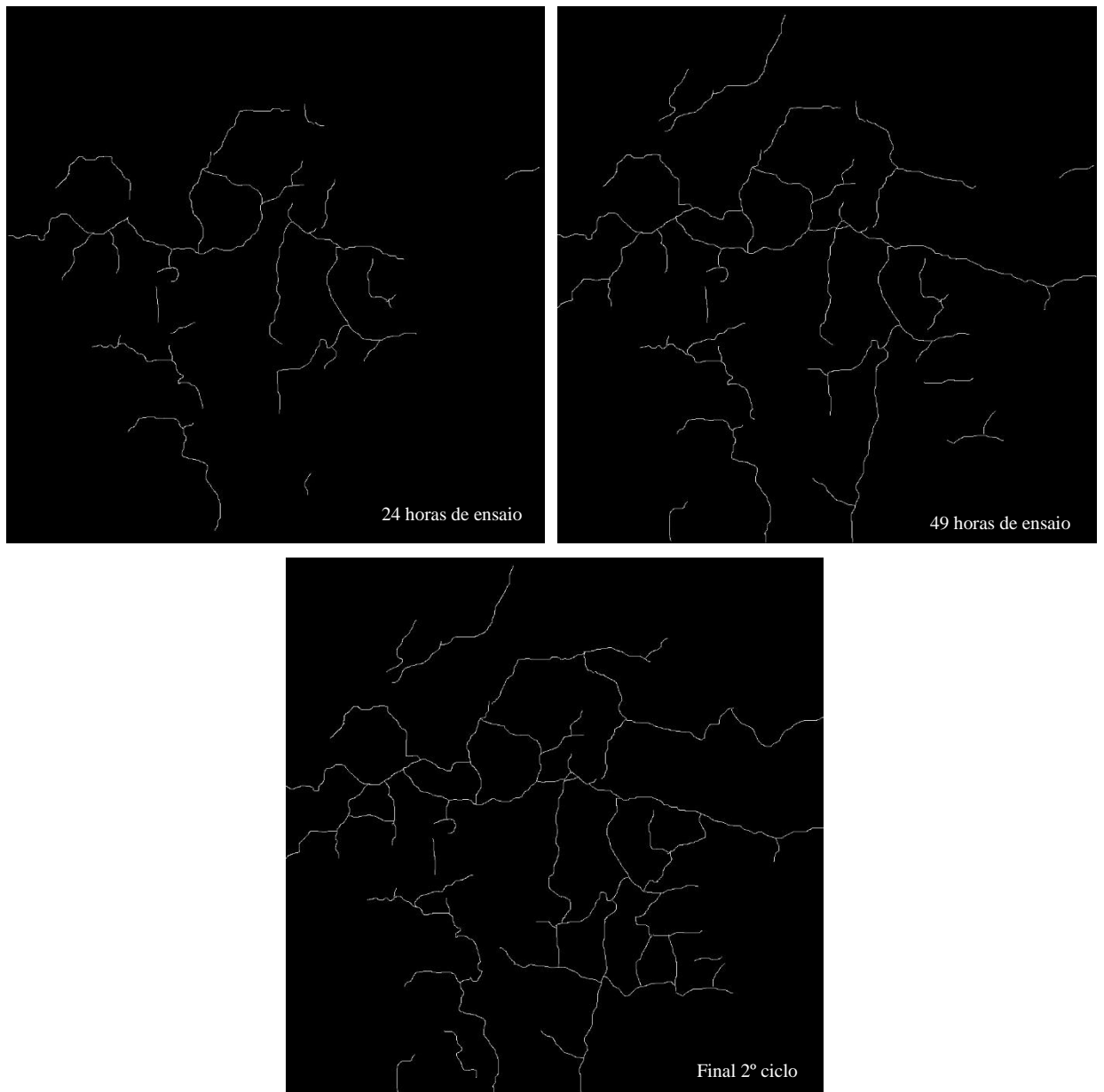


Figura 5.10. Evolução das fissuras ao longo do 2º ciclo de ressecamento do RCC.

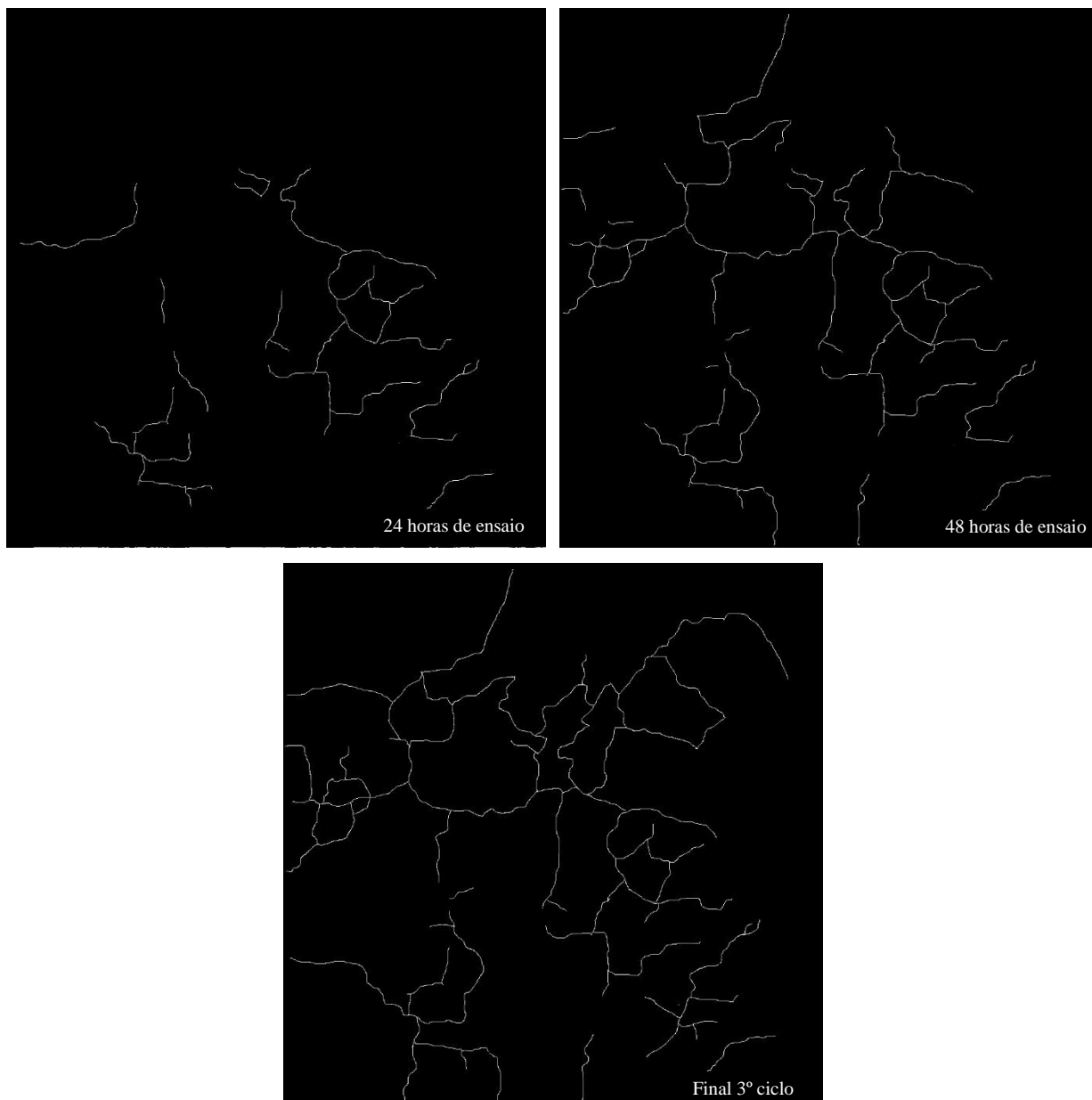


Figura 5.11. Evolução das fissuras ao longo do 3º ciclo de ressecamento do RCC.

Sobrepondo as imagens das fissuras ao final dos três ciclos (Figura 5.12) observa-se que algumas fissuras só são visíveis em um dos ciclos, ou seja, algumas fissuras eram regeneradas entre os ciclos e outras novas apareciam em menor número, conforme comprovado pela redução do CIF.

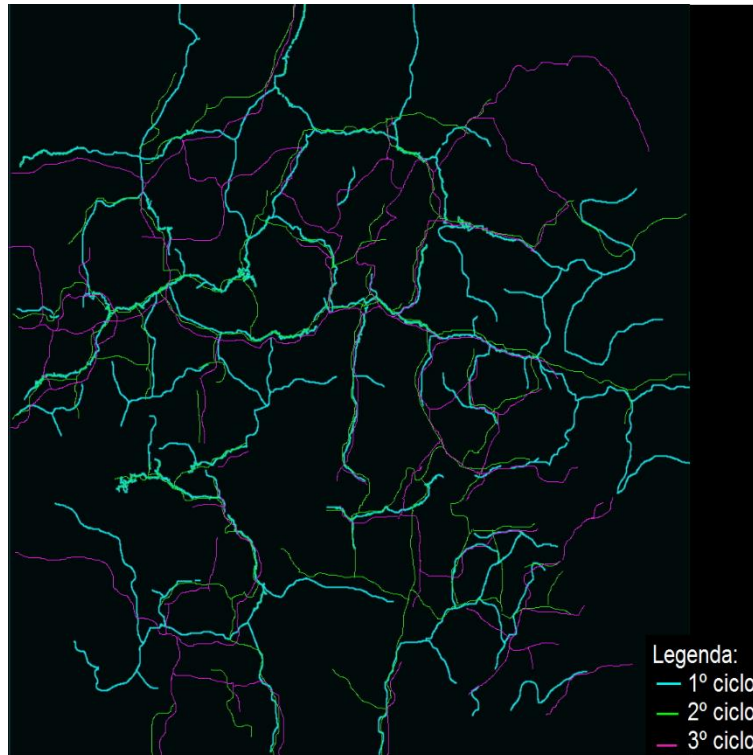


Figura 5.12. Sobreposição de fissuras ao final dos três ciclos de ressecamento para a amostra RCC.

A Figura 5.13 apresenta as curvas de fissuração em função do tempo e do teor de umidade. A redução da fissuração pode ser observada pelo distanciamento entre as curvas do 1º ciclo quando comparada aos demais. O 2º e 3º ciclos apresentaram comportamento semelhante. Diferentemente do SP, em que a fissuração aumentou do primeiro para o segundo ciclo, no ensaio com RCC observa-se uma redução do primeiro para os demais ciclos. Da mesma forma que no SP, o aumento da fissuração é mais acentuado nas primeiras horas de ensaio. Observa-se ainda que o ponto de inflexão da curva de fissuração encontra-se próximo ao teor de umidade correspondente ao valor de entrada de ar nos macro-poros obtido no ensaio de sucção, da ordem de 26%.



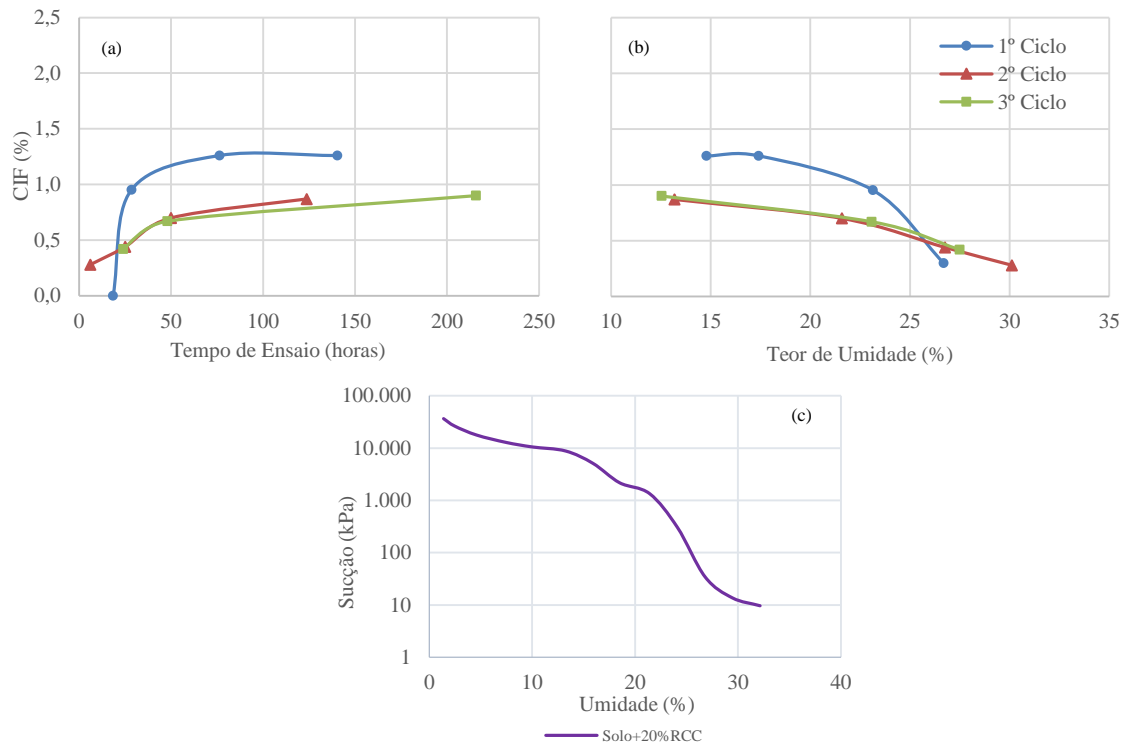


Figura 5.13. Variação do CIF em função do tempo de ensaio (a) e do teor de umidade (b); relação sucção x teor de umidade para a amostra de RCC.

Para a amostra com adição de fibras de PET, os resultados são apresentados na Tabela 5.4. Observa-se que o valor máximo do CIF foi de 1,02%, obtido ao final do 1º ciclo de ressecamento. Este valor é 47% e 19% inferior aos valores encontrados para o SP e o RCC, respectivamente. Destaca-se ainda que logo após a infiltração não foi possível visualizar nenhuma fissura, para os dois ciclos de umedecimento. Os tempos de infiltração foram de 16h30min e 16h36min, respectivamente para o 1º e 2º ciclos de umedecimento. Da mesma forma que nas demais amostras, é possível observar na Figura 5.14 a correlação entre o ponto de inflexão da curva de fissuração e de sucção.

Com relação ao padrão de fissuração, observa-se nas Figuras 5.15 a 5.17, que as fissuras se distribuem na superfície da amostra e apresentam pequena espessura. Os polígonos formados entre as fissuras apresentam área e formas semelhantes.

Tabela 5.4. Valores do CIF obtidos no ensaio de ressecamento do PET.

1º Ciclo				
Tempo de Ensaio (h)	2,00	6,00	20,30	48,00
CIF (%)	0,21	0,40	0,92	0,99
w(%)	28,86	28,30	25,64	20,50
Sr (%)	74,19	72,80	66,19	53,42
Varição da Umidade (%)	-3,18	-5,06	-13,98	-31,23
2º Ciclo				
Tempo de Ensaio (h)	16,50 <sup>1</sup>	30,00	54,00	73,00
CIF (%)	0,00	0,12	0,72	0,83
w(%)	39,12	33,21	26,89	23,90
Sr (%)	99,69	85,00	69,30	61,87
Varição da Umidade (%)	31,24	11,41	-9,79	-19,82
3º Ciclo				
Tempo de Ensaio (h)	16,60 <sup>1</sup>	36,00	65,00	111,00
CIF (%)	0,00	0,19	0,88	0,87
w(%)	38,91	35,45	26,68	20,84
Sr (%)	99,17	90,57	68,78	54,26
Varição da Umidade (%)	30,53	18,93	-10,49	-30,09

<sup>1</sup>Tempo para infiltração da água na amostra após realização da chuva.

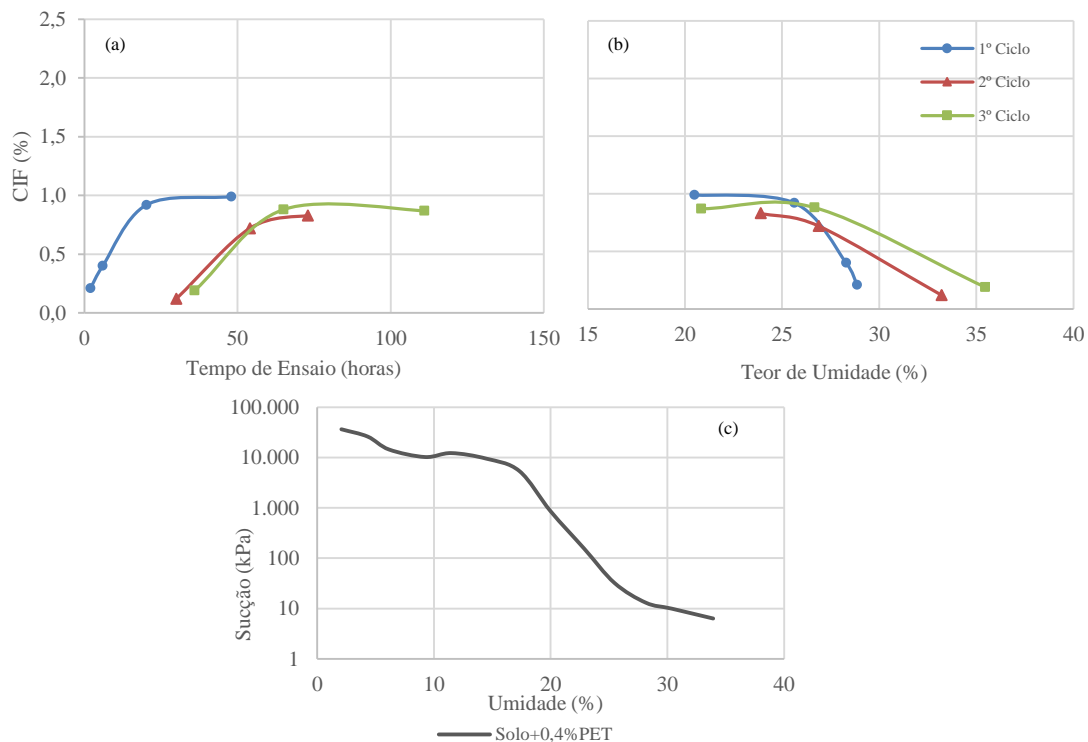


Figura 5.14. Variação do CIF em função do tempo de ensaio (a) e do teor de umidade (b); relação sucção x teor de umidade (c) para a amostra de PET.

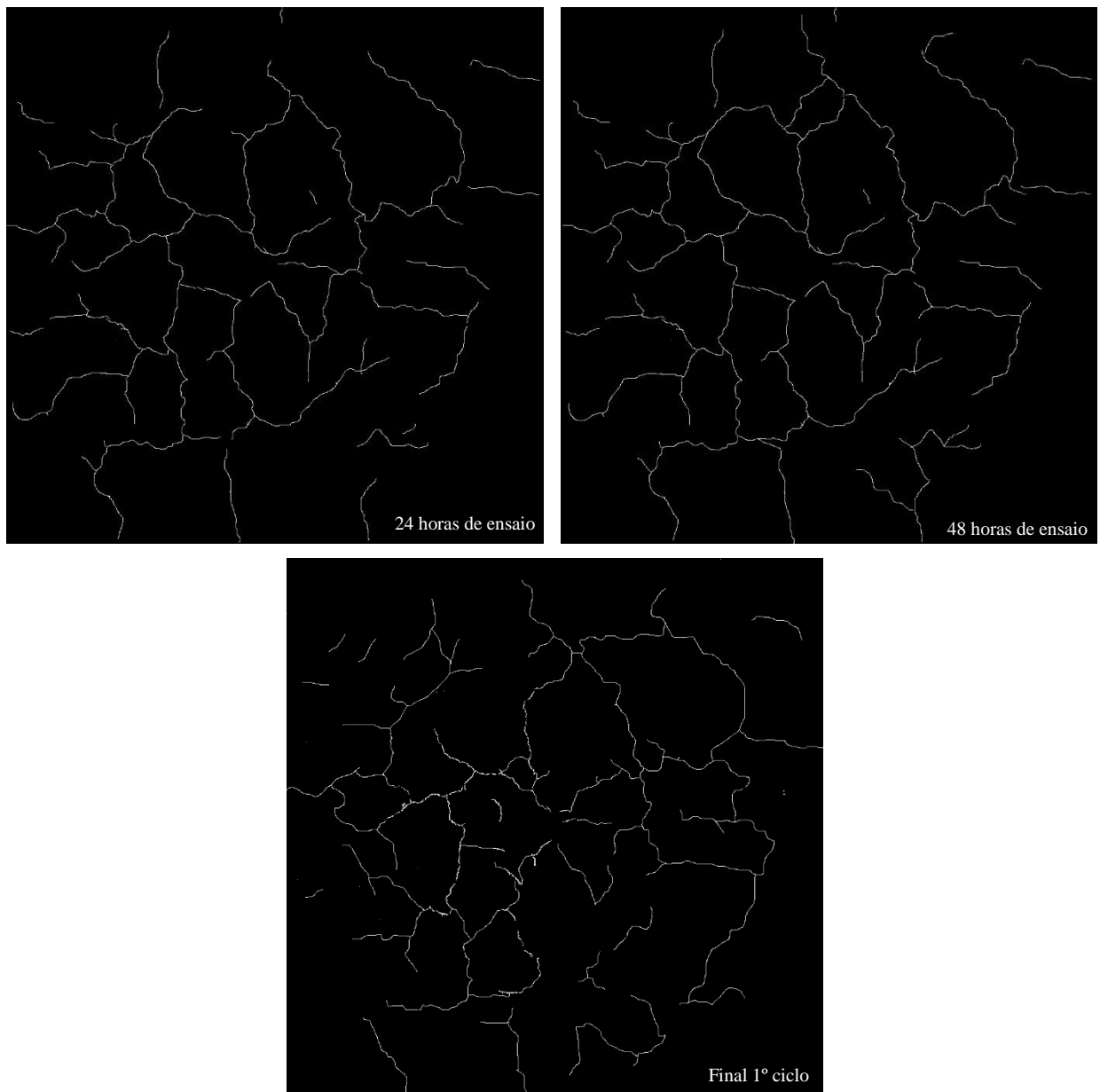


Figura 5.15. Evolução das fissuras ao longo do 1º ciclo de ressecamento do PET.

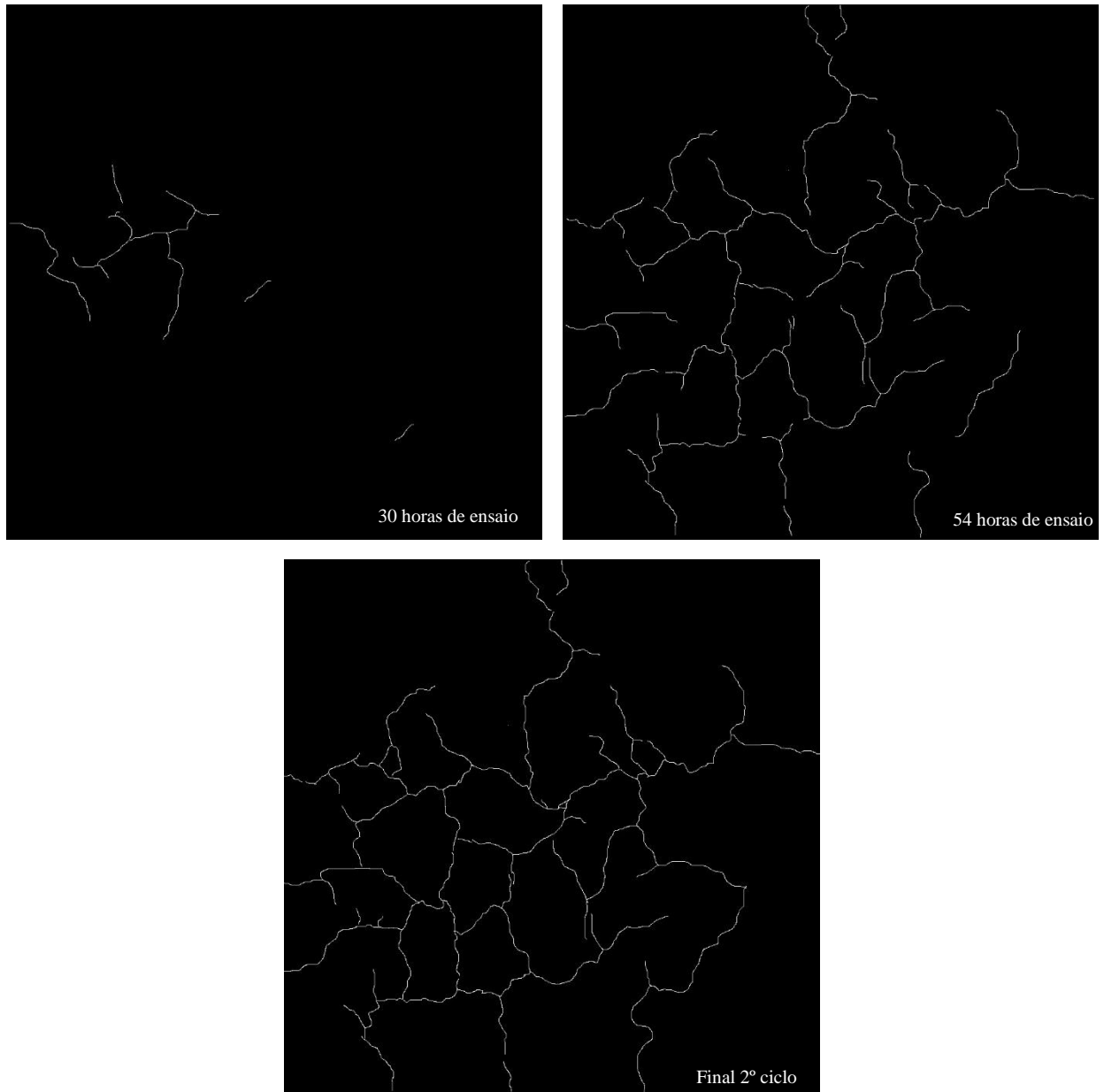


Figura 5.16. Evolução das fissuras ao longo do 2º ciclo de ressecamento do PET.

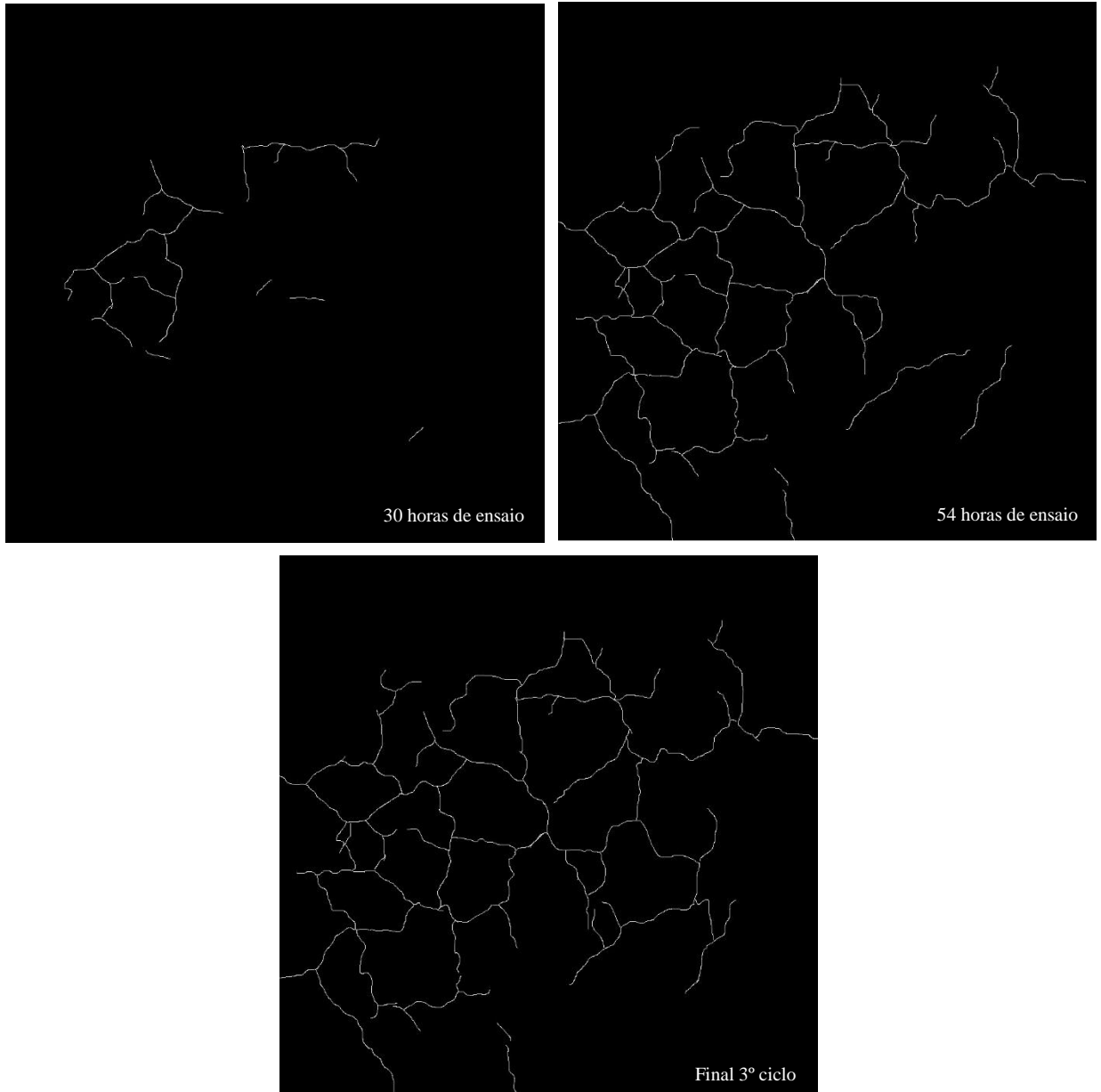


Figura 5.17. Evolução das fissuras ao longo do 3º ciclo de ressecamento do PET.

Analisando a sobreposição das fissuras ao longo dos três ciclos apresentada na Figura 5.18, não se observa grandes alterações. Algumas fissuras novas surgem no 3º ciclo, enquanto outras dos ciclos iniciais cicatrizam e não voltam a aparecer até o final do ensaio.

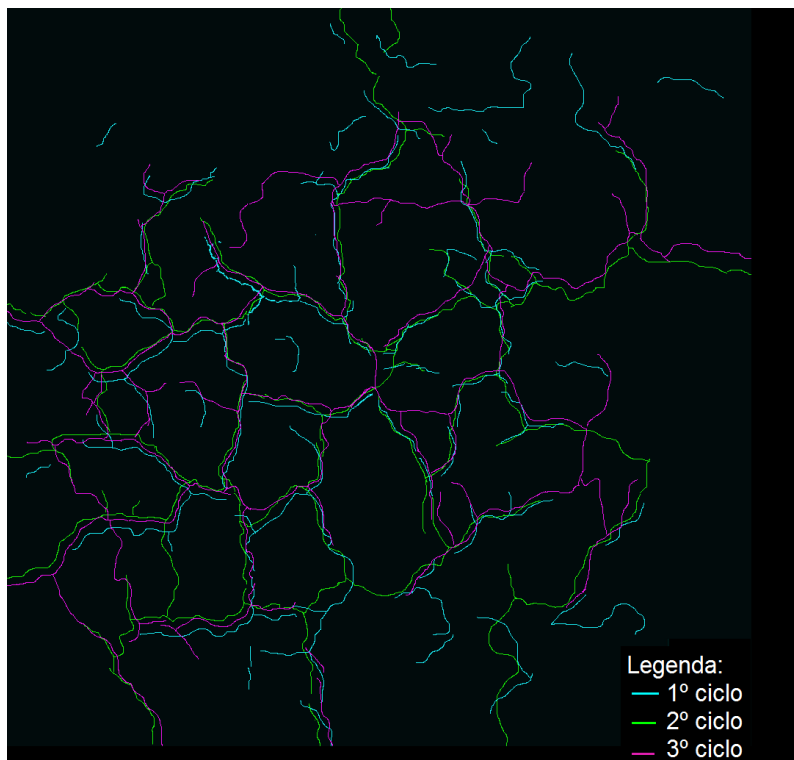


Figura 5.18. Sobreposição de fissuras ao final dos três ciclos de ressecamento para a amostra de PET.

A seguir são apresentadas as curvas de fissuração com o tempo das amostras, agrupadas por ciclo de ressecamento. Observa-se que, para todos os ciclos, o SP fissurou mais que as demais amostras. A amostra contendo fibras de PET fissurou mais rapidamente em todos os ciclos, mas apresentou os menores valores de CIF, demonstrando que a adição de fibras não impediu o surgimento das fissuras, mas evitou a sua propagação ao longo do processo de ressecamento. A adição do RCC, por sua vez, reduziu o nível de fissuração, sendo esta mais efetiva a partir do segundo ciclo (Figura 5.19).

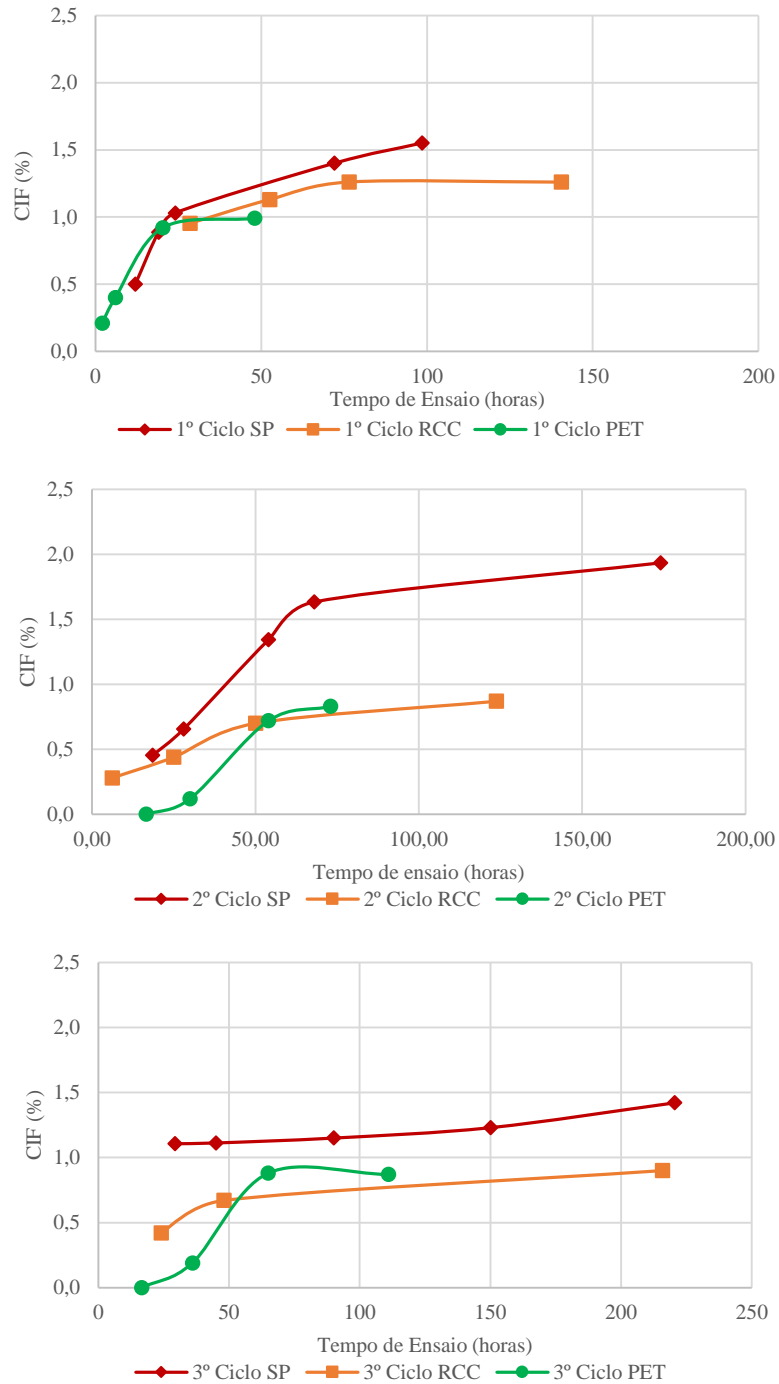


Figura 5.19. Comparação entre os valores de CIF ao longo dos ciclos de ressecamento para as amostras ensaiadas.

### **5.3. AVALIAÇÃO QUALITATIVA DAS PROFUNDIDADES DAS FISSURAS**

O software utilizado para o cálculo das áreas fissuradas permite o traçado de elementos tridimensionais, transformando uma região da imagem em uma superfície com profundidades relativas aos níveis de tons de cinza da imagem. É possível calibrar o programa com as dimensões da amostra, relacionando o número de pixels à dimensão lateral da caixa de acrílico (60 cm). A profundidade, no entanto, é sempre medida em pixels, permitindo apenas uma avaliação qualitativa desse parâmetro.

Para cada amostra foi delimitada uma região quadrada de aproximadamente 10 cm de lado para o traçado da superfície tridimensional. Após o traçado foi realizado um corte transversal da superfície, para que fosse possível avaliar as profundidades relativas.

Para o solo puro foram traçadas duas superfícies de modo a se mapear duas fissuras principais e de maior abertura. Para as outras misturas foram traçadas apenas uma superfície por amostra. As imagens e a indicação das seções analisadas são apresentadas a seguir.

As Figuras 5.20 e 5.21 referem-se à amostra de solo puro e permitem observar a existência de três fissuras principais a partir das quais as demais fissuras se ramificam. Essas fissuras surgiram no início do 1º ciclo e foram crescendo em espessura e profundidade com o ressecamento da amostra. Nos ciclos seguintes as imagens demonstram uma tendência de fechamento dessas fissuras, principalmente para a fissura selecionada pela seção 1. Essa tendência pode ser verificada na Figura 5.22, onde o corte e as profundidades relativas, em relação à superfície da amostra, são apresentados. Para a seção 1 observa-se que a profundidade varia entre 30 pel (pixels), referente à distância entre a cota da superfície (120 pel) e a base da fissura (90 pel). Essa profundidade reduz para cerca de 10 pel no final do 2º ciclo e para aproximadamente 5 pel ao final do 3º ciclo. Para a seção 2, as profundidades não apresentam variação significativa, mantendo-se na ordem de 10 pel.

Como comentado anteriormente, a amostra de solo puro apresentou muitas escamações que foram se intensificando ao longo do ensaio de ressecamento. Imagina-se que, de alguma forma, as partículas que se desprenderam durante os ciclos de umedecimento causaram a impressão de que as fissuras estavam se fechando. No entanto,



ao se retirar a amostra da caixa, ao final do ensaio, pôde-se perceber que as três fissuras principais atingiram toda a espessura da camada, alcançando o fundo da caixa. Para as amostras de RCC e PET não foi possível observar nenhuma fissura que ultrapasse a camada superficial da amostra, atingindo profundidades da ordem de 5 pel.

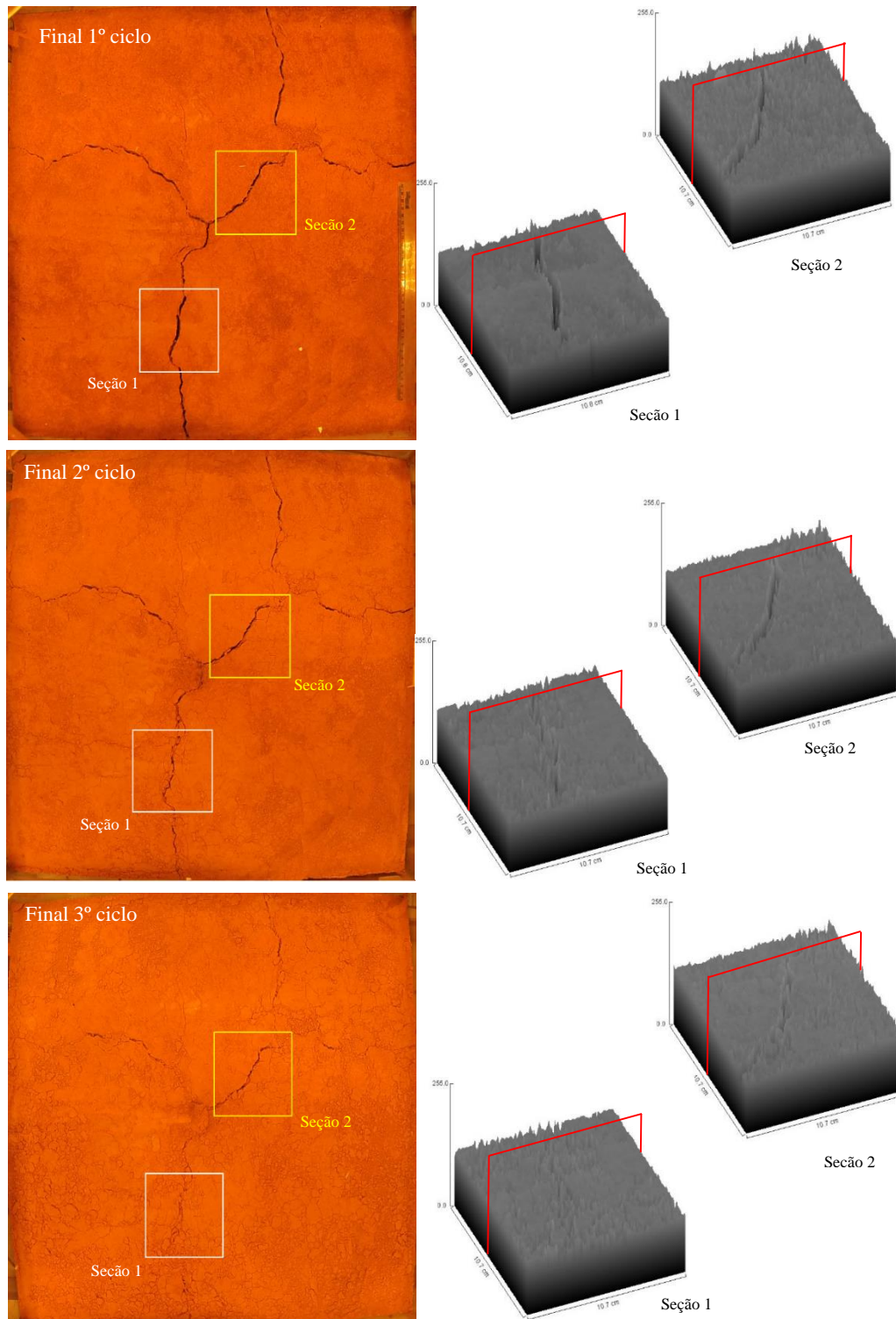


Figura 5.20. Superfícies tridimensionais para a amostra de solo puro.

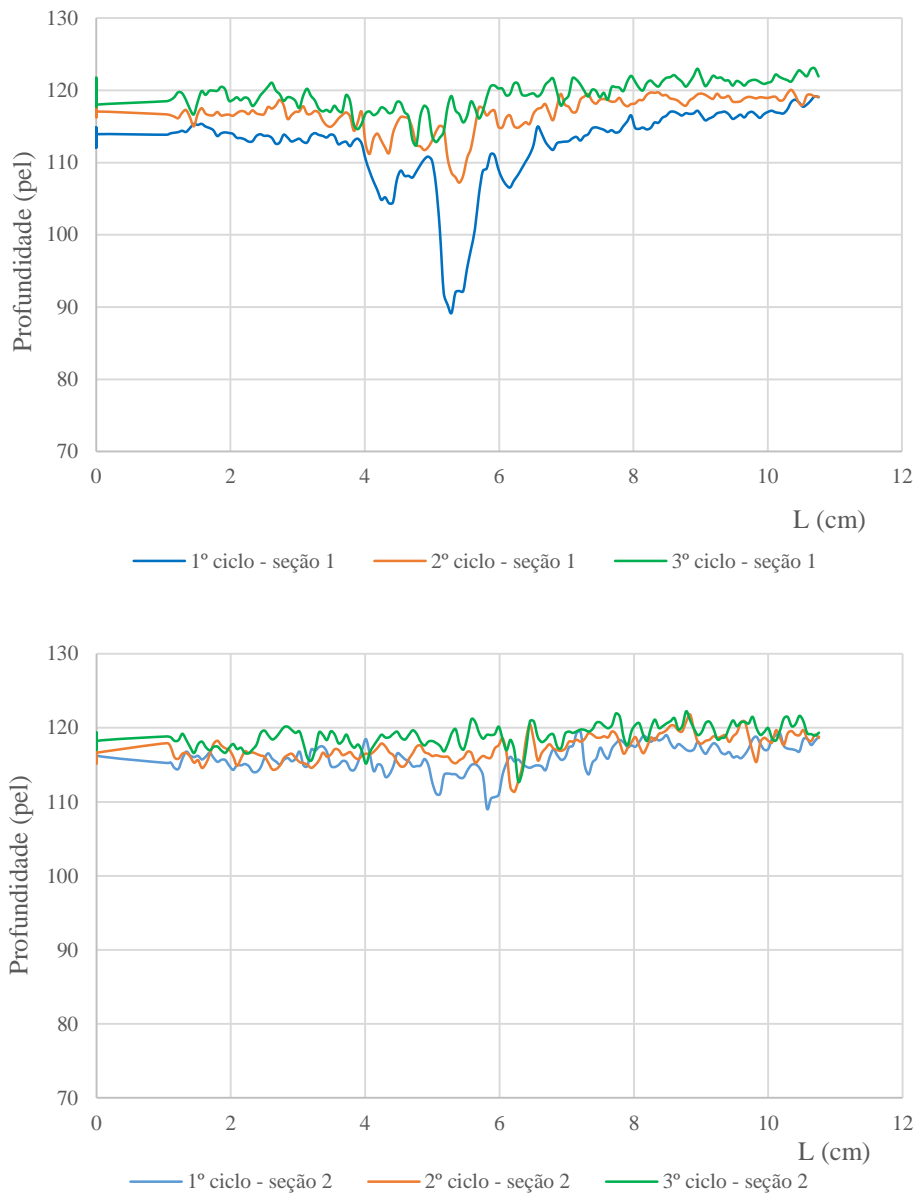


Figura 5.21. Avaliação qualitativa das profundidades das fissuras da amostra de solo puro nas seções 1 e 2, ao final dos três ciclos de ressecamento.

As Figuras 5.22 a 5.25 mostram as superfícies traçadas e o perfil de profundidade para as amostras de RCC e PET. As profundidades relativas são menores que as observadas na amostra de solo puro. O perfil com as profundidades das fissuras para as três amostras ao final do 1º ciclo é mostrado na Figura 5.26. Comparativamente, o solo puro apresentou fissuras mais profundas, quando comparado às demais amostras.

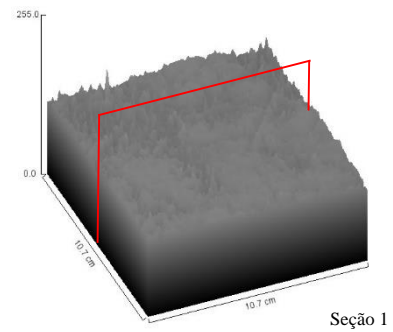
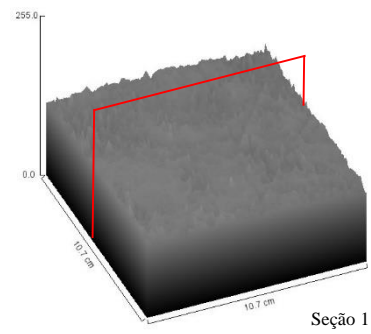
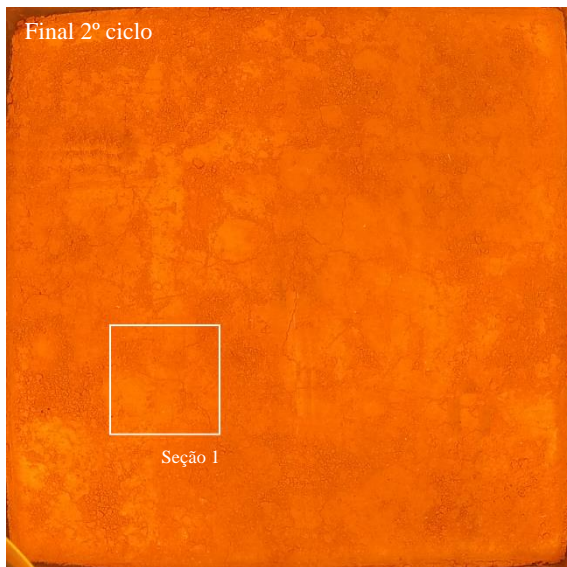
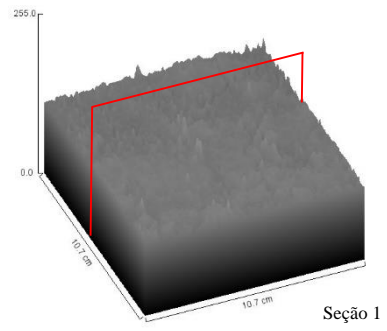
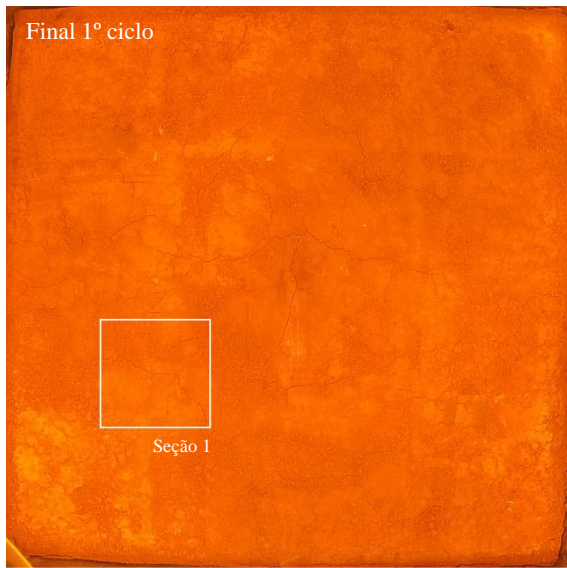


Figura 5.22. Superfícies tridimensionais traçadas para a amostra de RCC.

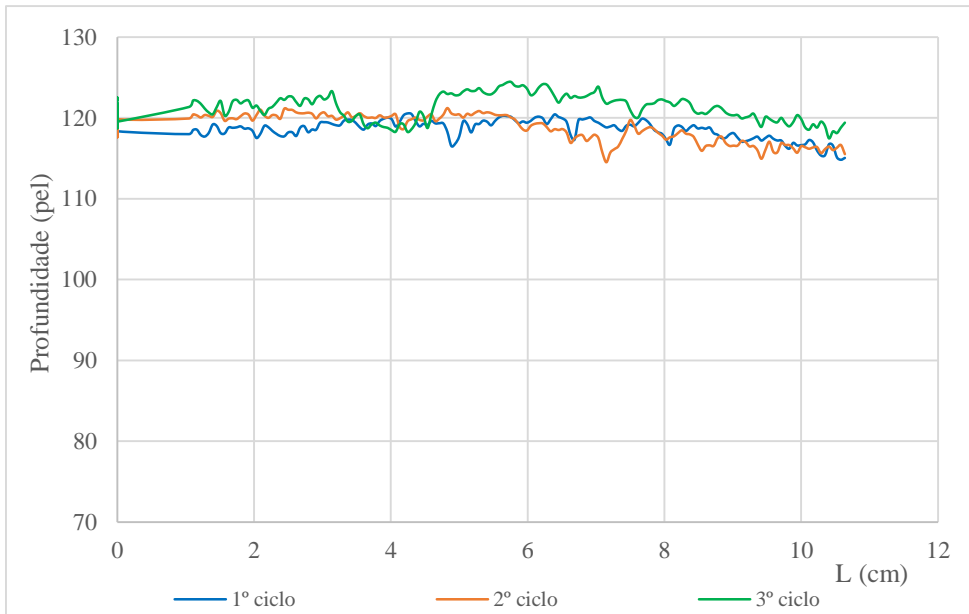


Figura 5.23. Avaliação qualitativa das profundidades das fissuras da amostra de RCC, ao final dos três ciclos de ressecamento.

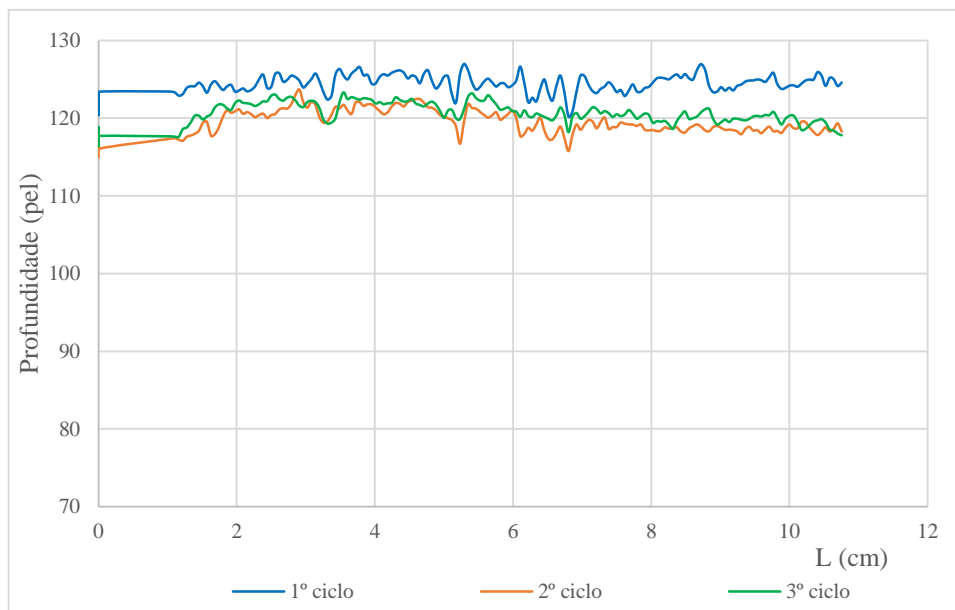


Figura 5.24. Avaliação qualitativa das profundidades das fissuras da amostra de PET, ao final dos três ciclos de ressecamento.

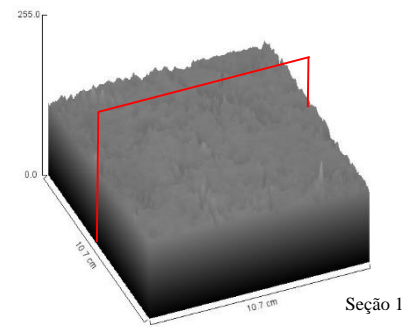
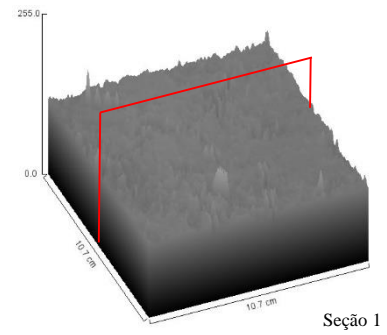
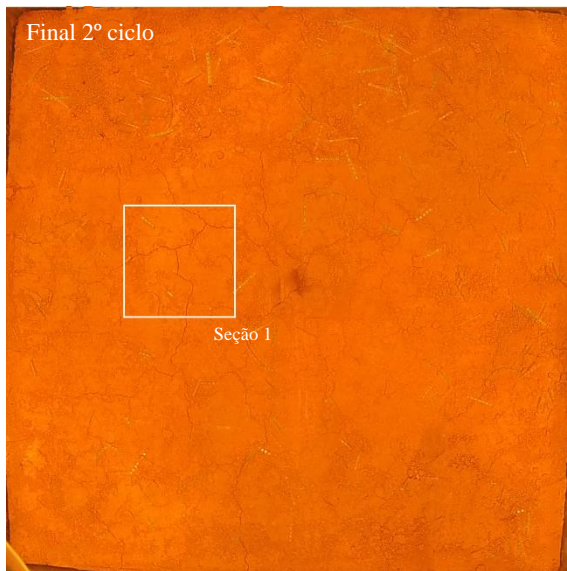
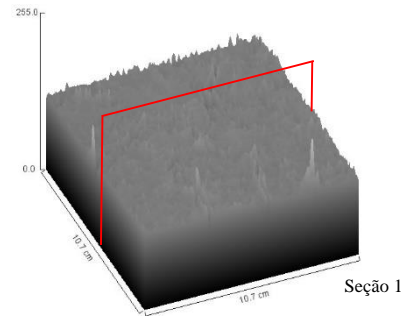


Figura 5.25. Superfícies tridimensionais traçadas para a amostra de PET.

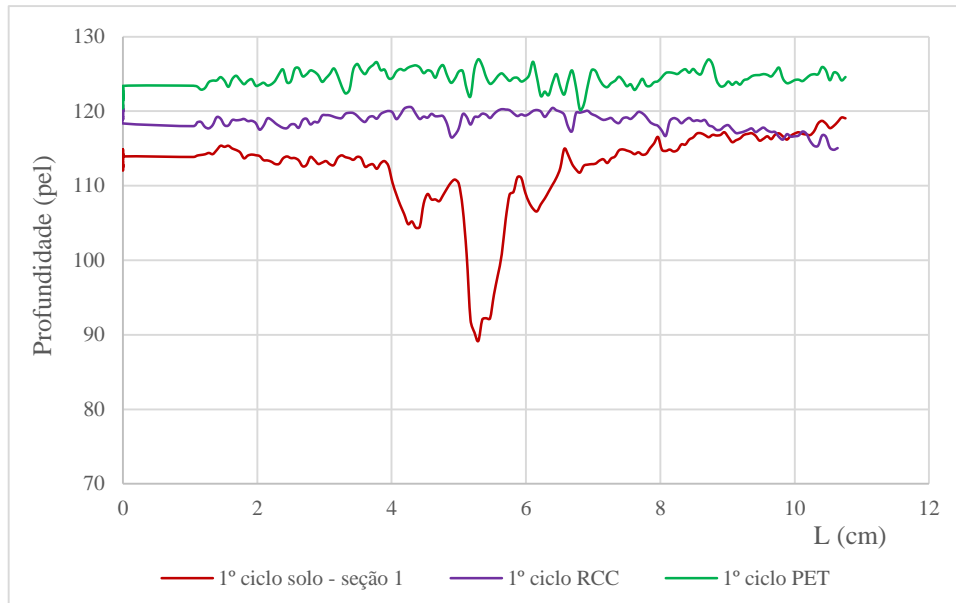


Figura 5.26. Comparativo entre as profundidades relativas das amostras ao final do 1º ciclo.

#### 5.4. RESULTADOS OBTIDOS COM A INSTRUMENTAÇÃO DAS AMOSTRAS

O processo de ressecamento das amostras foi monitorado por sensores de umidade e temperatura do solo instalados na superfície da amostra e por mini tensiômetros instalados em três alturas distintas da amostra, conforme descrito no Capítulo 3. Além desses sensores também foram registrados os valores de perda de massa da amostra e da temperatura e umidade relativa do ar.

A evolução dos vários parâmetros medidos ao longo dos ensaios é apresentada a seguir.

Para a amostra de SP a Figura 5.27 apresenta os resultados de temperatura do solo obtido com os sensores 5TM, variação da umidade gravimétrica da amostra ao longo ensaio e temperatura do ar. Como esse foi o primeiro ensaio realizado, algumas inconsistências foram detectadas nos registros de temperatura dos dois primeiros ciclos. De uma maneira geral, observa-se que os sensores de temperatura 5TM tem uma resposta próxima ao do termo higrômetro. Ao longo do ciclo de ressecamento, o simulador solar era mantido ligado por 10 horas e desligado o restante do dia. Por isso a variação de temperatura de forma cíclica durante o ensaio. Observa-se ainda que a perda de umidade é influenciada pela temperatura e pelo tempo de ensaio, sendo mais rápida do início do ensaio e para temperaturas mais elevadas.

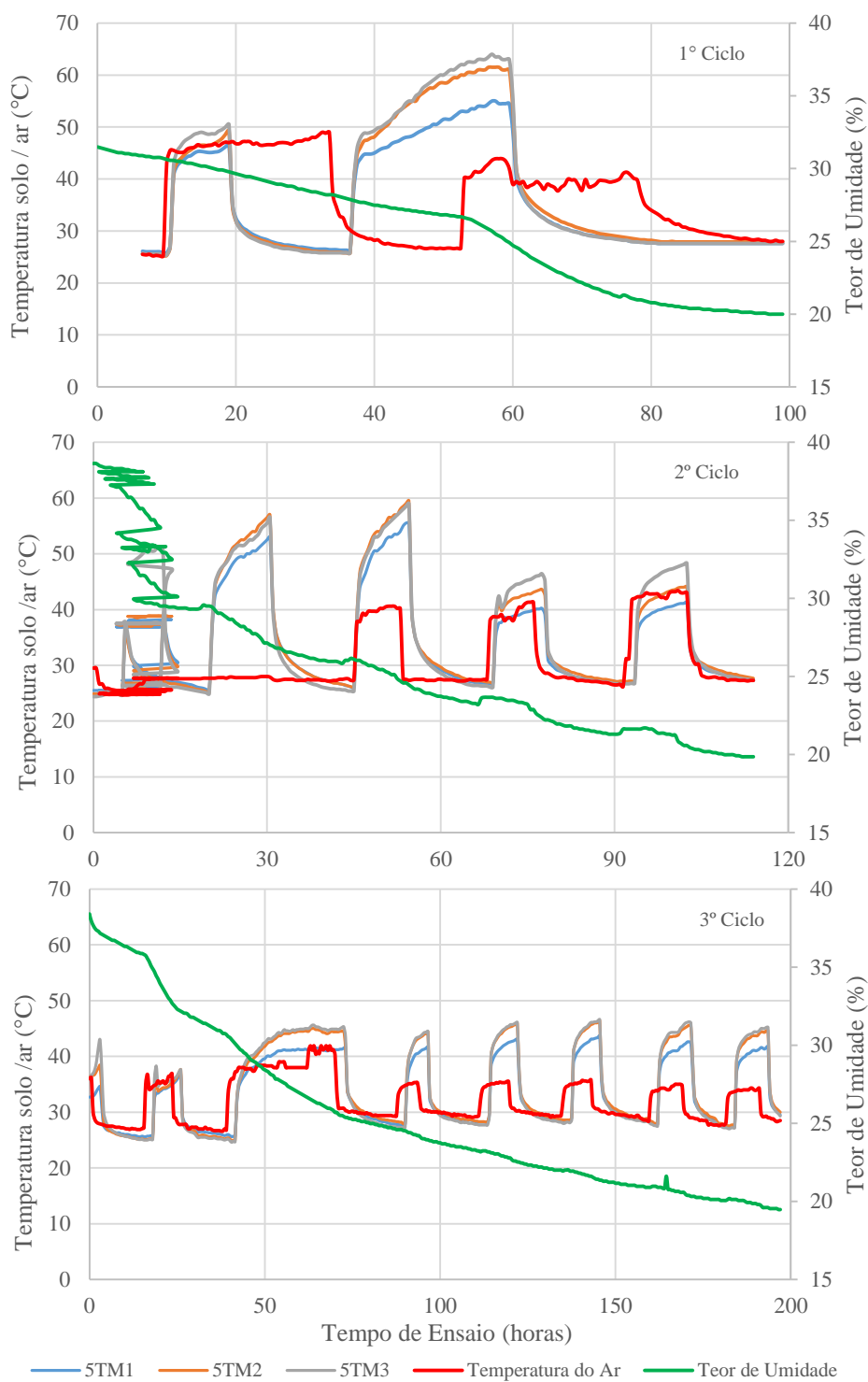


Figura 5.27. Evolução dos parâmetros de umidade e temperatura do solo e do ar para a amostra de SP para cada ciclo de ressecamento.

As Figuras 5.28 e 5.29 apresentam os mesmos parâmetros para as misturas com adição de RCC e PET, respectivamente.

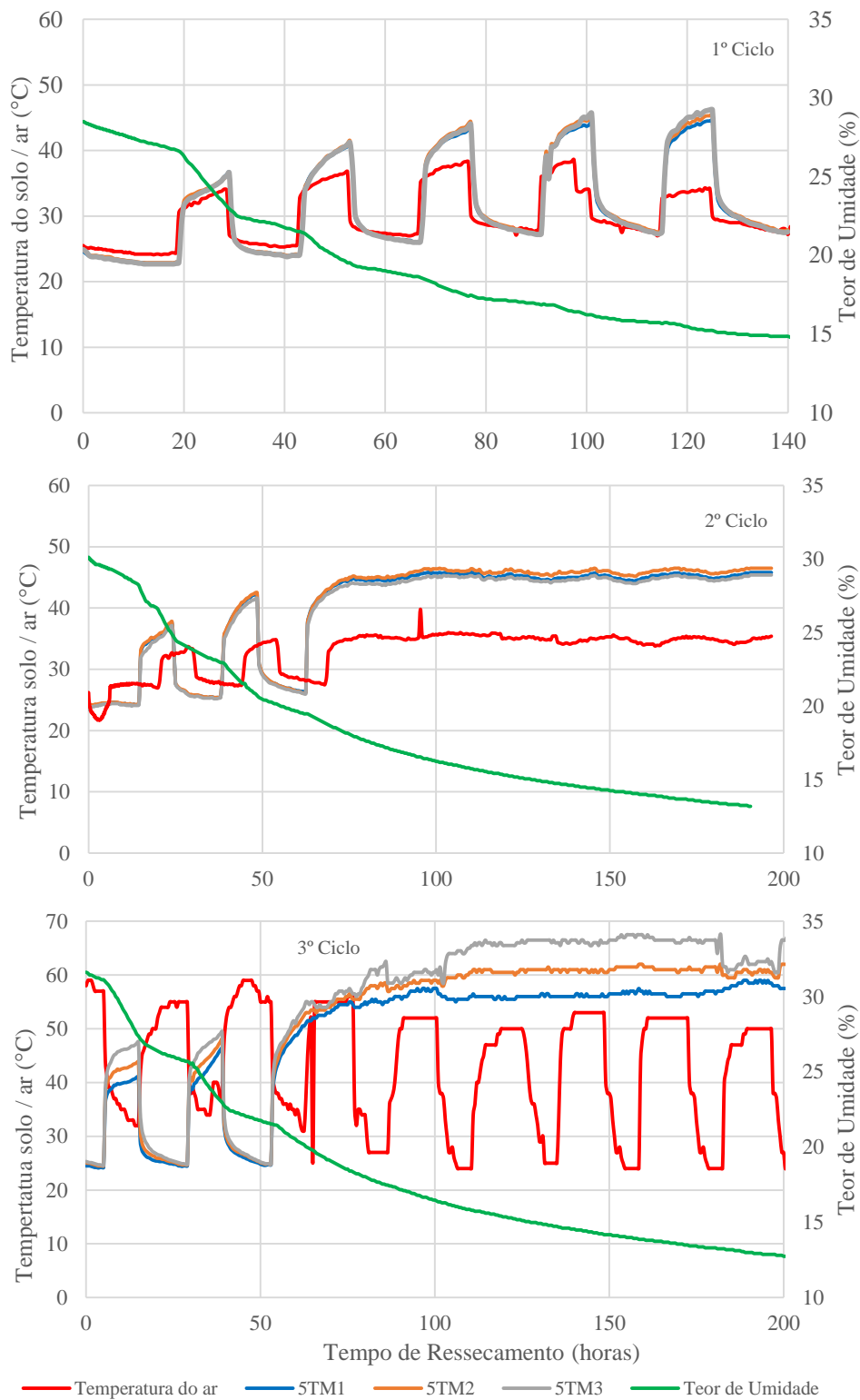


Figura 5.28. Evolução dos parâmetros de umidade e temperatura do solo e do ar para a amostra de RCC para cada ciclo de ressecamento.



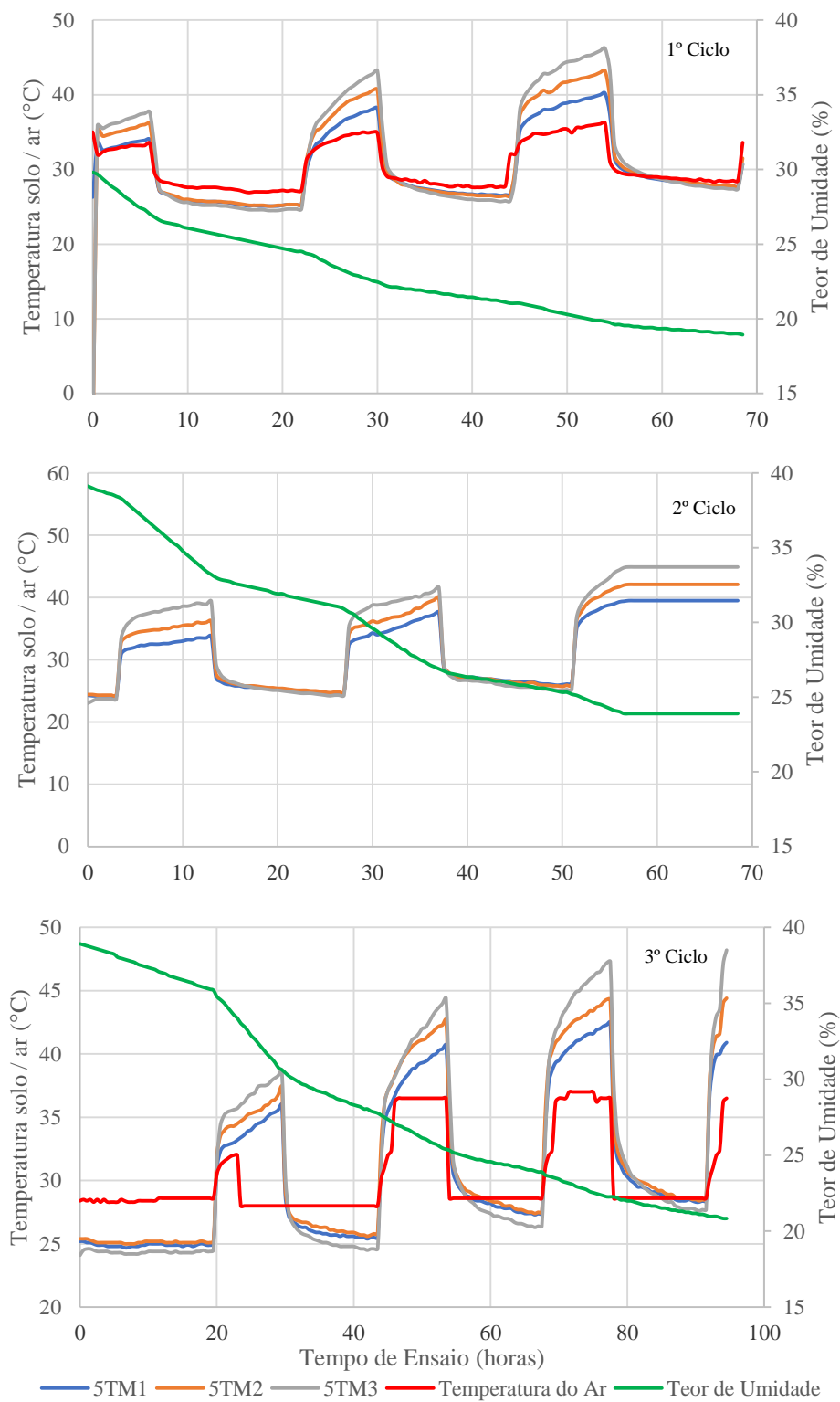


Figura 5.29. Evolução dos parâmetros de umidade e temperatura do solo e do ar para a amostra de RCC para cada ciclo de ressecamento.

Nas figuras é possível observar que as temperaturas registradas pelos sensores 5TM mantiveram-se sempre superiores às temperaturas registradas pelo termo

higrômetro. De uma forma geral, o distanciamento entre os valores medidos foram acentuando-se ao longo do processo de ressecamento, podendo estar associado à perda de contato entre o sensor e o material.

Outro parâmetro importante refere-se à variação do teor de umidade com o tempo devido aos ciclos de ressecamento. Neste sentido, é possível observar a capacidade de retenção de água para os diferentes tipos de material bem como a capacidade de absorção de água devido ao ciclo de umedecimento. O padrão de fissuramento associado a cada material tende a ser, juntamente com as propriedades de cada material (Solo Puro, solo-RCC e solo-PET), responsáveis pela evolução do teor de umidade. Assim, este parâmetro é avaliado de forma individualizada em função do tempo de ensaio e do tipo de material.

Na sequência são apresentadas curvas de umidade x tempo de ensaio, para o 1º ciclo de ressecamento, destacando-se a inclinação dos trechos iniciais e finais, com simulador ligado e desligado para cada amostra (Figura 5.30). Observa-se que o SP perde umidade mais lentamente no início do ensaio quando comparado às demais amostras, acelerando a perda ao final do ensaio. Nas amostras de RCC e PET o comportamento é inverso ao do SP, com velocidades de evaporação mais elevadas no início e mais suaves no final do ensaio. Dentre todas, a amostra de PET foi a que perdeu umidade mais rapidamente.

As Figuras 5.31 a 5.33 mostram a evolução da sucção das diferentes amostras ensaiadas a partir das medidas obtidas pelos mini tensiômetros T5-1, T5-2 e T5-3, posicionado em cada lateral da caixa e instalados a 4 cm, 7 cm e 12 cm, a partir do fundo da caixa, respectivamente. O tensiômetro mede a pressão de água transmitida via cápsula cerâmica à água deionizada contida no interior do tubo de acrílico (haste) conectado a um transdutor de pressão. Se o contato entre cápsula cerâmica e a água presente na matriz de solo é perdido, a cápsula perde umidade e o sensor não consegue mais medir a pressão de água corretamente e as medições do sensor caem a zero. Normalmente isto ocorre também quando a capacidade máxima de medida do sensor é alcançada.

Analisando a Figura 5.31, relativa a amostra de SP, pode-se observar que o pico de sucção ocorreu para valores próximos a 120 kPa, alcançado pelo tensiômetro localizado próximo à superfície. Os outros dois tensiômetros apresentaram picos de 80kPa e 60 kPa. No 1º ciclo os maiores valores de sucção foram atingidos para teores de umidade próximos a 30%. Como já mencionado anteriormente em outras avaliações, este

valor de umidade é correspondente ao término da entrada de ar nos macro poros obtido no ensaio de sucção. Para os outros dois ciclos de secagem os picos aconteceram para teores de umidade menores, entre 27% e 23%, provavelmente associados as alterações na estrutura do material devido ao fissuramento. .

Na amostra de RCC houve problemas com as leituras de alguns tensiômetros, devido principalmente a secagem prematura da cápsula, não sendo possível traçar as curvas para os 2º e 3º ciclos. A Figura 5.32 apresenta as curvas referentes ao 1º ciclo. O T5-1 também não pode ser instalado neste ciclo devido à quebra da haste. Observa-se que o pico de sucção nesta amostra foi de 180 kPa, para um teor de umidade de 27%, igualmente próximo ao teor de umidade correspondente ao valor de término da entrada de ar nos macro poros obtido no ensaio de sucção, que foi da ordem de 26% para amostra contendo RCC.

Na amostra contendo fibras de PET os picos de sucção obtidos para os três ciclos de secagem se mantiveram próximos a 160 kPa e com teores de umidade da ordem de 18% (Figura 5.33). É importante notar que, diferentemente das outras amostras, todos os três tensiômetros, com defasagem de tempo devido a profundidade de instalação, atingiram o valor de pico. Este comportamento poderia estar associado a capacidade de condução de água pelas fibras PET, pois como observado nas análises das imagens, a secagem da amostra de PET foi mais rápida que as demais devido provavelmente a sua maior condutividade hidráulica.

Foram ainda realizadas análises com base nos dados de umidade volumétrica fornecidos pelos sensores 5TM. Os valores foram plotados em função da umidade gravimétrica, calculada a partir dos registros das perdas de água devido aos ciclos de secagem fornecidos pela balança eletrônica. Assim, para verificar a correlação entre esses parâmetros foram elaborados os gráficos mostrados na Figura 5.34.

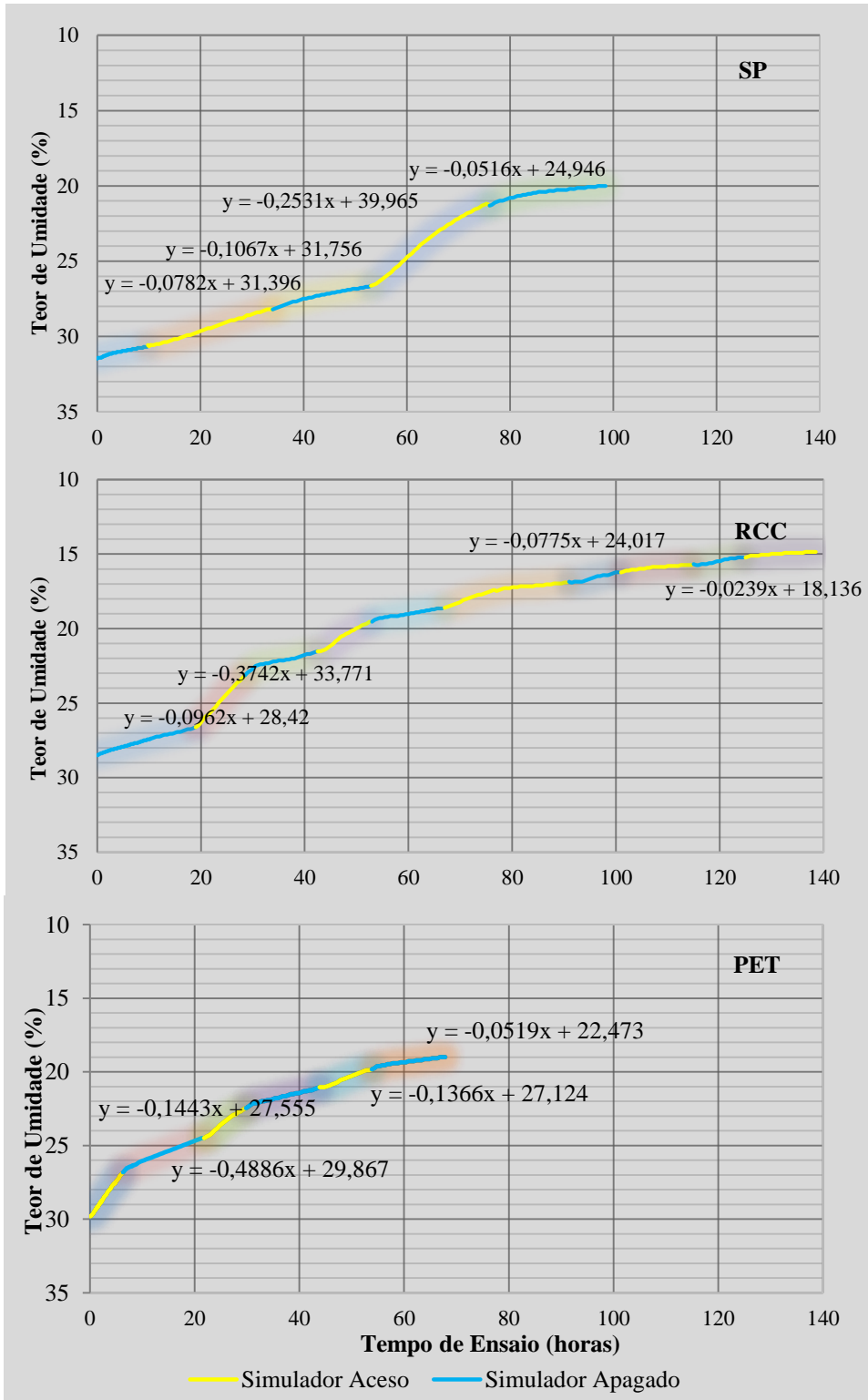


Figura 5.30. Curvas de variação da umidade com o tempo de ensaio para todas as amostras.

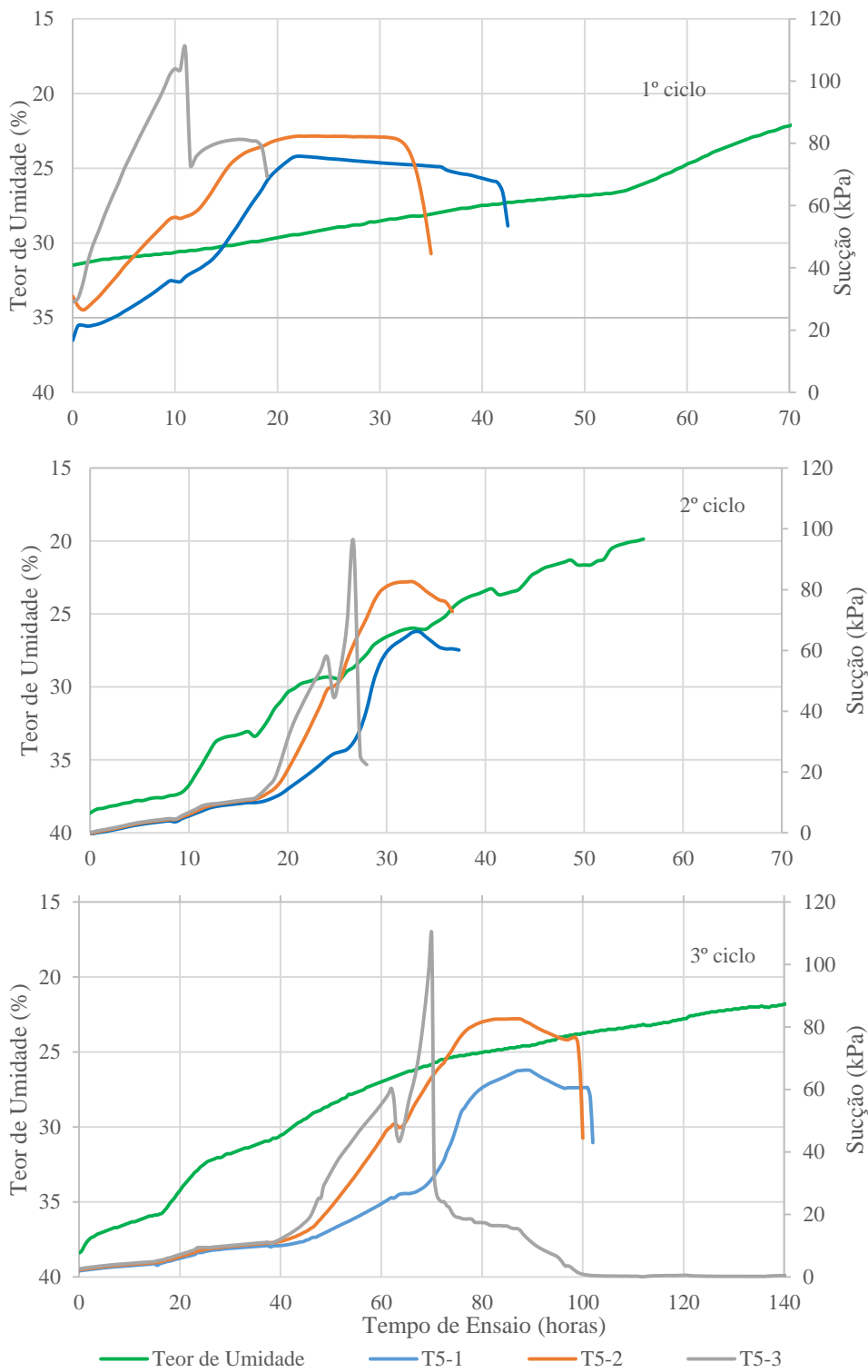


Figura 5.31. Evolução da sucção nos tensiômetros ao longo dos três ciclos de ressecamento da amostra de SP.

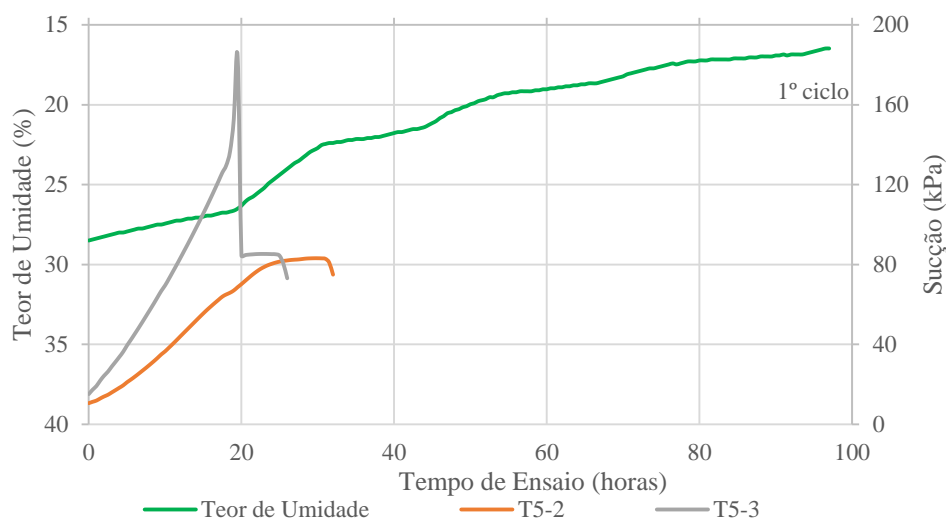


Figura 5.32. Evolução da sucção nos tensiômetros ao longo do 1º ciclo de ressecamento da amostra de RCC.

Observou-se que na amostra de SP o sensor central registrou umidades inferiores aos dos sensores instalados nas extremidades, possivelmente em função das fissuras formadas nesta região. Para as amostras com RCC e PET, as medições dos sensores ao longo dos ciclos se mostraram mais próximas. As equações e o coeficiente de correlação linear estimados para a relação entre as umidades gravimétrica e volumétrica também estão apresentados na Figura 5.34.

Concluídos os ciclos de ressecamento a caixa com a amostra era desmontada. Essa atividade era trabalhosa e demorada, tomando-se muito cuidado para não danificar os sensores que são extremamente frágeis. Para facilitar a remoção as laterais da amostra eram umedecidas e o material intacto localizado na parte central era retirado em pequenas porções e utilizado para verificação da umidade final e da massa específica (Figura 5.35). Este procedimento objetivou ainda avaliar de forma mais direta o padrão de fissuramento remanescente na amostra nas zonas onde ocorreram a maior concentração de fissuras, bem como sua evolução em função da profundidade. A Figura 5.35 mostra o detalhe do procedimento de remoção da amostra e finalização do ensaio.

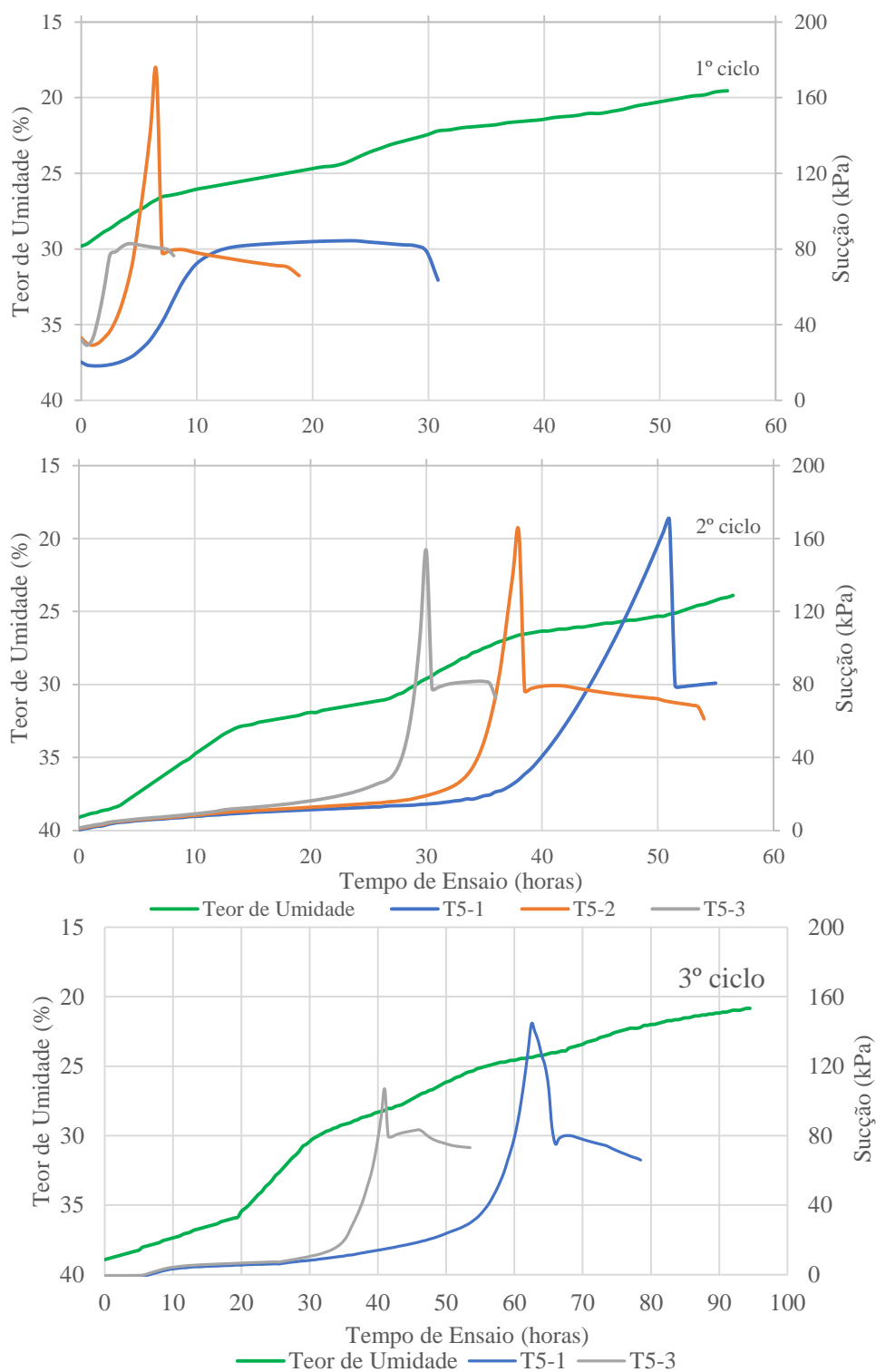


Figura 5.33. Evolução da sucção nos tensiômetros ao longo dos ciclos de ressecamento da amostra de PET.

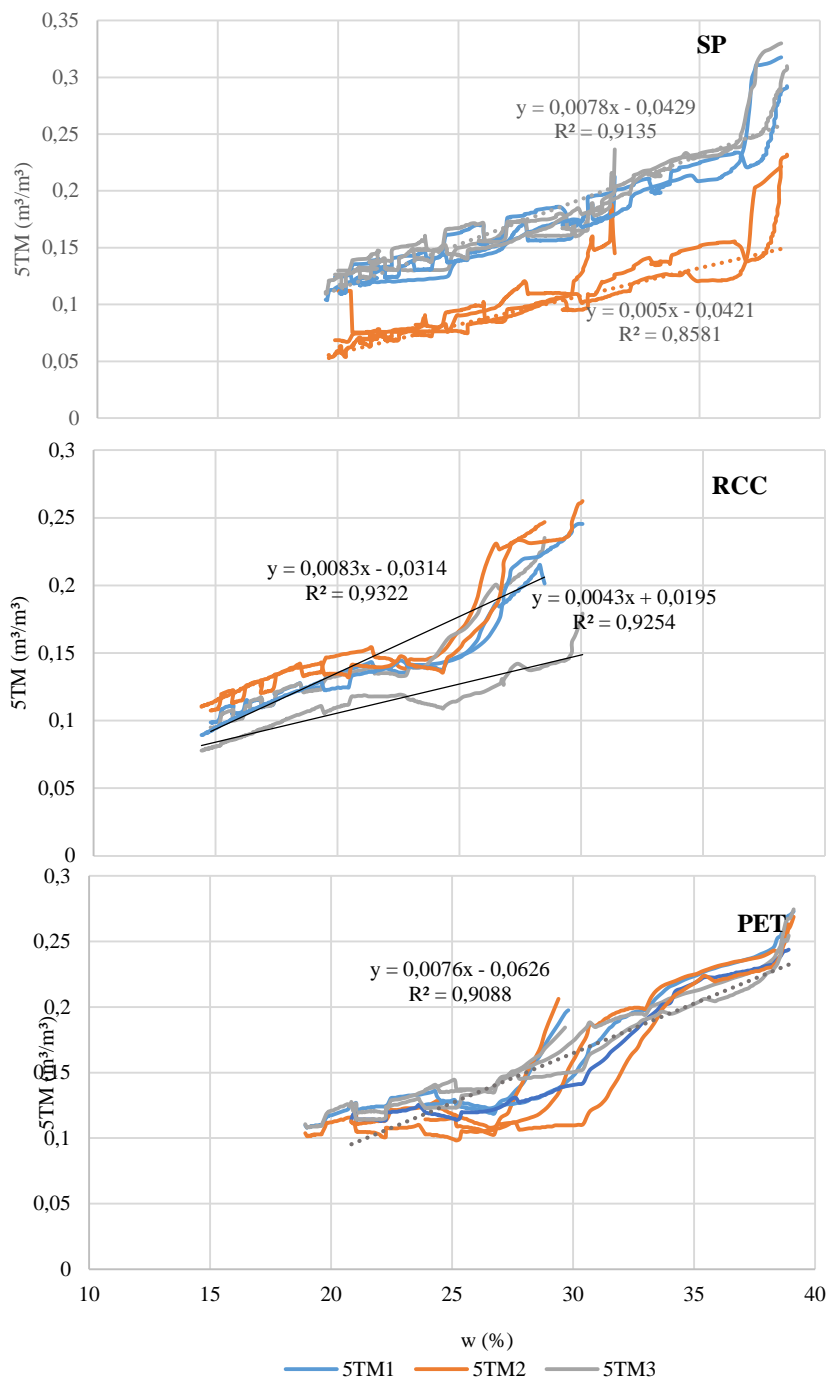


Figura 5.34. Correlações entre as medições do 5tm e a umidade gravimétrica das amostras.





Figura 5.35. Desmontagem da caixa e coleta de amostras.

### 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados dos ensaios laboratoriais realizados utilizando-se amostras de solo puro e com adição de Resíduos da Construção Civil (RCC) e fibras de PET, para avaliação do comportamento destes materiais quando aplicados em camadas de cobertura de aterros sanitários submetidos a processos de ressecamento e a consequente formação de fissuras. Tendo em vista a continuidade dessa linha de pesquisa são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

#### 6.1. CONCLUSÕES GERAIS

A pesquisa foi dividida em três etapas: caracterização dos materiais, ensaios hidromecânicos e ensaios de ressecamento. A partir da análise e discussão dos resultados podem ser apresentadas as seguintes conclusões:

Quanto aos materiais selecionados para pesquisa destaca-se que:

Embora existam citações na literatura sobre a utilização de diferentes materiais alternativos como material de reforço e estabilização de solos, procurou-se selecionar materiais com características distintas, um granular e outro fibroso, de modo que se pudesse avaliar a influência destas características no comportamento do solo quando associados a estes materiais em diferentes proporções. Além disso, outro fator determinante para a seleção dos materiais foram: quantidade disponível do resíduo; distância e facilidade de transporte entre a fonte geradora e o local de aplicação; redução dos impactos ambientais causados pela má destinação do resíduo; e facilidade de produção/reciclagem do resíduo escolhido.

O solo escolhido foi coletado no local onde está sendo construído o aterro sanitário de Brasília/DF, onde está prevista ainda a construção de uma central de britagem de resíduos de construção. Desta forma, o resíduo poderá ser produzido no próprio local do aterro e utilizado sem a necessidade de grandes deslocamentos. Como o aterro ainda está em fase de projeto, optou-se por selecionar um resíduo produzido por uma empresa de reciclagem e entulho já instalada na cidade e, na medida do possível estabelecer, caso viável, uma proposta de produção que viabilizasse a sua utilização nas camadas de

cobertura. Dentre os resíduos produzidos por esta empresa, a opção foi pela utilização de um material obtido de restos de construção coletados sem segregação prévia e com menor custo de produção, de modo a avaliar a possibilidade de utilização de um resíduo menos nobre e de fácil obtenção.

A escolha da fibra levou em consideração dois fatores principais: elevada produção das garrafas de PET, enviadas em sua maioria ao aterro, e facilidade de produção das fibras, utilizando um equipamento manual e de fácil reprodução, podendo inclusive ser posteriormente automatizado para incentivar sua produção e gerar rendas para cooperativas de catadores.

Os dois materiais selecionados mostraram-se viáveis sob o ponto de vista da disponibilidade, facilidade de obtenção e para preparação das misturas, além dos benefícios ambientais associados à sua correta destinação.

Quanto aos ensaios de caracterização pode-se resumir os seguintes resultados:

- O solo pesquisado pode ser classificado como silte de alta compressibilidade – MH, enquanto as misturas solo+RCC apresentam comportamento similar a um silte de baixa compressibilidade (ML);
- A adição do RCC ao solo alterou o comportamento das curvas de compactação elevando a massa específica aparente seca e reduzindo a umidade ótima com o aumento do percentual de RCC na mistura. Já a adição da fibra de PET, praticamente não influenciou o comportamento do solo quanto aos parâmetros obtidos no ensaio de compactação;
- O peso específico dos grãos ( $G_s$ ) das misturas com adição de RCC sofreu pequena elevação com o aumento do percentual de adição, quando comparada à do solo puro, já a adição das fibras de PET não demonstrou influência sobre este parâmetro;
- Foi detectado um elevado teor de sílica no RCC, podendo estar associado à presença de resíduos de concreto e argamassa, o que pode ter influenciado o ganho de resistência das misturas com adição de RCC e o comportamento da amostra durante o ensaio de ressecamento. Além de apresentar um efeito importante devido ao efeito do tempo de cura das amostras.

Os resultados dos ensaios hidráulicos e mecânicos permitiram concluir que:

- Os ensaios de RCS mostraram que o aumento do percentual de adição de RCC eleva a resistência com o tempo, sendo os maiores valores encontrados para a adição de 40% de RCC. Nas misturas com fibras de PET observou-se que o percentual de adição de 0,4% mostrou-se mais eficiente em relação ao ganho de resistência à compressão, não sendo verificada a influência do comprimento e da geometria lateral, lisa ou sanfonada, nos valores encontrados. Este fato poderia estar associado ao comprimento das fibras utilizadas;
- As curvas características de sucção apresentam formato bimodal para todas as misturas e também para o solo puro. Para sucções mais baixas, o acréscimo de RCC ao solo provocou uma redução na capacidade de retenção da mistura. Da mesma forma, a adição da fibra de PET também reduziu a capacidade de retenção. Para sucções altas o comportamento foi semelhante para todas as misturas.
- As curvas de resistência à tração do solo e das misturas com adição de RCC, obtidos pelos ensaios de compressão diametral, apresentaram comportamento semelhante com ruptura frágil, não sendo observadas diferenças significativas na resistência de pico. Para o caso em que foram adicionadas as fibras ao solo o comportamento do material mudou significativamente, com o surgimento de uma zona de deformação secundária influenciada pelas interações das fibras com o solo e a formação de vários picos secundários de resistência.
- Quanto à retração, no ambiente seco, condição mais severa de exposição, as amostras retraíram rapidamente nos dois primeiros dias de ensaio, cerca de 3%, atingindo valores máximos de retração da ordem de 3,5%, com exceção da amostra de solo puro que, no primeiro dia de ensaio, retraiu 4,5%, atingindo uma retração máxima de 5,5% a partir do sétimo dia. Considerando as recomendações de Daniel e Benson (1990) relativas à taxa de retração máxima para materiais de cobertura, a retração máxima de 4% seria atendida por todas as misturas alternativas, exceto pela amostra de solo puro.
- Os ensaios de ressecamento preliminares possibilitaram a avaliação da variação da permeabilidade e da fissuração. A primeira metodologia, utilizando corpos de prova cilíndricos, apontou aumento do coeficiente de permeabilidade em uma

ordem de grandeza para amostras submetidas a dois ciclos de ressecamento, embora não tenham surgido fissuras visíveis na superfície das amostras.

- A segunda metodologia de avaliação do processo de ressecamento, utilizando amostras com maior área de exposição e menor espessura, permitiu avaliar o padrão de fissuração das misturas que, quando comparado ao solo puro, apontaram para uma melhoria significativa na redução das áreas fissuradas. Os melhores resultados foram observados para os percentuais de 20% de RCC e 0,4% de PET com 30 mm de comprimento, que somados aos demais resultados, determinaram a escolha desses percentuais para os ensaios de ressecamento usando o simulador de ciclos contínuos de umedecimento e secagem.

Quanto aos ensaios especiais de ressecamento seguindo a metodologia proposta pode-se dizer que:

- A metodologia proposta para estes ensaios de ressecamento e umedecimento mostrou-se satisfatória. Com relação a simulação dos eventos de chuva o sistema proposto conseguiu simular adequadamente os regimes de chuvas. O simulador solar, no entanto, necessita de ajustes, observando-se em alguns momentos a sobrelevação da temperatura e a dificuldade de manter em condições mais próximas da realidade os efeitos da insolação às quais estão submetidas as camadas de cobertura. A avaliação da perda ou ganho de massa durante o ensaio com utilização da balança eletrônica poderia ser otimizada com a utilização de um sistema automático de aquisição de dados que registrasse os valores da massa em espaços regulares de tempo. A maior dificuldade com relação ao ensaio está relacionada aos tensiômetros. Por serem equipamentos muito sensíveis e com pequena faixa de medição para o nível de sucção atingido ao longo dos ensaio, não forneceram resultados dentro da eficiência esperada. Como as amostras secavam rapidamente, os tensiômetros atingiam o pico de cavitação e secavam, não registrando mais nenhum tipo de leitura. Para o ciclo de ressecamento seguinte era necessário reenchê-los todos os tensiômetros, um procedimento lento e cuidadoso que atrasava sobremaneira a realização dos ensaios. A grande vantagem associada a estes tensiômetros estava relacionado ao tamanho e a facilidade de instalação nas amostras de solo.

- A adição de RCC e fibras de PET alterou significativamente o padrão de fissuração das amostras, reduzindo a área fissurada em todos os ciclos quando comparada à do solo puro;
- O tempo para o início da fissuração observado mostrou-se diretamente relacionado ao valor de entrada de ar nos macroporos obtido no ensaio de sucção;
- A amostra com adição de PET fissurou rapidamente mas apresentou ao longo do processo menor evolução da área fissurada, demonstrando que a fibra atuou evitando a propagação das fissuras com o tempo;
- A amostra com adição de RCC demorou mais tempo para fissurar e foi observada a regeneração de algumas fissuras que desapareciam entre um ciclo e outro, reduzindo o valor do CIF ao longo do ensaio;
- No solo puro as fissuras surgiram nas primeiras horas de ensaio e foram aumentando a espessura e a profundidade ao longo dos ciclos. Essas fissuras se desenvolveram ao longo de toda a espessura da caixa (15 cm), diferentemente das demais amostras contendo PET ou RCC, em que as fissuras não ultrapassaram os 5 cm iniciais;

Em resumo, pode-se concluir que a adição dos materiais alternativos utilizados na pesquisa, para as condições avaliadas, afetou positivamente o comportamento das misturas quanto ao ressecamento e à formação e propagação de fissuras. O padrão de fissuração foi alterado, retardando a formação de fissuras e reduzindo o fator de intensidade de fissuração (CIF), quando comparado ao solo natural. Estes resultados indicam a possibilidade de utilização desses materiais como adição ao solo de cobertura de aterros sanitários, principalmente em regiões sujeitas a grandes variações sazonais e elevadas temperaturas.

## **6.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

A partir dos resultados obtidos nesta tese e do aprendizado ao longo da realização dos ensaios, sugere-se algumas possibilidades para pesquisas futuras.

- Melhorar a estrutura do equipamento que permita isolar a amostra e controlar melhor as condições de umidade e temperatura do ar, automatizando o controle

de acionamento do simulador solar, instalando-o de forma que não seja necessária sua remoção para a realização do ciclo de umedecimento; utilizar outros tipos de sensores que permitam medir níveis de sucção mais elevados; e controlar variação de volume e dados referente à evaporação durante o ressecamento;

- Buscar novas possibilidades para avaliação da fissuração, como a utilização de equipamentos ultrassom, tomografia computadorizada ou Raio-X;
- Realizar ensaios utilizando misturas com adição conjunta de RCC e PET;
- Usar fibras de PET mais estreitas;
- Utilizar outros tipos de fibras;
- Executar camadas experimentais utilizando RCC e PET, avaliando seu desempenho sob condições reais de utilização;
- Avaliar a utilização das misturas pesquisadas para execução de camadas evapotranspirativas;
- Avaliar o efeito da subcompactação para estes diferentes materiais e sua influência na formação de fissuras;
- Estabelecer técnicas de coleta de amostras na caixa que pudessem permitir a avaliação efeito das fissuras na permeabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE (2010). Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2010). Panorama de resíduos sólidos no Brasil- 2009. São Paulo: ABRELPE. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2011.pdf>>. Acesso em: mar/2014.

ABRELPE (2011). Panorama de resíduos sólidos no Brasil- 2010. São Paulo: ABRELPE. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2011.pdf>>. Acesso em: mar/2014.

ABRELPE (2012). Panorama de resíduos sólidos no Brasil- 2011. São Paulo: ABRELPE. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2011.pdf>>. Acesso em: mar/2014.

ABRELPE (2013). Panorama de resíduos sólidos no Brasil- 2012. São Paulo: ABRELPE. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf>>. Acesso em: mar/2014.

ABDI, M.R., PARSAPAJOUH, A., ARJOMAND, M.A. (2008). Effects of Random Fiber Inclusion on Consolidation, Hydraulic Conductivity, Swelling, Shrinkage Limit and Desiccation Cracking of Clays. International Journal of Civil Engineering, 6 (4), p.284-292.

ABIPET (2013). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. 9º Censo da Reciclagem de PET no Brasil. Disponível em: <<http://abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Acesso em: mar/2014.

ABNT (1984). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de Solo que Passam na #4,8mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, RJ, 8 p.

ABNT (1984a). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 13 p.

ABNT (1984b). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

ABNT (1984c). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 3 p.

ABNT (1986). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (método de ensaio). Rio de Janeiro, RJ, 8 p.

ABNT (1986a). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, RJ, 10 p.

ABNT (1988). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR MB 2887: Solo – Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática. Rio de Janeiro, RJ, 4 p.

ABNT (1997). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos -Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, RJ, 12 p.



- ABNT (2000). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545: Solo – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, RJ, 3 p.
- ABNT (2001). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-30: Agregado miúdo - Determinação da Absorção de Água. Rio de Janeiro, RJ, 3 p.
- ABNT (2004). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, RJ, 71 p.
- ABRECON (2013). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÕES. A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil: Relatório de Pesquisa Setorial 2013. Disponível em: < <http://www.abrecon.org.br/pesquisa2014/index.php/2013-2/>>. Acesso em: jan./2014.
- AFFONSO, F. J. A. (2005). Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos. Dissertação (Mestrado), COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 161p.
- AKBULUT, S., ARASAN, S., KALKAN, E. (2007). Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. *Applied Clay Science*, 38: 23–32.
- ALBRECHT, B. A., BENSON, C. H. (2001). Effect of desiccation on compacted natural clays. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1, 67–75.
- AL-WAHAB, R. M., EL-KEDRAH, M. H., (1995). Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in compacted clay. *Geoenvironment 2000*. Geotechnical Special Publication, n. 46, ASCE, New York, 791-805.
- AMADI, A.A., EBEREMU, A.O. (2013). Potential Application of Lateritic Soil Stabilized with Cement Kiln Dust (CKD) as Liner in Waste Containment Structures. *Geotech Geol Eng.*, 31:1221–1230.
- AMIR-FARYAR, B., AGGOUR, M. S. (2014). Fiber Reinforcement Optimization Using a Soil Approach. *Geo-Congress, ASCE, Atlanta*, p. 2523-2532.
- ASTM (1995). American Society for Testing and Materials. D5298: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Philadelphia, PA, 6p.
- BARROS, M. C. (2005). Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura. Dissertação (Mestrado). COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 96p.
- BARZEGAR, A.R.; RENGASAMY, P.; OADES, J.M. (1995). Effects of clay type and rate of wetting on the mellowing of compacted soils. *Geoderma*, 68, p. 39-49.
- BEAR, J. BARCHMAT, Y. (1990). Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 553p.
- BOSCOV, M. E. G. (1997). Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo.
- BOSCOV, M. E. G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 248p.

BRASIL (2002). Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Disponível em:<[www.mma.conama.gov.br/conama](http://www.mma.conama.gov.br/conama)> Acesso em: mar. 2014.

BRASIL (2009). IBGE–INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios, PNAD 2009. Disponível em:

<[http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_visualiza.php?id\\_noticia=1708](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1708)>. Acesso em: mar. 2014.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: mar. 2014.

BRONSWIJK, J.J.B. (1991). Drying, cracking, and subsidence of a clay soil in a lysimeter. In: Soil Science, v. 152, n.2, pp. 92–99.

CABELLO, A. C. (2013). Detección de grietas por desecación em Arcillas mediante GPR. Dissertação (Mestrado). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 133 p.

CALLISTER, W. D. Jr. (2011). Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7 ed. LTC, 705p.

CAMPOS, H. K. T. (2012). Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental, 17(2): 171-180.

CATAPRETA, C. A. A. (2008). Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 316p.

CETESB (1993). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Resíduos Sólidos Industriais. 2ª ed. São Paulo, SP.

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

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

EMBRAPA (1978). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. Rio de Janeiro, 455p.

FREDLUND, D. G., XING, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. Can. Geotech. J., 31(3): 521 – 532.

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

HARIANTO, T; HAYASHI, S.; DU, Y.; SUETSUGU, D. (2008). Effects of fiber additives on the desiccation crack behavior of the compacted Akaboku soil as a material for landfill cover barrier. Water Air Soil Pollut, 194, p.141–149.

HEIBROCK, G., ZEH, R. M., WITT, K. J. (2004). Tensile strength of compacted clays. Proceedings of the International Conference From Experimental Evidence towards Numerical Modelling of Unsaturated Soils, Weimar, Germany, p. 395 – 412.

- HEINECK, K. S. (2002). Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis. Tese (Doutorado). UFRGS, Porto Alegre, 251p.
- HUSE, K. (2007). Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros. Dissertação (Mestrado). COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 126p.
- IBEIRO, L. S. Caracterização de resíduo de indústria de papel para utilização como material geotécnico. Dissertação (Mestrado). UFRGS, Porto Alegre, 66p.
- IPT/CEMPRE (2000). Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. Coordenação: Maria Luiza Otero D’Almeida, André Vilhena. 2 ed. São Paulo: IPT.
- JOHNSTON, C.D. (1994), Comparative measures of workability of fibre-reinforced concrete and their precision, ASTM Special Technical Publication STP 169-C, Chapter 51: p. 547-561.
- KALKAN, E. (2009). Influence of silica fume on the desiccation cracks of compacted clayey soils. *Applied Clay Science*, 43: p. 296–302.
- KHIRE, M. V., BENSON, C. H., and BOSSCHER, P. J. (1997). Water balance modeling of earthen landfill covers. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 123(8), 744–754.
- KUMAR, A., WALIA, B. S., MOHAN, J. (2006). Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construction and Building Materials*, p. 1-6.
- LAKSHMIKANTA, M. R. (2009). Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils. Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- LAMBE, T.W., WHITMAN, R.V. (1969). *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, 553 p.
- LI, J.H., ZHANG, L.M. (2011). Study of desiccation crack initiation and development at ground surface. *Engineering Geology*, 123(21): p. 347–358.
- LIMA, M. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 336 p.
- LIMA, L.M.Q. (2004). Lixo, Tratamento e Biorremediação. HEMUS, São Paulo, SP, 265p.
- LUKIANCHUKI, J.A. (2007). Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 124p.
- LU, N. (2008). Is matric suction stress variable? *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 134(7): 899-905.
- MAHER, M. H., and HO, Y. C., (1994). Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 120 (8): 1381-1393.
- MANO, E. B. (1991). *Polímeros como Materiais de Engenharia*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP.
- MILLER, C. J.; MI, H., YESILLER, N. (1998). Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (3), p. 677–686.

- MITCHELL, J. K., HOOPER, D.R., CAMPANELLA, R.G. (1965). Permeability of compacted clay. In: Journal soil mechanics and foundations div, 91 (SM4): p. 41-65.
- NATARAJ, M. S., MCMANIS, K. L., (1997). Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers. Geosynthet. Int., 4 (1): p. 65-79.
- OECD (2014). ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT – Municipal waste (indicator). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1787/89d5679a-en>>. Acesso em: jun. 2015.
- OLIVEIRA, M. G. M., LAFAYETTE, K. P.V., TAVARES, Y. V. P., SILVA, S. R., TETI, L.M. E.H., MACEDO, T.F. (2011). Melhoramento de solo com resíduos da construção civil reforçado com fibras de polipropileno. VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, ELECS, Vitória, ES.
- PÉRON, H., DELENNE, J.Y., LALOU, L., EI YOUSOUFI, M.S. (2009). Discrete element modelling of drying shrinkage and cracking of soils. Computers and Geotechnics, 36, p.61–69.
- PINTO, C. S. (2000). Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. São Paulo: Oficina de Textos, 247p.
- QUISSINI, C. S. (2009). Estudo da aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos. Dissertação (Mestrado). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, 83p.
- RAYHANI, M.H.T., YANFUL, E.K., FAKHER, A. (2007). Desiccation-induced craking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran. Canadian Geotechnical Journal, 44, p. 276–283.
- RIBEIRO, B.T., MAGALHÃES, C.A.S., LIMA, J.M., SILVA, M.L.N (2007). Calibração e uso de mini simulador de chuva para estudos de erosão e poluição do solo. In: Boletim Técnico, n. 77. Lavras: UFLA, p.1-17.
- SANTOS, E.C.G. (2007). Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- SANTOS, G. G. D. (2011) Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: o Caso da Incineração e da Disposição em Aterro. Dissertação (Mestrado). COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 193p.
- SANTOS, J. R., SILVA, T.J.L. (2015) Análise da viabilidade de utilização de solo tropical com a adição de fibras pet em sistemas de cobertura de aterros sanitários. Trabalho de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 76p.
- SOUZA, G.S.C.C., RODRIGUES, T.S.N. (2014) Avaliação do ressecamento em camadas de cobertura de aterro sanitário executadas em argila com adição de resíduos da construção civil (RCC). Trabalho de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 55p.
- SOUZA, P. H. V. (2014). Avaliação do potencial de absorção em misturas de RCC e solo natural para execução de *liners* de cobertura de aterros sanitários. Trabalho de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 52p.

- SENA, R.S., CARVALHO, E.B., SOUSA, N.D.C., SANTOS, L.B., MELO, L.F.S., VERANO, B. (2013). Gestão dos resíduos sólidos da construção civil e demolição no Distrito Federal. I Congresso Internacional de Ciências Biológicas, v. 2.
- SCHUBERT, H. (1984). Capillary forces-Modeling and application in particulate Technology. Powder Technology, Elsevier Sequoia S.A:105-116.
- STIRLING, R. A. (2014). Multiphase Modelling of Desiccation Cracking in Compacted Soil. Tese (Doutorado). Newcastle University, School of Civil Engineering and Geosciences, School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle, p. 345.
- TANG, C.; SHI, B.; GAO, W.; CHEN, F.; CAI, Y. (2006). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. In: Geotextiles and Geomembranes, 25, p.194–202.
- TANG, C., SHI, B., LIU, C., SUO, W., GAO, L. (2011 a). Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. In: Applied Clay Science, 52, p. 69–77.
- TANG, C. J., CUI, Y.J., SHI, B., TANG, A.M., LIU, C. (2011 b). Desiccation and craking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles. Geoderma, 166, p. 111-118, 2011.
- US. EPA (2002). Assessment and Recommendations for Improving the Performance of Waste Containment Systems. Washington, DC: EPA. Disponível em: <<http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1001O83.pdf>.> Acesso em: mar. 2014.
- US. EPA (2004). Environmental Protection Agency –Technical Guidance For RCRA/CERCLA Final Covers. Washington, DC: EPA. Disponível em: <<http://nepis.epa.gov/epa/html/dlwait.htm?url=/exe/zypdf.cgi?dockey=p10074pp.pdf>.> Acesso em: mar. 2014.
- VIANA, H. N. L. (2007). Estudo da estabilidade e condutividade hidráulica de sistemas de revestimento convencionais e alternativos para obras de disposição de resíduos. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Brasília, DF, 259p.
- VOGEL, H. J., HOFFMANN, H., ROTH, K. (2005). Studies of crack dynamics in clay soil. Experimental methods, results, and morphological quantification. Geoderma, 125, p. 203–211.
- WILSON, G.W., FREDLUND, D.G., BARBOUR, S.L., 1997. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces. Canadian Geotechnical Journal, v. 34, p. 145–155.
- ZEH, R.; WITT, K. J. (2007). The Tensile Strength of Compacted Clays as Affected by Suction and Soil Structure. MECHANICS OF UNSATURATED SOILS, 2, p.7-9.
- ZOEMBERG, J. G.; McCARTNEY, J. S. (2006). Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment. The Handbook of Groundwater Engineering. 2 ed. p. 34-1 -34-31. Disponível em: [https://ceae.colorado.edu/geotech/mccartneyfiles/ET\\_2007\\_CRC\\_Chapter.pdf](https://ceae.colorado.edu/geotech/mccartneyfiles/ET_2007_CRC_Chapter.pdf). Acesso em mar. 2015.