



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

THAÍSA FERREIRA MACEDO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DA MISTURA
AGREGADO RECICLADO-SOLO-FIBRA-CIMENTO PARA
PAVIMENTAÇÃO**

Recife, PE
2013



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

THAÍSA FERREIRA MACEDO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DA MISTURA
AGREGADO RECICLADO-SOLO-FIBRA-CIMENTO PARA
PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Kalinny Lafayette

Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Gusmão

Recife, PE

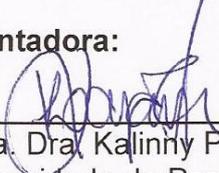
2013

THAÍSA FERREIRA MACEDO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DA MISTURA AGREGADO
RECICLADO-SOLO-FIBRA-CIMENTO PARA PAVIMENTAÇÃO**

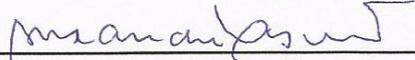
BANCA EXAMINADORA:

Orientadora:



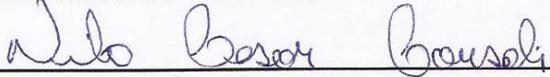
Prof. Dra. Kaliny Patrícia Vaz Lafayette
Universidade de Pernambuco

Co-orientador:

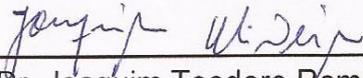


Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco

Examinadores externos:



Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
Universidade Católica de Pernambuco

Examinador interno:



Prof. Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos
Universidade de Pernambuco

Recife, PE
2013

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Renato e Lígia, pelo amor, compreensão, apoio e pelo estímulo nos momentos mais difíceis. Agradeço por sempre estarem ao meu lado.

A minha irmã gêmea Renata por ser minha companheira e me auxiliar quando mais precisava, apesar das diferenças.

Aos meus orientadores, Kalinny Lafayette e Alexandre Gusmão, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante a elaboração da dissertação.

Às minhas avós, Lígia e Margarida, por sempre rezarem por mim, passando tranquilidade e confiança.

Ao grupo docente do Programa de Pós-graduação em Construção Civil por ter contribuído na minha formação profissional.

Aos meus amigos, Gilmar Cabral, Marcos Antônio, Ana Karla e Camilla Pires, por acreditarem em mim e sempre me aconselharem nos momentos que mais precisava.

Aos alunos de iniciação científica, Bruno Carlos, Diogo César, Éverton Rodrigo, Felipe Barbosa, Jonas Bezerra, Laíze Andréa, Lucas Balio, Rodrigo Cavalcanti, ao doutorando Saul Guedes e ao laboratorista Fábio Silva por terem contribuído direta ou indiretamente com a execução dos ensaios de laboratório durante a pesquisa. Sou muito grata por conhecer pessoas com tanta boa vontade de ajudar.

Ao Sr. Severino por me ajudar em alguns ensaios durante a pesquisa e o incentivo a continuar e persistir na carreira acadêmica.

À usina de beneficiamento Ciclo Ambiental por ter fornecido amostras de agregado reciclado para a realização da pesquisa.

Ao Felipe Santana por ter contribuído para a análise mineralógica dos grãos de solo e disponibilidade em ajudar.

MACEDO, Thaísa Ferreira. **Análise do desempenho mecânico da mistura agregado reciclado-solo-fibra-cimento para pavimentação**. Recife: UPE, 2013. 162 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

RESUMO

Nos últimos anos, a construção civil vem apresentando um intenso desenvolvimento, contribuindo bastante para o crescimento econômico do país. Esse aspecto é muito relevante, contudo alguns problemas ambientais são provenientes da grande geração de resíduos da construção civil (RCC), produzidos durante a execução de obras. Além disso, com a constante busca de soluções que proporcionem melhoria das características mecânicas dos materiais, redução de custos e preservação dos recursos naturais, o aproveitamento de resíduos vem se destacando. A combinação de materiais surge como uma alternativa para minimizar o impacto gerado durante a execução e/ou demolição de obras. Levando isto em consideração, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência das fibras de polipropileno (teores de 0,25%, 0,50% e 0,75%) sobre a resistência do compósito. Contudo, ainda não existem metodologias de dosagem dos compósitos baseadas em critérios racionais, com relação a fibras e solo para o agregado reciclado. O programa experimental envolveu ensaios tradicionalmente aplicados em agregados naturais (granulometria, densidade real, limites de Atterberg e forma dos grãos). Após conhecer bem os materiais, foram feitos os ensaios mecânicos (compactação, resistência à compressão simples e Índice de Suporte Califórnia). Os ensaios de compactação provocaram uma mudança na composição granulométrica, mas sua cubicidade permaneceu. As fibras proporcionaram acréscimo de resistência à compressão da ordem de 200%, quando comparado ao compósito de 50% de agregado reciclado e solo, aos 7 dias. No índice de suporte Califórnia (ISC) com imersão, o compósito com 75% de agregado reciclado e solo, resultou em um incremento de resistência superior a cinco vezes em relação ao obtido apenas com o solo. De uma forma geral, os resultados mostraram que o agregado reciclado é apto para uso em camada de pavimentação e poderia ser considerado como uma possibilidade com a implementação de materiais antes só utilizados para reforço de solo.

Palavras-chave: Agregado reciclado, Solo, Fibras de polipropileno.

MACEDO, Thaísa Ferreira. **Analysis of mechanical performance of the mixture recycled aggregate-soil-fiber-cement for paving**. Recife: UPE, 2013. 162 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

ABSTRACT

In recent years, the civil construction has been shown in development, contributing enough to the country's economic growth. This aspect is very relevant, however some environmental problems are from the large generation of civil construction waste (CCW), produced during the execution of works. Besides, the constant search for solutions that provides mechanical improvement at material characteristics, cost reduction and preservation of natural resources, the utilization of waste has been outstanding. The combination of materials appears as an alternative to minimize the impact generated during the execution and / or demolition works. Taking this in consideration, this study aims to evaluate the influence of polypropylene fibers (concentrations of 0.25%, 0.50% and 0.75%) at the resistance of the composite. However there are still no dosage methodologies of composites based on rational criteria, with relation to fiber and soil for recycled aggregate. The experimental program involved tests traditionally applied in natural aggregates (particle size, true density, Atterberg limits and shape of the grains). Once familiar with the materials, there were made the mechanical tests (compaction, compressive strength and California Bearing Ratio). The compaction tests caused a change at the granulometric composition, but its cubicity remained. Fibers provided additional compression resistance of the order of 200%, when compared with composite of 50% recycled aggregate and soil, at 7 days. In California Bearing Ratio (CBR) with imersion, the composite with 75% of recycled aggregate and soil, resulted in an increase in resistance of more than five times that obtained with only the soil. Overall, the results showed that the recycled aggregate is suitable for use in paving layer and could be considered as a possibility to implement materials previously only used for reinforcing soil.

Keywords: Recycled aggregate, Soil, Polypropylene fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Resíduos provenientes de reformas no bairro de São José, Recife-PE	23
Figura 02 – Resíduos de gesso em terreno baldio, Recife – PE	23
Figura 03 – Resíduos de Classe A e Classe B, bairro da Iputinga, Recife – PE.....	25
Figura 04 – Resíduos cerâmicos com resíduos Classe B, bairro da Iputinga, Recife – PE.....	25
Figura 05 – Resíduos de Classe A com resíduos de gesso, bairro da Iputinga, Recife – PE.	26
Figura 06 – Deposição irregular em logradouro público, Recife-PE	33
Figura 07 – Deposição irregular de resíduos de Classe A e B no bairro Benfica, em Recife – PE	34
Figura 08 – Classificação das fibras	39
Figura 09 – Pavimento de concreto de cimento Portland: (a) Estrutura de pavimento-tipo; (b) Revestimento de concreto de cimento Portland sendo executado (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008).....	42
Figura 10 - Pavimento asfáltico: (a) Estrutura de pavimento-tipo; (b) Revestimento asfáltico sendo executado (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008).....	42
Figura 11 – Diferentes usos de materiais reciclados em pavimentação (PETKOVIK <i>et al.</i> , 2004).....	44
Figura 12 – Local da coleta de amostras de solo.....	47
Figura 13 – Usina de beneficiamento – Ciclo Ambiental.....	48
Figura 14 – Fibras de polipropileno (lisa e corrugada).....	50
Figura 15 – Fibras de polipropileno.....	51
Figura 16 – Fluxograma da distribuição dos compósitos de agregado reciclado na mistura.....	52
Figura 17 – Esquema do programa experimental.....	53
Figura 18 – Fluxograma dos ensaios com os diferentes materiais.....	54
Figura 19 – Classificação MCT (NOGAMI E VILLIBOR, 1981).....	56
Figura 20 – Compactação das amostras no ensaio MCT: (a) Retirada de parte do CP após a compactação MCT; (b) corpos de prova submersos para cálculo da perda por imersão.....	57
Figura 21 – Ensaio de absorção do agregado reciclado.....	59

Figura 22 – Etapas do ensaio de equivalente de areia: a) inserção do material na solução de cloreto de cálcio; b) material sendo agitado; c) introdução da solução no frasco; d) leitura da fração de argila.....	60
Figura 23 – Obtenção da forma dos grãos do agregado reciclado referentes a cada fração retida.....	62
Figura 24 – Realização do ensaio de retração.....	63
Figura 25 – Homogeneização dos materiais.....	67
Figura 26 – Fibra adicionada à mistura homogeneizada.....	67
Figura 27 – Moldagem do corpo de prova.....	68
Figura 28 – Corpos de prova submersos por 4 dias para determinação da expansão.....	71
Figura 29 – Resistência à penetração do ensaio de ISC.....	72
Figura 30 – Moldagem do corpo de prova.....	73
Figura 31 – Corpos de prova após a moldagem.....	73
Figura 32 – Ruptura do corpo de prova.....	74
Figura 33 – Composição gravimétrica do RCC.....	76
Figura 34 – Curvas granulométricas do solo, do agregado reciclado e dos compósitos.....	77
Figura 35 – Ábaco com a classificação MCT dos materiais.....	82
Figura 36 – Verificação da retração linear para cada mistura.....	86
Figura 37 – Análise mineralógica do solo com lupa (Aumento – 8x) (a); retida na peneira nº 10 (Aumento 8x) (b).....	87
Figura 38 - Feições microscópicas do solo – Aumento 50x.....	87
Figura 39 – Difratoograma de raio X da fração de solo.....	88
Figura 40 – Análise do agregado reciclado na lupa com evidência de grãos de quartzo.....	88
Figura 41 – Agregado reciclado com evidência de feldspato (microclina).....	89
Figura 42 - Difratoograma de raio X da fração de agregado reciclado.....	90
Figura 43 - Curvas de resistência à compressão simples da mistura AR (50%) + Solo + 2% Cimento e 0,5% Fibra.....	92
Figura 44 - Curvas de compactação do solo e do agregado reciclado.....	93
Figura 45 - Curvas de compactação das misturas sem as fibras.....	93
Figura 46 – Umidade ótima X Agregado reciclado na mistura.....	94

Figura 47 – Peso específico seco máximo X Agregado reciclado na mistura.....	95
Figura 48 - Curvas de compactação com 25% de AR, solo e diferentes teores de fibras.....	98
Figura 49 - Curvas de compactação com 50% de AR, solo e diferentes teores de fibras.....	99
Figura 50 – Curvas de compactação com 75% de AR, solo e diferentes teores de fibras.....	99
Figura 51 – Curvas de compactação com 25% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.....	100
Figura 52 – Curvas de compactação com 50% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.....	101
Figura 53 – Curvas de compactação com 75% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.....	102
Figura 54 – Umidade ótima X Fibra nas misturas de 25% de AR.....	103
Figura 55 – Peso específico seco máximo X Fibra nas misturas de 25% de AR.....	104
Figura 56 – Dispersão da mistura de 50% de AR (Umidade ótima X Fibra).....	106
Figura 57 – Dispersão da mistura de 50% de AR (Peso específico seco máximo X Fibra).....	106
Figura 58 – Dispersão da mistura de 75% de AR (Umidade ótima X Fibra)	108
Figura 59 – Dispersão da mistura de 75% de AR (Peso específico seco máximo X Fibra).....	109
Figura 60 - Granulometria da amostra de 100% de solo.....	111
Figura 61 - Granulometria da amostra de 100% de Agregado Reciclado.....	112
Figura 62 - Granulometria da mistura com 25% de Agregado Reciclado e com adição de solo.....	112
Figura 63 - Granulometria da mistura com 50% de Agregado Reciclado e com adição de solo.....	113
Figura 64 - Granulometria da mistura com 75% de Agregado Reciclado e com adição de solo.....	113
Figura 65 - ISC das misturas sem fibras com e sem imersão.....	116
Figura 66 – Curvas granulométricas da amostra solo (100%) pós-CBR, com e sem imersão.....	119
Figura 67 – Curvas granulométricas da amostra AR (100%) pós-CBR, com e sem imersão.....	120

Figura 68 – Curvas granulométricas da amostra AR (100%) pós-CBR, com e sem imersão.....	120
Figura 69 – Curvas granulométricas da amostra AR (50%) + Solo pós-CBR, com e sem imersão.....	121
Figura 70 – Curvas granulométricas da amostra AR (75%) + Solo pós-CBR, com e sem imersão.....	121
Figura 71 – Variação dos resultados de RCS das misturas aos 7 dias.....	123
Figura 72 – Variação dos resultados de RCS das misturas aos 28 dias.....	124
Figura 73 – RCS com 25% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.....	124
Figura 74 – RCS com 50% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.....	125
Figura 75 – RCS com 75% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.....	125
Figura 76 - Curvas de RCS da mistura com 75% AR + Solo.....	126
Figura 77 - Curvas de RCS da mistura com 75% AR + Solo + Cimento.....	127
Figura 78 - Curvas de RCS da mistura com 75% AR + Solo + Cimento + 0,25% fibra.....	127
Figura 79 - Curvas de RCS da mistura com 75% AR + Solo + Cimento + 0,5% fibra.....	128
Figura 80 - Curvas de RCS da mistura com 75% AR + Solo + Cimento + 0,75% fibra.....	128
Figura 81 - Curvas de RCS da mistura com 25% AR + Solo.....	152
Figura 82 - Curvas de RCS da mistura com 25% AR + Solo + cimento.....	152
Figura 83 - Curvas de RCS da mistura com 25% AR + Solo + cimento + 0,25% fibra.....	153
Figura 84 - Curvas de RCS da mistura com 25% AR + Solo + cimento + 0,5% fibra.....	153
Figura 85 - Curvas de RCS da mistura com 25% AR + Solo + cimento + 0,75% fibra.....	154
Figura 86 - Curvas de RCS da mistura com 50% AR + Solo.....	154
Figura 87 - Curvas de RCS da mistura com 50% AR + Solo + cimento.....	155
Figura 88 - Curvas de RCS da mistura com 50% AR + Solo + cimento + 0,25% fibra.....	155
Figura 89 - Curvas de RCS da mistura com 50% AR + Solo + cimento + 0,5% fibra.....	156
Figura 90 - Curvas de RCS da mistura com 50% AR + Solo + cimento + 0,75% fibra.....	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Quantidade total de RCC coletado no Brasil em 2009 e 2010.....	27
Tabela 02 – Características e propriedades do cimento da Classe 32	49
Tabela 03 - Características das fibras de polipropileno	51
Tabela 04 - Classificação da forma dos grãos	61
Tabela 05 – Percentual de argila, silte e areia nas amostras de solo, agregado reciclado (AR) e das misturas.....	77
Tabela 06 - Valores obtidos para o agregado reciclado e os limites fixados pela NBR 15115 (ABNT, 2004).....	78
Tabela 07 - Classificação dos materiais segundo o SUCS e a TRB.....	78
Tabela 08 – Índices de grupo dos materiais e das misturas.....	80
Tabela 09 – Densidade real das amostras.....	80
Tabela 10 – Limites de Atterberg do agregado reciclado, do solo e das misturas.....	81
Tabela 11 – Teor de Absorção de diversos agregados reciclados.....	83
Tabela 12 – Resultados de equivalente de areia das amostras.....	84
Tabela 13 – Forma dos grãos e as respectivas porcentagens do agregado reciclado.....	85
Tabela 14 – Resultados da retração linear.....	86
Tabela 15 – Valores de pH em água e em KCl das amostras.....	90
Tabela 16 – Teor de sulfatos das amostras.....	91
Tabela 17 – Umidades ótimas e pesos específicos dos materiais sem fibras.....	94
Tabela 18 – Correlações das amostras sem fibras e sem cimento.....	96
Tabela 19 – Correlações das variáveis das amostras sem fibras e com cimento.....	96
Tabela 20 – Umidades ótimas e pesos específicos de diferentes composições e origens.....	97

Tabela 21 – Valores obtidos nos ensaios de compactação do solo, do Agregado Reciclado (AR) e das misturas.....	103
Tabela 22 – Correlações das amostras de 25% de AR com fibras e sem cimento.....	105
Tabela 23 – Correlações das amostras de 25% de AR com fibras e com cimento.....	105
Tabela 24 – Correlações das amostras de 50% de AR com fibras e sem cimento.....	107
Tabela 25 – Correlações das amostras de 50% de AR com fibras e com cimento.....	107
Tabela 26 – Correlações das amostras de 75% de AR com fibras e sem cimento.....	109
Tabela 27 – Correlações das amostras de 75% de AR com fibras e com cimento.....	110
Tabela 28 - Limites fixados pela norma com relação à granulometria após a compactação.....	114
Tabela 29 – Índices de Degradação de Ruiz.....	114
Tabela 30 – Índices de Degradação do DNER – ME 398/99.....	115
Tabela 31 – Resultados de ISC, com e sem imersão, e da expansão dos materiais.....	117
Tabela 32 – Identificação dos parâmetros relativos à NBR 15115 (ABNT, 2004).....	117
Tabela 33 – Valores de Índice de Suporte Califórnia (ISC) obtidos em algumas pesquisas.....	118
Tabela 34 – Índices de Degradação de Ruiz (ID) após o CBR, com e sem imersão.....	122
Tabela 35 – Índices de Degradação (IDp) após o CBR, com e sem imersão.....	122
Tabela 36 – Resistência à Compressão Simples das amostras aos 7 e 28 dias.....	130

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	16
1.1. AGREGADO RECICLADO X SOLO X FIBRA.....	17
1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	18
1.3. OBJETIVOS.....	18
1.3.1. Objetivo Geral.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	19
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC).....	21
2.1.1. Definição.....	21
2.1.2. Classificação.....	22
2.1.3. Geração de resíduos.....	24
2.2. LEGISLAÇÃO.....	27
2.2.1. Legislação internacional.....	27
2.2.2. Legislação nacional.....	29
2.2.3. Legislação municipal.....	30
2.3. IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELO RCC.....	31
2.4. ALTERNATIVAS E VANTAGENS PARA REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS.....	35
2.5. ESTABILIZAÇÃO DE SOLO.....	36
2.5.1. Reforço de solos com fibras.....	37

2.6. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO.....	41
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1. INTRODUÇÃO.....	46
3.2. ESCOLHA DOS MATERIAIS.....	46
3.2.1. Solo.....	46
3.2.2. Resíduo de Construção Civil.....	47
3.2.3. Cimento.....	49
3.2.4. Fibras.....	49
3.2.5. Composição das misturas.....	51
3.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	52
3.3.1. Composição gravimétrica.....	54
3.3.2. Caracterização física.....	54
3.3.2.1. Granulometria	54
3.3.2.2. Densidade real.....	55
3.3.2.3. Limites de Atterberg.....	55
3.3.3. Metodologia MCT.....	55
3.3.4. Absorção.....	57
3.3.5. Equivalente de areia.....	59
3.3.6. Forma dos grãos.....	61
3.3.7. Retração linear.....	62
3.3.8. Caracterização mineralógica e química.....	63
3.3.8.1. Análise mineralógica com lupa e Difração de Raios-X.....	63
3.3.8.2. pH do solo e do agregado reciclado.....	64
3.3.8.3. Teor de sulfatos.....	65
3.3.9. Caracterização mecânica.....	66
3.3.9.1. Compactação.....	66
3.3.9.2. Moldagem dos corpos de prova para compactação.....	66
3.3.9.3. Avaliação da quebra dos grãos.....	68

3.3.9.4. Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR).....	70
3.3.9.5. Compressão simples.....	72
3.3.9.5.1. Preparação e moldagem dos corpos de prova para a compressão simples.....	72
CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	75
4.1. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA	75
4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	76
4.2.1. Granulometria e Índices físicos	76
4.2.2. Densidade real.....	80
4.2.3. Limites de Atterberg.....	80
4.2.4. Metodologia MCT.....	81
4.2.5. Absorção.....	82
4.2.6. Equivalente de areia.....	83
4.2.7. Forma dos grãos.....	84
4.2.8. Retração linear.....	85
4.3. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA.....	86
4.3.1. Análise mineralógica com lupa e difração de raios – X.....	86
4.3.2. Análise do pH dos materiais.....	90
4.3.3. Análise do teor de sulfatos.....	91
4.4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	91
4.4.1. Escolha de fibra.....	91
4.4.2. Compactação.....	92
4.4.2.1. Quebra dos grãos após a compactação.....	110
4.4.3. Índice de Suporte Califórnia.....	115
4.4.3.1. Avaliação da quebra dos grãos pós-CBR.....	118
4.4.4. Resistência à Compressão Simples.....	122
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	131

5.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	134
REFERÊNCIAS.....	136
ANEXO A – Curvas de resistência à compressão simples.....	151

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A construção civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento de um país. Nos últimos anos, a construção civil no Brasil apresenta um quadro bastante favorável devido aos investimentos e às facilidades de crédito para a população. Por meio disso, nasce o “boom” nesse setor, incentivando a cada dia a realização de mais construções e, assim, atender os consumidores.

Ao mesmo tempo, o setor também é responsável por uma parcela significativa do consumo de recursos naturais, incluindo energia e água, além de ser um dos maiores causadores da geração de resíduos sólidos e impactos ambientais (AGOPYAN e JOHN, 2011). Essa situação traz um cenário alarmante, pois os resíduos da construção civil (RCC) são, muitas vezes, descartados em locais ilegais, como córregos de rios, terrenos baldios, beira de estradas, canais e encostas.

Uma das maneiras de minimizar o impacto provocado pelos resíduos é a reciclagem de alguns produtos que, *a priori*, são descartados pelo homem no meio ambiente. Quando utilizados de forma correta, essa abordagem pode ser considerada um fator positivo na economia, visto que a sua inclusão no processo de produção poderá favorecer a redução no consumo de determinados materiais.

A cultura tradicional de que a natureza é fonte inesgotável de recursos materiais e energéticos e possui capacidade infinita de deposição vem sendo lentamente substituída por um modelo com base em ciclos de vida e implantação da gestão de resíduos (SILVA, 2009). Essa questão deve ser desenvolvida com a implantação da reciclagem que contempla o tripé da sustentabilidade: geração de economia, proteção ambiental e desenvolvimento social. Entretanto, não vai alcançar os resultados desejados de sustentabilidade se for um procedimento isolado. Deve fazer parte de um programa bem mais amplo, que englobe a criação da legislação sobre o tema, um plano de gestão municipal, gerenciamento nas obras e estratégias para a recuperação de áreas

degradadas com limpeza, a redução de áreas públicas utilizadas como aterro e uma fiscalização contínua.

A utilização do agregado reciclado como material na confecção de produtos para construção civil já está sendo largamente estudada por várias universidades no País. Tais estudos mostraram que o agregado reciclado tem um bom potencial para diversos usos, como: enchimentos em projetos de drenagem; base e sub-base em pavimentação; agregados para concreto; matéria-prima para cerâmica de revestimento, etc.

No caso da pavimentação, a necessidade de novos investimentos rodoviários e a escassez de recursos tem exigido, cada vez mais, a utilização de materiais que diminuam os custos finais do empreendimento. Entretanto, nem sempre os materiais disponíveis, mesmo misturados com outros, atendem às especificações e às exigências regionais. Dessa forma, com vistas a uma solução do problema, tem-se procurado modificar as propriedades dos solos, usando-se produtos com a finalidade de melhorá-los, conforme critérios técnicos e econômicos.

Em um país com as dimensões do Brasil, as soluções acabam por exigir um tratamento regionalizado. Com isso, as possibilidades de uso de materiais e de técnicas não tradicionais são grandes. Há materiais que têm sido utilizados, às vezes, sem estudos técnicos mais cuidadosos, mas que, se forem analisados de maneira mais detalhada, podem levar a especificações que permitam um uso generalizado e seguro (MOREIRA, 2010).

1.1 AGREGADO RECICLADO X SOLO X FIBRA

O agregado reciclado está condicionado a características específicas da região geradora, e as maiores diferenças com relação aos agregados naturais estão na forma dos grãos e na textura superficial, pois o agregado reciclado tende a ser mais irregular; sua densidade normalmente é menor devido a sua alta porosidade; e absorção de água, que é a diferença mais marcante entre os dois materiais, em se tratando de propriedades físicas. Assim, é função do engenheiro buscar novas tecnologias que proporcionem redução de custos e tornem obras de engenharia mais viáveis.

Uma alternativa pode ser a utilização de agregados reciclados e fibras na matriz do solo, formando um compósito com características adequadas e verificadas por meio de ensaios físicos, mineralógicos e mecânicos, para constituir obras de engenharia. Com relação à utilização das fibras de polipropileno, tem-se observado um número crescente de relatos como, por exemplo, de Feuerharmel (2000), Casagrande (2001 e 2005), Trindade *et al.* (2004 e 2006), Bento (2006), Donato (2003 e 2007), Girardello (2010), Consoli *et al.* (1999, 2004, 2009), Velloso *et al.* (2012) por ser considerada uma das mais promissoras existentes no mercado. O uso das fibras de polipropileno se destaca por oferecer condições satisfatórias de utilização em alguns setores da construção civil. Como aumentam a resistência à tração, a sua aplicabilidade é bastante ampla como material de terraplenos, estabilização de solos e pavimentação.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Segundo dados do IBGE (2010), no ano de 2010, a economia brasileira foi influenciada pelo fortalecimento da demanda interna, com o aumento da renda familiar e maior oferta de crédito, que impulsionaram o resultado do Produto Interno Bruto - PIB brasileiro (7,5%), maior taxa desde 1986 (7,5%). Com isso, a atividade da construção no PIB cresceu 11,6%, atingindo 5,7% de participação. No entanto, paralelamente a esse desenvolvimento, os resíduos das construções, que chegam a mais de 50% do total de resíduos sólidos municipais gerados no Brasil, também crescem, e despertam a busca dos pesquisadores por alternativas que diminuam os impactos gerados pela deposição desses materiais no meio ambiente (SANTOS, 2009).

Nesse contexto, a busca por materiais alternativos para uso na construção civil, principalmente no que diz respeito à construção de pavimentos, é o foco desta pesquisa, visando alavancar soluções que sejam capazes de oferecer ganhos econômicos, qualidade e segurança.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar o comportamento dos agregados reciclados da construção civil, com a inclusão de solo e fibras de polipropileno em

diferentes percentuais, além do cimento, que possam ser utilizados em obras de pavimentação. Buscando, assim, diminuir os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado desses materiais.

1.3.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo proposto, serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- realizar a caracterização física do agregado reciclado com inclusão de solo mediante ensaios tradicionais empregados para agregados naturais;
- verificar a composição química e mineralógica do solo e do agregado reciclado;
- analisar a influência da compactação na variação da granulometria dos materiais;
- avaliar o comportamento mecânico das diferentes composições de agregado reciclado-solo-fibra para utilização na pavimentação.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro consiste de uma **INTRODUÇÃO**, na qual se apresentam o tema de modo mais abrangente, os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento da pesquisa e a sua organização.

O segundo capítulo apresenta a **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**, em que se aborda o tema de resíduos da construção civil, classificação, considerando as legislações nacionais e internacionais e as alternativas de utilizações, como, também, algumas considerações relativas à pavimentação.

O terceiro capítulo trata dos **MATERIAIS E MÉTODOS** utilizados para realizar o trabalho, bem como a caracterização do local da coleta de solo e do agregado reciclado.

O quarto capítulo, de **RESULTADOS E ANÁLISES**, apresenta de forma detalhada os resultados dos ensaios e avalia o comportamento do material com a inclusão de fibras de polipropileno.

No quinto capítulo, das **CONCLUSÕES**, são apresentados os resultados mais importantes da pesquisa e sugere considerações que poderiam contribuir para o melhor entendimento dos materiais estudados em futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na engenharia, a busca por produtos sustentáveis com qualidade e menor custo para as obras da construção civil tem sido cada vez mais frequente. Assim, pesquisas com novos materiais ou compósitos com adição de produtos que até então não eram considerados estão despertando cada vez mais interesse da comunidade científica.

A incorporação de solo, fibra e cimento nos agregados reciclados produz um composto atrativo para regiões com disponibilidade e viabilidade na utilização desses materiais. É interessante salientar que já é uma prática consagrada os estudos de compósito (solo, cimento e fibra) e que a adição de outro material surge como mais uma possibilidade de soluções técnicas, além de minimizar impactos ambientais causados pelo grande volume de resíduos gerados na indústria da construção civil.

Neste capítulo, serão abordados assuntos relacionados aos Resíduos de Construção Civil (RCC), como a legislação vigente, os impactos gerados, as alternativas e vantagens para o reaproveitamento e as aplicações para pavimentação.

2.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)

2.1.1 Definição

De acordo com a Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), definiu-se Resíduos da Construção Civil como:

“materiais 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).

Em novas construções, os resíduos são gerados a partir das perdas físicas provenientes dos processos construtivos de transporte, recebimento e estocagem (PONTES, 2007). Procedimentos produtivos não eficientes e ultrapassados como quebra de placas

cerâmicas ou de concreto, consumo indiscriminado de materiais são fatores que terminam por gerar impactos ambientais (ROTH e GARCIAS, 2009).

Os resíduos originados de demolição são independentes do processo construtivo e da qualidade da obra, pois o mesmo é inerente ao processo de demolição (MORAIS, 2006). A quantificação efetiva dos resíduos é de difícil execução, e existem pelo menos três diferentes métodos de realizá-la: por área construída, pela movimentação de cargas em coletores e através de monitoramento de descargas (PINTO, 1999 apud SANTOS, 2007).

O desenvolvimento de técnicas construtivas mais sustentáveis interfere na quantidade de resíduos gerados por novas construções. Em novas edificações, a geração de resíduos no Brasil é de 300 kg/m², cerca de três vezes mais em relação a países desenvolvidos, que é de apenas 100 kg/m² (MARIANO, 2008).

2.1.2 Classificação

Os Resíduos da Construção Civil (RCC) são classificados pela Resolução n° 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) da seguinte forma:

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

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto, como mostra a Figura 01;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras.



Figura 01 – Resíduos provenientes de reformas no bairro de São José, Recife - PE.

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e gesso (esse último foi acrescentado pela Resolução CONAMA n° 431/2011 e retirado da Classe C), como apresentado na Figura 02.



Figura 02 – Resíduos de gesso em terreno baldio, Recife - PE.

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;

IV - Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes e óleos ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais, bem como telhas e demais

objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde, alterado pela Resolução do CONAMA n° 348/2004.

2.1.3 Geração de resíduos

Atualmente, uma das mais polêmicas questões levantadas pela sociedade é sobre a poluição do meio ambiente. Não sendo diferente para a questão da geração de resíduos sólidos, entre eles os RCC (CORNELI, 2009).

Com relação a geração de RCC, a União Europeia gera em torno de 500 milhões de toneladas por ano, representando cerca de 25% a 30% de todos os resíduos produzidos (EUROSTAT, ENVIRONMENT AND ENERGY, 2010).

Esses altos índices de geração de resíduos provenientes da construção civil são fatores preocupantes, podendo acarretar em esgotamento de aterros e poluição, quando misturados aos resíduos domésticos.

Uma das causas da grande geração de RCC no cenário nacional está relacionada à falta de planejamento entre as fases de projeto e execução das obras, trazendo com isso, uma maior probabilidade de mudanças durante a fase de execução (CORNELI, 2009). As Figuras 03 e 04 mostram formas de disposição inadequada de RCC na cidade do Recife-PE. A Figura 05 apresenta a falta de segregação dos resíduos Classe A (cerâmicos e argamassa) e Classe B (gesso).



Figura 03 – Resíduos de Classe A e Classe B, bairro da Iputinga, Recife – PE.



Figura 04 – Resíduos cerâmicos com resíduos Classe B, bairro da Iputinga, Recife – PE.



Figura 05 – Resíduos de Classe A com resíduos de gesso, bairro da Iputinga, Recife – PE.

Geralmente, os RCC são provenientes de obras de construção e demolição. Isso ocorre pela falta de cultura do reaproveitamento dos resíduos e pelo desconhecimento por parte do corpo técnico do setor (ERPEN, 2009). Deve-se levar em conta, também, que há falta de fiscalização e descaso por parte dos órgãos públicos com relação aos aspectos dos resíduos produzidos, principalmente pelos pequenos geradores.

Além disso, os resíduos são gerados durante a construção, principalmente, devido às perdas de materiais em consequência da aplicação do sistema tradicional ou rudimentar, como por exemplo, técnicas e procedimentos já utilizados com frequência, que são executados nas obras (GUSMÃO, 2008).

Tendo em vista tais circunstâncias, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) fizeram um levantamento do índice de coleta de resíduos em 2010. O estudo revelou um aumento de 8,7% em relação ao ano de 2009; e, somente em 2010, mais de 99 mil t/dia de RCC foram coletados no País (ABRELPE, 2010). A Tabela 01 apresenta a quantidade de RCC coletada no Brasil nos anos de 2009 e 2010.

Tabela 01 – Quantidade total de RCC coletado no Brasil em 2009 e 2010.

Região	2009	2010		
	RCC coletado (t/dia)/Índice (kg/hab/dia)	População urbana (hab)	RCC coletado (t/dia)	Índice (kg/hab/dia)
Norte	3.405 / 0,297	11.663.184	3.514	0,301
Nordeste	15.663 / 0,412	38.816.895	17.995	0,464
Centro-Oeste	10.997 / 0,918	12.479.872	11.525	0,923
Sudeste	46.990 / 0,632	74.661.877	51.582	0,691
Sul	14.389 / 0,630	23.257.880	14.738	0,634
Brasil	91.444 / 0,576	160.879.708	99.354	0,618

Fonte: ABRELPE (2010).

2.2 LEGISLAÇÃO

2.2.1 Legislação Internacional

Com o intuito de preservar a natureza e garantir a correta gestão do RCC, é estabelecida uma variedade de códigos e regulamentações ambientais. A grande maioria dessas leis visa a minimização e o controle do RCC (ORTIZ, PASQUALINO, CASTELLS, 2010).

A primeira legislação da União Europeia (UE) surgiu em 1975 com a regulamentação dos resíduos em geral (Diretiva 75/442, do Conselho Econômico Europeu). Essa legislação garantia a eliminação dos resíduos que causassem riscos à saúde da população e do *habitat* natural, além de estimular a reutilização de resíduos, com o intuito de preservar a natureza (MÁLIA, 2010).

Em 1991, foi publicada a Diretiva 91/156/CEE (Comunidade dos Estados Europeus), que vem complementar a primeira Diretiva de 1975, visando prevenir a geração dos resíduos, assegurar que cada estado-membro se torne autossuficiente quando se refere a eliminação dos resíduos, além dos objetivos previstos na primeira diretiva (MÁLIA, 2010).

Essa diretiva é um instrumento jurídico de que as instituições europeias dispõem para aplicarem suas políticas. É utilizada, principalmente, no âmbito da harmonização das legislações nacionais e é caracterizada pela sua flexibilidade de utilização, estabelecendo uma obrigação de resultado, mas deixa aos estados-membros a liberdade de escolherem os meios para alcançá-lo (Sínteses da legislação da UE, 2012).

Ainda com relação às diretivas europeias sobre a política dos resíduos, foi publicada, em 2008, a Diretiva 2008/98/EC (Official..., 2012), que foca os seguintes aspectos:

a) minimizar o impacto negativo da produção e gestão de resíduos na saúde humana e no ambiente; harmonizar a legislação ao nível europeu, esclarecendo as definições usadas, assim como a distinção entre valorização e eliminação, entre resíduo e não resíduo; reduzir a utilização de recursos e propiciar a aplicação prática da hierarquia de gestão de resíduos;

b) prevenir a geração de resíduos deverá constituir a primeira prioridade, e a reutilização e reciclagem, deverão ter prioridade em relação à valorização energética dos resíduos.

Com a publicação dessa diretiva, há uma modificação da política, que, primeiramente, baseava-se na eliminação de resíduos e posteriormente passou a favorecer a utilização desses resíduos por meio de sua reciclagem, visando diminuir a exploração dos recursos da natureza.

Ainda que não existam leis comunitárias próprias, países da União Européia tomaram iniciativas voltadas à prevenção e ao reaproveitamento de RCC. Referindo-se a tais fatores, Mália (2010) descreve um panorama dos RCC de alguns países europeus, como o Reino Unido e Portugal.

No Reino Unido, em 2008, foi publicada uma nova regulamentação, na qual os planos de gestão de RCC são obrigatórios na obra para todos os projetos de construção que custem mais de € 318.520,81.

Já em Lisboa (Portugal), o decreto-lei nº 46/2008 exige que seja estimada a quantidade de resíduos produzidos no global da obra e, além disso, a quantidade de RCC seja

dividida por fluxo específico de resíduos, identificando-os segundo o código da Lista Europeia de Resíduos (LER).

2.2.2 Legislação Nacional

As leis ambientais brasileiras, durante muito tempo, preocuparam-se mais com as questões relacionadas à preservação de espécies em extinção, aos desmatamentos, entre outras. A Constituição Federal de 1988, primeiro instrumento legal sobre análise na área de resíduos sólidos, em seu artigo 30, estabelece como competência do município organizar e prestar diariamente ou sob regime de concessão ou permissão os serviços públicos de interesse local.

Somente a partir de janeiro de 2003, quando entrou em vigor a Resolução n° 307 do CONAMA, é que o País passou a ter um dispositivo legal capaz de tratar questões específicas do RCC, um passo importante no sentido de implementar diretrizes para reduzir os impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção.

A Lei 12.305, aprovada no dia 2 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que impõe a existência de um plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos a ser criado e implementado por todos os municípios, salvo algumas exceções. Esse plano deve conter:

- I. diagnóstico da situação dos resíduos sólidos gerados no respectivo território, contendo a origem, o volume, a caracterização dos resíduos e as formas de destinação e disposição final adotadas;
- II. identificação de áreas favoráveis para disposição final ambientalmente adequada de rejeitos, observando o plano diretor de que trata o § 1° do art. 182 da Constituição Federal (1988) e o zoneamento ambiental, se houver;
- III. identificação das possibilidades de implantação de soluções consorciadas ou compartilhadas com outros municípios, considerando, nos critérios de economia de escala, a proximidade dos locais estabelecidos e as formas de prevenção dos riscos ambientais;

IV. identificação dos resíduos sólidos e dos geradores sujeitos a plano de gerenciamento específico nos termos do art. 20 ou ao sistema de logística reversa na forma do art. 33, observadas as disposições desta lei e de seu regulamento, bem como as normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);

V. metas de redução, reutilização, coleta seletiva e reciclagem, entre outras, com vistas a reduzir a quantidade de rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada.

A partir de agosto de 2012, foi instituído que os municípios que necessitarem de ajuda financeira do governo federal, para o destino adequado dos resíduos sólidos, devem ter o Plano Municipal de Gestão Integrada. A data-limite estabelecida será 2014, para que todos os lixões sejam eliminados. Esse Plano Municipal de Gestão Integrada inclui o tratamento do lixo e a reciclagem. Até então, cidades que não tinham esse plano podiam contar com o governo federal para melhorar a coleta e construir aterros.

2.2.3 Legislação Municipal

Além das leis e decretos municipais que tratam dos resíduos sólidos urbanos, existem aquelas que se referem ao transporte e à disposição dos Resíduos da Construção Civil, algumas cidades brasileiras possuem legislação própria para a questão do RCC.

Na cidade do Recife, o Decreto nº 18.082/98, que regulamenta a Lei nº 16.377/98, trata do transporte e da disposição de RCC e outros resíduos que não possuem coleta regular. Dentre os muitos pontos abordados por essa lei, destaca-se a proibição da utilização de áreas de particulares para o destino final dos RCC sem prévia autorização da Empresa Municipal de Limpeza Urbana (EMLURB).

A partir de 2002, com a Resolução nº 307 do CONAMA, alguns municípios como Recife, Belo Horizonte e São Paulo, elaboraram leis e decretos voltados para os RCC.

No Recife, foi elaborada a Lei nº 17.072, de 04 de janeiro de 2005, que estabelece as diretrizes e os critérios para o Programa de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Podem-se ressaltar os seus artigos:

- a definição do grande gerador como aquele que gera um volume de RCC superior a 1,0 m³/dia, ficando os demais enquadrados como pequenos geradores;
- a proibição da disposição de RCC, em qualquer volume, e resíduos provenientes da poda e jardinagem, em volume superior a 100 litros/dia, para a coleta domiciliar regular (tal artigo altera o volume estabelecido pela Lei 16.337/98, que era de 300 litros/dia);
- a obrigatoriedade da classificação, separação e identificação dos resíduos gerados em atividades de construção no local de origem, em obediência ao que determinam as resoluções do CONAMA;
- a obrigatoriedade de obtenção da licença de operação e, para tanto, submeter à aprovação do órgão da limpeza urbana deste município, o respectivo projeto de gerenciamento de RCC, para cada uma das unidades instaladas, tendo como objetivo estabelecer os procedimentos necessários para o manejo e a destinação ambiental adequados dos resíduos gerados na atividade;
- o projeto de gerenciamento de RCC comporá o acervo de documentos apresentados na solicitação de alvará junto à secretaria de planejamento;
- a criação de instalações para o recebimento dos resíduos (Posto de Recebimento de Resíduos - PRR) para atender os pequenos geradores, com facilidade de acesso e boas condições de tráfego, abarcando todas as regiões político-administrativas.

2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELO RCC

Segundo a Resolução n° 001 do CONAMA, de 23 de setembro de 1986, a expressão *impacto ambiental* é definida como:

“Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais” (CONAMA, 1986).

A indústria da construção civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social. Por outro lado, comporta-se ainda como uma geradora de impactos ambientais, dentre os quais a utilização de grandes quantidades de recursos naturais, a poluição atmosférica, o consumo de energia e a geração de resíduos (PIOVEZAN JÚNIOR, 2007). Além desses, ainda existe grande desperdício no uso dos materiais, mostrando que a construção civil é uma fonte geradora de resíduos em potencial (ROTH e GARCIAS, 2009).

Vedroni (2007) descreve o fato de que a indústria da construção civil gera impactos ao meio ambiente ao longo de praticamente toda a sua cadeia produtiva e que afeta ar, solo, lençol freático, animais, plantas e *habitat* humano.

Lima (2008) menciona que os resíduos gerados no setor da construção civil têm aumentado anualmente devido a um indicativo alto de perdas de materiais de construção. Esse setor tem uma grande responsabilidade em aliar suas atividades produtivas com os requisitos que se encaminham ao desenvolvimento sustentável, promovendo harmonia entre o desenvolvimento e o meio ambiente através do adequado manejo dos recursos naturais, da preservação ambiental, do tratamento dos resíduos gerados, além da manutenção das boas condições de vida futuras.

O agregado reciclado possui bom potencial para uso na construção civil, e seu uso representa uma redução dos impactos ambientais, pois diminui a retirada em torno de 20% a 50% dos recursos naturais (LIMA, 2005). A exploração desses recursos leva a uma procura por novas jazidas minerais, as quais estão cada vez mais difíceis de serem exploradas devido à escassez dos recursos naturais e ao maior rigor por parte dos órgãos ambientais na concessão de licenciamentos (NÓBREGA e MELO, 2009).

Uma situação relevante a ser considerada sobre a deposição irregular de resíduos é a limpeza frequente dos pontos de destinações clandestinas, que representam altos custos para a economia pública, contribuindo para a consolidação desses locais, tornando-os pontos críticos de deposição (UWAI, 2009). Fiscalizações e punições insuficientes e ineficazes tornam esse problema ainda mais grave.

Uma parcela importante dos RCC são reciclados pelas empresas privadas, o que se configurou em um próspero e crescente ramo de negócios (AGOPYAN E JOHN, 2011). Segundo a ABRELPE (2010), foram recolhidos, em 2010, 31 milhões de toneladas de resíduos, correspondendo a 1/3 do total, fração que em geral havia sido lançada em logradouros públicos, como mostra a Figura 06.



Figura 06 – Deposição irregular em logradouro público, Recife - PE.

Para Vedroni (2007), a inexistência de políticas públicas que ordenem os fluxos da destinação de RCC nas cidades, associada ao descompromisso dos geradores, tem como consequência a deposição irregular em áreas de proteção permanente, próximo de mananciais ou em logradouros, causando impactos ambientais.

Mesmo aparentemente não sendo consideradas perigosas, algumas frações dos resíduos da construção - como solventes, óleos, inclusive os que contêm amianto - são classificados como tal e exigem atenção (ÂNGULO et al., 2009). O gesso, por exemplo, atrapalha no processo de reciclagem, podendo apresentar elevados níveis de contaminação quando colocados indevidamente em aterros, não permitindo o controle dos impactos associados e reduzindo o tempo de utilização desses aterros (MONTEIRO et al., 2010). A Figura 07 mostra a deposição irregular de resíduos de Classe A e B localizada no bairro Benfica em Recife – PE.



Figura 07 - Deposição irregular de resíduos de Classe A e B no bairro Benfica, em Recife – PE.

A vida útil dos aterros diminuem pelos grandes volumes de resíduos domiciliares e RCC que esses ocupam, mesmo não sendo permitido após a Resolução nº 307 do CONAMA a presença desses últimos, os RCC. Tal fato torna-se uma questão difícil, pois isso pode recorrer às deposições irregulares. Além disso, essa prática promove outros tipos de custos a longo prazo, como a necessidade de implantar aterros em novas áreas cada vez mais distantes do local de geração, aumentando, assim, o custo com o transporte dos resíduos (NUNES, 2004).

Por muitos anos, no Recife, os resíduos tinham como destino o aterro da Muribeca, que atualmente se encontra desativado por ter atingido seu limite máximo de capacidade. Hoje, os rejeitos gerados na Região Metropolitana do Recife (RMR) estão sendo encaminhados para dois aterros privados: o Centro de Tratamento de Resíduos Sólidos – Candeias (CTR-Candeias), localizado no município de Jaboatão dos Guararapes, e o Centro de Tratamento de Resíduos Sólidos – Pernambuco, localizado no município de Igarassu.

Lima (2010) cita que, diante do grande volume gerado pela indústria da construção civil e dos resíduos depositados em aterros ou em locais inadequados, a aplicação da política dos 3Rs (reduzir, reutilizar e reciclar) aparece como uma alternativa não só viável, mas necessária para consolidação de uma comunidade sustentável. Como a redução implica adequações de processos construtivos, é muitas vezes técnica e economicamente inviável para a maioria das pequenas e médias indústrias.

A reciclagem surge como um elemento fundamental na busca do desenvolvimento sustentável, pois transforma um material, aparentemente sem uso, em uma fonte de matéria-prima que serve tanto para obras prediais quanto residenciais. Isso traz diversos benefícios, como para a preservação dos recursos naturais, a redução do consumo de energia, a geração de empregos e ainda soluciona os problemas que os municípios enfrentam com o gerenciamento desses materiais (FIGUEIREDO, 2011).

2.4 ALTERNATIVAS E VANTAGENS PARA REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS

No Brasil, a taxa de reciclagem, uma atividade que teve início por órgãos públicos municipais, ainda é muito baixa, embora esteja crescendo com a entrada de empresas privadas. Hoje em dia, o principal mercado é o de obras geotécnicas, com destaque para a base de pavimentos, embora mesmo nessa aplicação ainda se enfrentem consideráveis resistências no mercado (AGOPYAN E JOHN, 2011).

Atualmente, existe maior facilidade de encontrar pesquisas relacionadas a caracterização do RCC, suas formas de reutilização e possibilidades de reciclagem, tais como o seu uso como agregado para concreto, em pavimentação como base ou sub-base, na fabricação de artefatos de concreto como blocos pré-moldados, dentre outras (GUERRA, 2009).

Sales e Santos (2009) analisaram as características físicas e mecânicas de blocos para alvenaria sem função estrutural produzidos com agregado reciclado. Esse agregado foi beneficiado no próprio canteiro da obra, e os blocos foram feitos na fábrica de pré-moldados da mesma empresa. Foram produzidos blocos com dois traços em massa (1:12 e 1:13) e com consumo de cimento similar ao aplicado na fabricação dos blocos convencionais. Para os dois traços produzidos com agregado reciclado, os resultados obtidos quanto à resistência à compressão foram superiores em quase 50%, se comparados aos resultados dos blocos produzidos com agregado natural.

Essas vantagens e alternativas para o reaproveitamento dos RCC são importantes no âmbito econômico, social e ambiental, como:

- substituição de matéria-prima por entulho;

- diminuição da produção de CO₂ (dióxido de carbono) gerada por novos materiais que sofreram modificações antes de serem usados nas construções;
- preservação das reservas de minerais não renováveis;
- redução de áreas de aterros de rejeitos, proporcionando uma diminuição dos impactos oriundos da deposição numerosa e volumosa de RCC;
- diminuição dos pontos de descarte irregulares (causadores do agravamento das enchentes urbanas e da poluição visual);
- redução dos custos com gerenciamento de resíduos.

A segregação dos resíduos em diferentes fases permite também controlar os impactos diminuindo o custo da gestão, pois viabiliza a comercialização de frações como plásticos, metais e papel e reduz os riscos à saúde associados à reciclagem.

Segundo Silva (2009), a reciclagem de materiais que seriam considerados resíduos é de fundamental importância para a preservação do meio ambiente e, conseqüentemente, dos recursos naturais.

2.5 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Estabilizar um solo é realizar uma alteração da matriz, a partir de uma modificação de natureza física (estabilização granulométrica), físico-química (uso de misturas ou compósitos, como, por exemplo, solo-cimento-fibra), química (adição de cal, cimento, etc) ou mecânica (compactação), de maneira a permitir a estabilização do solo entre os limites de sua utilização e ainda fazer com que essa estabilidade permaneça sob as ações das cargas externas e das mudanças climáticas variáveis (GUEDES, 2011).

Segundo Pessoa (2004), o uso da técnica de estabilização do solo de forma correta reduz o tempo para execução da obra, possibilita a industrialização dos processos construtivos, trazendo, com isso, uma economia para o empreendimento, devendo ser analisado cada caso. Para uma aplicação correta do método de estabilização do solo que será utilizado, é necessário identificar quais propriedades do solo deverão ser melhoradas (SILVA, 2007).

As principais justificativas para a escolha pela estabilização de solo, conforme Cristelo (2001), são as seguintes:

- a importância em elevar um local com terrenos lodosos ou arenosos, de maneira a viabilizar o crescimento econômico da região;
- garantir uma boa utilização de estradas secundárias e rurais;
- fornecer bases para pavimentos de qualidade;
- influir como forma de absorção de ruídos, principalmente em zonas urbanas;
- facilitar o tráfego em certas regiões, em caso de emergências militares ou outras.

Contudo, a aplicação considerada principal da estabilização de solos é na execução de bases, sub-bases de estradas e aeródromos, além de estradas de terra.

2.5.1 Reforço de solos com fibras

Na engenharia civil, é um desafio a busca de materiais e técnicas que possam melhorar a qualidade das obras de pavimentação, pois têm sido frequentes os debates sobre as condições das estradas no País (FERNANDES et al., 2010). Dessa maneira, o reforço de um solo com fibras e agregado reciclado apresenta-se como uma possibilidade dentre as soluções técnicas para os engenheiros.

Reschetti (2008) relata que uma das formas de estabilização com a adição de novos materiais é através das inclusões que melhoram fisicamente o solo, que podem ser divididas em três tipos:

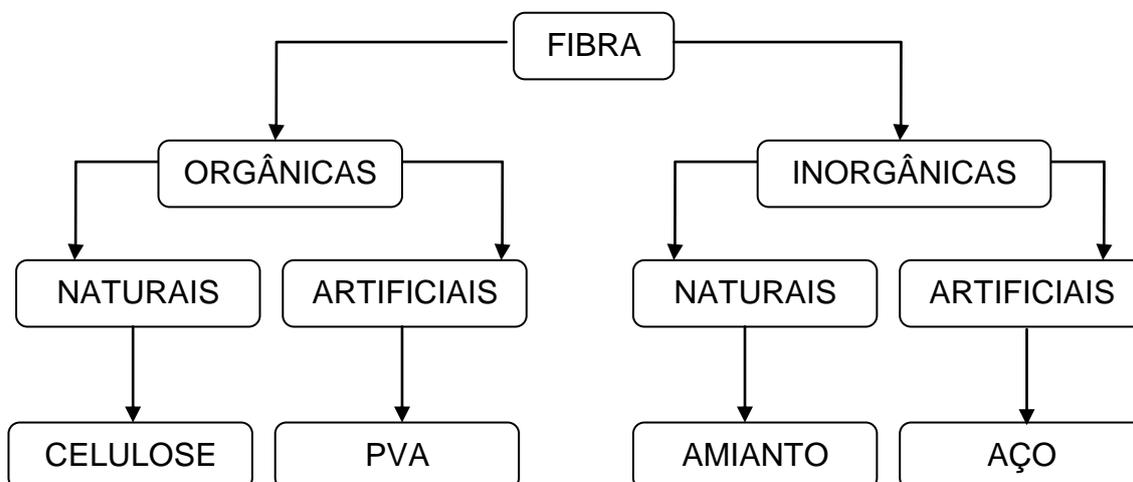
- I. inclusão de natureza unidimensional (direcional) – as tensões são transmitidas para o reforço pelo atrito superficial que será acentuado pela rugosidade superficial;

- II. inclusões bidimensionais - a interação solo-reforço pode ser desenvolvida similarmente por mecanismos de atrito e de adesão ou atrito, adesão e resistência passiva (TEODORO, 1999);
- III. inclusões de natureza tridimensional (aleatória) – a transferência de esforços da matriz com o reforço se dá apenas pelo atrito superficial, tal como a inclusão unidimensional.

A técnica de reforço de solo com fibras já é muito conhecida no meio da engenharia civil, representando o método mais antigo e, tecnicamente, a mais intrigante de todas as técnicas que são utilizadas na engenharia civil (CRISTELO, 2001).

A inclusão de fibras, quando do início de suas aplicações no solo, dava-se de maneira discreta e orientada, sendo hoje utilizadas inclusões aleatórias na massa de solo. A utilização dessas fibras no solo, o chamado *fibrossolo*, possui diversas aplicações em vários tipos de obras de engenharia, como reforço de solos para apoio de fundações rasas, barreiras de vedação e capas de proteção de aterros sanitários (BUENO, 2003).

Com o avanço nos estudos do comportamento dos solos, verificou-se que o reaproveitamento de certos materiais como as fibras de (PET), polipropileno, assim como as raspas de pneu, são de fundamental importância (Silva, 2007), pois estes são encontrados facilmente e em quantidades consideráveis. A Figura 08 apresenta a classificação das fibras.



Fonte: SILVA, G.; SILVA, M. G.; AGOPYAN, V. (2003).

Figura 08 - Classificação das fibras.

Existe no mercado uma grande variedade de fibras, as quais podem ser utilizadas como elemento de reforço de materiais compósitos. A diferença entre elas se justifica pela composição física e química, assim como pelas propriedades mecânicas e de resistência que apresentam quando expostas aos meios agressivos (SILVA, 2007). Para selecionar qual a melhor fibra a ser utilizada e que se adapta de maneira mais satisfatória, é preciso, antes de tudo, avaliar e conhecer através de estudos e ensaios as suas características, pois cada fibra possui sua singularidade (SPECHT, 2000).

Para Silva (2004), as fibras são divididas, de acordo com sua elasticidade, em fibras de alto e baixo módulo; tendo, com isso, aplicações diferentes. As fibras de alto módulo possuem a capacidade de melhorar a resistência do compósito, principalmente em relação à tração. Já as fibras de baixo módulo oferecem melhores resistências ao impacto e permitem ao compósito trabalhar no estágio pós-fissurado, proporcionando um aumento considerável de sua tenacidade, quando aplicadas em teores adequados.

Segundo John (1999), as fibras desempenham uma função importante, pois melhoram as características das matrizes frágeis, quando estas são submetidas a esforços dinâmicos. A ação dessas fibras aumenta a capacidade de carga do solo e reduz sua compressibilidade. Dessa forma, é necessário o conhecimento de alguns parâmetros para aplicação correta e para a escolha da fibra na utilização no compósito, como:

- durabilidade: capacidade que um produto possui de manter suas condições de serviço durante sua vida útil, podendo ser avaliada em anos ou pela resistência a agentes que possam alterar seu desempenho;
- vida útil: período de tempo em que um material mantém seu desempenho acima dos limites aceitáveis;
- degradação: é o processo em que o material sofre transformações irreversíveis que influenciam na perda da qualidade;
- agentes de degradação: são ações físicas, químicas, ambientais ou biológicas que causam degradação do material;

- mecanismos de degradação: são as formas como os agentes causam as alterações que levam a perdas nas propriedades esperadas do material;
- indicadores de degradação: são os indicativos utilizados para quantificar os mecanismos de degradação, ou seja, que expressam as variações de desempenho de um produto durante o seu uso.

As vantagens técnicas do uso de estruturas de solo reforçado são diversas, podendo ser relatadas como um método de construção prático, tornando possível a construção de estruturas com inclinações acentuadas, pois não necessita de mão de obra especializada e equipamentos caros. Precisa-se de um espaço relativamente pequeno em frente à estrutura para a construção. Permite maior tolerância com a deformação do solo de fundação e possibilita vários tipos de acabamentos da face (SANTOS, 2007).

Nos Estados Unidos, a utilização das fibras está bem disseminada, essencialmente quando se trata de área de compósitos. Sua aplicação é de grande importância em pavimentos industriais, pois são utilizadas em substituição às telas metálicas, cujo papel é controlar a fissuração por retração. Com isso, melhora a produtividade e o custo é otimizado. Outras aplicações destas fibras em elementos constitutivos de engenharia dizem respeito ao reforço de solo, ao combate à fissuração por retração do concreto, a coberturas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles (SILVA, 2007).

Trindade *et al.* (2004) observaram que a introdução de fibras de polipropileno de distribuição aleatória foi responsável por melhorar a resistência mecânica (resistência à compressão simples e resistência ao cisalhamento) do solo argiloso, fazendo com que esse compósito (mistura de solo e fibra) tivesse uma melhor qualificação técnica para a aplicação em obras de engenharia civil.

Fernandes *et al.* (2010), analisando o comportamento de um solo argiloso com fibras de polipropileno, verificaram que os valores de módulo resilientes aumentaram no caso de adição de 1% de fibra lisa e 0,5% de cimento, em relação à mistura de solo natural e cimento.

Trindade *et al.* (2006) mostram que o uso das fibras de polipropileno num solo arenoso aumentou a resistência à compressão diametral não confinada na ordem de 110% e na coesão 560%, podendo se tornar uma alternativa técnica para projetos de construções de estradas florestais.

Ferreira e Thomé (2011) verificaram que a adição de 50% de RCC no solo apresentou ótimo resultado de resistência e, através de ensaios de placa, ocorreu um aumento da carga de ruptura em 264%. Houve também um aumento nos módulos de elasticidade do solo-RCC quando comparado ao solo natural.

2.6 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO

As estruturas de pavimentos são sistemas de camadas assentes sobre uma fundação chamada subleito. O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008). Na engenharia rodoviária, são utilizadas estruturas de pavimentos rígidos e flexíveis.

Os pavimentos rígidos são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland (Figura 09) sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento (chamada sub-base), assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito.

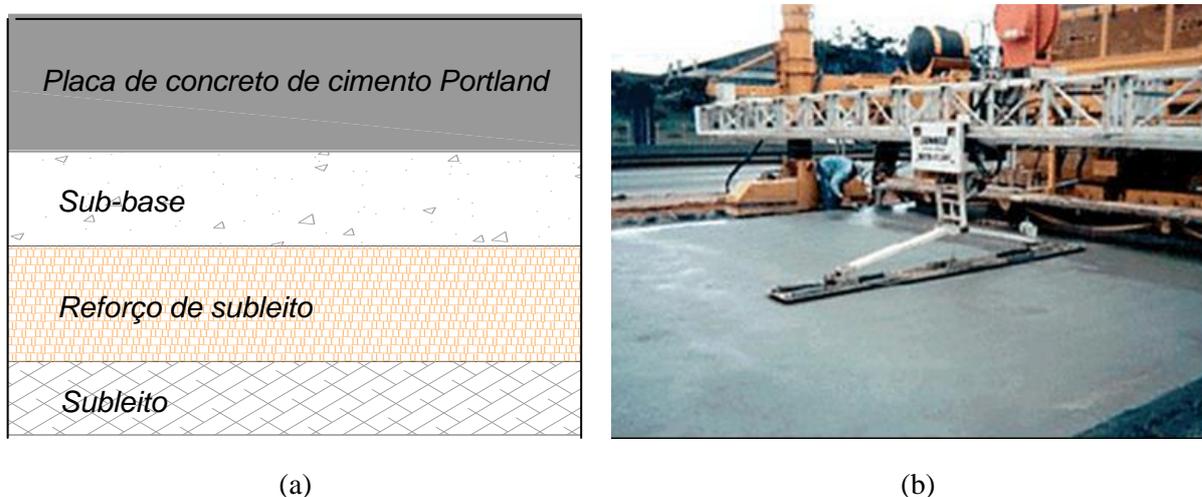


Figura 09 – Pavimento de concreto de cimento Portland: (a) Estrutura de pavimento-tipo; (b) Revestimento de concreto de cimento Portland sendo executado (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os pavimentos flexíveis, em geral associados aos pavimentos asfálticos, são compostos por uma camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, Figura 10. Essas estruturas de pavimento são projetadas para resistirem a numerosas solicitações de carga, dentro do período de projeto, sem que ocorram danos estruturais fora do aceitável e previsto.

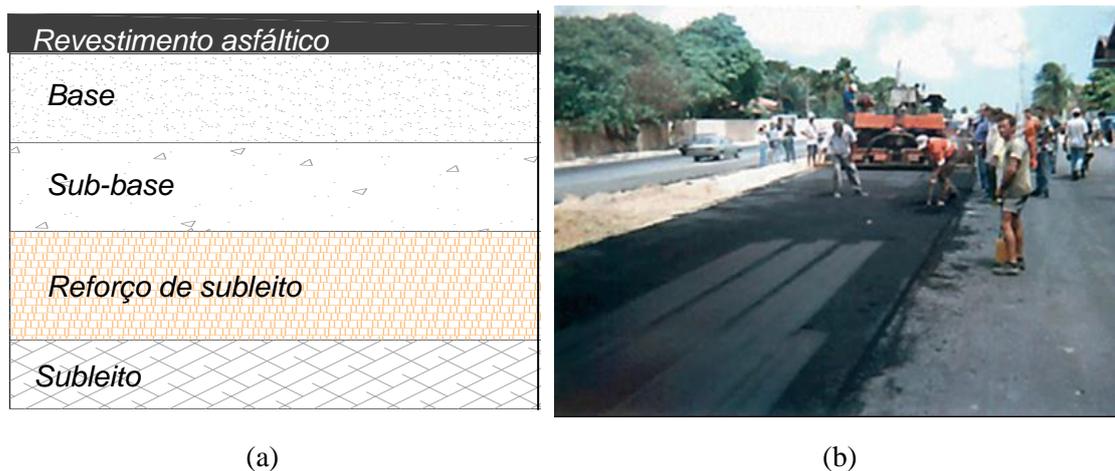


Figura 10 – Pavimento asfáltico: (a) Estrutura de pavimento-tipo; (b) Revestimento asfáltico sendo executado (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Pretendendo-se dar um destino adequado a determinados materiais, pela facilidade de se obter e pela existência de tecnologias de reciclagem, o uso de agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil tem crescido nos últimos anos em várias cidades do Brasil e do exterior. Visto que seus resultados são convincentes, por ser possível a substituição de materiais naturais por materiais alternativos, principalmente na pavimentação de vias de baixo volume de tráfego, podendo ser empregados em reforços do subleito ou das sub-bases, desde que atendam às especificações da norma ABNT 15115 (2004).

Bernucci, Leite e Motta (2005) relatam que desde a década de 1980, o Brasil vem realizando experiências com o uso de RCC em pavimentação, contudo sem estudos mais específicos. O controle tecnológico necessário para o emprego efetivo desses materiais depende de estudos que forneçam parâmetros para sua avaliação. No início da década de 1990, foi instalada a primeira recicladora no Brasil pela Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP) e, no final de 2004, teve início a pavimentação do

sistema viário do novo *campus* da USP na zona leste (USP-Leste), que utilizou pavimento ecológico com o emprego de materiais reciclados em toda a sua estrutura.

O aproveitamento desse material em pavimentação apresenta muitas vantagens como a utilização de quantidade significativa de material reciclado, tanto na fração miúda quanto na graúda, simplicidade de processos de execução do pavimento e de produção de agregado reciclado (CARNEIRO *et al.*, 2001).

Fernandes (2004) relata que um aspecto que dificulta a utilização do agregado reciclado é a sua heterogeneidade. Entretanto, Petkovic *et al.* (2004) afirmam que as estruturas de uma obra rodoviária podem ser de materiais recicláveis, como: revestimento, base, sub-base, reforço de subleito, drenagens sub-superficiais para controle do nível freático e barreiras antirruídos. A Figura 11 mostra as estruturas citadas.

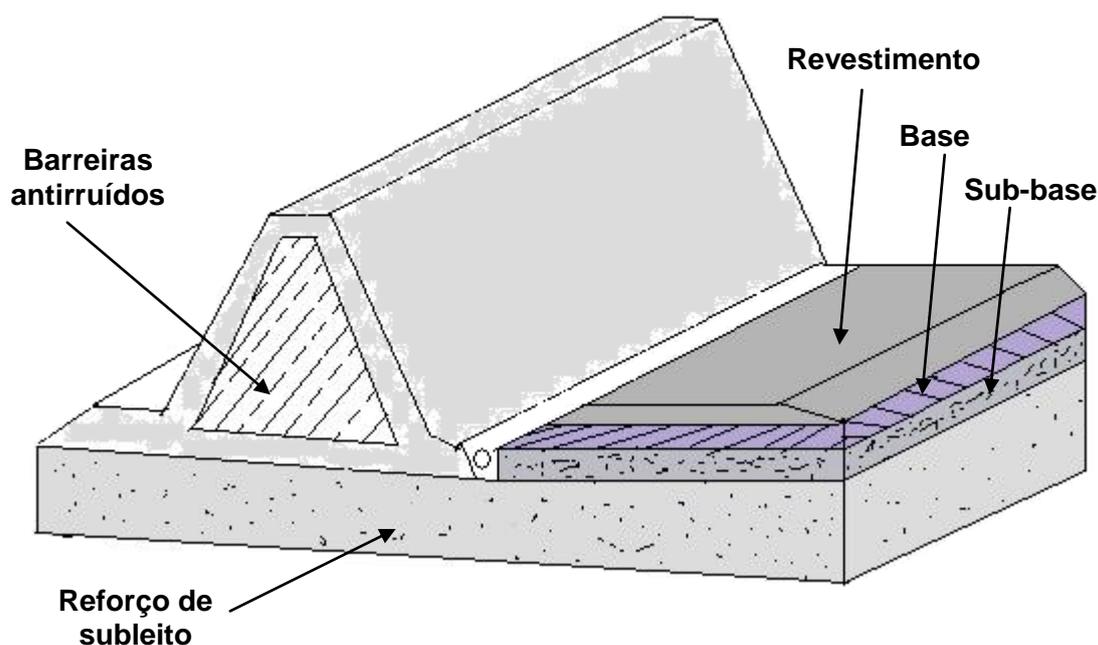


Figura 11 – Diferentes usos de materiais reciclados em pavimentação (PETKOVIK *et al.*, 2004).

Motta (2005) cita que alguns países europeus, em 1999, formaram um grupo chamado Alternative Materials in Road Construction (ALT-MAT), mostrando a viabilidade do uso de materiais alternativos para pavimentação. A pesquisa mostrou que os resultados em campo apresentaram desempenhos melhores do que os previstos em laboratório.

Desde o final da década de 1990, pelo menos 20 estados americanos empregam agregados reciclados de concreto na construção de pavimentos, pois esses resíduos têm se mostrado um excelente material granular para ser utilizado como base e sub-base, apresentando boa capacidade de suporte, durabilidade e drenagem (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1997 apud LEITE, 2007).

Na Suécia, os agregados reciclados têm sido utilizados em diferentes camadas da estrutura do pavimento, verificando-se incremento no módulo de resiliência segundo os diferentes períodos de cura e aumentando a sua resistência ao longo do tempo (ARM, 2001).

Leite (2007) descreve que a primeira via pavimentada com RCC foi executada na cidade de São Paulo no ano de 1984 e está localizada na zona oeste da cidade. Caracterizada por um baixo volume de tráfego, recebeu o resíduo de construção na camada de reforço de subleito. A construção teve acompanhamento executivo e de desempenho pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), tendo sido considerado de bom desempenho.

De acordo com Poon e Chan (2006), foi constatado que tijolos cerâmicos e concretos confeccionados com agregados reciclados, quando substituem os agregados naturais nos blocos de concreto para pavimentação, reduzem os valores da resistência à compressão, aumentam as taxas de absorção de água e diminuem os valores de resistência à abrasão, comparando esses resultados com os blocos fabricados com agregados naturais. Contudo, observou-se que o percentual de agregados reciclados nos tijolos cerâmicos e concretos não interfere significativamente no último parâmetro (resistência à abrasão).

Materiais alternativos, como tiras de pneus e garrafas PET, têm sido estudados com o RCC para substituir materiais granulares naturais em sistemas drenantes. Um geotêxtil envolvendo um material drenante alternativo pode servir como um elemento de filtro para o sistema. Sua utilização pode representar economia em regiões onde materiais drenantes sejam escassos ou muito caros (PALMEIRA, 2010).

Amorim, Queiroz e Ribeiro (2011) avaliaram o aproveitamento de resíduos da construção misturados a um solo laterítico para uso em obras de pavimentação. Para as

misturas de solo e RCC, foi observado que a influência do RCC elevou de forma significativa os valores encontrados para o Índice de Suporte Califórnia (ISC) ao ponto das misturas com 15%, 25% e 35% se encontrarem dentro dos padrões recomendados para materiais utilizados em camadas de sub-base. As misturas com 25% e 35% de RCC se encontraram dentro dos padrões estabelecidos pela norma do DNIT - ES - 141/2010 para utilizar esse material em camadas de base, uma vez que o ISC não foi inferior a 60%.

Góngora (2011) analisou brita e RCC como materiais de aterro ou estrada não pavimentada por meio de ensaios de carregamento cíclico. O material que apresentou melhor comportamento em termos de resistência foi o composto por RCC, chegando a 1710 ciclos de carga, enquanto que o utilizado com brita apresentou 1630 ciclos de carga.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

As informações apresentadas neste capítulo estão relacionadas à área de estudo, aos critérios de escolha dos materiais, assim como aos métodos de ensaios adotados durante a realização do programa experimental. A metodologia de análise do RCC como material para pavimentação é baseada nos procedimentos tradicionais de caracterização física, química e mecânica de agregados naturais.

3.2. ESCOLHA DOS MATERIAIS

3.2.1 Solo

A seleção do solo foi baseada pela facilidade de obtenção e por existir algumas pesquisas na área como os trabalhos de Lafayette (2006) e Gomes (2001) nos quais foram estudados solos da Formação Barreiras e Solos Residuais de Granito. Foram descartados solos contendo matéria orgânica e muito óxido de ferro e solos que, após a compressão na mão se esfarelassem, caracterizando um alto teor de areia, pois se fossem incorporados ao agregado reciclado estes teores iriam ficar muito mais elevados.

Foram coletados aproximadamente 450 kg de solo no município do Cabo de Santo Agostinho-PE. A amostra obtida foi armazenada em sacos plásticos e transportada para o Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Escola Politécnica de Pernambuco. A Figura 12 apresenta a área na qual foi retirada a amostra de solo para os ensaios de laboratório.



Figura 12 – Local da coleta de amostras de solo.

3.2.2 Resíduos da Construção Civil

A amostra de agregado reciclado foi fornecida pela Usina de Beneficiamento – Ciclo Ambiental (Figura 13), localizada no município de Camaragibe-PE, Região Metropolitana do Recife-PE. Essa unidade de reciclagem de RCC tem a capacidade para processar de 3.500 a 4.500 toneladas de RCC por mês. Na usina de reciclagem, os RCC chegam em caçambas coletoras e são inspecionadas para serem classificados de acordo com a sua tipologia. Todo material transportado é pesado antes da realização do beneficiamento.

Na pesagem dos resíduos, é utilizada uma balança rodoviária com capacidade para 60 toneladas, instalada na recepção da unidade de tratamento. O peso, além de se constituir numa unidade de medida para cobrança, também é utilizado para o controle estatístico de produção e estoque.



Figura 13 – Usina de beneficiamento – Ciclo Ambiental.

Após essa etapa, os resíduos são descarregados no pátio de estocagem e triagem, onde os funcionários fazem a separação manual dos resíduos estranhos ao processo ou de classes diferentes, estocando-os conforme sua tipologia. Uma vez feito o reconhecimento preliminar, tem início o processo de triagem para posteriormente os resíduos serem britados.

Os resíduos britados são levados por meio de correia transportadora até o sistema de peneiramento mecânico, em que os agregados reciclados são classificados de acordo com sua granulometria. Nessa etapa, os fragmentos metálicos são removidos por um sistema de eletroímã.

O RCC é reduzido a um tamanho médio de 4,8 mm. Em seguida, é colocado em bombonas com capacidade para 70 kg cada e levadas para o Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. O agregado reciclado coletado foi, aproximadamente, de 600 kg. No LACC, foi realizado um novo peneiramento para certificar que o material utilizado nos ensaios possuía um diâmetro menor que 4,8 mm.

3.2.3 Cimento

A utilização do cimento foi feita tendo em vista seu potencial aglomerante, capaz de provocar uma alteração das propriedades mecânicas do agregado reciclado; pois, em contato com a água, produz uma reação exotérmica de cristalização de produtos hidratados, ganhando resistência mecânica.

O tipo de cimento escolhido foi o CP II E 32 no teor de 2% em relação à massa seca de solo e agregado reciclado. Esse teor relativamente baixo foi definido porque a intenção era apenas melhorar as propriedades da mistura bem como conhecer a influência desse aglomerante em comparação às fibras utilizadas nesta pesquisa. Não foram testados teores mais elevados devido ao custo desse material, que, quando utilizado em grande quantidade, tornaria inviável em uma obra de pavimentação. A Tabela 02 apresenta algumas características e propriedades do cimento que foi inserido nas misturas de acordo com a norma NBR 11.578 (ABNT, 1981).

Tabela 02 – Características e propriedades do cimento da Classe 32.

Características e propriedades		Unidade	Classe
			32
Finura	Resíduo na peneira 75 μm	%	$\leq 12,0$
	Área específica	m^2/kg	$\geq 260,0$
Tempo de início de pega		h	≥ 1
Expansibilidade a quente		mm	≤ 5
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	$\geq 10,0$
	7 dias de idade	MPa	$\geq 20,0$
	28 dias de idade	MPa	$\geq 32,0$

Fonte: NBR 11578 (ABNT, 1981).

3.2.4 Fibras

O polipropileno é formado por um material polimérico (termoplástico). Os polímeros termoplásticos se baseiam em uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas, as quais podem deslizar umas sobre as outras. Com isso, adquirem maior flexibilidade e tenacidade, proporcionando um aumento da resistência ao impacto dos materiais e na ductilidade do mesmo a que está sendo inclusa (SPECHT, 2000). Os tipos de fibras de

polipropileno mais difundidos são os de monofilamentos e as fibriladas. A Figura 14 apresenta os dois tipos de fibras de polipropileno fornecidos para a escolha e realização dos ensaios de laboratório.



Figura 14 – Fibras de polipropileno (lisa e corrugada).

As fibras de polipropileno (Figura 15) utilizadas foram fornecidas pela Orpec Engenharia. Essas fibras foram inseridas na mistura agregado reciclado-solo-cimento de forma aleatória, com teores de 0,25%, 0,5% e 0,75% da massa seca da mistura e comprimento de 20 mm.

Essas fibras foram selecionadas com base em algumas características como uniformidade, por serem quimicamente inertes, apresentarem baixo módulo de elasticidade, grande capacidade de deformação, boa resistência aos álcalis e terem fácil oferta no mercado. Tais características tornam viável a sua aplicação em ensaios com grandes dimensões ou extrapolação de resultados para projetos de engenharia. A Tabela 03 apresenta as características das fibras de polipropileno.



Figura 15 – Fibras de polipropileno.

Tabela 03 – Características das fibras de polipropileno.

Tipo	Lisa	Corrugada
Comprimento	20 mm	20 mm
Peso específico	0,91 kg/dm ³	0,90 kg/dm ³
Módulo de elasticidade	3500-3600 N/mm ²	-
Resistência à tração	320-400 N/mm ²	-
Alongamento	Aprox. 25%	20 a 25%
Módulo de Young	0,50x10 ³ Ksi	-
Diâmetro	0,18 mm	0,18 ou 0,8 mm
Ponto de fusão	160-170°C	Aprox. 170°C

Fonte: Orpec Engenharia (2011).

3.2.5 Composição das misturas

A pesquisa foi realizada com fibras de polipropileno com teores distintos. O teor de fibra utilizado nos compósitos variou de acordo com estudos de outros autores como Trindade et al. (2004); Silva (2009); Fernandes et al. (2010). A escolha do comprimento

também seguiu essa mesma lógica, dando preferência principalmente à disponibilidade no mercado.

As misturas do solo com os diferentes percentuais de agregado reciclado e de fibras foram realizadas de maneira exploratória, sendo adotada uma faixa de teores tanto para a adição das fibras quanto para de resíduos. O fluxograma da Figura 16 mostra a distribuição dos compósitos com os percentuais de cada material constituinte.

O percentual de cimento (2%) foi determinado em relação à soma das massas secas de solo e agregado reciclado. A quantidade de fibra adicionada à mistura também foi determinada em relação à massa seca do agregado reciclado-solo-cimento. Dessa forma, fica garantida a relação em massa entre o cimento com o solo, o agregado e as fibras.

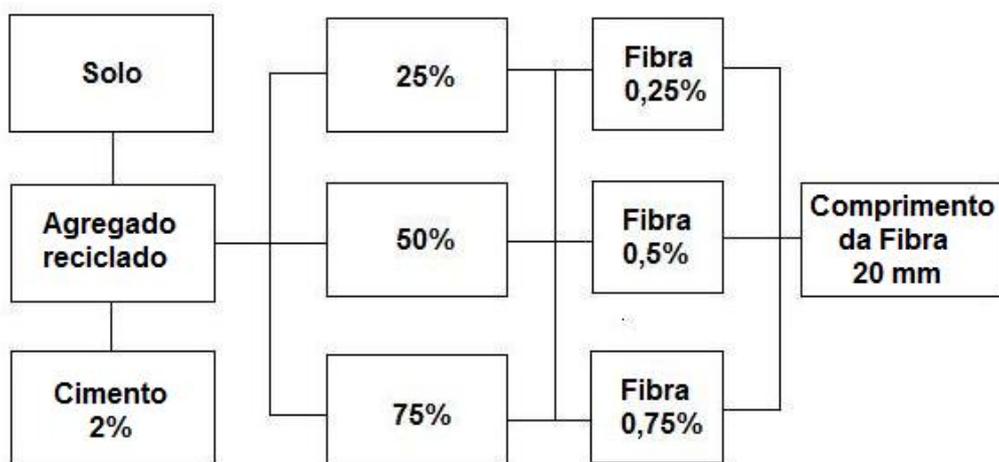


Figura 16 – Fluxograma da distribuição dos compósitos de agregado reciclado na mistura.

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental teve início após a coleta e o acondicionamento dos materiais no LACC. A Figura 17 apresenta um esquema simplificado das etapas realizadas durante a pesquisa.

O programa experimental foi dividido em três etapas:

- 1ª etapa: Ensaio de caracterização física (granulometria, densidade real, limites de atterberg, metodologia MCT, absorção, retração linear e equivalente de areia).
- 2ª etapa: Ensaio mineralógicos (com lupa e difração de raios X) e químicos (pH e teor de sulfatos).
- 3ª etapa: Ensaio mecânicos (compactação, Índice de Suporte Califórnia e resistência à compressão simples).

Os ensaios de caracterização física foram realizados com o solo, os agregados reciclados e as misturas sem cimento e fibras. Já os ensaios de caracterização mineralógica e química, foram realizados apenas com o solo e o agregado reciclado. Finalmente para a caracterização mecânica, foram utilizados os agregados reciclados, o solo e as misturas, como detalhado na Figura 18. Para esses ensaios foram utilizadas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Rodagens (DNIT).

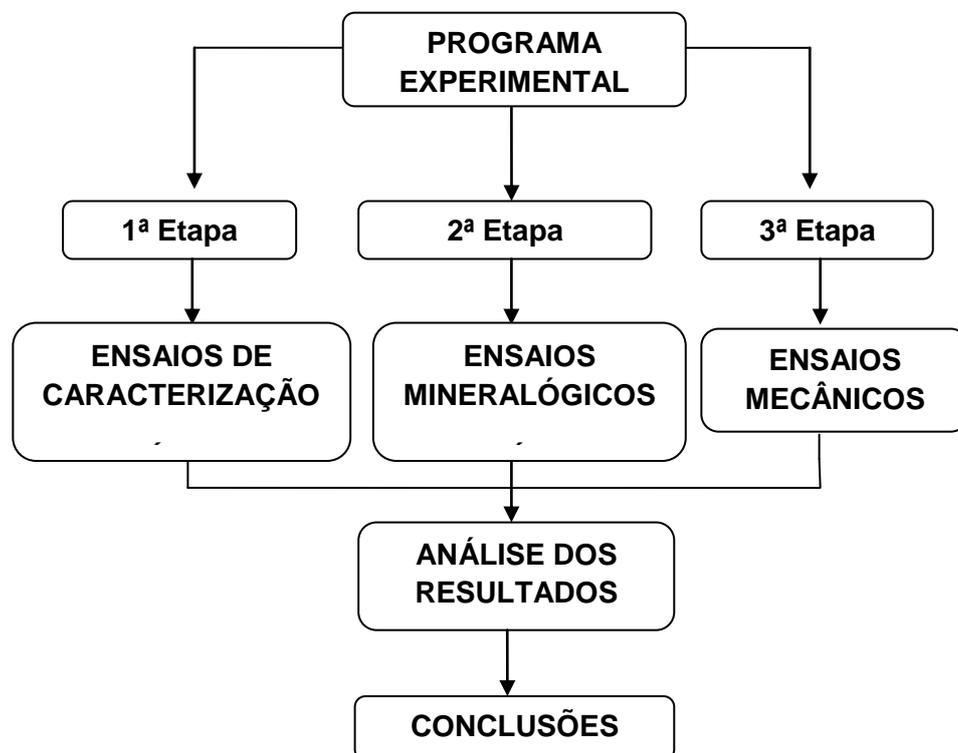


Figura 17 – Esquema do programa experimental.

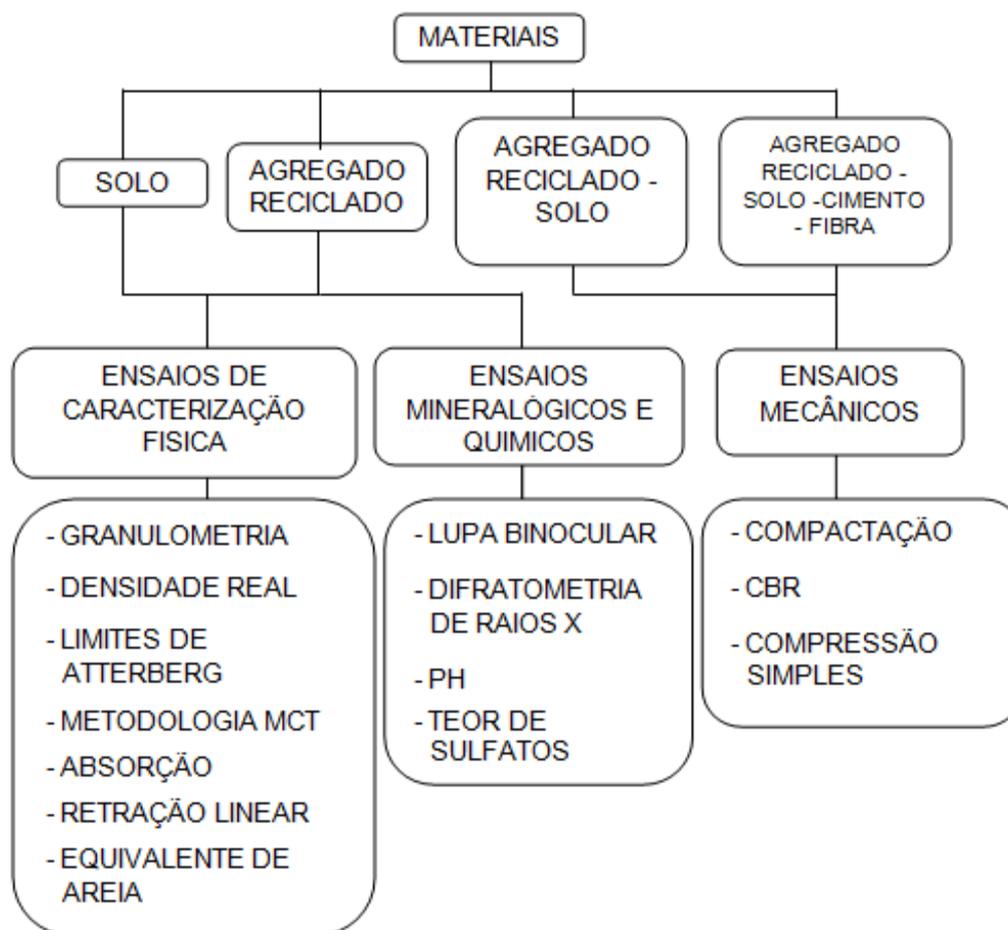


Figura 18 – Fluxograma dos ensaios com os diferentes materiais.

3.3.1 Composição Gravimétrica

Foram selecionados aproximadamente 70 kg de RCC seco antes de serem colocados no britador da usina de reciclagem, com o intuito de classificar os diferentes materiais encontrados na sua composição. Os materiais que passaram na peneira n^o4 (4,75 mm) foram classificados como finos, não sendo possível realizar uma separação manual.

3.3.2 Caracterização física

3.3.2.1 Granulometria

Para a realização desse ensaio, utilizou-se a NBR 7181 (ABNT, 1984), em que foi possível determinar a curva granulométrica do solo, do agregado reciclado e das misturas sem fibras. Esses materiais foram investigados quanto às especificações da

NBR 15116 (ABNT, 2004) e classificados de acordo com o Sistema Unificado de Solos (SUCS) e conforme a Transportation Research Board (TRB).

A TRB tem sido aplicada no reconhecimento de solos para construção de pavimentos em classificações em todo o mundo. Os materiais são divididos em grupos e subgrupos designados pelos símbolos A-1 a A-8, cujo comportamento como base ou pavimento é de qualidade decrescente na ordem dos grupos (DNIT, 2006).

Lima (2008) descreve que, no Brasil, as especificações para materiais de base e sub-base estabilizados granulometricamente são apresentados por normas do DNIT (2006) e da NBR 11804 (ABNT, 1991), que, por sua vez, indicam a necessidade de que a curva granulométrica seja contínua e esteja entre as faixas granulométricas especificadas.

3.3.2.2 Densidade real

Na determinação da densidade real, empregou-se a norma NBR 6508 (ABNT, 1984), os métodos do picnômetro e as bombas a vácuo nas amostras de solo, agregado reciclado e misturas.

3.3.2.3 Limites de Atterberg

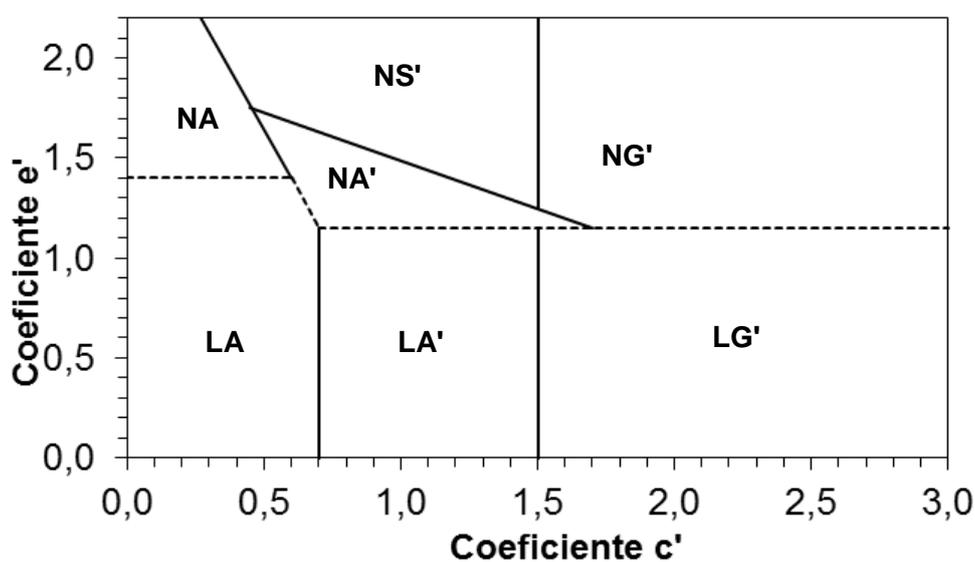
Nesta pesquisa, foram determinados os limites de liquidez e plasticidade de acordo com as metodologias propostas pelas normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984).

3.3.3 Metodologia MCT

A classificação Miniatura, Compactado, Tropical (MCT) nasceu da percepção de que solos tropicais, por estarem sujeitos a chuvas abundantes e frequentes, costumam comportar-se de modo diferente dos solos originalmente estudados no Hemisfério Norte. A técnica permite avaliar propriedades fundamentais dos solos associados à contração, permeabilidade, expansão, coeficiente de penetração d'água, coesão, capacidade de suporte, utilizando corpos de prova de dimensões reduzidas. Dessa

forma, essa classificação buscou solucionar as lacunas deixadas pelos demais métodos em relação aos solos tropicais.

A classificação MCT comporta sete grupos distintos, sendo três de comportamento laterítico (L) e quatro de comportamento não laterítico (N), Figura 19, na qual constam as características texturais e mineralógicas dos vários grupos de solos tropicais e algumas de suas propriedades mecânicas e hídricas. Embora em princípio essa classificação tenha sido destinada para fins rodoviários, ao longo do tempo passou a ser utilizada para outras finalidades dentro do campo geotécnico.



L= Laterítico	A' = Arenoso
N - Não Laterítico	G' = Argiloso
A = Areia	S' = Siltoso

Figura 19 – Classificação MCT (NOGAMI E VILLIBOR, 1981).

De acordo com Nogami e Villibor (1995), têm sido constatadas diferenças no grau de confiabilidade de previsão das propriedades nos diversos grupos da classificação. No que se refere à capacidade de suporte Mini-CBR, obteve-se maior confiabilidade nos solos de comportamento laterítico, tanto na condição não imersa como imersa. Já para os solos NS' (Solos Siltosos Não Lateríticos) foram constatadas grandes dispersões, em termos de capacidade de suporte, sobretudo se forem considerados tipos mineralógicos e

texturais extremos, tais como solos saprolíticos constituídos essencialmente de siltes caulíníticos.

Verificou-se que a classificação MCT não se relaciona de forma simples com os grupos de classificação TRB. Podendo, por exemplo, um solo A-7 corresponder tanto a argilas do grupo LG', de excelente comportamento, ou a argilas expansivas do grupo NG' ou, ainda, a siltes micáceos do grupo NS', que incluem os piores solos que se conhecem (DELGADO, 2007).

Tendo em vista a caracterização dos solos de comportamento laterítico, um novo ensaio foi introduzido o qual avalia o comportamento dos corpos de prova segundo o Mini – MCV (Moisture Condition Value), norma DNER-ME 258/94, que é uma adaptação para solos compactados em equipamentos miniatura. No procedimento de compactação MCV, foram utilizadas amostras deformadas de solos secas ao ar, passante na peneira de 2,0 mm (peneira #10), compactadas com diferentes umidades em moldes cilíndricos de $\phi = 5$ cm e $h = 5$ cm, efetuando-se um número sucessivo de golpes até atingir a massa específica aparente máxima. A Figura 20 apresenta a compactação da amostra em estudo pela Metodologia MCT.

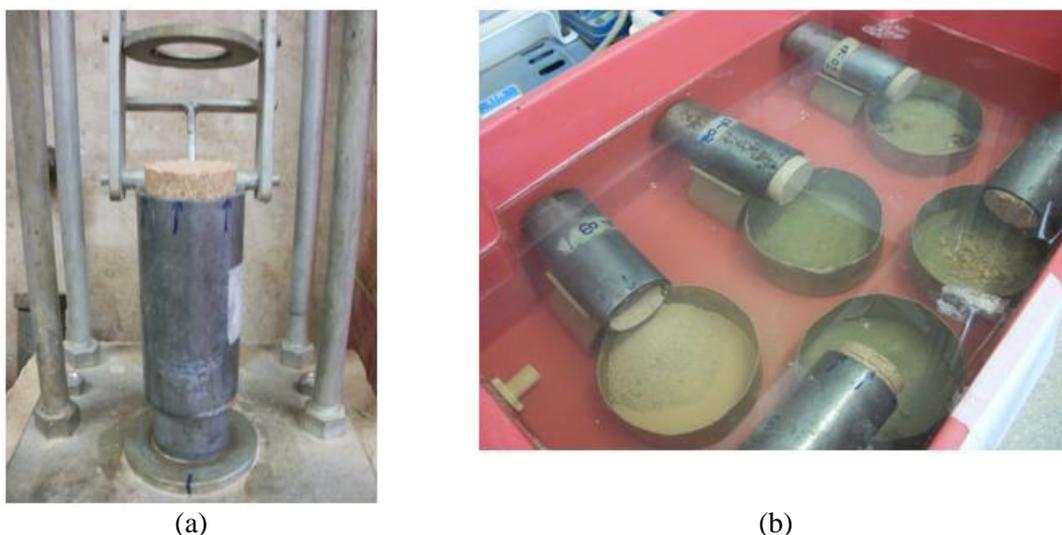


Figura 20 – Compactação das amostras no ensaio MCT: (a) Retirada de parte do CP após a compactação MCT; (b) corpos de prova submersos para cálculo da perda por imersão.

3.3.4 Absorção

A absorção é uma das propriedades fundamentais para o uso do material granular na composição de estruturas de pavimentos, uma vez que a quantidade de água presente

nas misturas pode variar dependendo da capacidade de retenção de água do material selecionado (JIMÉNEZ, 2011). É uma das propriedades ligadas à porosidade cuja determinação é das mais simples. Em consequência da variação da porosidade do agregado reciclado, a absorção de água também apresentará variabilidade.

De acordo com Moreira (2010), a de absorção de água dos agregados reciclados é maior do que a dos agregados naturais. Dessa forma, a condição de saturação pode ser obtida em questões de minutos, não importando o volume de poros presentes no material, como comprovam os trabalhos de CARRIJO (2005) e PIETRA (2005).

O ensaio de absorção seguiu a NBR 6458 (ABNT, 1984), que também é utilizada para a determinação da massa específica dos grãos da fração graúda. O material foi separado e imerso em água destilada por 24 horas. Após esse período de imersão, a água superficial dos agregados reciclados foi parcialmente removida com uma toalha levemente umedecida. Em seguida, os agregados foram pesados e levados à estufa, com temperatura aproximada de 100° C até a secagem. O valor da absorção (A) é obtido através da equação (1):

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

onde, m_1 = massa seca;

m_2 = massa úmida do corpo de prova.

A Figura 21 mostra o material submerso na água para a realização do ensaio de absorção.



Figura 21 – Ensaio de absorção do agregado reciclado.

3.3.5 Equivalente de areia

Segundo Bernucci et al. (2008), alguns materiais se tornam impróprios para serem aplicados em pavimentação devido à presença de vegetação, conchas e grumos de argila presentes sobre a superfície do agregado graúdo. Assim, é interessante que seja realizado o ensaio de equivalente de areia para cada amostra. Para a verificação de partículas de solo no agregado reciclado, realiza-se o ensaio de equivalente de areia seguindo os procedimentos descritos na norma do DNER – ME 054 (1997).

De acordo com a NBR EB-2103/91, o ensaio de equivalente de areia deverá ser realizado quando os valores de LL e IP das amostras forem superiores a 25% e 6%, respectivamente. O indicado é que os valores de equivalente de areia sejam superiores a 30%. Contudo, foram realizados esses ensaios em todas as amostras, independente dos valores de LL e IP.

Esse ensaio determina a proporção relativa de materiais tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos. Durante o processo, é separada uma amostra de agregado com partículas inferiores a 4,8 mm, medida em volume numa cápsula padrão e colocada numa proveta contendo uma solução de cloreto de cálcio. Após 10 minutos de saturação, a amostra é agitada durante 30 segundos. Posteriormente, deve-se introduzir a solução até atingir 38 cm da base e deixar em repouso por 20 minutos com a finalidade

de sedimentar e separar a areia da argila. O equivalente de areia (EA) é calculado de acordo com a equação (2):

$$EA = \frac{\text{leitura no topo da areia}}{\text{leitura no topo da argila}} \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

A Figura 22 mostra algumas etapas do ensaio desde a inserção do material na proveta até a leitura da fração de argila.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 22 – Etapas do ensaio de equivalente de areia: a) inserção do material na solução de cloreto de cálcio; b) material sendo agitado; c) introdução da solução no frasco; d) leitura da fração de argila.

3.3.6 Forma dos grãos

O agregado pode apresentar forma mais lamelar e textura mais áspera que o material mais convencional, conforme os equipamentos utilizados, durante o processo de reciclagem (LIMA, 1999).

A obtenção da forma do agregado utilizado nesta pesquisa foi realizada conforme a norma NBR 6954 (ABNT, 1989), que prescreve o método de determinação da forma para o material lastro padrão utilizado em via férrea. A análise é realizada utilizando um paquímetro digital, onde são anotados o comprimento (a), a largura (b) e a altura (c) de cada grão, classificando o material como cúbico, alongado, lamelar e alongado lamelar. A Tabela 04 mostra a classificação da forma dos grãos.

Tabela 04 – Classificação da forma dos grãos.

Método das relações b/a e c/b	Forma
$b/a > 0,5$ e $c/b > 0,5$	Cúbico
$b/a < 0,5$ e $c/b > 0,5$	Alongado
$b/a > 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	alongado-lamelar

Fonte: NBR 6954 (ABNT, 1989)

A NBR 15115 (ABNT, 2004) recomenda que o agregado reciclado tenha no máximo 30% de grãos lamelares. Na realização do ensaio, foram utilizados, aproximadamente, 2,0 kg de material, retidos nas peneiras de 25,4 mm, 19,1 mm, 9,52 mm, 4,76 mm e 2,0 mm. As medidas de largura, altura e comprimento dos grãos foram feitas com auxílio de paquímetro digital. A Figura 23 mostra as medidas das partículas referentes a cada fração retida. Os resultados são apresentados em porcentagem de partículas cúbicas, alongadas, lamelares e alongadas-lamelares.

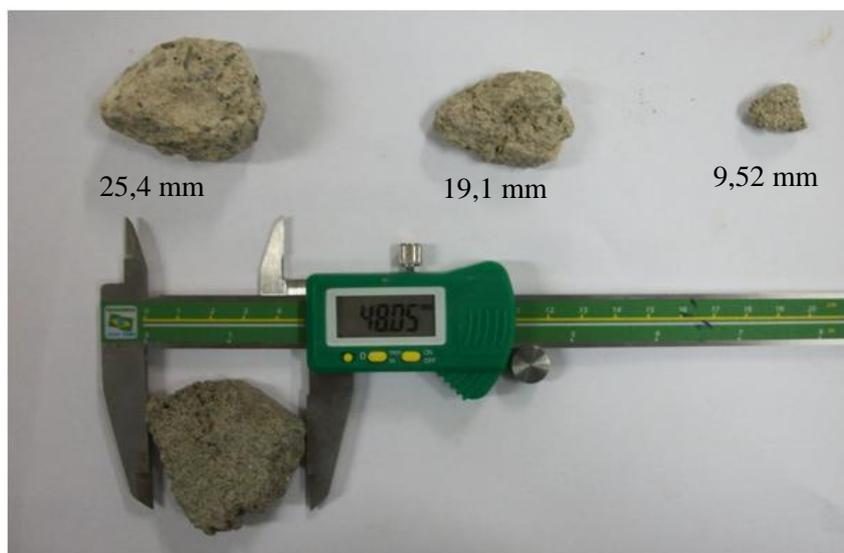


Figura 23 – Obtenção da forma dos grãos do agregado reciclado referentes a cada fração retida.

3.3.7 Retração Linear

Para a realização do ensaio de retração linear, utilizou-se as prescrições do CEPED (1984). Nesse ensaio, a mistura de solo e resíduo foi umedecida anteriormente até atingir uma consistência plástica, tal como no ensaio de limite de plasticidade. Após a homogeneização da mistura com a água, o material foi colocado dentro de uma caixa com 60 cm de comprimento, 8,5 cm de largura e 3,5 cm de espessura. Depois disso, o material foi adensado manualmente e devidamente rasado dentro da caixa, ficando em repouso à sombra por sete dias. Após esse período, foram realizadas leituras de variação dimensional, de modo que a soma das fendas existentes entre a caixa e a amostra de solo deve ser inferior a 20 mm. Além disso, o material contido na caixa não deve apresentar nenhuma fenda transversal na parte central. A Figura 24 apresenta o material contido na caixa para verificação da retração.



Figura 24 – Realização do ensaio de retração.

3.3.8 Caracterização mineralógica e química

3.3.8.1 Análise mineralógica com lupa e difração de raio X

Segundo Mitchell (1993), a mineralogia é o fator principal que promove o tamanho, a forma e as propriedades físicas e químicas do material, além disso, conferem plasticidade, expansibilidade e resistência ao material. Dessa forma, torna-se de fundamental importância seu estudo para entender melhor o seu comportamento.

A análise mineralógica do solo e do RCC foi realizada no Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESE) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco. O estudo morfoscópico e composicional dos grãos foi feito sobre a fração total de areia em lupa binocular.

A metodologia para essa análise constou da secagem prévia das amostras ao ar, para, em seguida, serem passadas nas peneiras de aberturas 2 mm e 0,062 mm sob água corrente. O material retido foi colocado na estufa a 100° C, e depois armazenado em saco plástico, etiquetado e levado ao Departamento de Geologia.

As frações finas do solo e do RCC foram identificadas por difração de raios X no Departamento de Engenharia de Minas da UFPE, com um difratômetro da marca Shimadzu (XRD-6000), com radiação K-alfa do cobre, com a velocidade do goniômetro

de 4°/min e a velocidade da carta de 40 mm/min. Os raios X são úteis para a análise de estruturas cristalinas, pois os comprimentos de ondas com valores de 1 Angstrom são da mesma ordem que o espaçamento dos planos atômicos em materiais cristalinos (Mitchell & Soga, 2005).

A fração argila foi separada por suspensão aquosa submetida à dispersão mecânica e centrifugação. A partir da lama de argila foram confeccionadas, no Laboratório de Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), três lâminas orientadas, que após secagem ao ar eram analisadas por DRX.

3.3.8.2 pH do solo e do agregado reciclado

Há, evidentemente, três condições possíveis associadas à reação do solo: acidez, neutralidade e alcalinidade. A acidez é comum em todas as regiões onde a precipitação é suficientemente elevada para lixiviar quantidades apreciáveis de bases permutáveis das camadas superficiais do solo. Tão generalizada é a sua ocorrência e tão pronunciada a sua influência sobre os vegetais que se tornou uma das mais discutidas propriedades dos solos.

É bem claro que são complexos os fatores responsáveis pela acidez do solo, ao mesmo tempo existem dois grupos de elementos dominantes que exercem influência: o alumínio e o hidrogênio, que originam a acidez, e os outros cátions que, na sua maioria, a combatem. A alcalinidade ocorre quando há um grau comparativamente elevado de saturação de bases, sendo naturalmente característica da maioria das regiões áridas e semiáridas. Qualquer processo que estimule a manutenção ou a formação de certas bases permutáveis, como cálcio, magnésio, potássio e sódio, contribuirá para a redução da acidez e o aumento da alcalinidade. O pH do solo indica o grau de acidez do solo de acordo com os seguintes valores:

- a) acidez forte – $\text{pH} < 5,5$
- b) acidez moderada a leve – pH entre 5 e 7
- c) neutro – $\text{pH} = 7$
- d) alcalinidade leve a moderada – pH entre 7 e 9
- e) alcalinidade – $\text{pH} > 9$

Ao se examinar a concentração do pH no solo, não se deve concluir que está em presença de uma solução homogênea comum. Existem diferenças no pH dos solos com apenas alguns centímetros de distância, o que é consequência da ação microbiana e da desigual distribuição dos resíduos orgânicos. Mesmo em um local específico do solo, na realidade em volta de uma determinada micela, há diferenças marcantes na distribuição dos íons de alumínio e hidrogênio. O pH dos solos diminuirá durante o verão, especialmente em áreas de cultivo, devido aos ácidos produzidos pelos microorganismos. Poderá, também, constituir um fator importante à atividade radicular dos vegetais superiores. No inverno e na primavera, nota-se às vezes aumento no pH, possivelmente porque as atividades bióticas são, nessa época, muito lentas.

Nesta pesquisa os valores do pH do solo e do agregado reciclado foram determinados em água e em KCl, de acordo com o Manual de Métodos de Análises de Solo da EMBRAPA (1997). A diferença entre os valores de pH é representada por $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCL}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, indicando se o alumínio está com sua maior parte na forma trocável ou não trocável. Na determinação do pH em KCl, os cátions de K^+ da solução de KCl permutam com o hidrogênio e o alumínio trocável existente na superfície dos coloides. À medida que se eleva o pH, os íons são removidos formando $\text{Al}(\text{OH})_3$, consequentemente liberando locais de permuta nos coloides minerais. De acordo com BRADY (1979), um valor de ΔpH com fontes de cargas negativas nos coloides do solo acha-se primordialmente associados com as argilas silicatadas, enquanto num ΔpH positivo há predomínio de óxido de ferro e alumínio.

3.3.8.3 Teor de sulfatos

Nos pavimentos rígidos, de acordo com o DNIT (2004), a presença de SO_4^- age prejudicialmente ao longo do tempo, sendo capaz de atuar sobre o cimento ou agregado possibilitando o acréscimo de reações expansivas.

John e Cincotto (2003) descrevem que a presença de grande concentração de sulfato de cálcio em base de pavimentação vai trazer problemas a longo prazo devido à formação de vazios pela lixiviação, afetando também a composição e pHs da água do solo de forma mais rápida que a fração à base de cimento portland.

Dessa maneira, para verificar se os compostos atendem a NBR 15116 (ABNT, 2004), foram analisados os teores de sulfato conforme a norma NBR 9917 (ABNT, 2009).

3.3.9 Caracterização mecânica

Nesse grupo de ensaios, encontram-se: compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR ou ISC) e compressão simples. A descrição utilizada em cada ensaio é apresentada a seguir.

3.3.9.1 Compactação

O ensaio de compactação foi empregado segundo a norma brasileira NBR 7182 (ABNT, 1986) e tem a finalidade de obter o peso específico aparente máximo e a umidade ótima do solo para uma determinada energia de compactação.

Pesquisadores afirmam que a variação na compactação entre um solo com fibras e um solo puro não é pouco expressiva (FEUERHAMEL, 2000). Para verificar essa afirmação, o ensaio de compactação foi realizado no agregado reciclado, no solo e nas misturas com a incorporação de fibras.

Para a execução do ensaio, foi utilizada a energia de Proctor Intermediária, sendo essa escolha feita em função do uso que será dado ao material analisado e por ter sido utilizada por outros pesquisadores (RESCHETTI, 2008; LEITE, 2007; JIMÉNEZ, 2011). Além dos parâmetros convencionais, esse ensaio forneceu dados sobre a influência da compactação na mudança das curvas granulométricas originais e, para efeito comparativo, o comportamento com adição de cimento.

3.3.9.2 Moldagem dos corpos de prova para compactação

A preparação dos corpos de prova para os ensaios de compactação foi realizada em três fases: pesagem, mistura e moldagem. Foram moldados dois corpos de prova para cada composição, totalizando 52 corpos de prova, com reuso de material. As fibras, quando em contato com a água, parecem desenvolver uma tensão superficial que as fazem grudar umas nas outras e em qualquer outro material com que entrem em contato. Por

esse motivo, os componentes foram adicionados na seguinte sequência: solo, agregado reciclado e água até a homogeneização, Figura 25, adicionando, por último, o teor de fibras em relação à massa seca do material, Figura 26.



Figura 25 – Homogeneização dos materiais.



Figura 26 – Fibra adicionada à mistura homogeneizada.

Essa ordem evitou que as fibras se desfiassem ou formassem grumos na mistura. A Figura 27 apresenta o material sendo compactado no Proctor com energia intermediária.



Figura 27 – Moldagem do corpo de prova.

3.3.9.3 Avaliação da quebra dos grãos

Na última década, pesquisas têm focado em analisar, após a compactação, a distribuição das partículas, tanto em ensaios físicos quanto em ferramentas numéricas e têm demonstrado que a aplicação da energia de compactação implica na quebra dos grãos, apesar da boa qualidade dos agregados. Essa quebra pode reduzir parâmetros como módulo de resiliência e incrementar a deformação permanente, dependendo do estado da densidade e de tensões considerados. Por isso, é importante identificar os efeitos que a quebra dos grãos produz na granulometria do material estudado.

Nesta pesquisa, foram realizados ensaios de granulometria nos corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de compactação na energia intermediária, com reuso de material, tendo como objetivo verificar se ocorreram modificações das curvas granulométricas e determinar os índices de degradação dessas amostras.

A quebra dos grãos afeta propriedades dos materiais granulares como dissipação de poro pressão, permeabilidade, resistência à compressão, mudança de volume e é influenciada diretamente pelas variações nos tamanhos das partículas ou nas mudanças das agregações entre elas.

No final da década de 1950, a quebra dos grãos foi considerada um problema para a engenharia a partir da degradação durante a utilização do agregado graúdo como base (Ausghenbaugh *et al.*, 1966)

Pesquisas têm mostrado que a compactação por meio de impactos provoca uma quebra dos grãos que se apresentam com uma forma angulosa gerando uma textura superficial rugosa e incrementando a coesão (PARK, 2003).

A quebra dos grãos pode ocorrer sob a ação de baixas tensões dependendo das características dos materiais. Os índices utilizados para determinar a quebra dos grãos são de natureza empírica, MARSAL e RESENDIZ (1975); HARDIN (1985), LADE *et al.* (1996).

No Brasil, a degradação ou quebra dos grãos devido a compactação com o Proctor pode ser determinada através dos procedimentos da norma do DNER-ME 398/99. Utilizando uma curva granulométrica padrão, são determinadas as porcentagens de material que passa em seis peneiras antes e após a compactação, realizando a subtração entre as porcentagens inicial e final (D), como mostra a equação (3):

$$ID_p = \frac{\sum D}{6} \quad \text{Equação (3)}$$

O Índice de Degradação ID_p corresponde à soma das diferenças que passam por cada peneira, dividida pela quantidade de peneiras utilizadas (12,5 mm – ½” ; 9,5 mm – 3/8” ; 4,75 mm – n° 4; 2,0 mm – n° 10; 0,425 mm – n° 40 e 0,075 mm – n° 200).

Além do índice de degradação ID_p , também é possível verificar através da energia do ensaio de compactação, uma variação na distribuição granulométrica do material, caracterizada por um deslocamento Δ_i em cada peneira. Com isso, o Índice de degradação de Ruiz é obtido a partir do somatório desses deslocamentos Δ_i da curva granulométrica em cada peneira, dividido pelo n° de peneiras usadas no ensaio (Buzatti, 1987 apud Valle, 1994).

O índice é obtido através da equação (4):

$$ID = \frac{\sum \Delta i}{N} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde, ID = Índice de Degradação de Ruiz

n = nº de peneiras utilizadas no ensaio

Δi = Deslocamento da curva granulométrica

Um agregado ideal corresponde a um valor de ID igual a zero, sendo resistente à degradação. Contudo, quando o valor máximo atinge o número 100, isso mostra que o agregado tem péssima qualidade.

3.3.9.4 Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR)

O ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR) foi concebido para avaliar a resistência do material frente a deslocamentos significativos impostos por meio de penetração em laboratório (JIMENEZ, 2011). A resistência do ensaio CBR é uma resposta que combina indiretamente com a coesão e o ângulo de atrito do material.

Para a realização ISC ou CBR, foi utilizada a NBR 9895 (ABNT, 1987). O ISC é a relação em percentagem entre a pressão exercida por um pistão de diâmetro padronizado, necessária à penetração no solo até determinado ponto, e a pressão necessária para que o mesmo pistão penetre a mesma quantidade em solo-padrão de brita graduada.

Para fazer a penetração dos corpos de prova, foi utilizada uma prensa manual de CBR com capacidade máxima de 5000 kgf, localizada no Laboratório de Mecânica dos Solos da POLI/UPE. A velocidade de penetração do pistão padrão foi de 1,27 mm/min.

Foram moldados 20 corpos de prova, com e sem imersão, para a realização do ensaio de CBR. Inicialmente, o molde de diâmetro de seis polegadas (152 mm) foi fixado na base perfurada, sendo colocado no fundo do molde um disco espaçador para que o material a

ser compactado não ocupasse totalmente o molde, promovendo um espaço para posterior colocação da sobrecarga a ser utilizada na determinação da expansão. Colocou-se o colarinho, e utilizando energia intermediária, o material foi compactado em cinco camadas com o soquete grande, sendo 26 o número de golpes por camada. A superfície foi escarificada para promover uma melhor aderência entre as camadas.

Após a compactação, virou-se o corpo de prova e foi colocado acima do prato perfurado o disco anelar de sobrecarga. Sobre a haste do prato perfurado, foi apoiada a haste do relógio comparador, fixado pelo porta-extensômetro. O corpo de prova foi colocado imerso em água por 4 dias (Figura 28) para a determinação da expansão, que é definida como a relação entre o aumento de altura do corpo de prova e a sua altura inicial, expressa em porcentagem.



Figura 28 – Corpos de prova submersos por 4 dias para determinação da expansão.

Para medir a resistência à penetração, retirou-se o corpo de prova que foi levado para a prensa com um pistão de 49 mm de diâmetro, a fim de ser rompido através da penetração, como mostra a Figura 29.



Figura 29 – Resistência à penetração do ensaio de ISC.

3.3.9.5 Compressão simples

Esse ensaio seguiu os procedimentos da NBR 12770 (ABNT, 1992), que tem como objetivo determinar a resistência à compressão, não confinada (ou simples), de corpos de prova de solos coesivos, mediante a aplicação de carga axial e controlando a deformação.

3.3.9.5.1 Preparação e moldagem dos corpos de prova para a compressão simples

Os corpos de prova para os ensaios de compressão simples foram moldados conforme o ensaio de compactação, acrescentando-se apenas o teor de cimento antes da adição da água e das fibras. Segundo Vendruscolo (2003), essa sequência é considerada a mais indicada, pois permite que o cimento seja misturado ao solo seco, garantindo melhor homogeneização da matriz.

Após a mistura, o material foi separado em três partes iguais, sendo envolvidas por papel alumínio e armazenadas em um recipiente com tampa (isopor), evitando a perda da umidade para posterior moldagem. Ao final desse processo foram separadas

pequenas porções da mistura em duas cápsulas para determinação de umidade. A média desses resultados foi considerada a umidade do corpo de prova.

A moldagem dos corpos de prova foi feita de forma estática em três camadas no interior de um molde cilíndrico com 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. Para promover uma maior interação entre estas camadas, cada superfície compactada foi escarificada levemente antes da prensagem da camada superior. Foi aplicada vaselina na parte interna do cilindro para facilitar a retirada do corpo de prova após a moldagem. A Figura 30 apresenta o corpo de prova durante o processo de moldagem na prensa manual da marca Solotest, e a Figura 31 mostra os corpos de prova após a extração do molde. Posteriormente eles foram pesados e anotados os diâmetros e as alturas.



Figura 30 – Moldagem do corpo de prova.



Figura 31 – Corpos de prova após a moldagem.

Para cada mistura, foram moldados quatro corpos de prova, colocados em câmara úmida por 7 e 28 dias, totalizando 126 corpos de prova.

Foi utilizada a câmara úmida do Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola Politécnica de Pernambuco, onde foram curados os corpos de prova, sendo controlada a umidade relativa do ar em torno de 93% e a temperatura de $25^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Os corpos de prova que seguiram os procedimentos da preparação e moldagem atenderam às seguintes exigências:

- massa específica aparente seca (γ_s): grau de compactação de 97% a 103%, sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_s após a moldagem, dividido pelo valor de γ_s definido inicialmente.
- teor de umidade (ω): valor $\pm 3,0\%$.
- dimensões: diâmetro $50 \pm 0,5$ mm e altura 100 ± 1 mm.

Os corpos de prova que não seguiram tais requisitos foram descartados.

Após o tempo pré-estabelecido de 7 e 28 dias em câmara úmida, os corpos de prova foram levados ao LACC da Universidade de Pernambuco para a realização do ensaio de resistência à compressão simples em uma prensa de marca Emic, modelo DL 30.000, e uma velocidade de 0,040 mm/s, como mostra a Figura 32.



Figura 32 – Ruptura do corpo de prova.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com o programa experimental de laboratório. As análises da caracterização física, mineralógica, química e do comportamento mecânico compreendem os ensaios de laboratório realizados com amostras de solo, agregado reciclado e misturas (agregado reciclado, solo, fibra e cimento) desses materiais.

4.1 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

Para quantificar os materiais que compõem o RCC utilizado nesta pesquisa, foi realizada uma composição gravimétrica com uma amostra de 70 Kg antes desse material ser selecionado e britado.

O material é composto por cerâmica branca (azulejo e piso), cerâmica vermelha (tijolo e telha), concreto e argamassa, madeira, papel, plástico e metais identificados nesta pesquisa como outros. A Figura 33 apresenta as porcentagens dos materiais que compõem a amostra.

Segundo a norma NBR 15115 (ABNT, 2004), materiais indesejáveis (classificados como outros) não podem ser usados na construção de bases granulares, podendo estar presentes no resíduo de construção sempre que a quantidade for inferior a 3%. De acordo com esses resultados, é possível afirmar que o material em estudo não apresenta uma quantidade significativa de material indesejado e poderia ser utilizado como agregado para base desde que sejam verificadas suas propriedades físicas e mecânicas.

O RCC, segundo a norma NBR 15116 (ABNT, 2004), apresenta um procedimento para classificação que pode ser de agregado reciclado de concreto (ARC) e agregado reciclado misto (ARM), considerando apenas o material retido na peneira nº 4 (4,75 mm). No primeiro caso, a quantidade de materiais cimentícios e pétreos deve ser maior ou igual a 90%. No segundo caso, essa quantidade deve ser menor que 90%. A

quantidade de material à base de cimento e rocha presente no RCC no presente estudo é de 61,3%, sendo, dessa forma classificado como agregado reciclado misto (ARM).

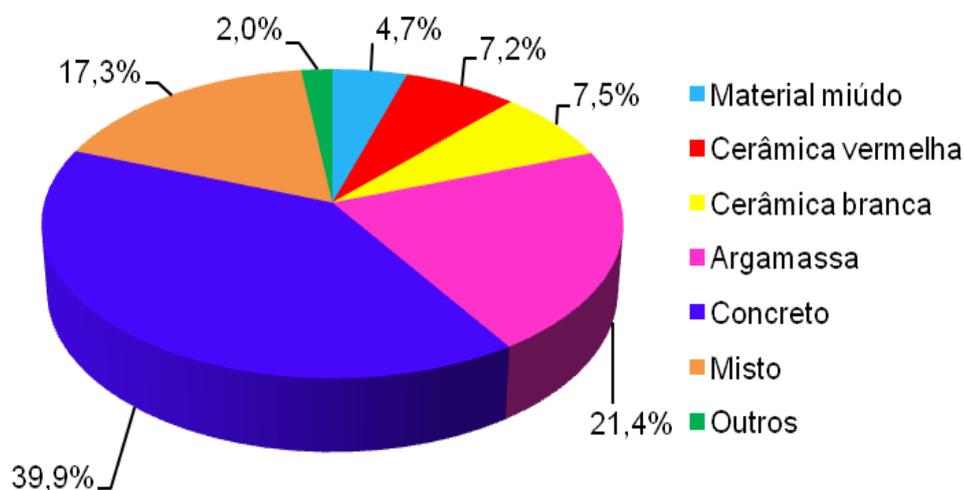


Figura 33 – Composição gravimétrica do RCC.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.2.1 Granulometria e índices físicos

A análise granulométrica das amostras estudadas foi realizada de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984). As curvas do solo, agregado-reciclado e das misturas (agregado reciclado e solo) em diferentes percentuais, estão representadas na Figura 34. Foram determinados os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c), verificando-se também a porcentagem passante na peneira 0,42 mm, visando, assim, garantir uma quantidade mínima de material fino para promover um maior embricamento de sua fração graúda. Foi observado que o solo e a maior parte das misturas não possuem coeficientes de uniformidade, com exceção da mistura com 75% de agregado reciclado que tem $C_c = 12$ e $C_u = 1,74$.

É possível verificar que as amostras passam pela peneira de 50 mm, conforme prescreve a norma NBR 15115 (ABNT, 2004), que os agregados reciclados devem ter dimensões máximas de 63,5 mm. A Tabela 05 mostra os percentuais de pedregulho, areia, silte e argila de cada amostra. Verificou-se que à medida que o percentual de agregado reciclado na mistura aumentava, o material se tornava mais granular, com maiores percentuais de areia.

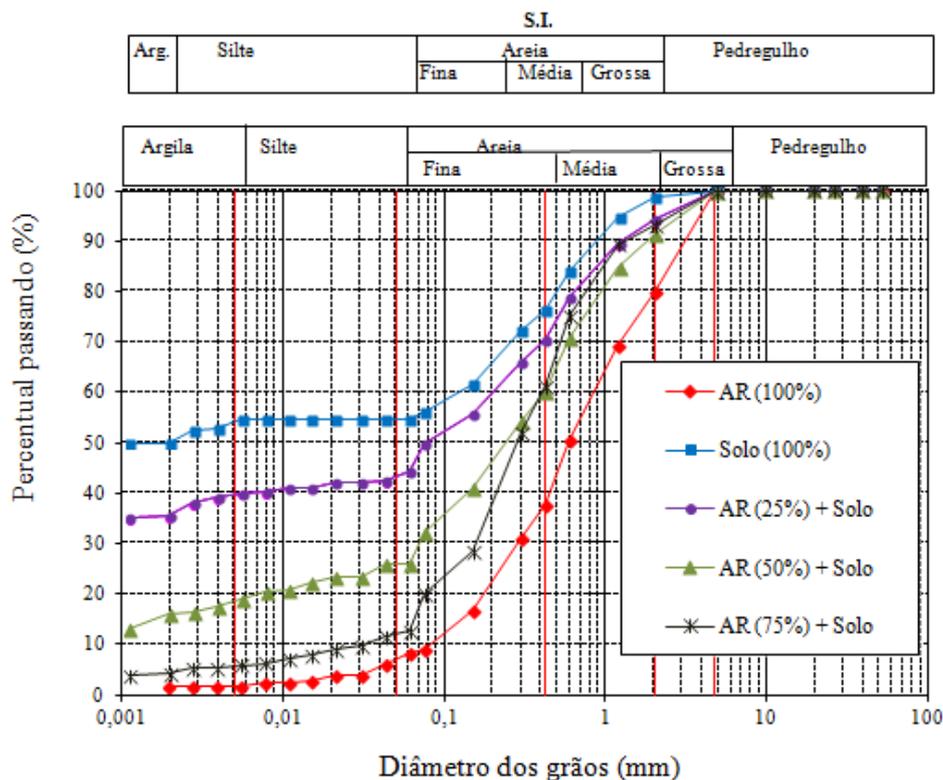


Figura 34 – Curvas granulométricas do solo, do agregado reciclado e dos compósitos.

Tabela 05 – Percentual de argila, silte e areia nas amostras de solo, agregado reciclado (AR) e das misturas.

Amostra	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
AR (100%)	-	93,5	4,4	2,1
Solo (100%)	3,2	42,8	3,3	50,7
AR (25%) + Solo	-	56,0	4,0	40,0
AR (50%) + Solo	-	74,2	6,8	19,0
AR (75%) + Solo	0,1	88,5	5,6	5,8

AR = Agregado Reciclado

A Tabela 06 mostra os valores obtidos para o agregado reciclado e os limites fixados pela NBR 15115 (ABNT, 2004).

Tabela 06 - Valores obtidos para o agregado reciclado e os limites fixados pela NBR 15115 (ABNT, 2004).

	Porcentagem que passa na peneira 0,42 mm (%)	<i>Cu</i>	<i>Cc</i>
Agregado reciclado (100%)	36	12,1	1,5
NBR 15115 (ABNT, 2004)	$10 \leq a \leq 40$	>10	Não consta

Com relação à dimensão característica máxima e a porcentagem passante na peneira 0,42 mm, é possível perceber que o agregado reciclado satisfaz o item especificado na norma. Com relação ao coeficiente de Uniformidade (*Cu*), encontrou-se valor superior, satisfazendo também a especificação brasileira; e esse resultado demonstra que o agregado reciclado é classificado como bem graduado.

Complementando a análise, a Tabela 07 apresenta os resultados da classificação dos materiais conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (ASTM, 1990) e a Transportation Research Board (TRB).

Tabela 07 – Classificação dos materiais segundo o SUCS e a TRB.

Materiais	Classificação SUCS	Classificação TRB
Agregado reciclado (AR)	Areia bem graduada -SW	Fragmentos de pedra, pedregulho e areia (A-1-b)
Solo	Argila arenosa - CL	Argila (A-7-6)
*AR (25%) + Solo	Areia argilosa - SC	Argila (A-6)
*AR (50%) + Solo	Areia siltosa - SM	Areia siltosa ou argilosa (A-2-4)
*AR (75%) + Solo	Areia siltosa - SM	Areia siltosa ou argilosa (A-2-4)

*AR = Agregado Reciclado

Considerando os dados da granulometria com as características citadas pelo DNIT (2006), foi possível classificar as amostras de:

- **Agregado reciclado (AR)**: fazendo parte do subgrupo A-1-b, que inclui os materiais constituídos, principalmente, de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado;
- **Solo**: se enquadra no subgrupo A-7-6, que inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume;
- **AR (25%) + solo**: faz parte do subgrupo A-6, em que o solo típico desse grupo é argiloso, plástico, tendo, geralmente, 75% ou mais de material passando na peneira n° 200 (0,075 mm). O grupo inclui também misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira n° 200. Os solos deste grupo comumente sofrem elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 16. Esses valores crescentes mostram o efeito combinado do aumento dos índices de plasticidade e diminuição dos materiais grossos;
- **AR (50%) + solo e AR (75%) + solo**: estão incluídas no subgrupo A-2-4, no qual são encontrados materiais como pedregulhos e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam o limite do grupo A-1 e ainda areia fina com silte não plástico excedendo os limites do grupo A-3. De acordo com o DNIT (2006), essas misturas apresentam um desempenho como reforço de subleito, variando de bom a excelente.

Foi determinado também o Índice de Grupo (IG), que define a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento. Quanto menor o IG, melhor será o material para subleito, como é o caso do agregado reciclado e das misturas com 50% e 75% de agregado reciclado, que apresentaram IG igual a zero, como mostra a Tabela 08. Entretanto, o solo e a mistura com 25% de agregado reciclado apresentaram valores diferentes de zero, indicando ser um material regular para ser utilizado como subleito.

Tabela 08 – Índices de grupo dos materiais e das misturas.

Materiais	Índice de Grupo
AR (100%)	0
Solo (100%)	11
AR (25%) + Solo	4
AR (50%) + Solo	0
AR (75%) + Solo	0

4.2.2 Densidade real

A densidade real foi determinada segundo a NBR 6508 (ABNT, 1984). Na Tabela 09, verifica-se que os resultados variaram entre 2,63 g/cm³ e 2,69 g/cm³, estando esses valores próximos aos obtidos em outras pesquisas envolvendo RCC como os encontrados por Lira Jr. (2010), os quais foram de 2,63 g/cm³ a 2,76 g/cm³.

Tabela 09 – Densidade real das amostras.

Amostra	Densidade Real (g/cm³)
AR (100%)	2,63
Solo (100%)	2,66
AR (25%) + Solo	2,69
AR (50%) + Solo	2,65
AR (75%) + Solo	2,64

4.2.3 Limites de Atterberg

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos nos ensaios de LL e LP, onde se verifica que tanto o AR (100%) quanto à mistura de AR (75%) + Solo não apresentaram limites de liquidez e plasticidade, comportando-se como materiais não plásticos.

Tabela 10 – Limites de Atterberg do agregado reciclado, do solo e das misturas.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
AR (100%)	-	-	-
Solo (100%)	48,1	24,5	23,6
AR (25%) + Solo	37,8	25,2	12,6
AR (50%) + Solo	31,3	24,8	6,5
AR (75%) + Solo	-	-	-

Segundo a norma NBR EB-2103/91, quando os valores obtidos para LL e IP ultrapassam 25% e 6% respectivamente, é indicado realizar um ensaio de equivalente de areia, e este deverá ter um valor superior a 30%.

No caso do material utilizado nesta pesquisa, apesar de apenas três resultados de Limite de Liquidez ultrapassarem o valor requerido, foram realizados os ensaios de equivalente de areia em todas as amostras para efeito comparativo.

4.2.4 Metodologia MCT

No Brasil, o sistema de classificação de solos mais usado em pavimentação é o que segue as instruções do TRB e do SUCS. No entanto, pesquisas iniciadas por Nogami e Villibor quanto ao comportamento de solos tropicais demonstram que o comportamento desses materiais muitas vezes foge ao esperado pelas classificações tradicionais, o que ocasionou a proposição da metodologia MCT, através de uma série de procedimentos que reproduzem condições mais reais de solos usados na pavimentação.

A Figura 35 apresenta o ábaco para classificação MCT dos materiais desta pesquisa. Na classificação MCT, as amostras de AR (25%) + solo, AR (50%) + Solo e AR (75%) + Solo foram enquadradas no grupo LA' (areias argilosas lateríticas). As amostras de solo e de agregado reciclado foram classificadas como LG' (argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas) e LA (areias com pouca argila laterítica), respectivamente. De acordo com a classificação de Nogami e Villibor (1995), são materiais que possuem recomendação de utilização em obras viárias como base de pavimento de vias de baixo volume de tráfego, reforço de subleito e subleito compactado.

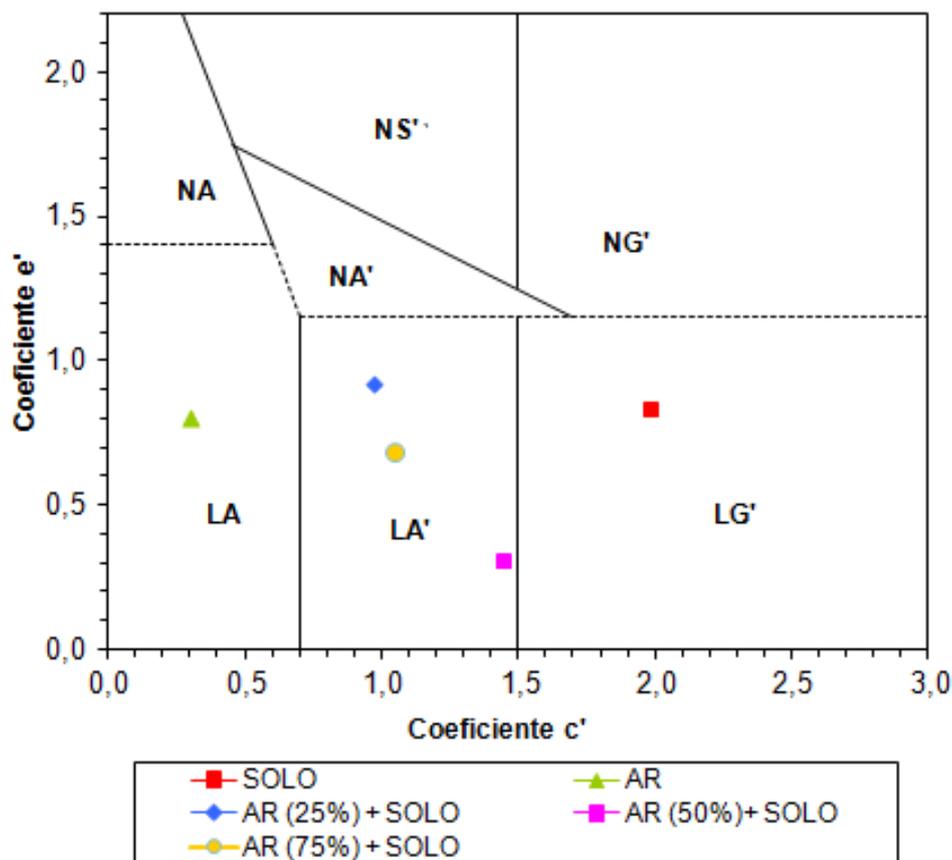


Figura 35 – Ábaco com a classificação MCT dos materiais.

4.2.5 Absorção

A absorção do agregado reciclado foi baseada na NBR 6458 (ABNT, 1984), e o valor da fração graúda do agregado reciclado foi de 8,7%. A Tabela 11 apresenta os valores de absorção com referência a diferentes composições de materiais.

O valor da absorção do agregado reciclado utilizado nesta pesquisa foi superior em relação aos valores encontrados por alguns autores, como apresentados na Tabela 10, sendo esse fato consequência da heterogeneidade dos materiais presentes nos diferentes agregados reciclados, que influi diretamente na sua capacidade de absorção. A determinação dessa propriedade nos materiais reciclados é importante, pois o agregado poroso pode absorver o ligante asfáltico, o que resultaria em uma mistura mais seca ou pobre, vindo a sofrer desagregações durante o uso.

Tabela 11 – Teor de Absorção de diversos agregados reciclados.

Tipo do Agregado Reciclado	Procedência	Absorção (%)	Autor/ano
Misto	RMR	8,7	Esta pesquisa
Misto	RMR	10,45	Proença (2012)
		11,92	
		11,4	
		10,38	
		16,42	
ARC*	Brasília	7,7	Jiménez (2011)
Misto	-	8,1	Silva (2009)
Misto	Fortaleza/CE	7,0	Lima (2008)
ARC*	Fortaleza/CE	6,2	Ron <i>et al.</i> (2008)
ARC*	Hong Kong	8,9	Tam <i>et al.</i> (2008)
ARC*	Santo André/SP	12,2	Leite (2007)
Cerâmico	Hong Kong	19,0	Ponn <i>et al.</i> (2006)
Misto	São Paulo/SP	7,8	Motta (2005)
Misto	Macéio/AL	6,0	Vieira <i>et al.</i> (2004)

* ARC = Agregado Reciclado de Concreto.

Lima (2008) e Leite (2007) obtiveram teores de absorção em britas inferiores a 4%. Nesse caso, é possível dizer que o agregado reciclado é mais poroso que o agregado natural e, portanto, a quantidade de água que deve ser adicionada para o ensaio de compactação deve ser maior que a dos materiais convencionais. A norma NBR 15116 (ABNT, 2004) define que a absorção do agregado reciclado graúdo para utilização em concreto sem função estrutural seja menor ou igual a 7%, mas não define limite para fins de pavimentação. Nesse caso, a utilização do agregado reciclado desta pesquisa não deve ser descartada como material de base.

4.2.6 Equivalente de areia

Conforme a norma NBR EB-2103/91, se os valores de LL e IP forem superiores a 25% e 6%, respectivamente, é indicado que seja realizado o ensaio de equivalente de areia e que seu resultado seja superior a 30%, conforme descrito no item 4.2.3.

Para cada ensaio, foram realizados três testes para garantir maior segurança. A Tabela 12 apresenta os valores médios dos resultados, podendo ser observado que o equivalente de areia das amostras de AR (100%), AR (50%) + solo e AR (75%) + solo são superiores a 30%, o que indica baixo conteúdo de material argiloso em sua composição, além de cumprir o valor exigido pela norma NBR EB-2103/91.

Tabela 12 – Resultados de equivalente de areia das amostras.

Amostra	Equivalente de areia
AR (100%)	74,2
Solo (100%)	5,1
AR (25%) + Solo	5,3
AR (50%) + Solo	37,8
AR (75%) + Solo	48,4

4.2.7 Forma dos grãos

É consenso que, em misturas asfálticas, as partículas de agregados devem ser mais cúbicas que planas ou alongadas, seja nos concretos betuminosos ou em revestimentos por penetração. As partículas de forma angular exibem um maior intertravamento e atrito interno, resultando em uma maior estabilidade mecânica em relação às partículas lamelares. Entretanto, partículas arredondadas, como cascalhos naturais, seixos e areias, têm uma melhor trabalhabilidade e requerem menor esforço de compactação, porém isso não constitui necessariamente uma vantagem, visto que podem vir a densificar sob ação do tráfego, levando a deformações permanentes (SILVA, 2009).

A determinação da forma dos grãos foi realizada segundo os procedimentos da norma NBR 6954 (ABNT, 1989), utilizando as frações do material retido nas peneiras 25,4 mm; 19,1 mm; 9,52 mm; 4,76 mm e 2,00 mm. A Tabela 13 apresenta as formas e as porcentagens na amostra analisada.

Tabela 13 – Forma dos grãos e as respectivas porcentagens do agregado reciclado.

Classificação da forma	Presença no agregado reciclado (%)
Cúbica	58,0
Alongada	26,1
Lamelar	15,2
Alongada-lamelar	0,7

De acordo com a Tabela 12, há uma predominância na amostra de grãos de forma cúbica (58%). A cubicidade dos agregados reciclados decorre, em parte, de sua suscetibilidade ao desgaste superficial e da fragmentação de partículas no momento da britagem. A forma cúbica dos agregados reciclados foi verificada em diversas pesquisas, tais como as realizadas por Motta (2005), Leite *et al.* (2006), Lima (2008) e Jiménez (2011).

Agregados cúbicos são mais indicados para pavimentação, já que o material de forma lamelar tende a se quebrar quando exposto ao tráfego e a outras ações construtivas, LIMA (2008).

Os valores obtidos nesta pesquisa atendem à NBR 15115 (ABNT, 2004), que recomenda para o agregado reciclado uma porcentagem de até 30% de grãos lamelares. É verificado um percentual considerável de partículas alongadas e menos de 1% de partículas com a forma alongada-lamelar.

4.2.8 Retração linear

A Tabela 14 mostra os resultados da retração linear de cada mistura. Esses resultados mostram a soma das fendas existentes entre a caixa e as amostras, apresentando valores inferiores a 20 mm. Conforme define as prescrições do CEPED (1984), após os sete dias, a amostra não deve apresentar nenhuma fissura transversal na parte central da caixa, o que foi observado, independentemente da variação do percentual de agregado reciclado, como mostra a Figura 36.

Tabela 14 – Resultados da retração linear.

Materiais	Retração Linear (mm)
AR (75%) + Solo	0,77
AR (50%) + Solo	0,79
AR (25%) + Solo	0,10



Figura 36 – Verificação da retração linear para cada mistura.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA

4.3.1 Análise mineralógica com lupa e difração de raios X

Na análise mineralógica dos grãos de solo (Figura 37a), observou-se a ocorrência de grãos de quartzo variando de angulosos a subangulosos. Foram encontrados fragmentos de crosta laterítica (Figura 37b), além de fragmentos de carapaças de moluscos (CaCO_3) arredondados a subarredondados e material orgânico típico de solos argilosos. É verificado uma elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos cuja coloração própria é avermelhada. A Figura 38 identifica os grãos de quartzo e da crosta laterítica.

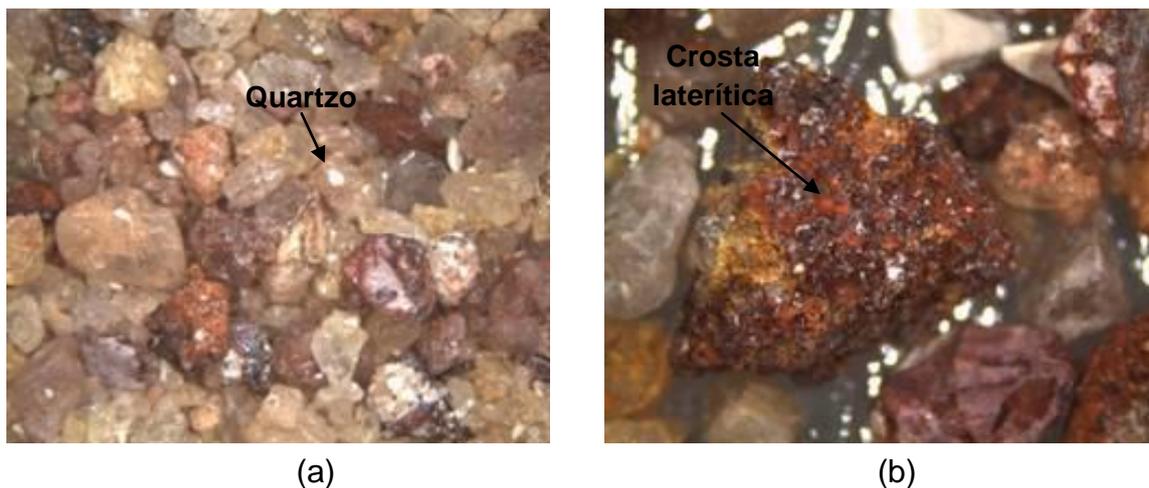


Figura 37 – Análise mineralógica do solo com lupa (Aumento – 8x) (a); retida na peneira n° 10 (Aumento 8x) (b).



Figura 38 – Feições microscópicas do solo – Aumento 50x.

O difratograma de raio X da fração de solo complementa a análise mineralógica apresentada na Figura 39. Neste solo, foi constatada a presença da caulinita, onde seu pico intenso foi de 7,20 Å e 3,58 Å, indicando o predomínio isolado desse argilomineral nessa fração e o seu bom grau de cristalinidade. Foram constatados, ainda, resquícios de illita, com pico de 3,36 Å.

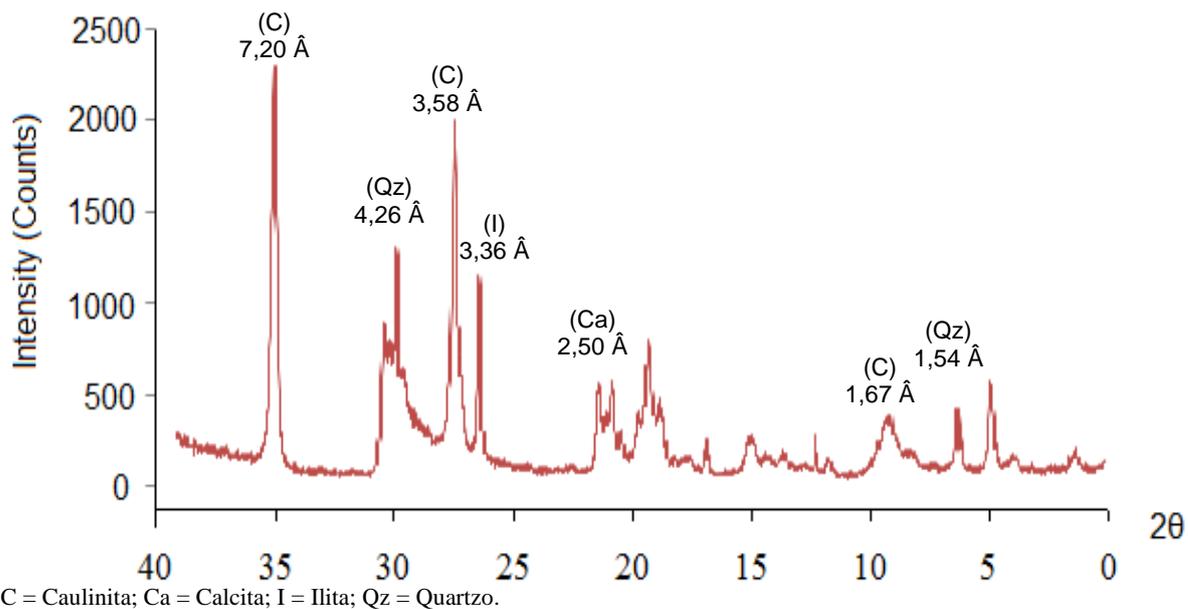


Figura 39 – Difratoograma de raio X da fração de solo.

Foi possível, também, observar os grãos da amostra de agregado reciclado com mais detalhes. Com auxílio da lupa binocular, verificou-se a predominância de grãos de quartzo (Figura 40) variando de subangulosos a subarredondados, porém foram encontrados alguns cristais de feldspato (Figura 41) como a microclina.

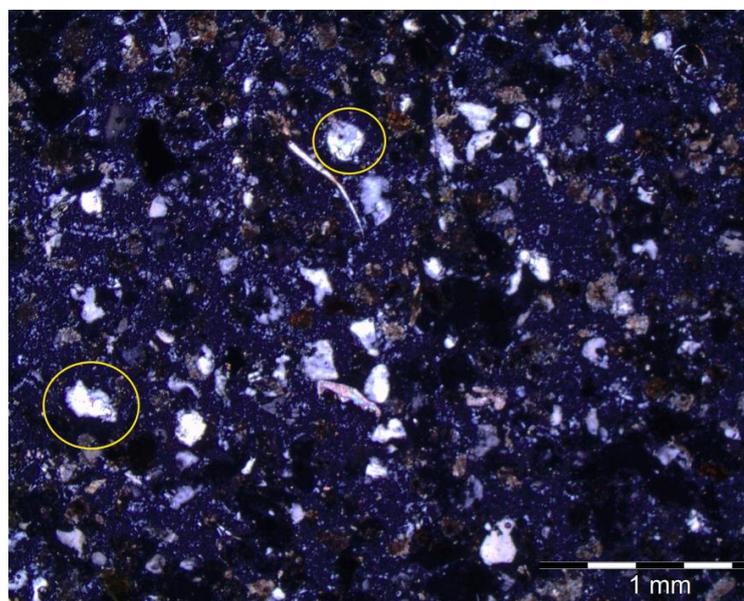


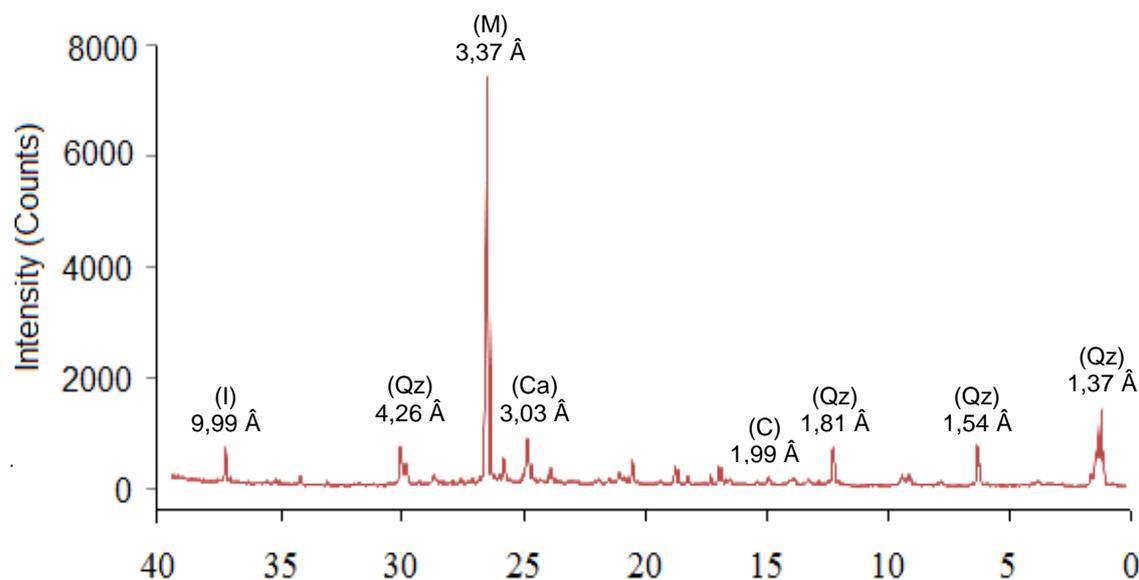
Figura 40 – Análise do agregado reciclado na lupa com evidência de grãos de quartzo.



Figura 41 – Agregado reciclado com evidência de feldspato (microclina).

A difração de raios X realizada na amostra de agregado reciclado (Figura 42) mostra que este possui quantidades diferentes de tectosilicatos como o quartzo. Além disso, confirma a presença da microclina, um mineral de feldspato. Esse mineral é o constituinte não plástico que, além da função de fundente, auxilia o corpo cerâmico a manter a sua forma após a queima na indústria.

Assim como o feldspato, apareceram carbonatos, tal como a calcita, que se justifica pela quantidade de materiais cimentícios (concreto e argamassa) presentes no agregado reciclado. Os filosilicatos, como a caulinita e em menor quantidade a ilita, estão presentes devido aos materiais cerâmicos.



C = Caulinita; Ca = Calcita; I = Ilita; Qz = Quartzo; M = Microclina.

Figura 42 – Difratoograma de raio X da fração de agregado reciclado.

4.3.2 Análise do pH dos materiais

Através da análise do pH dos materiais (Tabela 15), foi possível observar que o pH em água das amostras variam de 4,8 a 12,2, e o pH em KCl está no intervalo de 4,3 a 11. Com isso, verificou-se que o solo tem pH ácido; em contrapartida, o agregado reciclado e as misturas se caracterizam como alcalinos.

Tabela 15 – Valores de pH em água e em KCl das amostras.

Amostras	pH em KCl	pH em água	Δ pH
AR (100%)	11,0	12,2	- 1,2
Solo (100%)	4,3	4,8	- 0,5
AR (25%) + solo	8,9	9,9	- 1,0
AR (50%) + solo	10,3	11,3	- 1,0
AR (75%) + solo	10,9	12,0	- 1,1

Observa-se que a variação do pH (Δ pH) é negativo, indicando a possível presença de argilas de sílica e de alumínio. Isso também é confirmado no ensaio de DRX, que revelou a presença de argilominerais ricos em sílica e alumínio, como a ilita e a caulinita.

Svehla (1979) verificou que valores de pH superiores a 9 influenciam na precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) ao longo do tempo. Isso pode explicar a presença de CaCO_3 no agregado reciclado.

4.3.3 Análise do teor de sulfatos

De acordo com a NBR 15.116 (ABNT, 2004), o teor máximo de sulfatos em percentual é de 2% em relação à massa de agregado reciclado. A Tabela 16 apresenta os valores encontrados nas amostras analisadas. Com isso, é possível verificar que os materiais atendem às especificações da norma citada.

Tabela 16 – Teor de sulfatos das amostras.

Amostras	Teor de sulfatos (%)
AR (100%)	0,02
Solo (100%)	0,02
AR (25%) + solo	0,03
AR (50%) + solo	0,01
AR (75%) + solo	0,02

4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.4.1 Escolha da fibra

As fibras de polipropileno do tipo lisa têm um menor diâmetro, apresentando uma maior superfície específica. As fibras de polipropileno do tipo corrugada estão sendo produzidas com o intuito de incrementar a aderência, pois apresentam uma superfície mais rugosa, apesar de uma menor superfície específica. Diante dessas características, surge a necessidade de verificação para que possa ser escolhida a que apresente melhor desempenho no material estudado. Realizando-se um ensaio de compressão simples, foram obtidas as curvas de tensão *versus* o deslocamento com amostras de AR (50%) + Solo, com a presença de cimento e 0,5% de fibra (lisa e corrugada). Esses corpos de prova permaneceram em câmara úmida por sete dias antes de serem rompido. Utilizou-se a média dos resultados de 3 corpos de prova para cada mistura, tanto para a fibra lisa, quanto para a corrugada.

Pode-se observar, na Figura 43, que a tensão de ruptura e a resistência pós-pico do corpo de prova com fibra lisa apresenta valores superiores em relação ao corpo de prova com a fibra corrugada, com um incremento de 15,0 %, sendo, portanto, a fibra lisa a escolhida para a execução dos ensaios de laboratório.

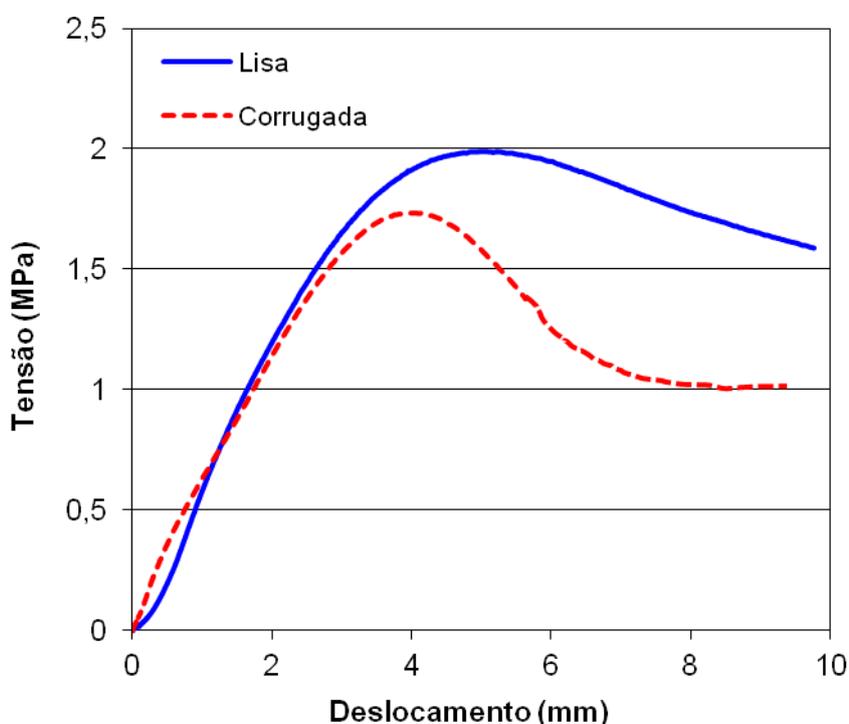


Figura 43 – Curvas de resistência à compressão simples da mistura AR (50%) + Solo + 2% Cimento e 0,5% Fibra.

4.4.2 Compactação

As amostras analisadas foram submetidas ao ensaio de compactação descrito na norma NBR 7182 (ABNT, 1986). Além da obtenção da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo, foi analisada a quebra dos grãos após a compactação.

Durante a realização de cada ensaio de compactação, foram moldados cinquenta e dois corpos de prova com reuso do material. A norma NBR 7182 (ABNT, 1986) diz que, para obter a curva de compactação, são necessários cinco pontos, sendo dois no ramo seco, um próximo à umidade ótima e dois no ramo úmido da curva.

As curvas de compactação, aplicando a energia de Proctor Intermediário nas amostras de solo, agregado reciclado e das misturas sem fibras, estão apresentadas nas Figuras 44 e 45, onde foram observadas curvas com formato de sino. Esse formato é bem relevante, pois em função da grande variabilidade das amostras, os resultados com agregados reciclados são em geral bem dispersos, dificultando a obtenção da curva de compactação, LEITE, (2007); MOLENAAR e NIEKEERK, (2002) e O'MAHONY e MILLIGAN, (1991).

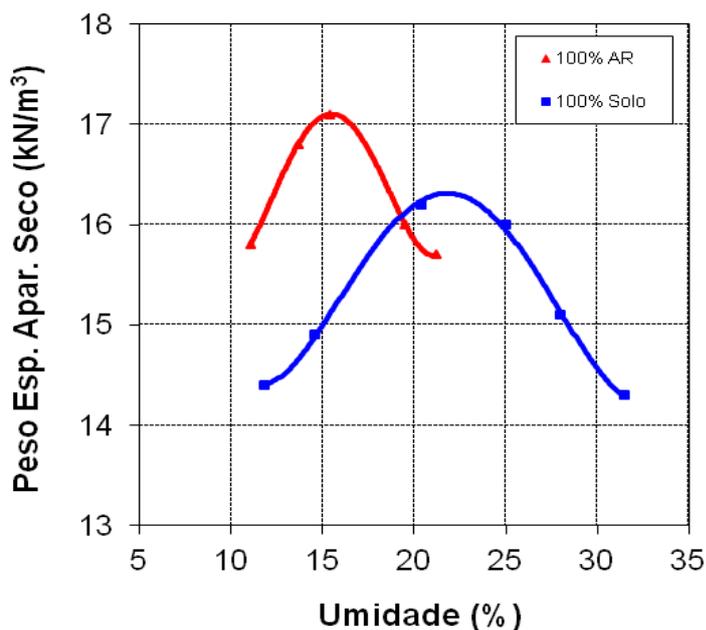


Figura 44 – Curvas de compactação do solo e do agregado reciclado.

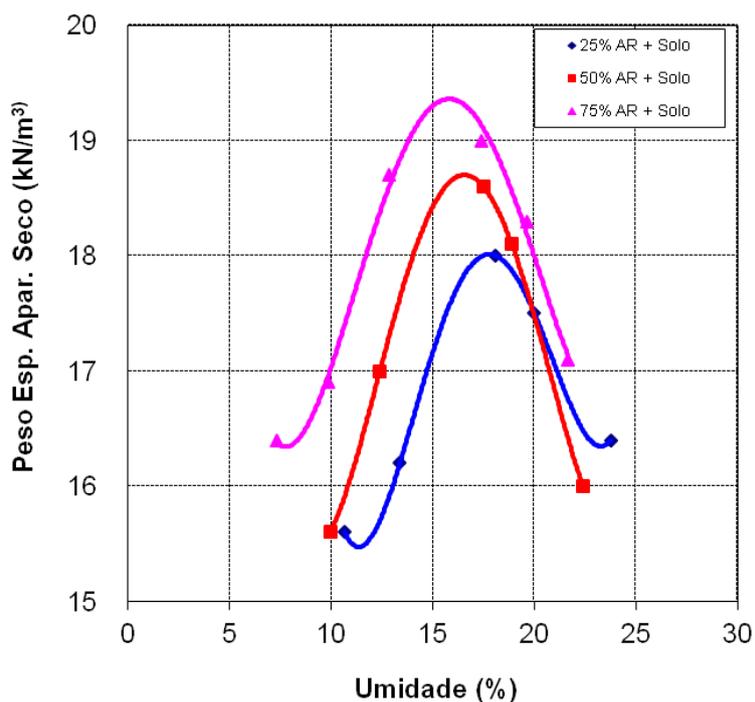


Figura 45 – Curvas de compactação das misturas sem as fibras.

A Tabela 17 mostra as umidades ótimas e os pesos específicos dessas curvas sem adição de fibras. Observou-se que a umidade ótima das misturas sem adição de fibras variou na faixa de 15,3% a 18,6% e apresentou redução à medida que o percentual de agregado reciclado aumentou (Figura 46). Além disso, o peso específico seco máximo aumentou com a maior variação de fração granular, como apresentado na Figura 47.

Tabela 17 - Umidades ótimas e pesos específicos dos materiais sem fibras.

Materiais	W_{ot} (%)	γ_s (kN/m³)
AR (100%)	15,5	17,1
Solo (100%)	22,0	16,4
AR (25%) + Solo	18,6	18,0
AR (50%) + Solo	16,4	18,7
AR (75%) + Solo	15,3	19,4

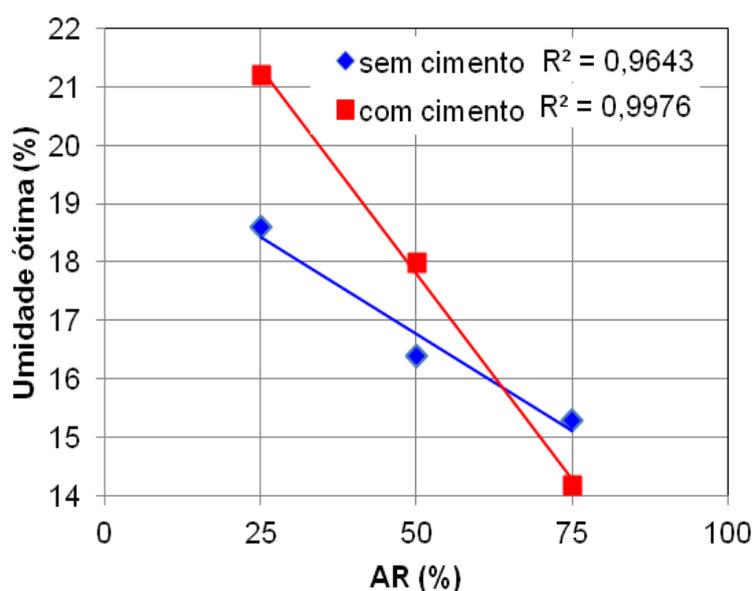


Figura 46 – Umidade ótima X Agregado reciclado na mistura.

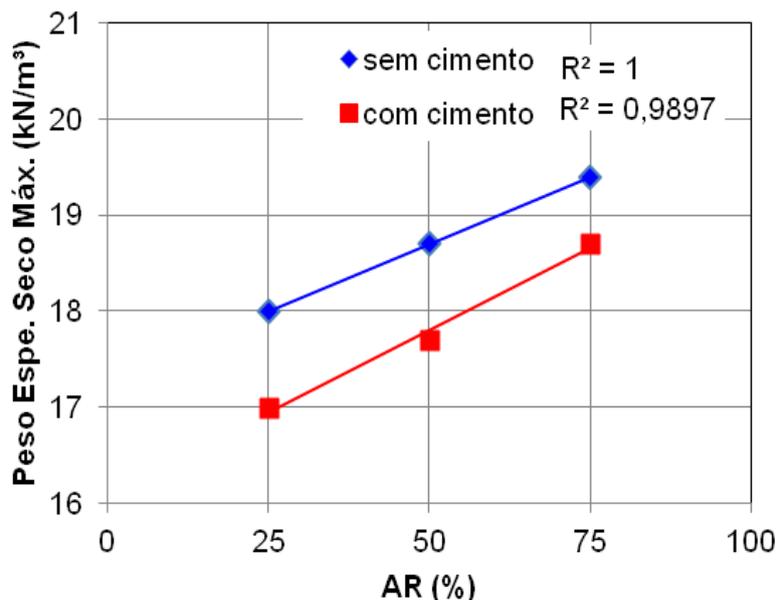


Figura 47 – Peso específico seco máximo X Agregado reciclado na mistura.

Esses resultados estão em concordância com as indicações da literatura, pois corroboram que a presença de frações mais granulares em um material, quando estes se encontram compactados, indicam menores umidades ótimas e maiores pesos específicos.

Souza, Segantini e Pereira (2008) também observaram uma redução dos valores de umidade ótima em função da adição de resíduos no solo. Esses autores verificaram que a adição dos resíduos de concreto no solo argiloso aumentou o peso específico da mistura devido a uma melhor acomodação das partículas durante a compactação. A tendência é, portanto, obter materiais mais compactos, mais resistentes, com menor absorção de água e, certamente, mais duráveis.

Com relação às umidades ótimas e aos percentuais de agregado reciclado na mistura, como apresentados nas Tabelas 18 e 19, as correlações são negativas devido às variáveis que se movem em direções opostas, sendo o $r_{xy}^1 = -0,98$ (sem cimento) e o $r_{xy}^1 = -1$ (com cimento), indicando, mesmo assim, forte correlação. Quanto à qualidade do ajuste dos pontos traçados no diagrama de dispersão em torno da linha de tendência, o resultado foi obtido por meio do coeficiente de determinação (R^2), ficando próximo de 1 para os dois tipos de amostra, indicando bom ajuste linear.

É possível observar que a associação entre o percentual de agregado reciclado na mistura e o peso específico seco máximo, nas Tabelas 18 e 19, apresenta correlações

positivas, visto que as variáveis crescem no mesmo sentido e o $r_{xy}^1 = 1$ (sem cimento) e o $r_{xy}^1 = 0,99$ (com cimento). Os coeficientes de determinação (R^2) também foram próximos de 1, indicando, também, bom ajuste linear.

Tabela 18 – Correlações das amostras sem fibras e sem cimento².

	Agregado reciclado (%)	Umidade ótima (%)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	25	18,6	625	346	465	-0,98
	50	16,4	2500	269	820	
	75	15,3	5625	234,1	1147,5	
Σ =	150	50,3	8750	849	2432,5	
	Agregado reciclado (%)	Peso esp. seco máx. (kN/m ³)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	25	18	625	324	450	1,00
	50	18,7	2500	349,7	935	
	75	19,4	5625	376,4	1455	
Σ =	150	56,1	8750	1050,1	2840	

Tabela 19 – Correlações das variáveis das amostras sem fibras e com cimento².

	Agregado reciclado (%)	Umidade ótima (%)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	25	21,2	625,0	449,4	530	-1,00
	50	18,0	2500,0	324,0	900	
	75	14,2	5625,0	201,6	1065	
Σ =	150	53,4	8750,0	975,1	2495	
	Agregado reciclado (%)	Peso esp. seco máx. (kN/m ³)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	25	17,0	625,0	289,0	425	0,99
	50	17,7	2500,0	313,3	885	
	75	18,7	5625,0	349,7	1402,5	
Σ =	150	53,4	8750,0	952,0	2712,5	

A Tabela 20 apresenta valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, encontrados na bibliografia para agregados reciclados de diferentes composições e origens. Verifica-se uma variabilidade nos valores de umidade ótima em relação ao tipo de agregado reciclado. Esse fato pode ser explicado devido a fatores que influem no momento da análise do agregado reciclado, como: origem do RCC, composição, granulometria, energia de compactação e quantidade de água.

¹ Os valores de X correspondem aos percentuais de agregado reciclado, e os de Y são os pesos específicos secos máximos ou as umidades ótimas.

Tabela 20 – Umidades ótimas e pesos específicos de diferentes composições e origens.

Tipo de agregado reciclado	Procedência	W _{ot} (%)	γ _s (kN/m ³)	Autor
AR misto	RMR	15,5	17,1	Esta pesquisa
AR misto	RMR	21,5	17,0	Proença (2012)
		20,3	17,4	
		21,2	16,9	
		18,1	17,4	
		18,5	16,9	
*RCA	São Paulo	14,5	17,5	Leite <i>et al.</i> (2011)
Misto	Brasília	15,3	17,2	Jiménez (2011)
**ARCV	Uberlândia	21,0	16,1	Dias <i>et al.</i> (2006)
*RCA	Goiânia	14,5	18,4	Oliveira <i>et al.</i> (2005)
***AR misto	São Paulo	11,0	18,3	Motta (2005)

*RCA – Agregado Reciclado de Concreto

**ARCV – Agregado Reciclado de Cerâmica Vermelha

***AR misto – Agregado Reciclado misto

Além dos autores mencionados na Tabela 20, outras pesquisas aplicando energias de compactação em RCC com materiais do tipo misto ou de apenas um tipo de material (cerâmico, cimentício), também obtiveram valores de peso específico e umidade ótima, como Santos (2007) entre 17,9 a 18,9 kN/m³ e 13,0 a 17,8%; Macedo (2008) entre 15,7 a 17,5 kN/m³ e 14,0 a 21,0%; Grubba (2009) entre 17,8 a 20,3 kN/m³ e 11,0 a 21,2%; Lira Jr. (2010) 15,8 kN/m³ e 17,5%; e Proença (2012) entre 17,1 a 17,9 kN/m³ e 18,4 a 19,9%.

As Figuras 48, 49 e 50 apresentam as curvas de compactação das misturas com os diferentes teores de fibras, e as Figuras 51, 52 e 53 mostram as curvas de compactação das misturas com adição de cimento, encontradas a partir da execução do ensaio, aplicando a energia de Proctor Intermediário.

² Interpretação dos valores de r_{xy}:

- a) 0 a + 0,19 – correlação bem fraca
- b) -0,20 a - 0,39 ou 0,20 a 0,39 – correlação fraca
- c) -0,40 a -0,69 ou 0,40 a 0,69 – correlação moderada
- d) -0,70 a -0,89 ou 0,70 a 0,89 – correlação forte
- e) -0,90 a -0,99 ou 0,90 a 0,99 – correlação muito forte
- f) -1 ou +1 – correlação perfeita

As curvas das amostras com 25% de agregado reciclado, representadas na Figura 48, apresentaram comportamento diferenciado em relação às outras amostras com a presença das fibras. A curva da mistura com 0,75% de fibra apresentou maior peso específico e maior umidade ótima em relação à composição com 0,25% de fibras, com valores de aumento de 1,1% e 1,2%, respectivamente. Uma possível explicação para essa diferença seria a heterogeneidade do material.

As curvas de compactação representadas na Figura 49 mostram que a inclusão das fibras nos compósitos com 50% de agregado reciclado causou uma pequena redução da umidade ótima, aproximadamente de 2%, e do peso específico máximo, com uma redução média de 0,9%.

Segundo Feuerharmel (2000) a adição de fibras facilita uma interligação entre os poros do solo, tornando-se mais permeável. Desta forma, a inserção de fibras em um solo argiloso provoca alterações de natureza física.

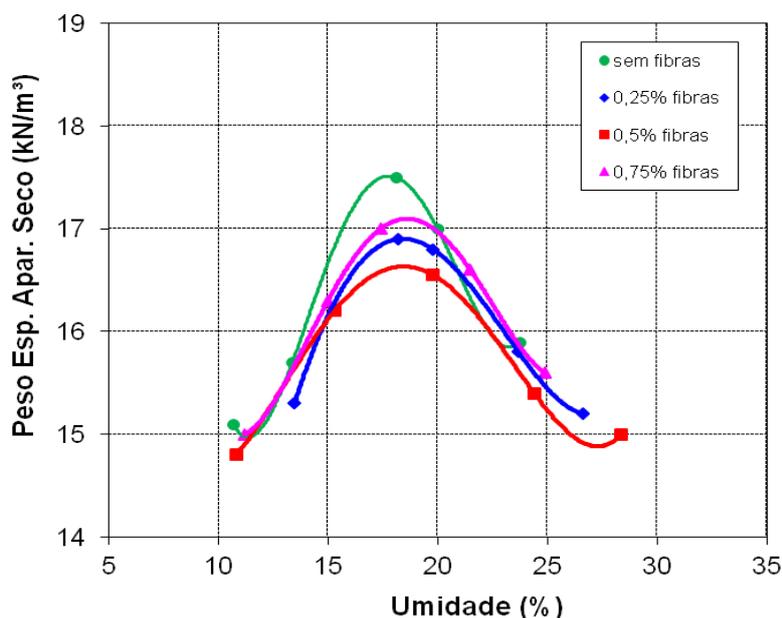


Figura 48 – Curvas de compactação com 25% de AR, solo e diferentes teores de fibras.

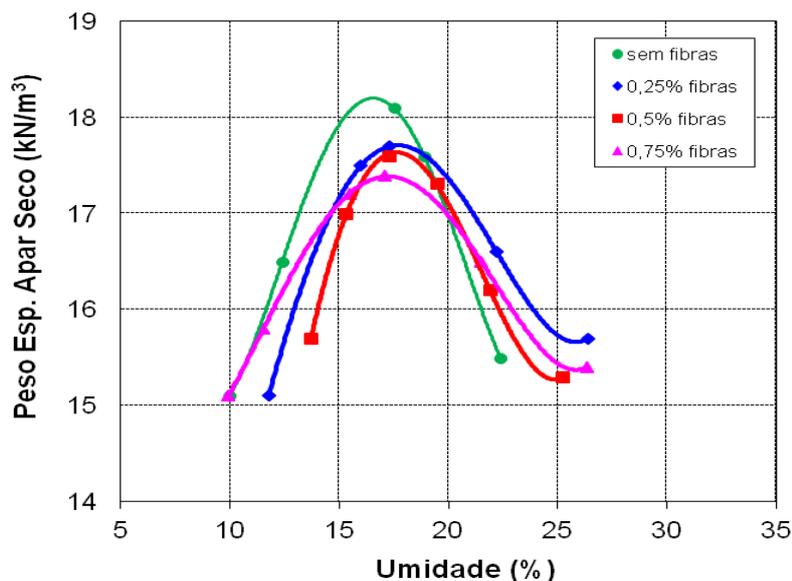


Figura 49 – Curvas de compactação com 50% de AR, solo e diferentes teores de fibras.

Para as misturas com 75% de agregado reciclado (Figura 50), o peso específico seco máximo e a umidade ótima diminuíram à medida que o teor de fibra aumentava, com exceção da curva de 0,75% de fibra em que ocorreu um pequeno acréscimo, próximo a 2% na umidade ótima, e uma redução de 3,8% do peso específico máximo quando comparado a amostra de AR (75%) + Solo + Fibra (0,25%).

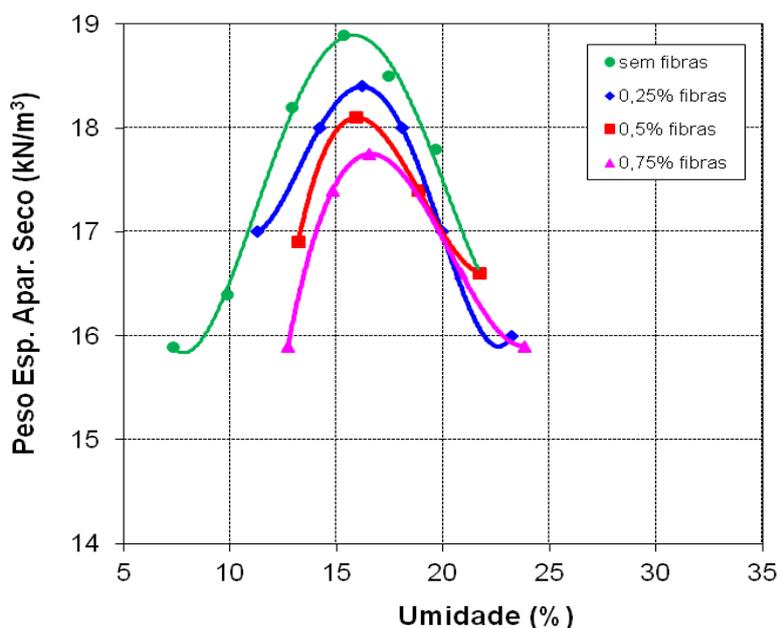


Figura 50 – Curvas de compactação com 75% de AR, solo e diferentes teores de fibras.

A Figura 51 apresenta as curvas de compactação com 25% de agregado reciclado na mistura com adição de cimento (2%). Verifica-se uma redução do peso específico

aparente seco de 5,3% de acordo com o aumento do percentual de fibras assim como nos valores das amostras sem adição de cimento.

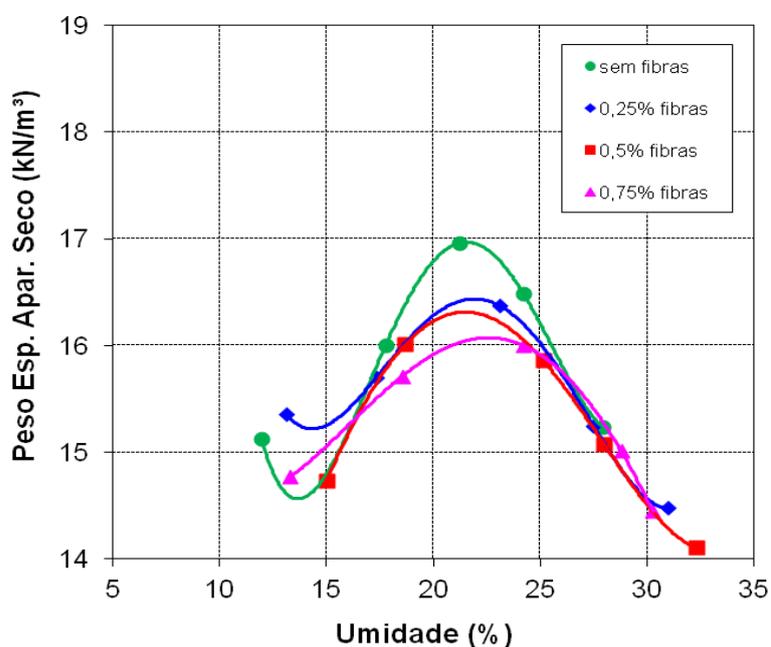


Figura 51 – Curvas de compactação com 25% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.

As curvas da mistura de 50% de AR com adição de cimento estão apresentadas na Figura 52, sendo possível observar que a amostra com 0,25% de fibra apresentou valores muito próximos aos da mistura sem fibras. Além disso, os pesos secos diminuem 4,5% com relação à inserção de fibras nas amostras. Em contrapartida, houve um aumento da umidade ótima em torno de 4,3%, com exceção da amostra com 0,75% de fibra, que ocorreu um decréscimo com relação à amostra com 0,5% de fibra.

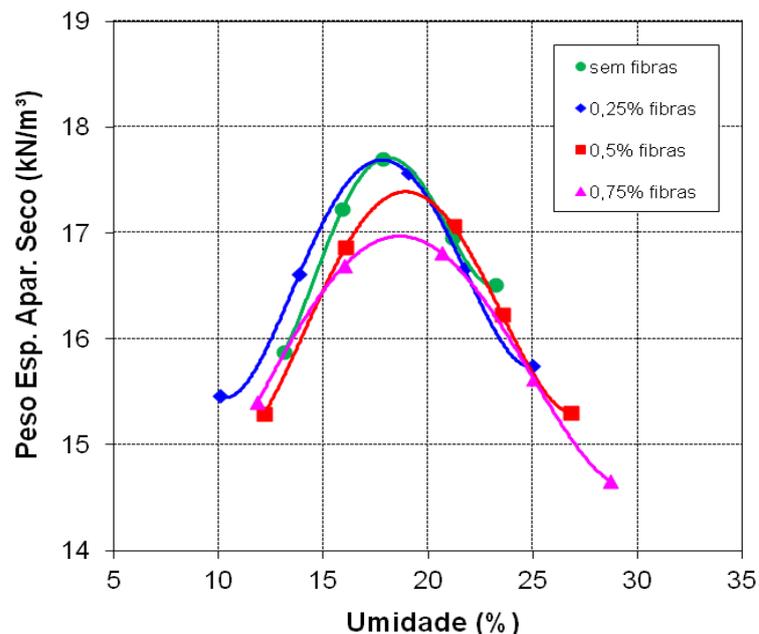


Figura 52 – Curvas de compactação com 50% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.

De acordo com as curvas de compactação de 75% AR na mistura (Figura 53), a amostra sem fibras e com 0,25% de fibra apresentaram mesmo valor para a umidade ótima. Com relação à adição de 0,75% de fibras na amostra, a umidade teve um acréscimo de 16,2%, já os pesos secos reduziram em torno de 5,9%, quando comparada a amostra sem fibras.

Uma possível explicação para essas alterações com a adição de cimento na mistura seria de natureza química, de acordo com Feuerharmel (2000), pois as reações produzidas seriam de hidrólise da água e dissolução de compostos anidros do cimento em seus constituintes iônicos, ocorrendo um desequilíbrio iônico inicial. Isso é devido as partículas de argila serem eletricamente carregadas, provocando uma floculação do material. Verifica-se assim, um comportamento granular na mistura, pelo efeito da floculação, apresentados através das curvas de compactação, uma redução dos pesos secos máximos.

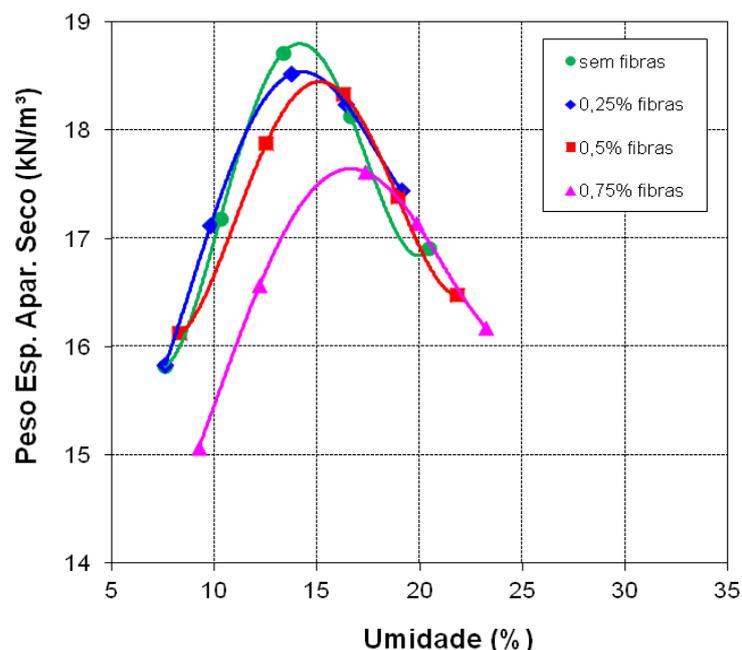


Figura 53 – Curvas de compactação com 75% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.

A Tabela 21 apresenta os valores referentes à umidade ótima e ao peso específico seco máximo de cada mistura com e sem adição de cimento. É possível observar que não ocorrem variações significativas nos parâmetros de compactação, umidades ótimas e pesos específicos aparentes secos máximos para as amostras de AR (50%) + Solo e AR (75%) + Solo. Esse comportamento também foi verificado por SILVA *et al.* (1995); NATARAJ *et al.* (1996); TRINDADE *et al.* (2006); SILVA (2007); RESCHETTI (2008).

Entretanto, ocorreu um acréscimo de umidade em torno de 23% nas amostras de AR (25%) + Solo com cimento em relação às amostras sem adição de cimento, e essa tendência não foi observada no peso específico seco máximo.

Tabela 21 – Valores obtidos nos ensaios de compactação do solo, do Agregado Reciclado (AR) e das misturas.

Amostra	Sem adição de cimento (2%)		Com adição de cimento (2%)	
	W _{ot} (%)	γ _s (kN/m ³)	W _{ot} (%)	γ _s (kN/m ³)
AR (25%) + Solo	18,6	18,0	21,2	17,0
AR (25%) + Solo + Fibra (0,25%)	18,1	16,9	22,0	16,4
AR (25%) + Solo + Fibra (0,5%)	18,0	16,6	21,8	16,3
AR (25%) + Solo + Fibra (0,75%)	18,3	17,1	23,0	16,1
AR (50%) + Solo	16,4	18,7	18,0	17,7
AR (50%) + Solo + Fibra (0,25%)	17,4	17,7	18,0	17,7
AR (50%) + Solo + Fibra (0,5%)	17,3	17,6	19,0	17,4
AR (50%) + Solo + Fibra (0,75%)	17,1	17,4	18,8	16,9
AR (75%) + Solo	15,3	19,4	14,2	18,7
AR (75%) + Solo + Fibra (0,25%)	16,2	18,4	14,2	18,6
AR (75%) + Solo + Fibra (0,5%)	16,0	18,1	15,5	18,4
AR (75%) + Solo + Fibra (0,75%)	16,5	17,7	16,5	17,6

A Figura 54 apresenta a dispersão das amostras de 25% de AR, mostrando que as misturas sem cimento apresentaram valores das umidades ótimas muito próximos, sendo um pouco diferente das amostras com cimento. Com relação à qualidade do ajuste, foi obtido um coeficiente de determinação $R^2 = 0,24$ (sem cimento) e $R^2 = 0,80$ (com cimento), que ficou próximo de 1 e indicou melhor ajuste linear.

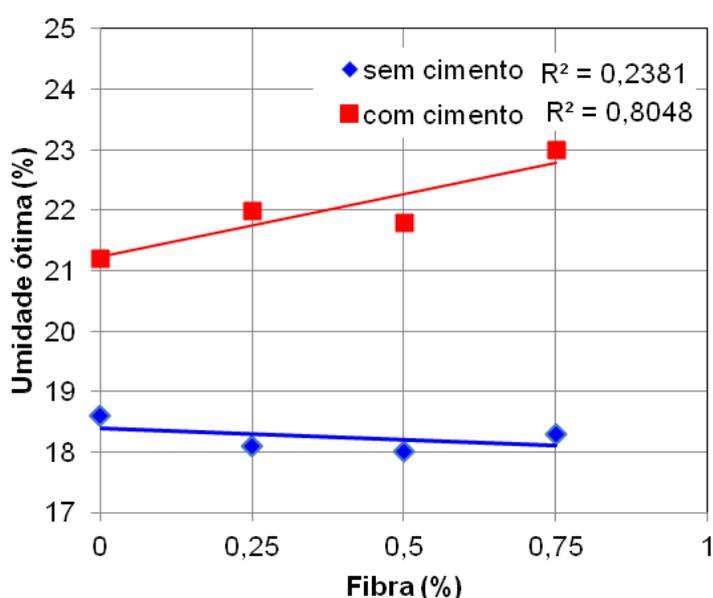


Figura 54 – Umidade ótima X Fibra nas misturas de 25% de AR.

Na Figura 55, é possível verificar que as associações entre as duas variáveis, percentual de fibras e o peso específico seco máximo, possuem $R^2 = 0,41$ (sem cimento) e $R^2 = 0,87$ (com cimento).

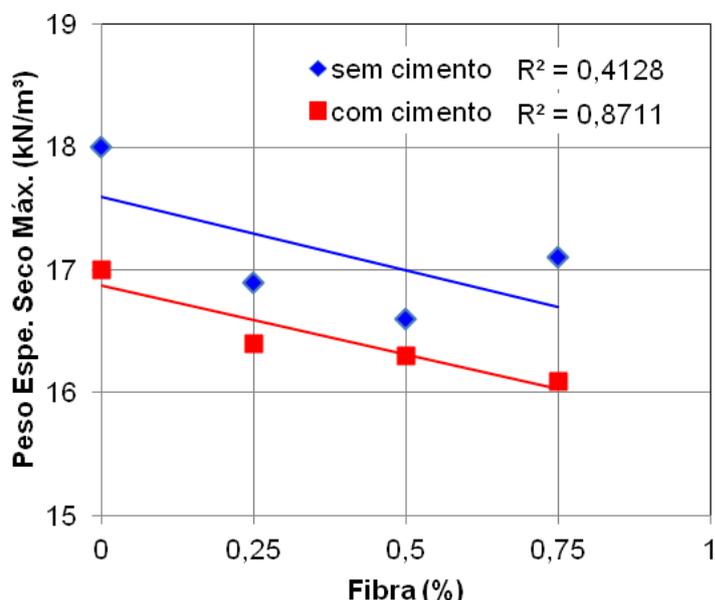


Figura 55 – Peso específico seco máximo X Fibra nas misturas de 25% de AR.

As Tabelas 22 e 23 apresentam as correlações das umidades ótimas, sendo classificadas como moderada para o $r_{xy} = -0,49$ (sem cimento) e correlação muito forte para $r_{xy} = 0,90$ (com cimento). Quanto aos pesos específicos aparentes secos máximos, esses apresentam correlações, visto que as variáveis crescem em sentidos opostos, sendo o $r_{xy} = -0,64$ (sem cimento), com uma correlação moderada, e o $r_{xy} = -0,93$ (com cimento), indicando correlação muito forte. Além disso, mostra que, à medida que aumenta o teor de fibra, o peso específico diminui.

Tabela 22 – Correlações das amostras de 25% de AR com fibras e sem cimento².

	Fibras (%)	Umidade ótima (%)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	0	18,6	0	345,96	0	
	0,25	18,1	0,0625	327,61	4,525	
	0,50	18	0,25	324	9	-0,49
	0,75	18,3	0,5625	334,89	13,725	
Σ =	1,5	73	0,875	1332,46	27,25	
	Fibras (%)	Peso esp. seco máx. (kN/m ³)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	0	18	0	324	0	
	0,25	16,9	0,0625	285,61	4,225	
	0,50	16,6	0,25	275,56	8,3	-0,64
	0,75	17,1	0,5625	292,41	12,825	
Σ =	1,50	68,6	0,875	1177,58	25,35	

Tabela 23 – Correlações das amostras de 25% de AR com fibras e com cimento².

	Fibras (%)	Umidade ótima (%)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	0	21,2	0	449,44	0	
	0,25	22	0,0625	484	5,5	
	0,50	21,8	0,25	475,24	10,9	0,90
	0,75	23	0,5625	529	17,25	
Σ =	1,5	88	0,875	1937,68	33,65	
	Fibras (%)	Peso esp. seco máx. (kN/m ³)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	0	17	0	289	0	
	0,25	16,4	0,0625	268,96	4,1	
	0,50	16,3	0,25	265,69	8,15	-0,93
	0,75	16,1	0,5625	259,21	12,075	
Σ =	1,5	65,8	0,875	1082,86	24,325	

A Figura 56 apresenta a dispersão dos valores das umidades ótimas relacionadas aos percentuais de fibras nas amostras de 50% de AR. Com relação à qualidade do ajuste, foi obtido um coeficiente de determinação $R^2 = 0,33$ (sem cimento), ocorrendo um acréscimo e $R^2 = 0,70$ (com cimento), indicando melhor ajuste da reta.

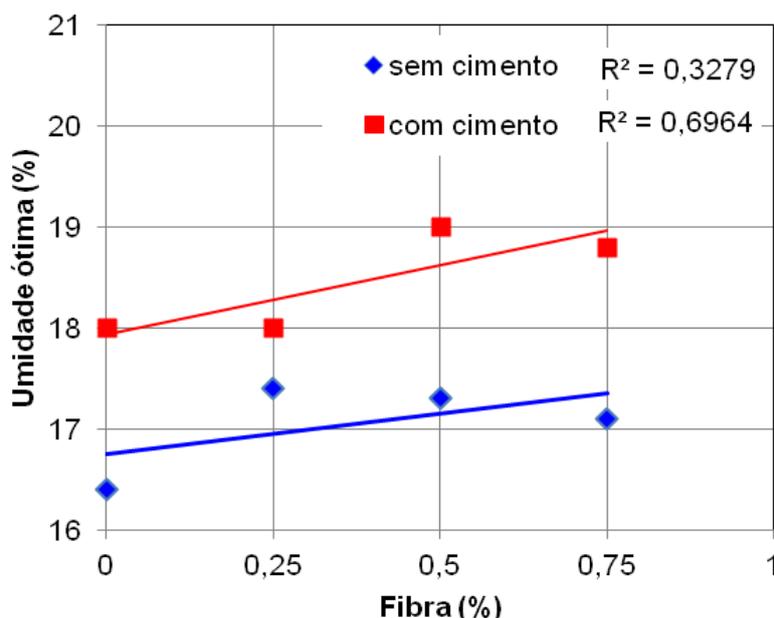


Figura 56 – Dispersão da mistura de 50% de AR (Umidade ótima X Fibra).

A Figura 57 mostra as associações entre as duas variáveis, percentual de fibras e o peso específico seco máximo. Com isso, é possível verificar os coeficientes de determinação $R^2 = 0,79$ (sem cimento) e $R^2 = 0,85$ (com cimento).

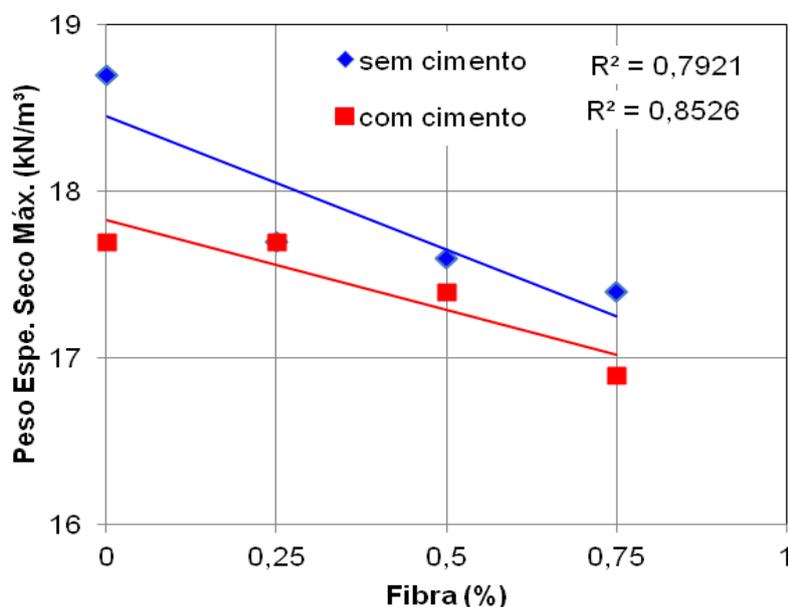


Figura 57 – Dispersão da mistura de 50% de AR (Peso específico seco máximo X Fibra).

As Tabelas 24 e 25 apresentam correlações positivas das amostras de 50% de agregado reciclado para a umidade ótima, sendo o $r_{xy} = 0,57$ (sem cimento), com uma correlação moderada, e o $r_{xy} = 0,83$ (com cimento), apresentando correlação forte.

Entretanto, verificou-se correlações negativas para os pesos específicos secos máximos, visto que as variáveis crescem em sentidos opostos, sendo o $r_{xy} = -0,89$ (sem cimento), com uma correlação forte, e o $r_{xy} = -0,92$ (com cimento), indicando correlação muito forte.

Tabela 24 – Correlações das amostras de 50% de AR com fibras e sem cimento².

	Fibras (%)	Umidade ótima (%)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	0	16,4	0	268,96	0	
	0,25	17,4	0,0625	302,76	4,35	
	0,50	17,3	0,25	299,29	8,65	0,57
	0,75	17,1	0,5625	292,41	12,825	
Σ =	1,5	68,2	0,875	1163,4	25,825	

	Fibras (%)	Peso esp. seco máx. (kN/m ³)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	0	18,7	0	349,69	0	
	0,25	17,7	0,0625	313,29	4,425	
	0,50	17,6	0,25	309,76	8,8	-0,89
	0,75	17,4	0,5625	302,76	13,05	
Σ =	1,50	71,4	0,875	1275,5	26,275	

Tabela 25 – Correlações das amostras de 50% de AR com fibras e com cimento².

	Fibras (%)	Umidade ótima (%)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	0	18	0	324	0	
	0,25	18	0,0625	324	4,5	
	0,50	19	0,25	361	9,5	0,83
	0,75	18,8	0,5625	353,44	14,1	
Σ =	1,5	73,8	0,875	1362,4	28,1	

	Fibras (%)	Peso esp. seco máx. (kN/m ³)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	0	17,7	0	313,29	0	
	0,25	17,7	0,0625	313,29	4,425	
	0,50	17,4	0,25	302,76	8,7	-0,92
	0,75	16,9	0,5625	285,61	12,675	
Σ =	1,5	69,7	0,875	1215	25,8	

A Figura 58 apresenta a dispersão dos valores das umidades ótimas *versus* percentuais de fibras nas amostras de 75% de AR. Com isso, foi possível obter os coeficientes de

determinação $R^2 = 0,74$ (sem cimento) e $R^2 = 0,85$ (com cimento), indicando bons ajustes lineares. As Tabelas 26 e 27 apresentam as correlações das amostras, sendo o $r_{xy} = 0,86$ (sem cimento), com uma correlação forte, e o $r_{xy} = 0,92$ (com cimento), apresentando correlação muito forte, pois está mais próxima de 1.

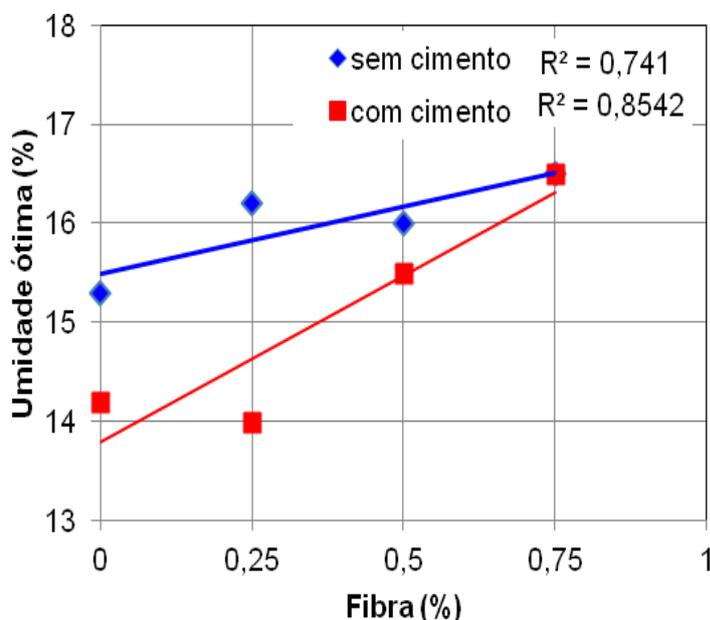


Figura 58 – Dispersão da mistura de 75% de AR (Umidade ótima X Fibra).

As associações entre as duas variáveis, percentual de fibras e o peso específico seco máximo, apresentadas na Figura 59 mostram os coeficientes de determinação: $R^2 = 0,92$ (sem cimento) e $R^2 = 0,81$ (com cimento), revelando bom ajuste das retas. Porém apresentam correlações negativas (Tabelas 26 e 27), visto que as variáveis crescem em sentidos opostos, sendo o $r_{xy} = -0,96$ (sem cimento) e o $r_{xy} = -0,91$ (com cimento), indicando correlação muito forte.

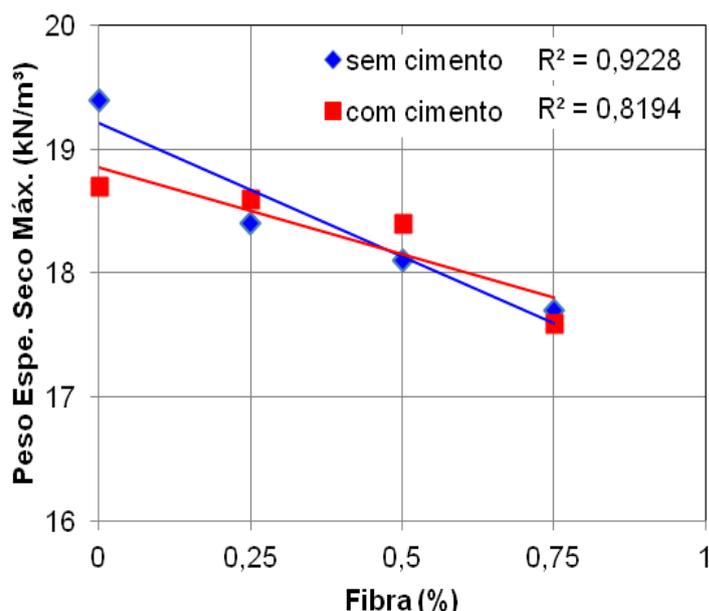


Figura 59 – Dispersão da mistura de 75% de AR (Peso específico seco máximo X Fibra).

Tabela 26 – Correlações das amostras de 75% de AR com fibras e sem cimento².

Fibras (%)	Umidade ótima (%)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
0	15,3	0	234,09	0	
0,25	16,2	0,0625	262,44	4,05	
0,50	16	0,25	256	8	0,86
0,75	16,5	0,5625	272,25	12,375	
Σ = 1,5	64	0,875	1024,78	24,425	

Fibras (%)	Peso esp. seco máx.(kN/m ³)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
0	19,4	0	376,36	0	
0,25	18,4	0,0625	338,56	4,6	
0,50	18,1	0,25	327,61	9,05	-0,96
0,75	17,7	0,5625	313,29	13,275	
Σ = 1,50	73,6	0,875	1355,82	26,925	

Tabela 27 – Correlações das amostras de 75% de AR com fibras e com cimento².

	Fibras (%)	Umidade ótima (%)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	0	14,2	0	201,64	0	
	0,25	14	0,0625	196	3,5	
	0,50	15,5	0,25	240,25	7,75	0,92
	0,75	16,5	0,5625	272,25	12,375	
Σ =	1,5	60,2	0,875	910,14	23,625	
	Fibras (%)	Peso esp. seco máx. (kN/m ³)	X ²	Y ²	XY	r _{xy}
	0	18,7	0	349,69	0	
	0,25	18,6	0,0625	345,96	4,65	
	0,50	18,4	0,25	338,56	9,2	-0,91
	0,75	17,6	0,5625	309,76	13,2	
Σ =	1,5	73,3	0,875	1343,97	27,05	

Embora os coeficientes de determinação (R^2) das amostras sem adição de cimento, principalmente os das misturas de 25% de agregado reciclado, tenham sido relativamente baixos, houve um acréscimo significativo do R^2 com a presença de cimento, indicando que a inclusão desse material fez melhorar as correlações das amostras estudadas.

4.4.2.1 Quebra dos grãos após a compactação

Zeghal (2009), utilizando corpos de prova de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura em 8 camadas de 37,5 mm verificou que a distribuição e o tamanho dos grãos são alterados com o processo de compactação.

Valle (1994) cita que é necessário conhecer o potencial de degradação de agregados para que se possa avaliar o comportamento do pavimento e interpretar seu funcionamento estrutural.

Motta (2005) determinou uma energia de compactação para corpos de prova menor que a energia modificada, para diminuir a quebra dos grãos do agregado reciclado, embora se acredite que é recomendado utilizar uma alta energia de compactação.

É possível observar que ocorreram alterações nas curvas granulométricas com maior percentual de material passante em todas as curvas, como é mostrado da Figura 60 à 64. Apesar dessas mudanças granulométricas, as curvas continuam atendendo à norma NBR 15115 (ABNT, 2004) em relação à porcentagem passante na peneira 0,42 mm e ao coeficiente de uniformidade. De acordo com Leite (2007), isso reforça a importância da energia de compactação mais elevada, obtendo-se maior quebra dos grãos e fazendo com que, durante a vida útil do pavimento, o problema da degradação diminua, evitando possíveis afundamentos ou mesmo rupturas.

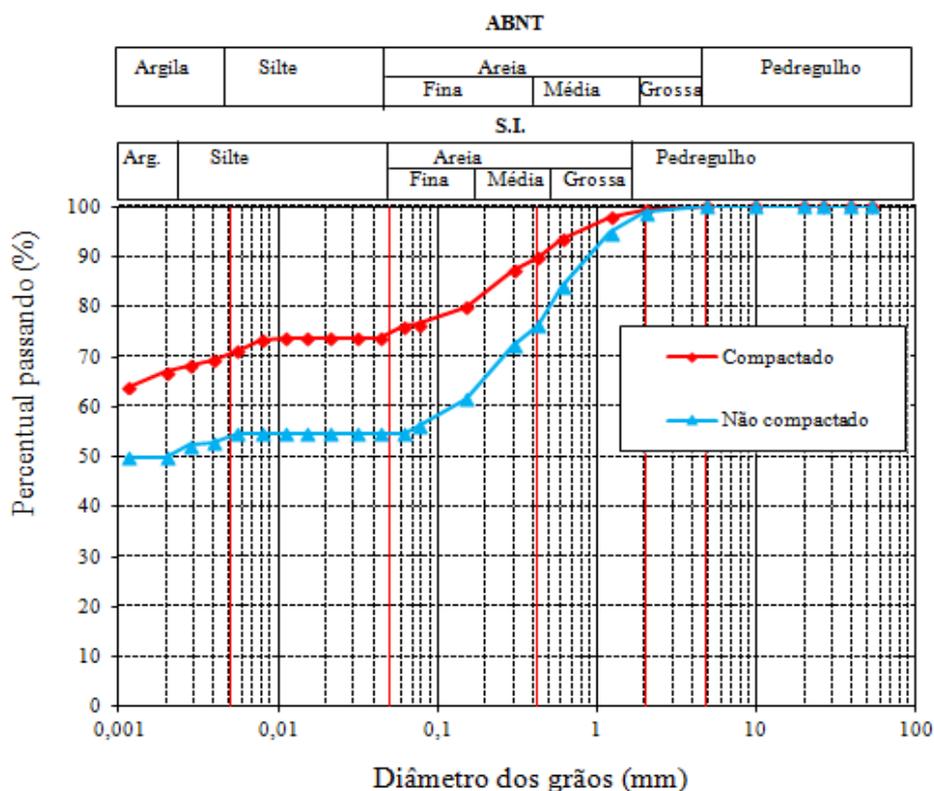


Figura 60 – Granulometria da amostra de 100% de Solo.

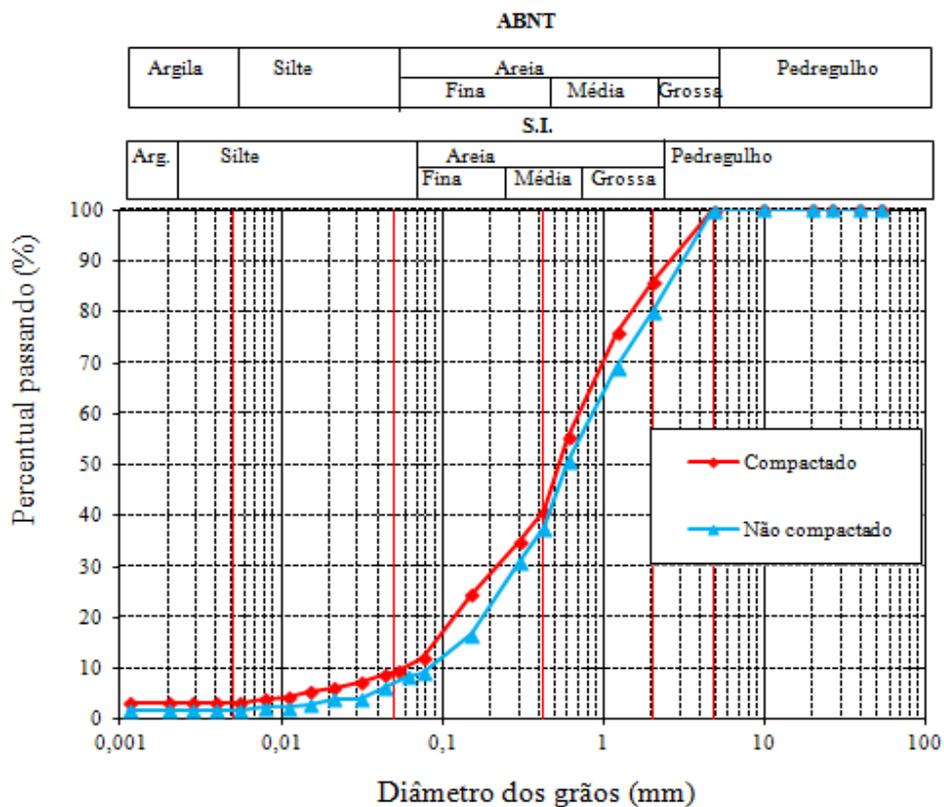


Figura 61 – Granulometria da amostra de 100% de Agregado Reciclado.

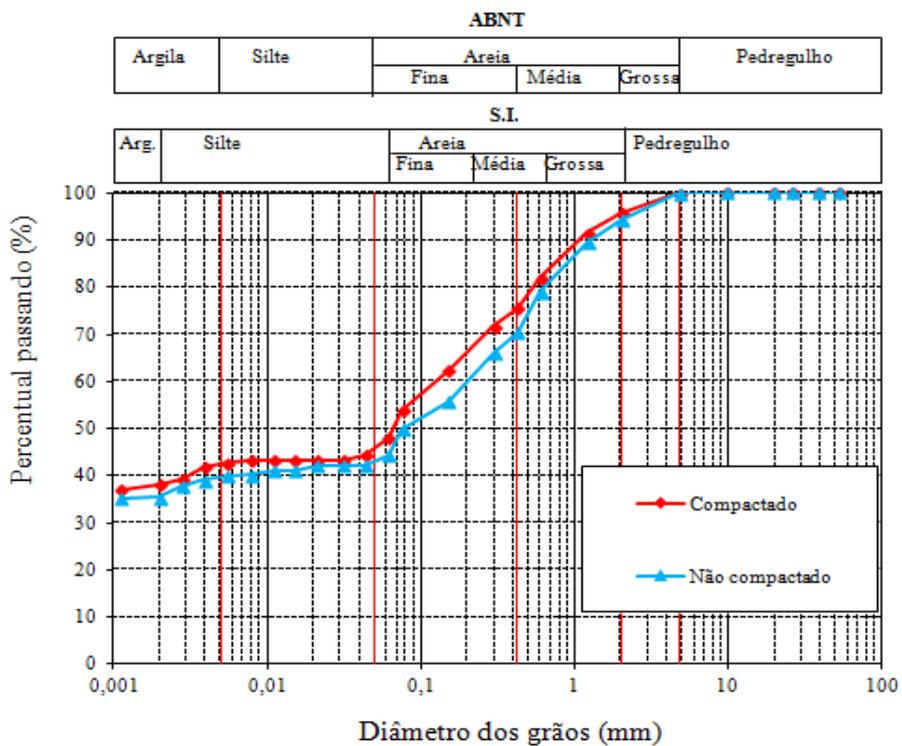


Figura 62 – Granulometria da mistura com 25% de Agregado Reciclado e com adição de solo.

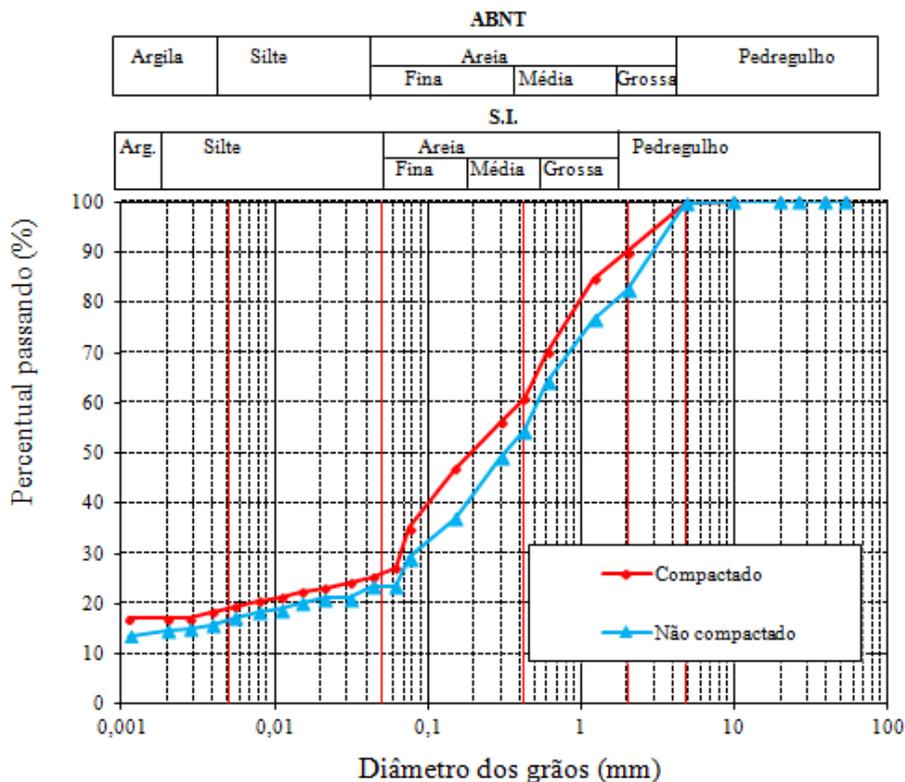


Figura 63 – Granulometria da mistura com 50% de Agregado Reciclado e com adição de solo.

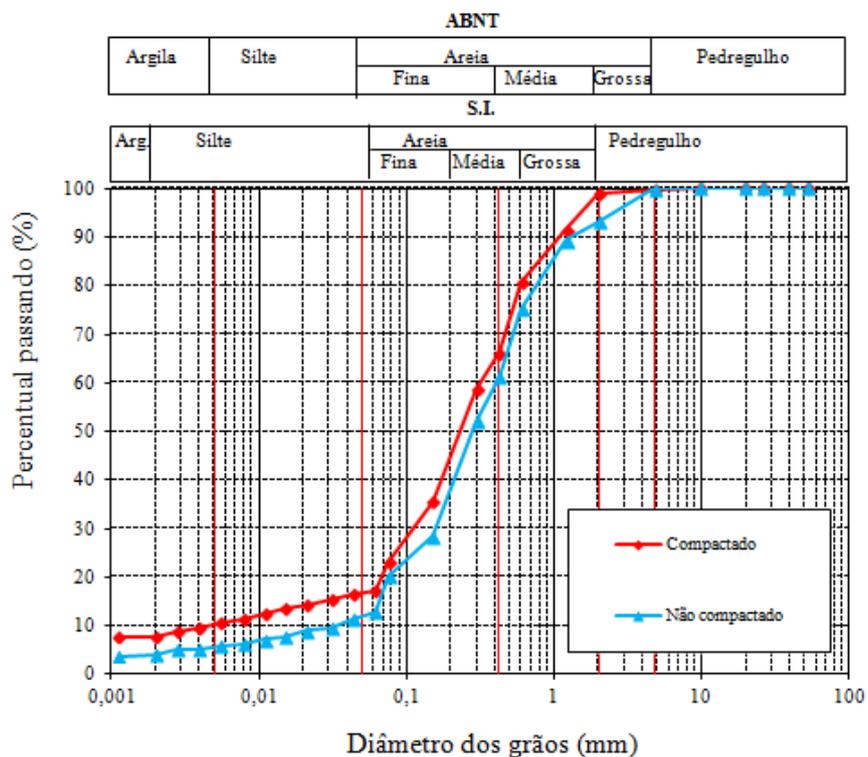


Figura 64 – Granulometria da mistura com 75% de Agregado Reciclado e com adição de solo.

A Tabela 28 apresenta os resultados obtidos na amostra do agregado reciclado, onde se observa um acréscimo nos valores passantes na peneira 0,42 mm e no coeficiente de uniformidade (C_u).

O aumento dos valores de C_u após a compactação na energia intermediária é devido à maior quantidade de finos passantes na peneira equivalente a 10%. Resultados semelhantes também foram observados por LEITE (2007).

Tabela 28 – Limites fixados pela norma com relação à granulometria.

	Porcentagem que passa na peneira 0,42 mm (%)	C_u	C_c
*AR (100%) compactado	40	14	1,14
NBR 15115 (ABNT, 2004)	$10 \leq a \leq 40$	≥ 10	não consta

*AR = Agregado Reciclado

Como a análise da quebra dos grãos induzida pelo processo de compactação tem sido objeto de estudo de diferentes autores, através da mudança de distribuição das partículas, foi quantificado o Índice de Degradação de Ruiz e o procedimento descrito na norma DNER – ME 398/99.

A Tabela 29 apresenta o resultado do Índice de Degradação de Ruiz das amostras após o emprego da energia intermediária na compactação.

Tabela 29 – Índices de Degradação de Ruiz.

Amostra	Deslocamento máximo	Deslocamento mínimo	Desvio-padrão	ID Ruiz
AR (100%)	7,89 (# 0,149 mm)	2,85 (# 0,075 mm)	1,57	5,58
Solo (100%)	20,42 (# 0,075 mm)	0,57 (# 2,0 mm)	7,47	11,54
AR (25%) + Solo	6,43 (# 0,149 mm)	1,64 (# 2,0 mm)	1,83	3,98
AR (50%) + Solo	9,93 (# 0,149 mm)	5,86 (# 0,075 mm)	1,46	7,21
AR (75%) + Solo	7,05 (# 0,149 mm)	2,21 (# 1,19 mm)	1,83	5,01

Valle (1994) analisou a degradação de solos saprolíticos de granito, que são materiais usualmente utilizados em camadas inferiores de pavimentos, em Santa Catarina. Os resultados encontrados variaram de 3,6 a 8,9. Com exceção do solo, todos os valores

obtidos nesta pesquisa se encontram nesse intervalo, verificando-se que a degradação sofrida foi aproximadamente equivalente a de um material natural. Dessa forma, as misturas e o AR podem ser indicados para aplicações em camadas de pavimentos.

Leite (2007) pesquisou o ID de Ruiz para os agregados reciclados de Santo André. O resultado para uma energia de compactação intermediária foi de 3,7, sendo esse valor inferior aos valores encontrados nesta pesquisa, provavelmente pela heterogeneidade inerente dos agregados reciclados e pelo tipo de solo inserido nas misturas.

Outro método utilizado para determinação da quebra dos grãos foi o do DNER 398/99, que fornece o Índice de Degradação (IDp) e que tem por objetivo analisar o comportamento do material em função do desgaste sofrido durante a compactação. A Tabela 30 apresenta o resultado do Índice de Degradação do DNER – ME 398/99 das amostras após o emprego da energia intermediária na compactação.

Tabela 30 – Índices de Degradação do DNER – ME 398/99.

Amostra	Deslocamento máximo	Deslocamento mínimo	Desvio-padrão	IDp
AR (100%)	5,83 (# 2,0 mm)	2,85 (# 0,075 mm)	1,59	4,66
Solo (100%)	20,42 (# 0,075 mm)	0,57 (# 2,0 mm)	10,07	11,49
AR (25%) + Solo	5,03 (# 0,42 mm)	1,64 (# 2,0 mm)	1,75	3,60
AR (50%) + Solo	7,46 (# 2,0 mm)	5,86 (# 0,075 mm)	0,82	6,56
AR (75%) + Solo	5,80 (# 2,0 mm)	2,94 (# 0,075 mm)	1,47	4,55

Os valores obtidos pelo DNER apresentaram uma pequena redução nas misturas, em torno de 10%, em relação ao ID de Ruiz. Entretanto, o valor limite sugerido pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) é de 6%, tendo como referência as rochas naturais. Nesse caso, os IDp das amostras de AR 100%, de AR (25%) + Solo e AR (75%) + Solo estão de acordo com as especificações sugeridas pelo IPR.

4.4.3 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), ou California Bearing Ratio (CBR), seguiu a NBR 9895 (ABNT, 1987). Foram moldados 2 corpos de prova para cada material, totalizando 20 corpos de prova, com e sem imersão, compactados com energia intermediária. Após a compactação, foram submetidos à penetração (sem imersão) e a

96 horas de imersão antes da penetração. Através desse ensaio, foram obtidos os resultados de ISC e da expansão dos materiais. A Figura 65 apresenta os valores de ISC dos materiais, com e sem imersão, sem a utilização de fibras, mostrando que a presença do agregado reciclado na mistura fez aumentar o ISC. Esse acréscimo resultou em um incremento de ISC superior a cinco vezes (com imersão) e seis vezes (sem imersão) em relação ao valor de ISC do solo.

Foi observado que os valores de ISC foram inferiores quando comparados com os valores obtidos sem imersão, como era de se esperar, já que após 96h de imersão a resistência do material saturado diminui devido à perda de sucção.

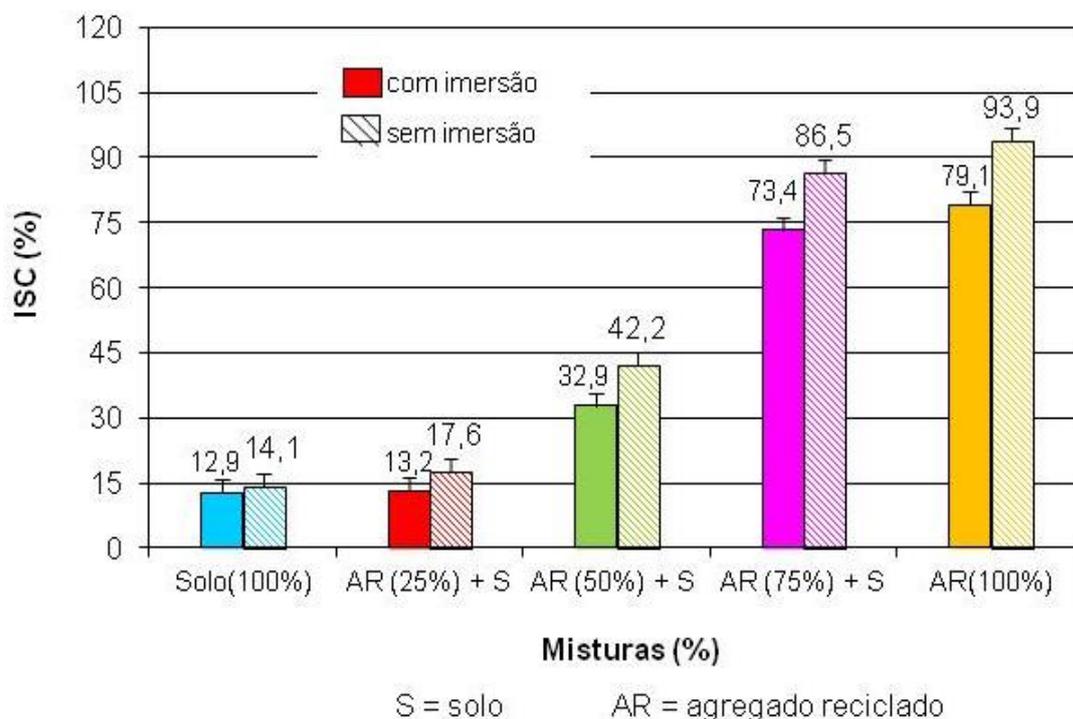


Figura 65 – ISC das misturas sem fibras com e sem imersão.

Os resultados de ISC e de expansão encontrados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 31. A identificação dos parâmetros relativos a NBR 15115 (ABNT, 2004) encontram-se na Tabela 32.

Tabela 31 – Resultados de ISC, com e sem imersão, e da expansão dos materiais.

Resultados desta pesquisa			
Materiais	ISC (%)		Expansão (%)
	Com imersão	Sem imersão	
AR (100%)	79,1	93,9	0,00
Solo (100%)	12,9	14,1	0,32
AR (25%) + Solo	13,2	17,6	0,06
AR (50%) + Solo	32,9	42,2	0,10
AR (75%) + Solo	73,4	86,5	0,03

Tabela 32 – Identificação dos parâmetros relativos à NBR 15115 (ABNT, 2004).

Parâmetros da NBR 15115 (ABNT, 2004)		
Base	≥ 60	$\leq 0,5$
Sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$
Reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$

Com base nesses parâmetros, foi possível observar que o ISC das amostras com e sem imersão de AR (75%) + Solo mostram que esses materiais que podem servir de base, sub-bases e reforço de subleito das camadas de um pavimento. O solo e a mistura com 25% de agregado reciclado podem ser utilizados como material para reforço de subleito. A mistura que contém 50% de AR serve tanto para sub-base quanto para reforço de subleito.

Os parâmetros de expansão foram baixos e, segundo Trichês e Kryckyj (1999), é comum aos RCC; e, por esse motivo, os agregados se tornam bastante atrativos para a sua utilização em pavimentação.

Como critério de comparação, foram usados alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil com agregados reciclados, como mostra a Tabela 33. Entretanto, esses estudos consideraram misturas em diferentes proporções de solos ou elementos estabilizadores (cal ou cimento) para suas análises.

Tabela 33 – Valores de Índice de Suporte Califórnia (ISC) obtidos em algumas pesquisas.

Tipo de agregado reciclado	ISC (%)	Fonte
AR Misto	79,15	Esta pesquisa
AR Misto	91,00	Jiménez (2011)
Misto	89,00	Lima (2008)
Misto	72,00	Silva <i>et al</i> (2008)
RCA	73,00	Leite (2007)
AR misto	96,00	Leite <i>et al.</i> (2006)
Misto	75,00	Motta (2005)
Misto	92,00	Oliveira <i>et al.</i> (2005)
Misto	157,00	Fernandes (2004)
Misto	112,00	Carneiro <i>et al.</i> (2001)

Conforme descrito anteriormente, os valores desta pesquisa se enquadram no intervalo de valores obtidos por diversos autores, sendo considerados satisfatórios em camadas para pavimentos. Apesar da recomendação da NBR 15115 (ABNT, 2004) e da NBR 15116 (ABNT, 2004) de não utilizar agregado reciclado em vias de alto volume de tráfego, o material desta pesquisa poderia ser utilizado, já que o valor do ISC supera os 60% indicado pela norma.

4.4.3.1 Avaliação da quebra dos grãos pós-CBR

Para efeito de comparação, também foi realizada a avaliação da quebra dos grãos após o ensaio de CBR, com e sem imersão, assim como foi visto no item 4.4.2.1. Nas Figuras 66 a 70 são apresentadas as curvas granulométricas antes de serem submetidas ao ensaio de CBR e após o ensaio, com e sem imersão.

Através dessas curvas granulométricas, é possível verificar pequenas variações na diferença de percentual de material passante nas curvas das Figuras 67 a 70, com exceção da amostra de solo, na qual as variações das curvas com e sem imersão em relação a curva inicial (antes do ensaio de CBR) foram maiores.

Essas mudanças granulométricas são devido à quebra dos grãos durante o ensaio de CBR. Contudo, essas curvas continuam atendendo à NBR 15115 (ABNT, 2004) em relação à porcentagem passante na peneira 0,42 mm e ao coeficiente de uniformidade.

Para avaliar a quebra dos grãos após o ensaio de CBR, também foram analisados os Índices de Degradação de Ruiz e o descrito pela norma do DNER – ME 398/99, através das curvas granulométricas das amostras com e sem imersão.

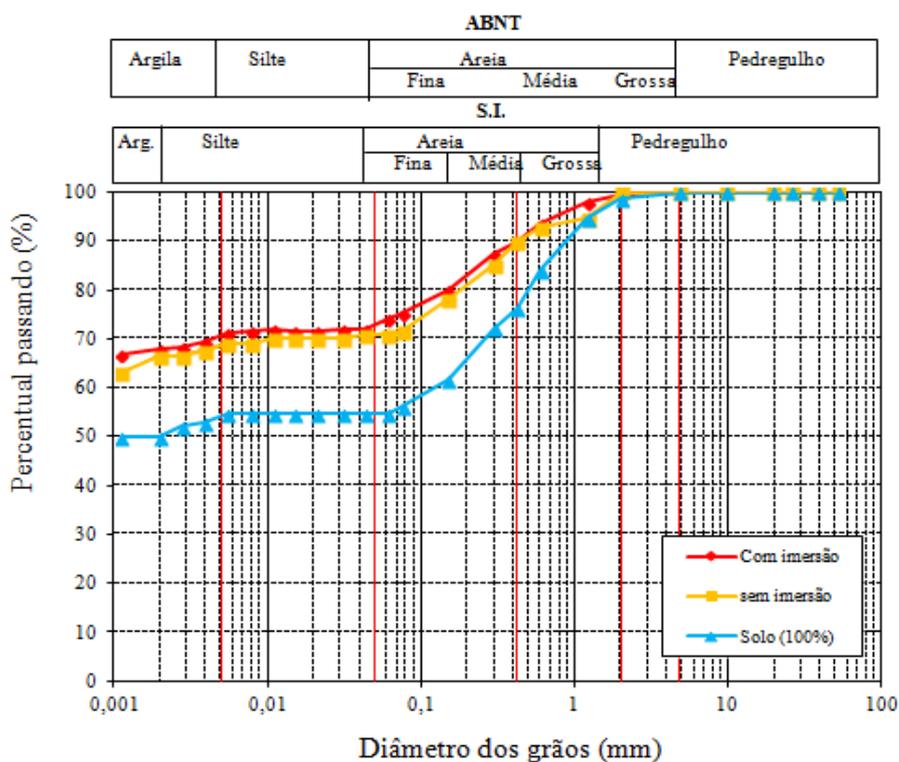


Figura 66 – Curvas granulométricas da amostra de solo (100%) pós-CBR, com e sem imersão.

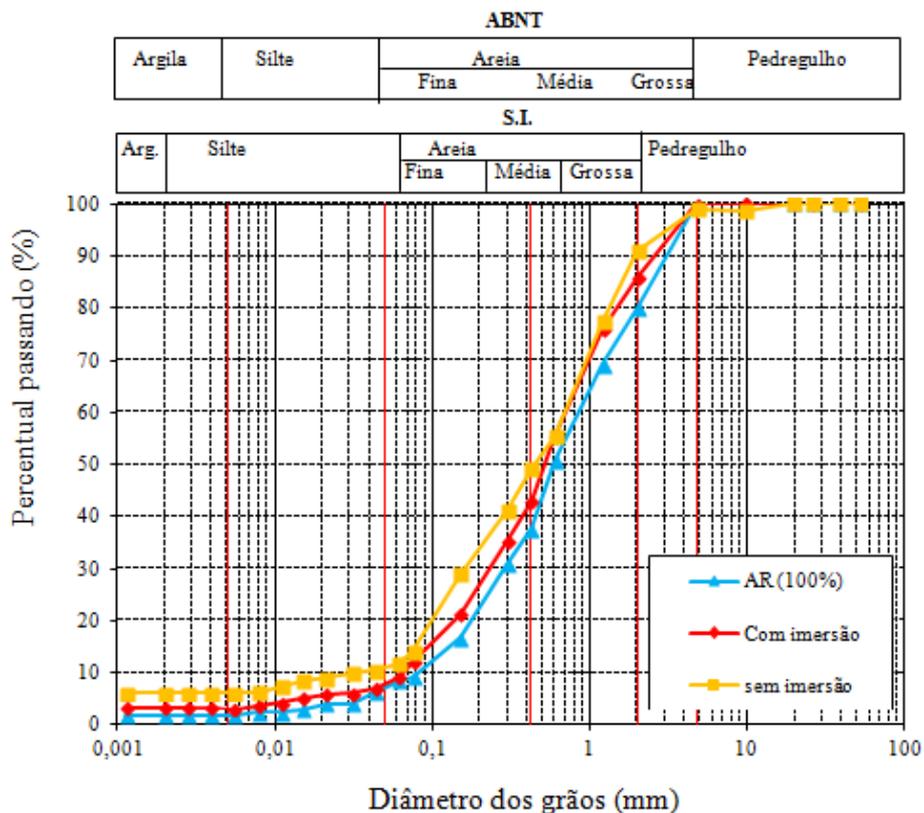


Figura 67 – Curvas granulométricas da amostra AR (100%) pós-CBR, com e sem imersão.

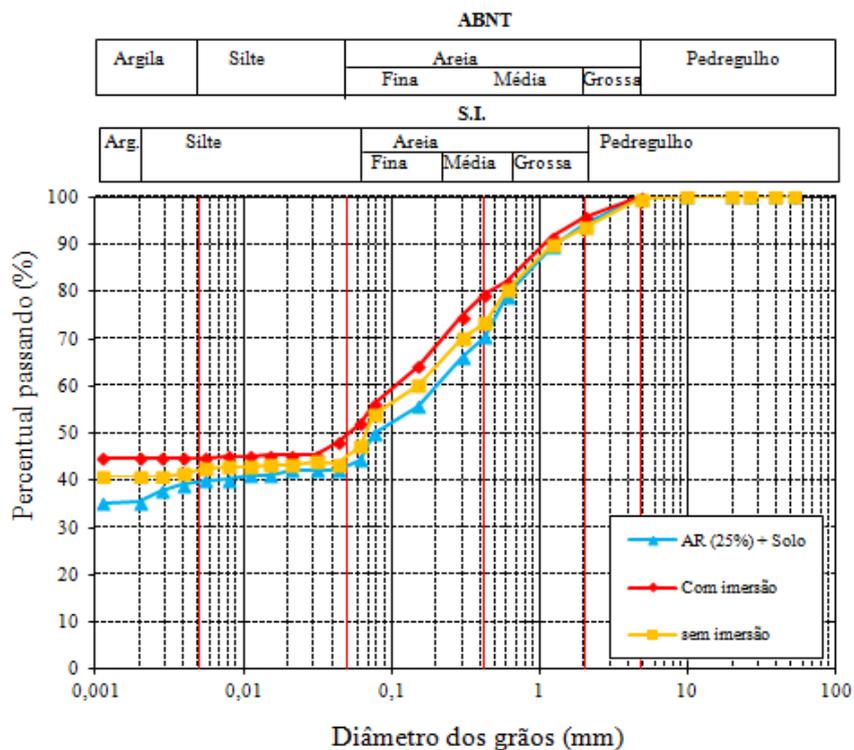


Figura 68 – Curvas granulométricas da amostra AR (25%) + Solo pós-CBR, com e sem imersão.

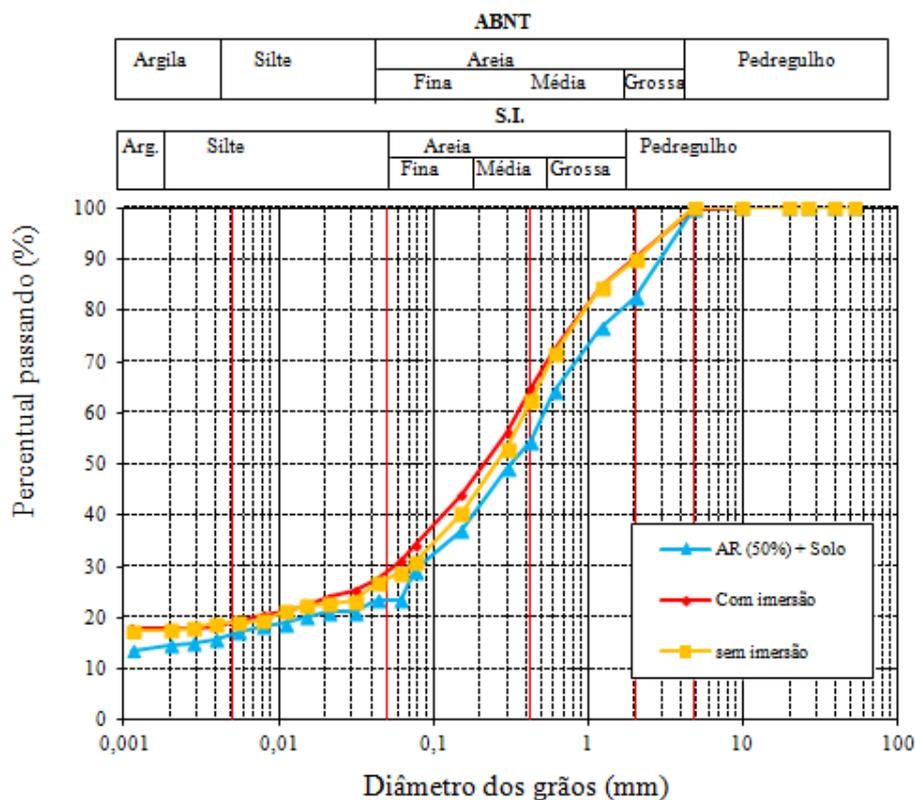


Figura 69 – Curvas granulométricas da amostra AR (50%) + Solo pós-CBR, com e sem imersão.

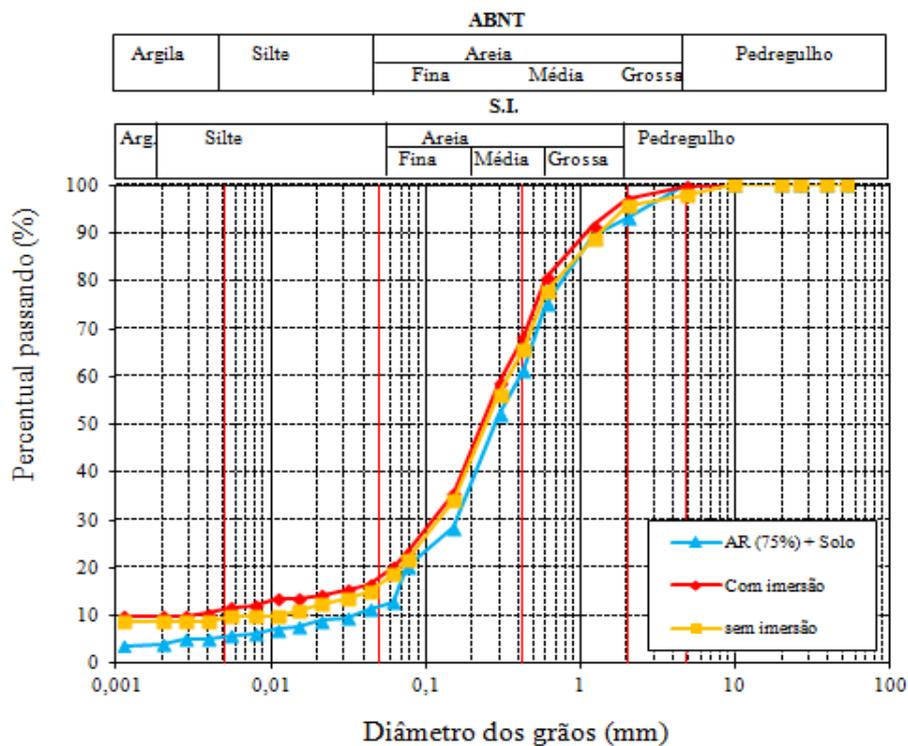


Figura 70 – Curvas granulométricas da amostra AR (75%) + Solo pós-CBR, com e sem imersão.

As Tabelas 34 e 35 mostram que os valores dos Índices de Degradação de Ruiz e o IDp do DNER – ME 398/99, com e sem imersão, foram muito próximos, não havendo também diferença significativa entre esses valores e os da quebra dos grãos após o ensaio de compactação.

Tabela 34 – Índices de Degradação de Ruiz (ID) após o CBR, com e sem imersão.

Amostra	ID Ruiz após o CBR	
	Sem imersão	Com imersão
AR (100%)	4,90	5,38
Solo (100%)	11,47	11,35
AR (25%) + Solo	3,48	3,84
AR (50%) + Solo	7,03	7,43
AR (75%) + Solo	4,92	5,01

Tabela 35 – Índices de Degradação (IDp) após o CBR, com e sem imersão.

Amostra	IDp após o CBR	
	Sem imersão	Com imersão
AR (100%)	4,54	4,66
Solo (100%)	10,15	11,03
AR (25%) + Solo	3,48	3,93
AR (50%) + Solo	6,26	6,67
AR (75%) + Solo	4,07	4,55

4.4.4 Resistência à Compressão Simples

Os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) foram realizados segundo a metodologia da NBR 12770 (ABNT, 1992). A determinação foi feita pela média das tensões de ruptura de três corpos de prova, por composição e por cada período de cura (7 e 28 dias), admitindo-se uma tolerância de $\pm 3\%$ em torno da média, segundo procedimentos corriqueiros em trabalhos de estabilização de solos para fins rodoviários.

Foram moldados um total de 90 corpos de prova, que foram submetidos à cura por 7 e 28 dias em câmara úmida.

Os resultados apresentados na Figura 71 indicam que a máxima resistência à compressão aos 7 dias foi observada na combinação do quantitativo de AR (75%) + Solo + 0,75% de fibra. Nessa combinação, as fibras promoveram um ganho de resistência à compressão da ordem de 100%, quando comparado à mistura de AR (75%) + Solo e sem cimento. Em contrapartida, a amostra com AR (50%) + Solo + 0,75% de fibra obteve um maior acréscimo de aproximadamente 200% com a adição da fibra e do cimento, quando comparada à amostra de AR (50%) + Solo e sem cimento.

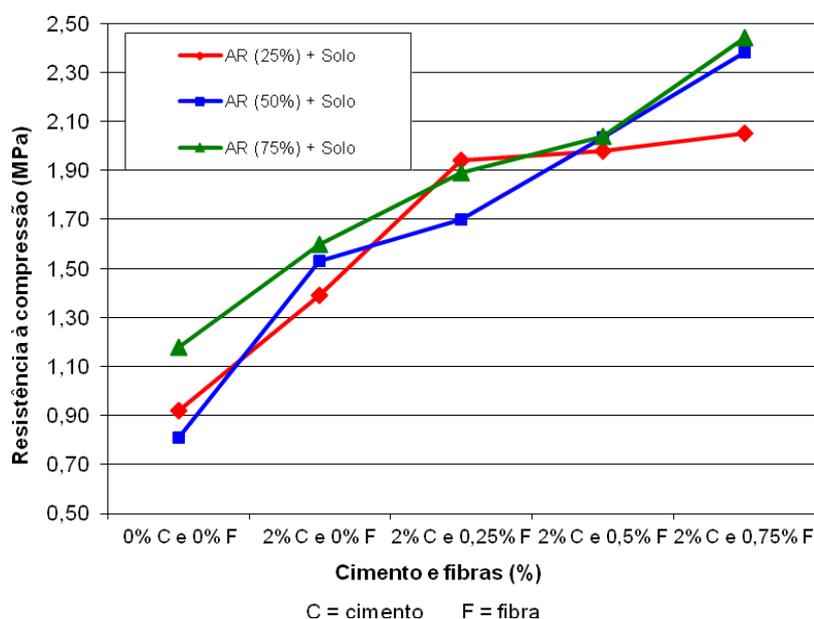


Figura 71 – Variação dos resultados de RCS das misturas aos 7 dias.

A Figura 72 apresenta os resultados de resistência à compressão das misturas aos 28 dias, sendo possível verificar que a amostra de AR (75%) + Solo + 0,75% de fibra, apresentou ganho de 100% de resistência com relação à amostra de AR (75%) + Solo sem cimento. Contudo, a amostra que apresentou maior ganho de resistência foi AR (50%) + Solo + 0,75% de fibra, com acréscimo de cerca de 136% em relação à amostra de AR (50%) + Solo sem cimento.

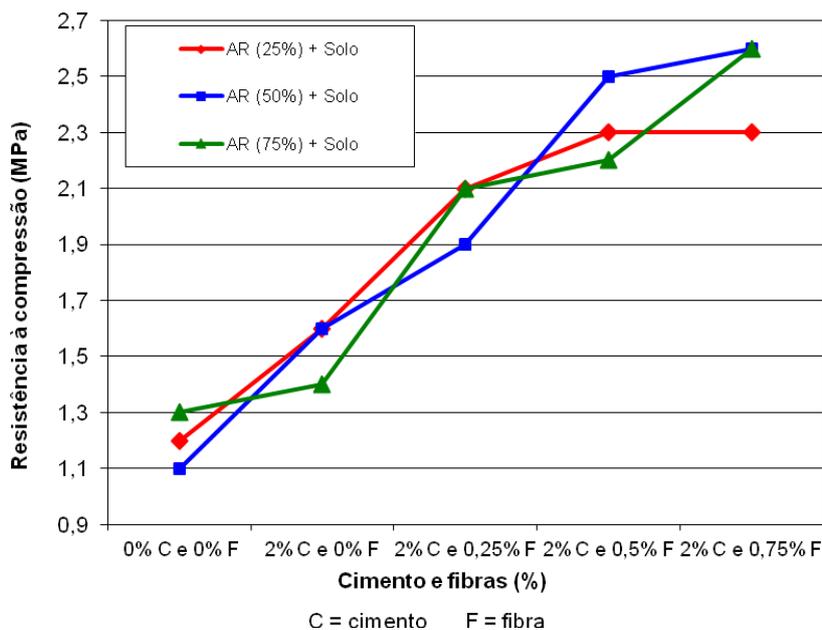


Figura 72 – Variação dos resultados de RCS das misturas aos 28 dias.

As Figuras 73, 74 e 75 apresentam os valores de resistência à compressão das diferentes misturas, que permaneceram durante 7 e 28 dias em câmara úmida.

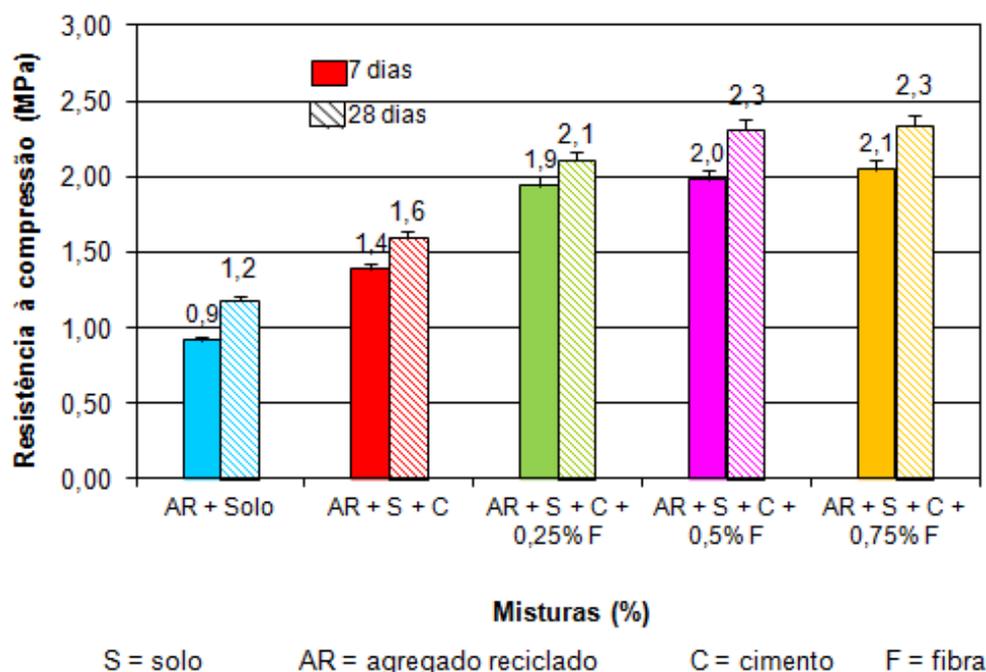


Figura 73 – RCS com 25% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.

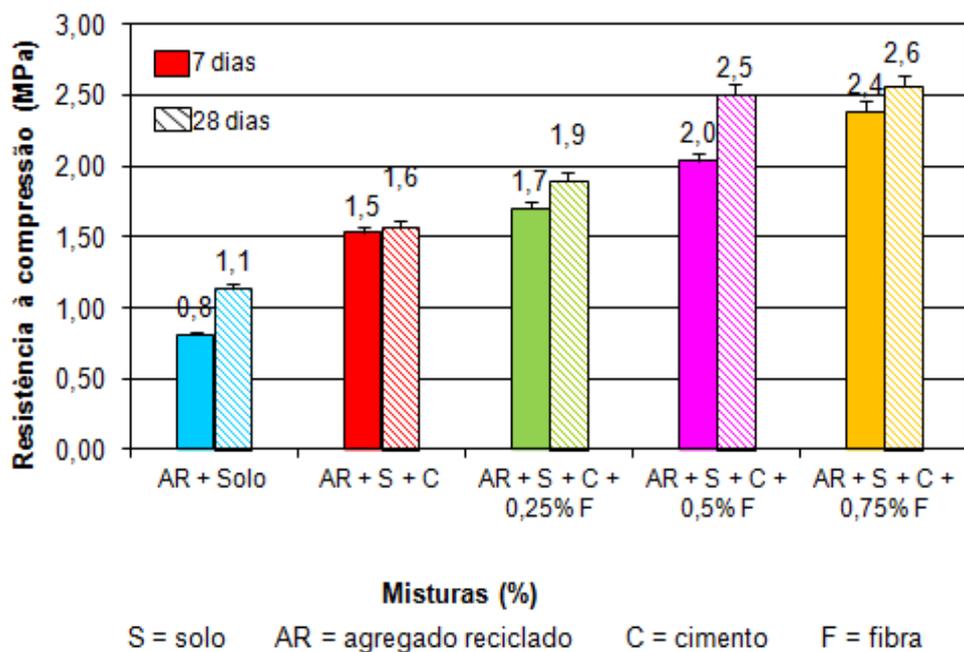


Figura 74 – RCS com 50% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.

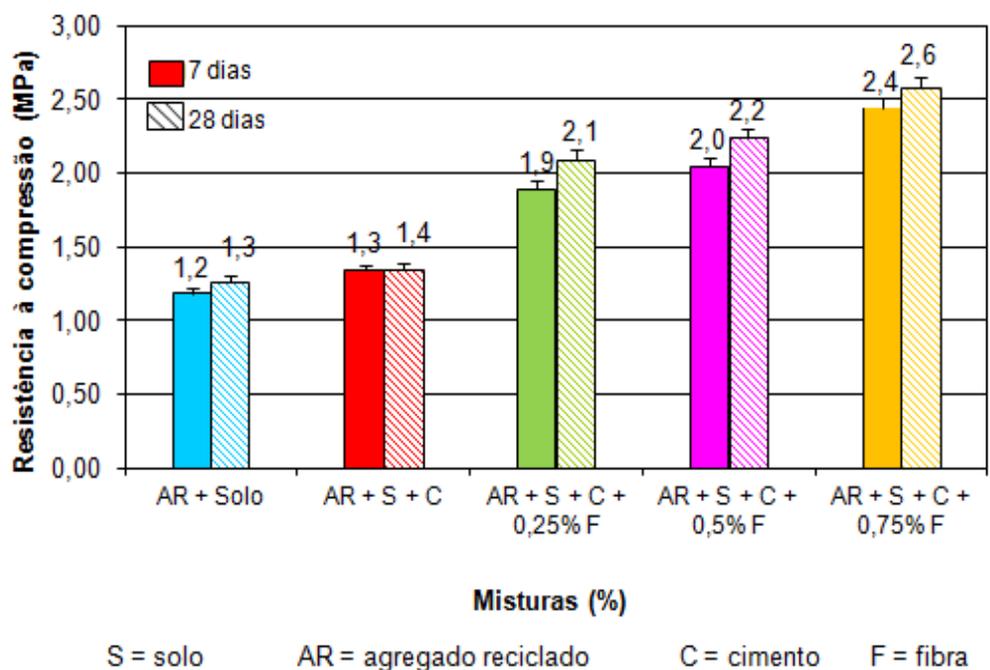


Figura 75 – RCS com 75% de AR, solo, cimento e diferentes teores de fibras.

Observou-se que o acréscimo de cimento e fibra aumentou a resistência do material, apesar de ter havido uma redução do peso específico seco máximo. Tal fato ocorreu devido ao efeito da cimentação e da resistência a tração que é preponderante.

As Figuras 76 a 80 representam as curvas de resistência a compressão (tensão versus deslocamento) do grupo de misturas com 75% de AR em sua composição. As curvas de resistência correspondentes as amostras com 25% de AR e 50% de AR encontram-se no Anexo A da presente pesquisa.

Através dessas curvas foi possível notar que a medida que aumentou o percentual de fibras, o deslocamento também aumentou. Isso é devido a ductilidade que as fibras proporcionam ao material, favorecendo ao acréscimo do deslocamento.

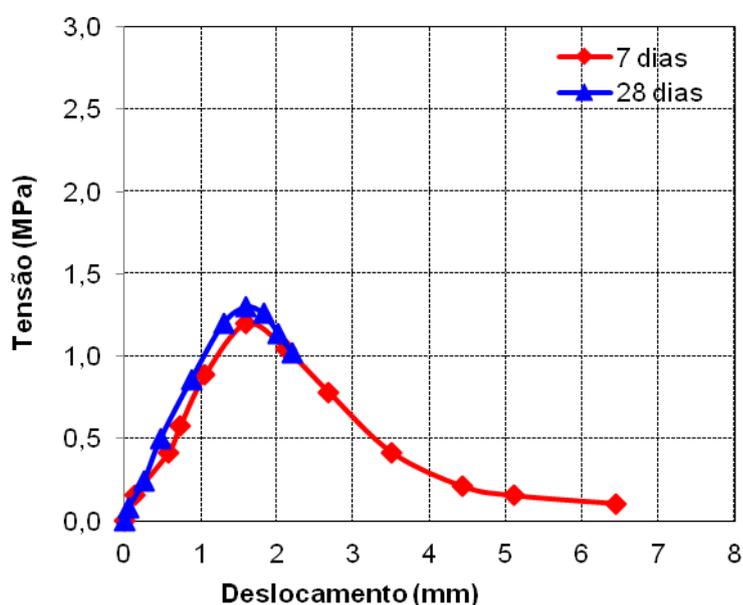


Figura 76 - Curvas de RCS da mistura com 75% AR + Solo.

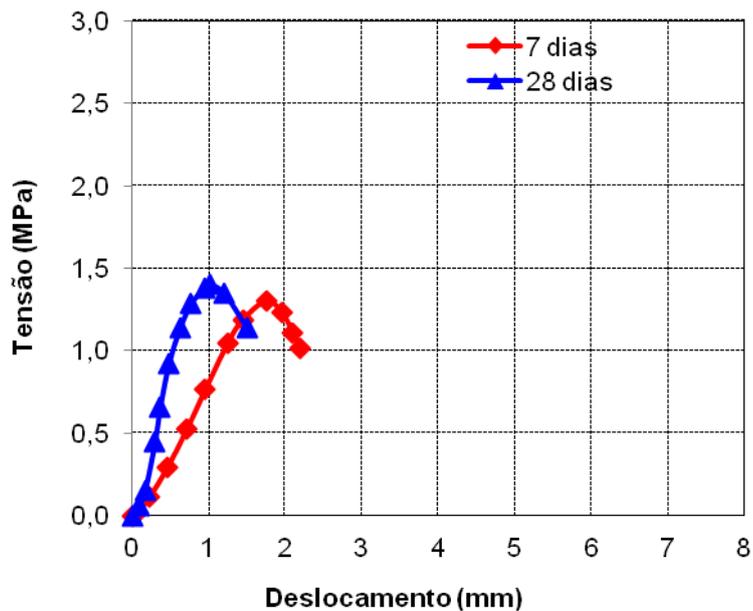


Figura 77 - Curvas de RCS da mistura com 75% AR + Solo + cimento.

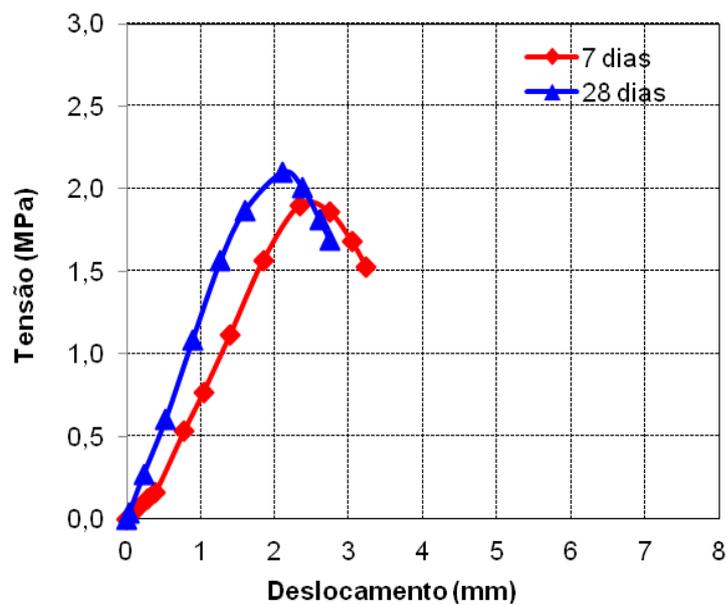


Figura 78 - Curvas de RCS da mistura com 75% AR + Solo + cimento + 0,25% fibra.

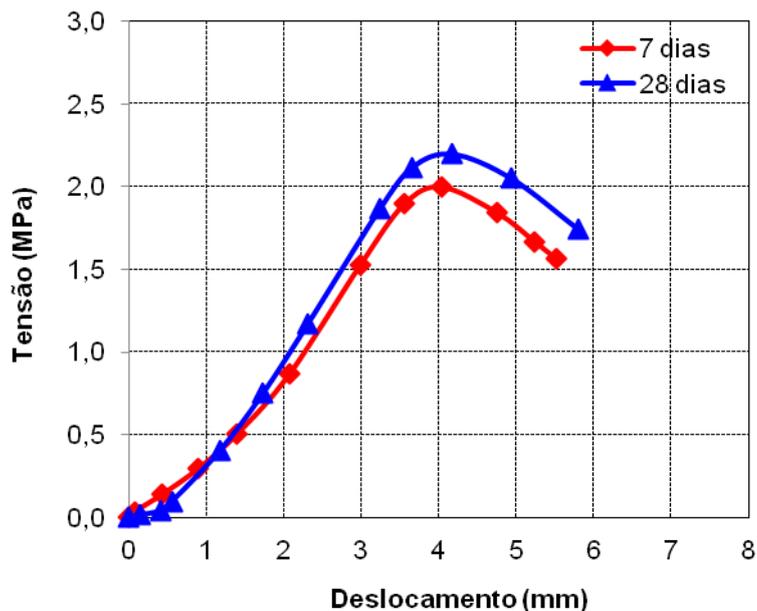


Figura 79 - Curvas de RCS da mistura com 75% AR + Solo + cimento + 0,5% fibra.

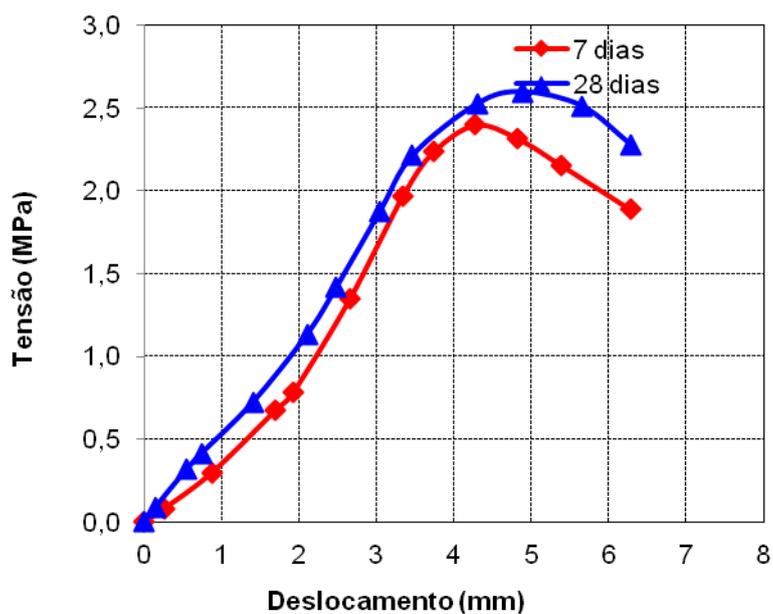


Figura 80 - Curvas de RCS da mistura com 75% AR + Solo + cimento + 0,75% fibra.

Embora os valores de resistência das misturas entre 7 e 28 dias de cura tenham sido muito próximos, seus valores foram preponderantes quando comparados os compósitos sem cimento e sem fibras em relação a adição desses materiais. Isso pode ser observado na Tabela 36, em que apresenta os valores de resistência à compressão das misturas.

Através da Tabela 36 pode-se observar que em todas as amostras ocorreu um acréscimo da resistência quando foi adicionado o cimento e as fibras. Com relação à incorporação da fibra no compósito, verificou-se que a mistura de AR (50%) + Solo apresentou os melhores resultados, pois houve um incremento da resistência à compressão, aos 7 dias, de 113%, 150% e 200%, quando comparadas as amostras de 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibras em cada composição, respectivamente.

Quanto aos 28 dias, foi também observado um acréscimo da resistência à compressão na mistura de AR (50%) + Solo, de 73%, 127% e 136% em relação às amostras com 0,25%, 0,5% e 0,75% de fibras em cada mistura, respectivamente. Isso mostra que a mistura com AR (50%) + Solo + Cimento + 0,75% de fibras apresentou melhores condições de resistência tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias, quando comparadas as amostras com os outros percentuais de agregados reciclados.

A norma NBR 15115 (ABNT, 2004) indica a estabilização do agregado reciclado através da adição da cal ou cimento, como forma de promover uma maior resistência, devendo atingir 2,1 MPa, no mínimo, após 7 dias de cura. No presente estudo, os corpos de prova de agregados reciclados com 2% de cimento e fibra atingiram valores superiores ao que é preconizado pela referida norma, chegando a 2,4 MPa, e os valores dos corpos de prova que não atingiram o valor mínimo aos 7 dias, obtiveram-no aos 28 dias nas amostras com as adições de fibra.

Tabela 36 – Resistência à Compressão Simples das amostras aos 7 e 28 dias.

Amostra	RCS (MPa)	
	7 dias	28 dias
AR (25%) + Solo	0,9	1,2
AR (25%) + Solo + Cimento	1,4	1,6
AR (25%) + Solo + Cimento + Fibra (0,25%)	1,9	2,1
AR (25%) + Solo + Cimento + Fibra (0,50%)	2,0	2,3
AR (25%) + Solo + Cimento + Fibra (0,75%)	2,1	2,3
AR (50%) + Solo	0,8	1,1
AR (50%) + Solo + Cimento	1,5	1,6
AR (50%) + Solo + Cimento + Fibra (0,25%)	1,7	1,9
AR (50%) + Solo + Cimento + Fibra (0,50%)	2,0	2,5
AR (50%) + Solo + Cimento + Fibra (0,75%)	2,4	2,6
AR (75%) + Solo	1,2	1,3
AR (75%) + Solo + Cimento	1,3	1,4
AR (75%) + Solo + Cimento + Fibra (0,25%)	1,9	2,1
AR (75%) + Solo + Cimento + Fibra (0,50%)	2,0	2,2
AR (75%) + Solo + Cimento + Fibra (0,75%)	2,4	2,6

Silva (2007) realizou ensaios de Resistência à Compressão Simples com solo e adição de fibras de polipropileno com teores de 0,5% e 1%, verificando que o teor de fibra de 1,0 % proporcionou um aumento na Resistência à Compressão quando comparado ao solo com 0,5% de fibra.

Os valores desta pesquisa também estão de acordo com os valores obtidos por Motta (2005) e Lima (2008), os quais observaram um considerável acréscimo de resistência com adição de cal e cimento nos teores de 2% a 4%.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Com relação aos materiais utilizados na presente pesquisa, foi possível avaliar algumas propriedades físicas, químicas e mineralógicas desses, podendo-se tirar de cada parte analisada as considerações a seguir:

A composição gravimétrica permitiu determinar que 98% da amostra de RCC pertencem a materiais classificados na Classe A da resolução CONAMA n° 307 de 2002 (concreto, brita, cimento, argamassa, cerâmica branca e vermelha, tijolo, telha). A parcela composta por materiais contaminantes (madeira, plástico, metal e papel) constitui apenas 2% do RCC. Segundo a norma NBR 15115 (ABNT, 2004), materiais indesejáveis não devem ser utilizados em bases granulares, podendo estar presentes nos Resíduos da Construção Civil em uma quantidade inferior a 3%. Dessa forma, o resultado encontrado está de acordo com os valores especificados pela norma.

Com base nos resultados, pode-se afirmar que os agregados reciclados provenientes da Usina Ciclo Ambiental não apresentam uma quantidade significativa de materiais indesejáveis e poderiam ser utilizados como agregados para base e ainda classificados, segundo a norma NBR 15116 (ABNT, 2004), como agregado reciclado misto (ARM).

As curvas granulométricas permitiram definir a distribuição das partículas dos materiais e composições. Sendo o agregado reciclado constituído por 93,5% de areia, 4,4% de silte e 2,1% de argila, foi classificado como um material bem graduado. A parcela de finos menores que 0,075 mm se enquadram nos valores exigidos pela norma NBR 15116 (ABNT, 2004).

Os valores de Limites de Atterberg para os agregados reciclados e para a amostra de AR (75%) + Solo não apresentaram limites de liquidez e plasticidade, comportando-se como materiais não plásticos. Entretanto, o agregado reciclado e as misturas de AR (50%) + Solo e AR (75%) + Solo atenderam à condição de equivalente de areia superior a 30%; sendo, nesse caso, apto para o uso na pavimentação rodoviária, uma vez que o teor de material argiloso é pequeno.

Pela classificação MCT, as amostras de solo e agregado reciclado foram classificadas como LG', e as misturas como LA' todas possuíram recomendação de utilização em obras viárias como base de pavimento de vias de baixo volume de tráfego, reforço de subleito e subleito compactado.

O teor médio de absorção de água para a fração graúda do agregado reciclado foi de aproximadamente 8,7%, valor próximo aos resultados obtidos por outros pesquisadores e considerado alto, uma vez que os agregados naturais possuem uma absorção em torno de 2%. A norma NBR 15116 (ABNT, 2004) estabelece um valor máximo de 7% para concreto sem função estrutural, entretanto não estabelece intervalo para ser utilizado na pavimentação.

Foi verificado que os grãos de agregado reciclado possuem predominância da forma cúbica (58%), sendo mais indicados para pavimentação. Os valores obtidos atendem à NBR 15115 (ABNT, 2004), que recomenda até 30% de grãos lamelares e menos de 1% de partículas com a forma alongada-lamelar.

Os resultados de retração linear obtidos a partir das misturas sem fibras não apresentaram fissura na parte central da caixa, e seus valores foram inferiores a 20 mm, conforme as prescrições do CEPED (1984).

Na mineralogia, foi possível verificar que a fração de solo é composta por grãos arredondados a subarredondados, grãos de quartzo, variando de angulosos a subangulosos, além de fragmentos de crosta laterítica. Com relação à amostra de agregado reciclado, predominam grãos de quartzo, identificados também na difratometria de raio X, que também registrou a presença de alguns cristais de feldspato, como a microclina, além de carbonatos, como a calcita, que se justifica pela presença de materiais cimentícios no agregado reciclado, assim como os filosilicatos, como a caulinita, e, em menor quantidade a ilita, que está presente devido aos materiais cerâmicos. A precipitação do carbonato de cálcio poderia acontecer devido ao pH ser superior a 9, valor mínimo necessário para verificar sua presença.

Os percentuais de sulfato encontrados nas diferentes amostras seguem os padrões estabelecidos pela norma NBR 15116 (ABNT, 2004), sendo os valores inferiores a 2%.

Os resultados dos ensaios de compactação mostraram que as curvas têm um formato de sino, sendo muito importantes devido à dificuldade de sua obtenção pela grande variabilidade do agregado reciclado.

As umidades ótimas das amostras sem adição de fibras apresentaram redução com o acréscimo de agregado reciclado, enquanto o peso específico seco máximo aumentou com a maior variação de fração granular. Com adição de fibras, em geral, ocorreu uma redução da umidade ótima.

As análises das correlações feitas com os dados obtidos dos ensaios de compactação mostraram um melhor ajuste linear com a adição de cimento e variando de correlação moderada (sem cimento) a correlação muito forte (com cimento).

Ficou evidente que as curvas granulométricas obtidas após a compactação ficaram muito próximas, onde a maior quebra correspondeu à curva da amostra de solo e o Índice de Degradação do agregado reciclado foi de 5,58, que é um valor próximo ao de um agregado natural.

Os valores de CBR obtidos para o agregado reciclado e as misturas são satisfatórios e recomendados tanto para base, sub-base, quanto para reforço de subleito. Os resultados de CBR com imersão de 96h foram inferiores aos resultados obtidos sem imersão, sendo que essa redução variou de 9% a 33%. Esse comportamento era de se esperar, já que a resistência do material saturado diminui devido à perda de sucção.

Os valores dos Índices de Quebra de Ruiz (ID) e os do DNER-ME 398/99 (IDp) foram calculados para os ensaios de compactação e CBR com e sem imersão. Os resultados se apresentaram muito próximos, não havendo diferenças significativas, já que as curvas granulométricas, ao final do ensaio, não mostraram variações. Entretanto, foi verificado que, na maioria das amostras, a maior quebra de partículas se apresenta durante a compactação.

Os ensaios de Resistência a Compressão Simples mostraram ganhos de resistência aos 7 e 28 dias para todas as amostras analisadas, e a mistura de AR (50%) + Solo + Cimento com a variação do percentual de fibras apresentou melhores ganhos de resistência.

Contudo, as amostras que apresentaram melhores propriedades mecânicas foram as misturas de AR (50%) + Solo + Cimento + 0,75% de fibras e AR (75%) + Solo + Cimento + 0,75% de fibras, com 2,4 MPa, aos 7 dias e 2,6 MPa, aos 28 dias, para as duas amostras.

É importante salientar que o uso de materiais reciclados para construção passa pelo incentivo à adoção de tecnologias construtivas mais sustentáveis. O aumento na qualidade dos produtos obtidos na construção, a necessidade de uma manutenção adequada e a diminuição dos custos são algumas das metas a serem alcançadas. Entretanto, isso não deve ocorrer de forma indiscriminada em detrimento da falta preservação do meio ambiente. É interessante que sejam elaboradas normas rígidas de controle de qualidade de materiais e serviços, bem como adotadas novas tecnologias de interesse comum, com o objetivo de melhorar a conservação ambiental.

Finalmente, conclui-se que o agregado reciclado e as misturas com a adição de fibras utilizados nesta pesquisa apresentam características físicas e mecânicas que permitem seu uso como insumo na construção de bases rodoviárias e podem substituir os materiais convencionais.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir do estudo desenvolvido nesta pesquisa, é possível apresentar algumas recomendações para futuras pesquisas, tais como:

- Investigar, através de ensaios mecânicos, a influência de outros tipos de Resíduos da Construção Civil nas misturas;
- Avaliar o comportamento mecânico dos materiais constituintes do compósito sob a influência de energia modificada durante a compactação e o ensaio de CBR, verificando a quebra dos grãos;
- Avaliar o desempenho mecânico das misturas com outros percentuais de cimento;
- Analisar a caracterização física e mecânica dos agregados reciclados com diferentes teores de fibras, comprimentos e tipos.
- Considerar diferentes períodos de imersão do ensaio de CBR para verificar a capacidade de hidratação dos finos presentes nas misturas;

- Realizar ensaios de Índice de Suporte Califórnia com a presença de fibras nas misturas;
- Analisar a Resistência à Compressão com a incorporação das fibras nos compósitos com outros percentuais e comprimentos;
- Verificar o módulo de resiliência dos compósitos por meio de ensaios dinâmicos para avaliar a estrutura das camadas de base e do subleito dos pavimentos flexíveis;
- Estudar, por meio da construção de modelos experimentais com as misturas, avaliando seu desempenho para diferentes tipos de carga e condições de tráfego.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm – determinação da massa específica da massa específica aparente e da absorção da água. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6954**: Lastro Padrão: determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica - Procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de Compactação - Procedimento. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 9917**: Agregados para concreto- Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia. 14p. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 11578**. Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 11804**: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12770**: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. 4p. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 15.115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004, 10 p.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR EB-2103**: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente. Rio de Janeiro, 1991.

ABRELPE. 2010. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010**. Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. ABRELPE. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2010.pdf>>. Acesso em: 25-02-12.

AGOPYAN, V. ; JOHN, V. M. . **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011. v. 1. 142 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, (1990). Annual book of ASTM standards. Section 4: Construction, v.04.08: Soil and rock; dimension stone; geosynthetics. Philadelphia

AMORIM, E. F.; QUEIROZ, H. S. de; RIBEIRO, L. F. M. Aproveitamento de Resíduos de Construção e Demolição de Obras Misturados a um Solo Laterítico para Uso em Obras de Pavimentação. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL E VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS REGIO/GEOSSINTÉTICOS 2011, 7., 2011, Belo Horizonte, MG. **REGEO/Geossintéticos 2011**. Belo Horizonte, MG, Regeo/Geossintéticos 2011, 2011.

ÂNGULO, S. C.; ULSEN, C.; JOHN, V. M.; KAHN, H.; CINCOTTO, M. A.; CHEMICAL – mineralogical charal lerizaluan of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brasil. Waste Management, V. 29, p. 721-730, 2009.

ARM, M. (2001). Self cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial test and field test. Waste Management, 21, pp. 235 – 239.

AUGHENBAUGH, N. B., JOHNSON, R. B., YODER, E. J. (1966). Degradation of base course aggregates during compaction. Technical Report 166, US Army Cold Regions Research and Engineering Lab.

BENTO, P.F. (2006). **Uso de Cal e Fibras na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G. DM –

144/06, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

BERNUCCI, L. B., LEITE, F. C., MOTTA, R. S. 2005. Aplicação de Agregado Reciclado de RCD em Pavimentação: Sistema Viário da USP-Leste. Apresentação. CD ROM. In: **Seminário Gestão e Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição - Avanços e Desafios**. São Paulo - SP.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. (2008). Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro, 504 p.

BRADY, N. C. (1979) “Natureza e propriedades dos solos (Tradução de Antônio B. Neiva Figueiredo Filho)”, 5ª edição, Rio de Janeiro, Ed. Freitas bastos, 647 p.

BRASIL. Constituição Federal, 1988.

BRASIL. **Lei Nº 12.305**, de 2 de ago de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília- DF, 2 ago de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm> Acesso: 27-09-11.

BRASIL. **Lei Nº 17.072**, de 04 de janeiro de 2005. Estabelece as diretrizes e critérios para o Programa de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Disponível em:<<http://www.recife.pe.gov.br/pr/servicospublicos/emlurb/Lei-17072-05.pdf>> Acesso: 13-11-2011.

BRASIL. Decreto Municipal nº **18.082/98** que Regulamenta a **Lei nº 16.377/98** no que tange ao transporte e disposição de Resíduos da Construção Civil e outros resíduos não abrangidos pela coleta regular e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.recife.pe.gov.br/noticias/arquivos/34.pdf>> Acesso: 13-11-2011.

BRASIL. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa anual da indústria da construção**. 2010. Disponível em <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Industria da Construcao/Pesquisa Anual da Industria da Constr ucao/2010/paic2010.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Industria_da_Construcao/Pesquisa_Anual_da_Industria_da_Construcao/2010/paic2010.pdf)> acesso em 01 de março de 2013.

BUENO, B. S. **Uso de fibras plásticas para reforço de solos compactados**. Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BUZZATTI, D.J. (1987). Índice de abrasão los angeles e índice de degradação: análise comparativa paradiuersas naturezas de agregados. Departamento de estradas e rodagem do estado de Minas Gerais, **Publicação técnica**, Nº 23.

CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E. C.; OLIVEIRA, A. M. V.; SCHADACH DE BRUM, I. A.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P.V.; COSTA, D. B. (2001). Características do entulho e do agregado reciclado em: Reciclagem do entulho para a produção de materiais de construção. Projeto entulho bom. Organizado por Cassa. J. C. S. (em memória), Carneiro, A. P.; Schadach de Brum I. A. p; 142 – 188.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos da construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. São Paulo: USP, 2005. 129p. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno Visando o Uso como Base de Fundações Superficiais**. 2001. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de Solos Reforçados com Fibras Submetidos a Grandes Deformações**. 2005. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

CEPED – CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO. **Manual de construção com solo-cimento**. Camaçari-BA, 1984. 147p. CEPED/ABCP.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 001**. Brasília, 1986.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307**. Brasília, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 348**. Brasília, 2004.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 431**. Brasília, 2011.

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; DONATO, M.; PRIETTO, P. D. M. **Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites**. Ground Improvement, ISSMGE, v.8, n.2, p. 77-90, 2004.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L.A. **The behavior of a fiber-reinforced cemented soil**. Ground Improvement, ISSMGE, v.3, n.3, p.21-30, 1999.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; FONINI, A. DALLA ROSA, F. **Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range**. Geotextiles and Geomembranes 27, 196-203. 2009.

CORNELI, Vanessa Medeiros. **Análise da gestão de resíduos de construção e demolição no município de Campo Mourão/Paraná Maringá 2009**. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação Em Engenharia Urbana, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual De Maringá, Maringá, 2009.

CRISTELO, N. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. Dissertação**. Portugal, 2001. (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Portugal.

DELGADO, A. K. C. (2007). **Estudo do Comportamento Mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária**. Tese de Doutorado, G.TD-045/2007, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 392p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 258/94** - Solos compactados em miniatura – Mini-MCV. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ES 141/2010** - Pavimentação ± Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 398/99** – Agregados: determinação do índice de degradação após compactação. Próctor IDP. Rio de Janeiro; 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 054/97**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DIAS, J.F.; AGOPYAN, V. ; BERNUCI, L. L. B.; MOURA, E. (2006). Avaliação do módulo de resiliência de misturas solo agregado reciclado cerâmico em função do esqueleto granular do agregado. **13ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA. MACEIÓ.**

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentos Rígidos.** 2ed. Rio de Janeiro, 2004.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** 3ed. Rio de Janeiro, 2006.

DONATO, M. **Comportamento Mecânico de Concreto Compactado com Rolo Reforçado com Fibras de Polipropileno.** 2003. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

DONATO, M. **Medidas Diretas de Tensão em Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno.** 2007. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).

ERPEN, M. L. **Resíduos sólidos de construção e demolição estudo de caso: Gurupi - TO.** 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Brasília.

EUROSTAT, ENVIRONMENT AND ENERGY (2010). **Generation and Treatment of Waste.** Disponível em: <<http://ec.europa.eu/eurostat/>>. Acesso em: 01-03-12.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA-RD-97-148: User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction. Department of Transportation. Washington, 1997. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/research>> . Acesso: 17-11-11.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição nos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação.** 2004. 109p. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ). Rio de Janeiro, 2004.

FERNANDES, M. G. M.; OLIVEIRA, J. R. M. S.; CARNEIRO, L. A. V. ; GUIMARÃES, A. C. R. (2010). Análise do comportamento resiliente de um solo argiloso reforçado com fibras de polipropileno. **COBRAMSEG 2010**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. CD ROM.

FERREIRA, M. de C. THOMÉ, A. (2011). Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. **Teoria e Prática Na Engenharia Civil**, Passo Fundo, n. 18, p.1-12, nov. 2011.

FEUERHARMEL, R. M. **Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno**. 2000. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 133 p.

FIGUEIREDO, S.S. (2011) **Estudo da durabilidade de tijolos solo-cal incorporados em resíduos de demolição da construção civil**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande PB/107 p.;

GIRARDELLO, Vinícius. **Ensaio de placa em areia não saturada reforçada com fibras**. 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GOMES, Fabíola de Souza. **Estudo da erodibilidade e parâmetros geotécnicos de um solo em processo erosivo**. 2001. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal De Pernambuco, Recife, 2001.

GÓNGORA, I. A. G. (2011). Utilização de Geossintéticos como Reforço de Estradas não Pavimentadas: Influência do Tipo de Reforço e do Material de Aterro. Dissertação de Mestrado, Publicação G. DM-190/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76 p.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 2009. 163f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GUEDES, S. B. **Estudo do desempenho mecânico de um solo-cimento reforçado com fibras para uso como revestimento primário em estradas não-pavimentadas**. 2011. 119 f. Exame de Qualificação (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife.

GUERRA, Jaqueline de Souza. **Gestão de resíduos da construção civil em obras de edificações**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação Em Engenharia Civilrbana, Departamento de Engenharia Civil, Universidade De Pernambuco, Recife, 2009.

GUSMÃO, Alexandre Duarte. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Camaragibe, PE: CCS Gráfica, 2008. 140 p.

HARDIN, B. O. (1985). Crushing of soil particles. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol. 111, N° 10: pp.1177 – 1191.

IPR – INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Estudos e pesquisas de rochas de pedreiras para estabelecimento de critérios de qualidade frente às normas e procedimentos existentes e sua aceitação. Relatório final. ECL – Engenharia, Consultoria e Economia S.A. Rio de Janeiro, 1998.

JIMÉNEZ, A. M. G. **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação**. 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2011.

JOHN, V. M.; CINCOTTO M. A. Alternativas de Gestão de Resíduos de Gesso. Reciclar para construir. São Paulo, 2003. 9 p. Disponível em www.reciclagem.pcc.usp.br. Acesso em: 12/10/2011.

JOHN, V. M. Panorama sobre reciclagem de resíduos na construção civil. In. II Seminário Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem na Construção civil CT. 206 1999. IBRACON.

LADE, P. V., YAMAMURO, J. A., BOPP, P.A. (1996). Significance of particle crushing in granular materials. Journal of Geotechnical Engineering, 122 (4): pp. 309 – 316.

LAFAYETTE, K. P. V. **Estudo Geológico-Geotécnico do Processo Erosivo em Encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/PE**. 2006. 358 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2006.

LEITE, F. da C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 185 f.

Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2007.

LEITE, F. da C.; MOTTA, R. S.; BERNUCCI, L. L. B., MOREIRA, E.; ABDORE, M. R. (2006). Comparação de valores de índice de suporte Califórnia de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil. **13ª Reunião de pavimentação urbana**. 13ª RPU. Maceió/ AL. Brasil.

LEITE, F. da C.; MOTTA, R. S.; VASCONCELOS, H. L.; BERNUCCI, L. L. B. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 05, 2011, PP. 2972-2979.

LIMA, F. S. N. de S. **Aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de argamassas**. 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

LIMA, J. A. R. de, 1999. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. São Carlos, 246p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LIMA, J. H. C. **Utilização de Resíduo de Construção e Demolição para pavimentos urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza**. 2008. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade do Ceará, Fortaleza, CE, 162 fl.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010.107p.

LIRA JR., E. A. de. **Uso de resíduos de construção e demolição (RCD) em estacas de compactação para melhoramento de solos**. Recife. UPE, 2010. 166f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

LISBOA. Decreto-Lei n.º 46: gestão de resíduos de construção e demolição. **Diário da República**, 2008.

MACEDO, T. F. Avaliação do uso de resíduos da construção e demolição com solo reforçado. 2008. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil - Universidade de Pernambuco. Recife.

MÁLIA, M. **Indicadores de Resíduos de Construção e Demolição**. Lisboa, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.

MARIANO, L. S. **Gerenciamento de resíduos da construção civil com reaproveitamento estrutural: estudo de caso de uma obra com 4.000m²**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós- Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental,, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2008.

MARSAL, R. J. & RESENDIZ, D. (1975). Earth and Earth-Rock Dams (in Spanish). Limusa, Ciudad de Mexico, Mexico, 546p.

MITCHELL, J. K. (1993) “Fundamentals of soil Behavior”. 2 ed. John Wiley & Sons, New York, USA.

MITCHELL, J. K., SOGA, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, INC., Canada, 3rd ed., 577p.

MOLENAAR, A. A. A.; VAN NIEKERK, A. A. Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. **Transportation Research Record**, Washington, n.1787, p.73-82, 2002.

MONTEIRO, A.; TOJO, Y.; MATSUO, T.; UAMADA, M.; ASA KURA, H.; ONO, Y.; Gypsum and organic matter distribution in a mixed construction and demolition waste sorting process and their possible removal from outputs. **Journal of Hazardous Materials**, V. 175, p. 747-753, 2010;

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia**: subsídios para uma gestão sustentável. 2006. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

MOREIRA, L. H. H. (2010). **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo, SP. 106p.

MOTTA, R. S. (2005). **Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil Para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

NATARAJ, M. S.; ADDULA, H. R.; MCMANIS, K. L. Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. In: International Symposium on environmental geotechnilgy, 3, San Diego, 1996. **Proceedings...** Pennsylvania: technimic Publishing Co, Inc, 1996. V. 1, p. 826-835.

NÓBREGA, R. N.; MELO, R. A. de. Uso de agregados de resíduos da construção civil na pavimentação urbana em João Pessoa. In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos da Construção. **ENARC**. 2009.

NOGAMI, J. S & VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solo Laterítico**. São Paulo. 1995. 240 p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1981) Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. **Anais do Simpósio de Solos Tropicais em Engenharia**, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, p.30-40.

NUNES, K. R. A. **Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição**. 2004. 275 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN UNION. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0003:EN:PDF>
Acesso em: 07-03-2012.

OLIVEIRA, J.C.; REZENDE, L.R.; GUIMARÃES, R. C.; CARVALHO, J. C. (2005). Variação dos parâmetros de compactação e cbr de agregados reciclados de resíduos da construção civil. **36ª Reunião anual de pavimentação RAPv**. Curitiba, Brasil.

O'MAHONY, M. M.; MILLIGAN, G. W. E. Use of recycled materials in subbase layers. **Transportation Research Record**, Washington, n.1310, p.73-80, 1991.

ORPEC ENGENHARIA. Disponível em: <http://www.orpecengenharia.com.br>. Acesso em: 03/04/2011.

ORTIZ, O.; PASQUALINO, J. C.; CASTELLS, F. Environmental Performance of Construction Waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. **Journal of Waste Management**, v. 30, n. 4, p. 646-654, 2010.

PALMEIRA, E. M. (2010). Soluções de baixo custo envolvendo geossintéticos e materiais alternativos em obras geotécnicas e de proteção ambiental. COBRANSEG

2010: Engenharia Geotécnica para o Desenvolvimento, Inovação e Sustentabilidade. ABMS.

PARK, T. (2003). Application of Construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement. *Journal of Transportation Engineering*. ASCE, 129, (5): pp. 558 – 563.

PESSOA, F. H. C. **Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. Brasília, 2004. 151 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade de Brasília.

PETKOVIC, G., ENGELSEN, J. C., HÅØYA, A. O., BREEDVELD, G. (2004). Environmental impact from the use of recycled materials in road construction: method for decision-making in Norway. *Resources, Conservation and Recycling*, 42: pp 249 – 264.

PIETRA, I. **Avaliação da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos da construção e demolição reforçados com fibras de aço**. 2005. 129p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP. 2005.

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

PIOVEZAN JÚNIOR, G. T. A. **Avaliação dos resíduos da construção civil (RCC) gerados no município de Santa Maria**. 2007. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Programa De Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2007.

PONTES, G. C. **Avaliação do gerenciamento de resíduos de construção e demolição em empresas construtoras do Recife e sua conformidade com a Resolução nº307/CONAMA: Estudo de casos**. 2007. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife.

POON, C. S.; CHAN, D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and building materials*, V. 20, p. 578-585, 2006. Disponível em <http://www.Elsevier.com>. Acesso em: 15 de dez. 2011.

POON, C.S. QIAS, X.C.; CHAN, D. (2006). The cause and influence of self – cementing properties of fine recycled concrete aggregates of properties of unbound sub-base. *Waste management and research*, 26 : p. 1166-1172.

PROENÇA, F. T. T. C. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduos da construção civil para o aproveitamento em obras de pavimentação.** 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2012.

RESCHETTI JÚNIOR, P. R. **Avaliação do comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico reforçado com fibras para uso em pavimentação.** 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

RON, M. B.; CASAGRANDE, M. D. T.; VALE, A. C.; LOPES, M. M.; SOARES, J. B. (2008). Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção civil e demolição como agregados em misturas asfálticas. Fortaleza, CE. **15ª RPU** – trabalho nº 19, 7p.

ROTH, C. das G.; GARCIAS, C. M. **Construção Civil e a Degradação Ambiental.** Desenvolvimento em Questão [online], Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, v. 7, n. 13, p. 111-128, 2009.

SALES, A. T. C.; SANTOS, D. G. Aplicação de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção em Blocos Pré-Moldados de Vedação. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 2009, Feira de Santana. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2009. p. 496-505.

SANTOS, E. C. G. dos. **Aplicação de resíduos de construção e demolição (rcd-r) em estruturas de solo reforçado.** 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SANTOS, M. P. (2009). **Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos de madeira provenientes da construção civil.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Universidade de Minas Gerais. 108p.

SILVA, C. A. R. da. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas.** 2009. 220f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

SILVA, C. C. da. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SILVA, F. A. **Tenacidade de materiais compósitos não convencionais**. Rio de Janeiro, 2004. 234p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro, PUCRJ.

SILVA, G.; SILVA, M. G.; AGOPYAN, V. Avaliação de edifícios no Brasil: da avaliação ambiental para a avaliação da sustentabilidade. Artigo técnico. Ambiente Construído – **Revista do ANTAC**, 2003. Artigo técnico, 18 p. Porto Alegre.

SILVA, M. A.; BUENO, B. S.; LIMA, D. C. Estabilização de solos com inclusões sobre aplicações de geossintéticos, 2., 1995. Geossintéticos 95...1995, p. 327-335.

SILVA, M.G.B.; SILVA, B.T.A.; BARROSO, S.H.A. (2008). Um primeiro estudo dos resíduos de Construção e Demolição da Construção Civil para Aplicação em Camadas de Pavimentos na Cidade de Fortaleza. Fortaleza, CE. 10 p.

SÍNTESES DA LEGISLAÇÃO DA UE. Disponível em: http://europa.eu/legislation_summaries/institutional_affairs/decisionmaking_process/114527_pt.htm. Acesso em: 07-03-2012.

SOUZA, M.I.B.; SEGANTINI, A.S.S.; PEREIRA, J.A. 2008. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, Nº 2, p. 205-212, 2008.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas Solo-cimento-fibras submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. Porto Alegre, 2000. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), CPGEC/UPRGS.

SVEHLA, G. (1979). VOGEL'S Text Book of Macro and Semimicro Qualitative Inorganic Analysis, Longman, London and New York, fifth edition, 544 p.

TAM, W. Y.; WANG, K.; TAM, C. M. (2008). Assessing relationship among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. **Journal of hazardous materials**, 152: p. 703-714.

TEODORO, J.M. (1999) **Resistência do cisalhamento de solos reforçados com fibra plástica**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos.

TRICHÊS, G.; KRYCKYJ, P. R. (1999). Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana. **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL**. São José dos Campos, SP.

TRINDADE, T. P.; IASBIK, I.; LIMA, D. C.; MONETTE, E.; SILVA, C. H. de C.; CARVALHO, C. A. B.; BUENO, B. S.; MACHADO, C. C. (2006). Estudo laboratorial do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais. **Revista: Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, n. 02, p. 215-222. 2006.

TRINDADE T. P.; IASBIK, I.; LIMA, D. C.; SILVA, C. H. de C.; BARBOSA, P. S. A. (2004). Latossolo vermelho-amarelo reforçados com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: Estudo em laboratório. **Revista Escola de Minas**. Minas, v. 57, Nº 1, p.53-58, Ouro Preto, 2004.

UWAI, M. de S. **Custos de implantação e operação de um sistema de coleta de pequenos volumes de RCC**. 2009. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Departamento de Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

VALLE, N. **Utilização de solos residuais saprolíticos na pavimentação rodoviária em Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994.

VEDRONI, J. W. **Estudo de caso sobre a utilização do RCD (resíduos de construção e demolição) em reaterros de valas nos pavimentos de piracicaba SP**. 2007. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola na Área de Construções Rurais e Ambientância, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

VELLOSO, R. Q.; CASAGRANDE, M. D. T.; VARGAS JÚNIOR, E. A.; CONSOLI, N. C. Simulation of the Mechanical Behavior of Fiber Reinforced Sand using the Discrete Element Method. **Soils and Rocks**, v.35, n. 2, p. 201-206, may-august. 2012.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Porto Alegre, 2003. 224 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C.; LIMA, F. B.. Resistência e durabilidade de concretos da construção e demolição. **Revista Engenharia Civil**. Universidade do Minho, número 19, 2004, p. 15-18. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/cec/revista/revista.html>. Acesso em 01 de nov. de 2011.

ZEGHAL, M. (2009). The impact of grain crushing on road performance. **Geotechnical & Geological Engineering**, 27. Pp. 549-558.

ANEXO A

Curvas de resistência à compressão simples

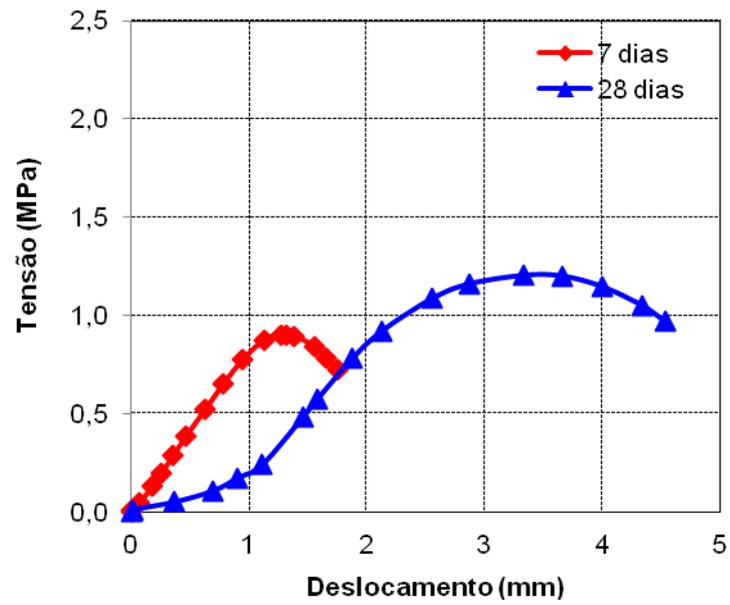


Figura 81 - Curvas de RCS da mistura com 25% AR + Solo.

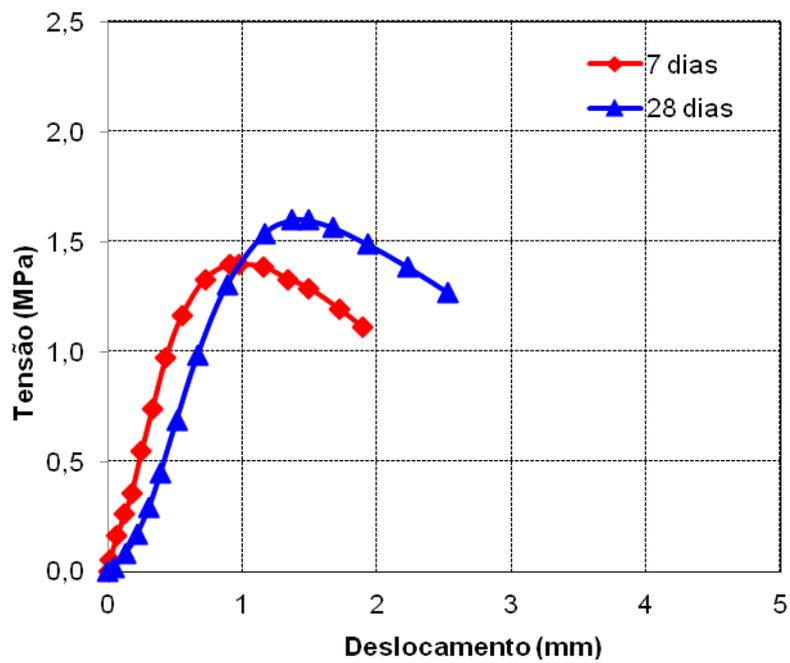


Figura 82 - Curvas de RCS da mistura com 25% AR + Solo + Cimento.

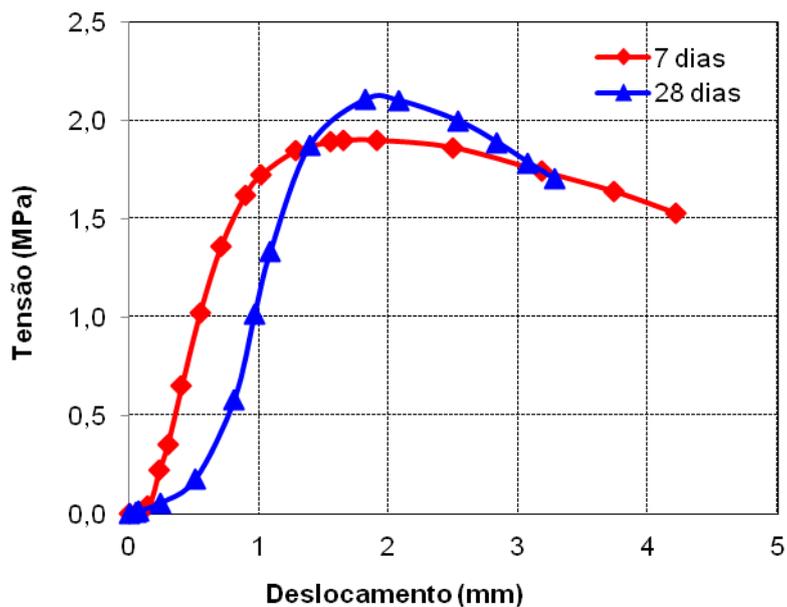


Figura 83 - Curvas de RCS da mistura com 25% AR + Solo + Cimento + 0,25% fibra.

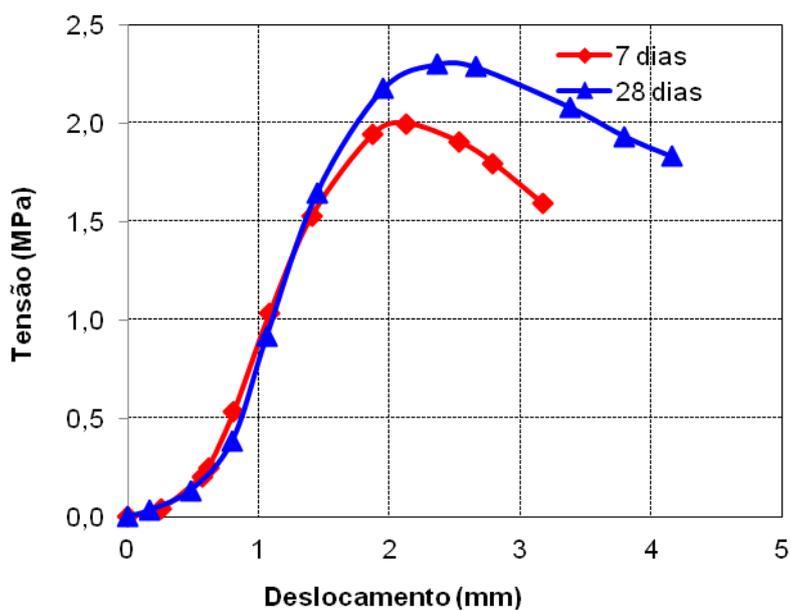


Figura 84 - Curvas de RCS da mistura com 25% AR + Solo + Cimento + 0,5% fibra.

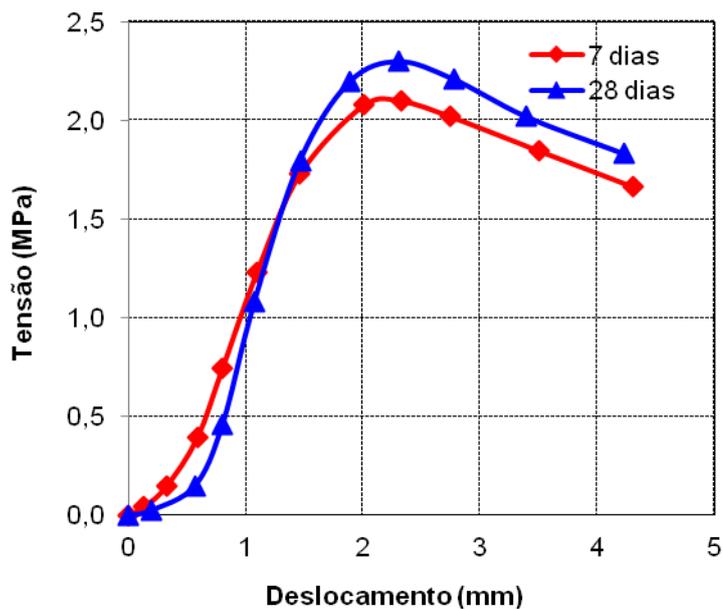


Figura 85 - Curvas de RCS da mistura com 25% AR + Solo + Cimento + 0,75% fibra.

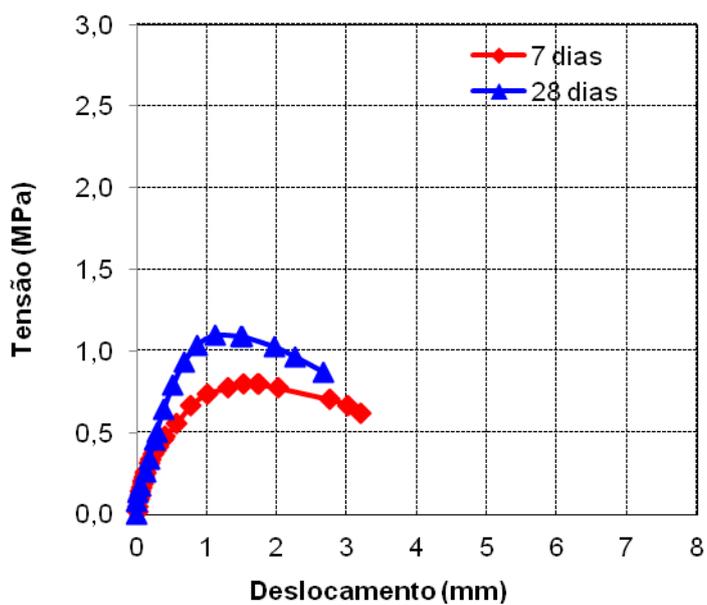


Figura 86 - Curvas de RCS da mistura com 50% AR + Solo.

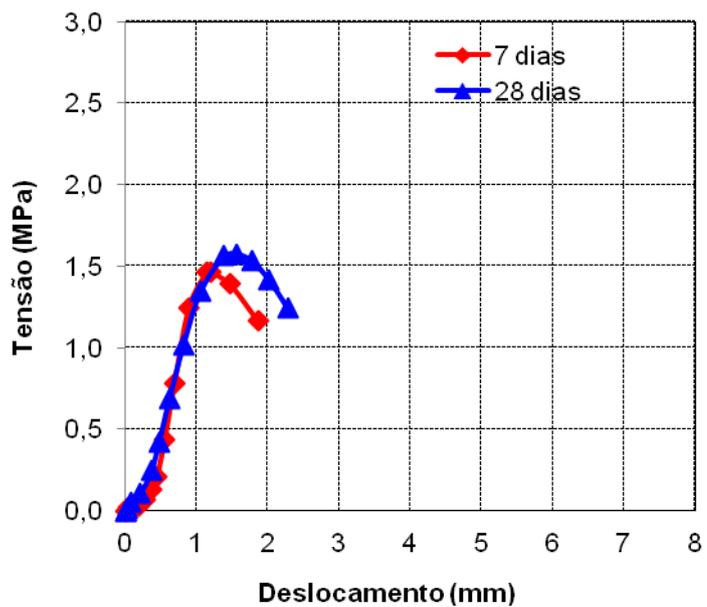


Figura 87 - Curvas de RCS da mistura com 50% AR + Solo + cimento.

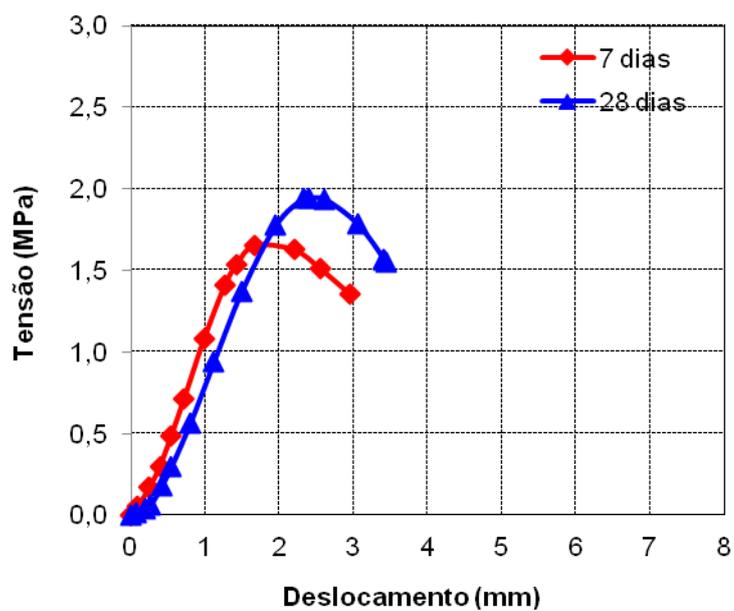


Figura 88 - Curvas de RCS da mistura com 50% AR + Solo + cimento + 0,25% fibra.

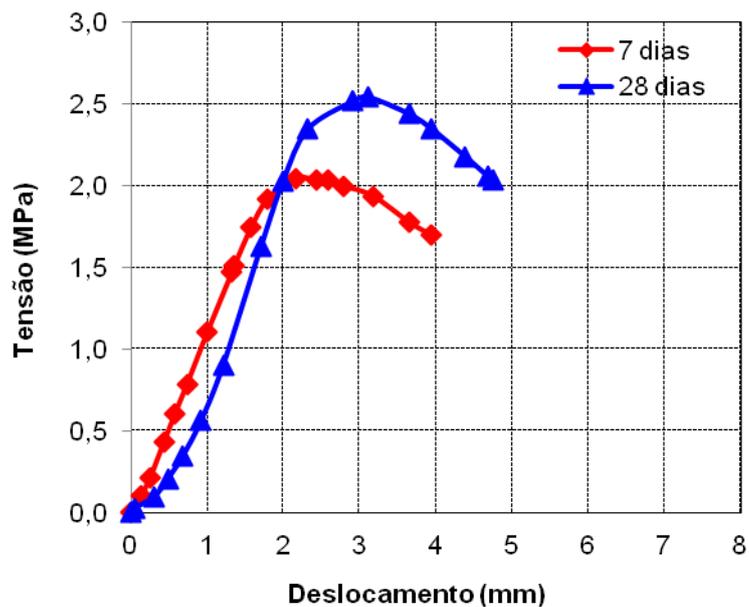


Figura 89 - Curvas de RCS da mistura com 50% AR + Solo + cimento + 0,5% fibra.

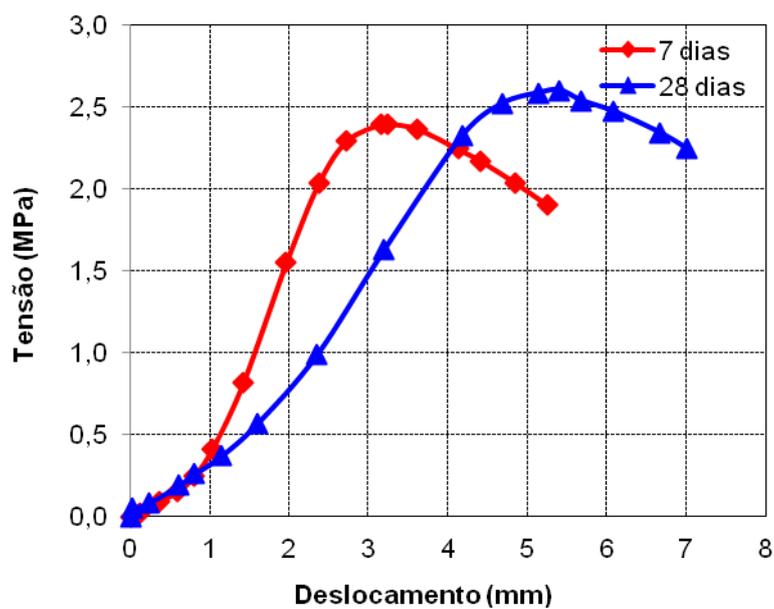


Figura 90 - Curvas de RCS da mistura com 50% AR + Solo + cimento + 0,75% fibra.