

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

**A APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO REICLADO NO COMPÓSITO SOLO-CIMENTO**

Paulo Edison Martins da Silveira

Orientador: Prof. Dr. Carlos de Almeida Nóbrega

Dissertação de Mestrado elaborada
junto ao Programa de Pós-Graduação
em Geociências - Área de
concentração em Geociências e Meio
- Ambiente, para obtenção do título de
Mestre em Geociências.

Rio Claro
2005

604.6 Silveira, Paulo Edison Martins da
S587a A aplicação do resíduo de construção e demolição
reciclado no compósito solo-cimento / Paulo Edison
Martins da Silveira. – Rio Claro : [s.n.], 2005
132 f. : il., tabs., quadros, gráfs., fots.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Carlos de Almeida Nóbrega

1. Resíduos. 2. Entulhos. 3. Encapsulamento de
resíduos. 4. Agregado alternativo. I. Título.

A APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADO NO COMPÓSITO SOLO-CIMENTO

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos de Almeida Nóbrega

Prof. Dra. Gilda Carneiro Ferreira

Prof. Dr. José Carlos Chitolina

Paulo Edison Martins da Silveira

Aluno

Rio Claro, 10 de março de 2005.

Resultado: Aprovado

Deus Pai, meu inspirador
Meus pais e irmãos
Lorilei, esposa e companheira incentivadora
Felipe e Aline, meus filhos que entenderam o significado deste trabalho que acabou por
reduzir nossas horas de convívio
Este trabalho eu dedico a vocês

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Carlos de Almeida Nóbrega, meu eficiente orientador, pela confiança em mim depositada, em nome do qual estendo meus agradecimentos a todos os professores e colegas da Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus de Rio Claro.

Ao Prof. Dr. José Carlos Chitolina e demais professores da Escola de Engenharia de Piracicaba, por suas valiosas sugestões que muito auxiliaram no desenvolvimento deste projeto.

A FUMEP - Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba, mantenedora da EEP - Escola de Engenharia de Piracicaba, que cedeu seus laboratórios para o desenvolvimento de grande parte dos trabalhos deste projeto.

Ao CEA - Centro de Estudos Ambientais da UNESP-Rio Claro, em especial a Química Francisca A. M. Gonçalves e a Biomédica Eleni N. Malagutti, pelas análises químicas de extrema valia.

Ao IAC - Instituto Agrônomo de Campinas, na pessoa da Prof. Dr^a. Mônica Ferreira de Abreu, que ofereceu seus laboratórios para análises químicas deste trabalho.

A EMDAPH - Empresa Municipal de Desenvolvimento Habitacional de Piracicaba pelas facilidades oferecidas durante os trabalhos deste projeto.

Ao SEDEMA - Secretaria Municipal de Defesa do Meio Ambiente de Piracicaba pelas informações de extrema valia ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Haroldo Rodrigues Caroba, técnico responsável do laboratório de Química e de Resíduos da FUMEP por sua inestimável colaboração na realização de experimentos laboratoriais.

Aos queridos alunos bolsistas dos laboratórios de Solos, Geologia e Materiais de Construção Civil: Luís Alberto Faria, Rodrigo Trevisan e Miguel Costa Jr, que voluntariamente, alegremente e descontraidamente me auxiliaram na execução de ensaios, muitas vezes extenuantes.

Ao aluno Robson Willians da Costa Silva, graduando do curso de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de Piracicaba - EEP, nosso colaborador quando juntamente trabalhamos na fase de caracterização do resíduo de construção civil reciclado, em Piracicaba, alvo de nossas pesquisas.

SUMÁRIO	PÁGINA
Índice	i
Índice de tabelas	iii
Índice de figuras	v
Índice de fotos	vii
Índice de Quadros	viii
Resumo	ix
Abstract	x
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	04
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
4. MATERIAIS E MÉTODOS	42
5. RESULTADOS	58
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	109
7. CONCLUSÕES	113
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

ÍNDICE	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	04
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
3.1. RESÍDUOS	05
3.2. RECICLAGEM	06
3.3. APLICAÇÃO DE ALGUNS RESÍDUOS COMO AGREGADO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	08
3.4. CONSUMO DE MATÉRIAS PRIMAS NÃO RENOVÁVEIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	11
3.5. GERAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	11
3.6. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	15
3.6.1. Aspectos Gerais	15
3.6.2. Composição	16
3.6.3. Variabilidade dos Resíduos de Construção Civil	21
3.7. A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL	22
3.8. ASPECTOS LEGAIS DOS RCD NO BRASIL	24
3.9. A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	25
3.9.1. Histórico	25
3.9.2. Experiências Municipais de Reciclagem de Entulho no Brasil	26
3.9.3. Processos de Reciclagem do RCD	28
3.10. AS POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO DO ENTULHO RECICLADO	30
3.10.1. Utilização em Pavimentos	30
3.10.2. Utilização como Agregado para o Concreto	31
3.10.3. Utilização Como Agregado em Argamassas	34
3.10.4. Utilização como Agregado em Tijolos de Solo Estabilizado com Cimento	35
3.10.5. Outros Usos	35
3.11. ENCAPSULAMENTO DE RESÍDUOS	36
3.12. SOLO-CIMENTO	36
3.12.1. Aspectos Históricos	36
3.12.2. Aspectos Gerais	38
3.12.3. Estabilização dos Solos com Cimento	39
3.12.4. Produção de Tijolos e Blocos de Solo-Cimento	41
3.12.5. As Propriedades do Solo no Compósito Solo - Cimento	41
3.12.6. A dosagem do Solo-Cimento	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1. SOLO UTILIZADO	42
4.2. O RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADO ESCOLHIDO	42
4.3. CIMENTO UTILIZADO	43
4.4. COLETA DE AMOSTRAS	43
4.4.1. Coleta de Amostra de Solo e Obtenção de Sub - Amostras	43
4.4.2. Coleta de Amostras de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados	44
4.5. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO RCD RECILCADO	45

4.5.1. Ensaio de Lixiviação	46
4.5.2. Ensaio de Solubilização	46
4.5.3. Extração do Digerido para Massa Bruta	47
4.5.4. Análise dos Parâmetros Químicos	47
4.5.5. Teor de Matéria Orgânica e Sólidos Voláteis	48
4.6. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO RCD RECICLADO	48
4.6.1. Massa Específica dos Grãos e Massa Unitária do Agregado	48
4.6.2. Análise Granulométrica dos Agregados	49
4.6.3. Teor de Materiais Pulverulentos	49
4.6.4. Análise Granulométrica Combinada	49
4.6.5. Absorção d'água de Agregado Miúdo	50
4.7. CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS RESÍDUO/SOLO COMO CONSTITUINTES DE COMPÓSITO SOLO-CIMENTO	50
4.7.1. Massa Específica dos Grãos	50
4.7.2. Análise Granulométrica Combinada	50
4.7.3. Grau de Floculação e Grau de Dispersão	51
4.7.4. Limites de Consistência	51
4.7.5. Estudo de Compactação	51
4.7.6. Classificação Física das Misturas Resíduo/Solo	52
4.8. ESTUDO DE COMPACTAÇÃO E DOSAGEM DO COMPÓSITO SOLO-CIMENTO	54
4.9. MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS	55
4.10. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS C.Ps	55
4.11. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS C.Ps	56
4.12. ENSAIO DE DURABILIDADE POR SECAGEM E MOLHAGEM	56
4.13. ANÁLISE QUÍMICA DOS COMPÓSITOS	57
5. RESULTADOS	58
5.1. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO RCD RECICLADO	58
5.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO RCD RECICLADO	60
5.3. VARIABILIDADE DO RCD RECICLADO	64
5.4. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS MISTURAS RESÍDUO/ SOLO	72
5.4.1. Mistura Resíduo/ Solo com Diluição 0% (M - 0%)	72
5.4.2. Mistura Resíduo/ Solo com Diluição 25% (M-25%)	76
5.4.3. Mistura Resíduo/ Solo com Diluição 50% (M-50%)	80
5.4.4. Mistura Resíduo/ Solo com Diluição 75% (M-75%)	84
5.4.5. Mistura Resíduo/ Solo com Diluição 100% (M-100%)	88
5.4.6. Resumo da caracterização física das cinco misturas resíduo/solo	93
5.4.7. Escolha das misturas resíduo/solo	94
5.5. ESTUDO DE DOSAGEM DOS COMPÓSITOS	95
5.5.1 Escolha dos teores de cimento	95
5.5.2 Moldagens dos Corpos-de-Prova dos Compósitos Solo Cimento	98
5.6. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES	103
5.7. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE AGUA	106
5.8. DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA, VARIAÇÃO DA UMIDADE E VARIAÇÃO DE VOLUME PRODUZIDAS POR CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM DOS C.Ps DE SOLO-CIMENTO	106
5.9. ANÁLISE QUÍMICA DOS COMPÓSITOS	108
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	109
7. CONCLUSÕES	113
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	116

ÍNDICE DE TABELAS

PÁGINA

Tabela nº 1 - Resultados analíticos dos extratos lixiviados e solubilizados do RCD reciclado (Lote I)	59
Tabela nº 2 - Resultados analíticos do extrato digerido (massa bruta) do RCD reciclado (Lote I)	60
Tabela nº 3 - Massa Específica dos grãos e Massa Unitária no Estado Solto do RCD reciclado.	61
Tabela nº 4 - Absorção de água do RCD reciclado	61
Tabela nº 5 - Análise granulométrica do RCD Reciclado	62
Tabela nº 6 - Teor de materiais pulverulentos do RCD reciclado	62
Tabela nº 7 - Análise granulométrica combinada do RCD reciclado	63
Tabela nº 8 - Porcentagem das Frações do RCD reciclado	63
Tabela nº 9 - Massa específica dos grãos de 6 lotes do RCD reciclado	65
Tabela nº 10 - Análise granulométrica dos seis lotes de RCD reciclados	66
Tabela nº 11 - Frações granulométricas dos lotes de RCD reciclados	66
Tabela nº 12 - Limites de consistência dos seis lotes de RCD reciclados	67
Tabela nº 13 - Classificação dos seis lotes de RCD reciclados de acordo com a norma técnica D-3282. (ASTM,2004)	68
Tabela nº 14 - Absorção de água dos seis lotes de RCD reciclados	68
Tabela nº 15 - Resultados analíticos dos extratos lixiviados dos seis lotes de RCD reciclado	69
Tabela nº 16 - Resultados analíticos dos extratos solubilizados dos lotes de RCD reciclado	70
Tabela nº 17 - Resultados analíticos dos extratos digeridos (massa bruta) dos seis lotes do RCD reciclado	71
Tabela nº 18 - Massa específicas dos grãos do solo (M- 0%)	72
Tabela nº 19 - Análise Granulométrica combinada do solo (M - 0%)	73
Tabela nº 20 - Porcentagem das frações da mistura M-0%	73
Tabela nº 21 - Grau de floculação e de dispersão do solo (M-0%)	74
Tabela nº 22 - Limites de consistência do solo (M-0%)	74
Tabela nº 23 - Estudo de Compactação do Solo (M - 0%)	75
Tabela nº 24 - Massa específica dos grãos da mistura 25% (M-25%)	76
Tabela nº 25 - Análise granulométrica combinada da mistura 25% (M - 25%)	77
Tabela nº 26 - Porcentagem das frações da mistura M-25%	77
Tabela nº 27-Graus de floculação e dispersão da mistura 25% (M-25%)	78
Tabela nº 28 - Limites de consistência da mistura 25% (M-25%)	78
Tabela nº 29 - Estudo de Compactação da mistura 25% (M-25%)	79
Tabela nº 30 - Massa específica dos grãos da mistura 50% (M-50%)	80
Tabela nº 31 - Análise granulométrica combinada da mistura 50% (M-50%)	81
Tabela nº 32 - Porcentagem das frações da mistura M-50%	81
Tabela nº 33 - Graus de Floculação e Dispersão da mistura 50% (M-50%)	82
Tabela nº 34 - Limites de consistência da mistura 50% (M-50%)	82
Tabela nº 35 - Estudo de Compactação da mistura 50% (M-50%)	83
Tabela nº 36 - Massa específica dos grãos da mistura 75% (M-75%)	84
Tabela nº 37 - Análise granulométrica combinada da mistura 75% (M-	85

75%)	
Tabela nº 38 - Porcentagem das frações da mistura M-75%	85
Tabela nº 39 - Graus de Floculação e dispersão da mistura 75%	86
Tabela nº 40 - Limites de consistência da mistura 75% (M-75%)	86
Tabela nº 41 - Estudo de compactação da mistura 75% (M-75%)	87
Tabela nº 42 - Massa específica dos grãos do RCD reciclado (M-100%)	88
Tabela nº 43 - Análise granulométrica combinada do RCD reciclado (M-100%)	89
Tabela nº 44 - Porcentagem das frações da mistura M-100%	89
Tabela nº 45 - Graus de Floculação e dispersão do RCD reciclado (M 100%)	90
Tabela nº 46 - Limites de consistência do RCD reciclado (M 100%)	90
Tabela nº 47 - Estudo de compactação do RCD reciclado (M 100%)	91
Tabela nº 48 - Caracterização física das cinco misturas Resíduo/Solo	93
Tabela nº 49 - Classificação das misturas Resíduo/Solo e as especificações exigidas para os compósitos Solo - Cimento	94
Tabela nº 50 - Estudo de compactação do compósito CM- 75%	96
Tabela nº 51 - Estudo de compactação do compósito CM-100%	97
Tabela nº 52 - Moldagem de corpos de prova dos compósitos CM-75% e Resistência à compressão aos 7 dias para escolha do teor de cimento	99
Tabela nº 53 - Moldagem de corpos de prova dos compósitos CM-100% e Resistência à compressão aos 7 dias para escolha do teor de cimento	100
Tabela nº 54 - Moldagem de corpos de prova para ensaios do compósito CM -75% com 8% de teor de cimento em massa.	101
Tabela nº 55 - Moldagem de corpos de prova para ensaios do compósito CM -100% com 8% de teor de cimento em massa.	102
Tabela nº 56 - Ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura dos compósitos CM-75% e CM-100%	103
Tabela nº 57 - Ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura dos compósitos CM-75% e CM-100%	104
Tabela nº 58 - Ensaio de resistência à compressão simples aos 60 dias de cura dos compósitos CM-75% e CM-100%	104
Tabela nº 59 - Ensaio de resistência à compressão simples aos 90 dias de cura dos compósitos CM-75% e CM-100%	105
Tabela nº 60 - Ensaio de absorção d'água aos 7 dias de cura dos compósitos CM-75% e CM-100%	106
Tabela nº 61 - Determinação da perda de massa dos compósitos CM-75% e CM-100%	106
Tabela nº 62 - Resultados analíticos de nitrato dos compósitos CM-75% e CM-100%	108

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁGINA

Figura nº 1 - Esquematisação dos processos de aproveitamento de resíduos (Redução de matéria prima e eficiência energética).	07
Figura nº 2 - Composição do RCD reciclado na usina de reciclagem de Ribeirão Preto- SP.	19
Figura nº 3 - Composição do RCD gerado em novas construções (em volume) na cidade de Londrina-PR.	19
Figura nº 4 - Composição do RCD gerado em demolição (em volume) na cidade de Londrina-PR.	19
Figura nº 5 - Composição do entulho depositado no aterro de Itatinga, São Paulo)	20
Figura nº 6 - Composição do entulho gerado em Salvador - BA.	20
Figura nº 7 - Composição do RCD gerado em Blumenau - SC.	20
Figura nº 8 - Variabilidade do RCD de Santo André, 12 dias, Amostras Horárias.)	21
Figura nº 9 - Usina de reciclagem de Belo Horizonte	29
Figura nº 10 - Fluxograma dos resíduos em São Paulo.	29
Figura nº 11 - Curva granulométrica de agregado do RCD reciclado	62
Figura nº 12 - Curva granulométrica do RCD reciclado	63
Figura nº 13 - Curvas granulométricas dos seis lotes de RCD reciclados	67
Figura nº 14 - Curva granulométrica do solo (M-0%)	73
Figura nº 15 - Curva de compactação do solo (M-0%) Am - 1	75
Figura nº 16 - Curva de compactação do solo (M-0%) Am - 2	75
Figura nº 17 - Curva de compactação do solo (M-0%) Am - 3	75
Figura nº 18 - Curva de compactação do solo (M-0%) Am - 4	75
Figura nº 19 - Curva granulométrica da mistura 25% (M - 25%)	77
Figura nº 20 - Curva de compactação da M- 25% - Am-1	79
Figura nº 21 - Curva de compactação da M- 25% - Am-2	79
Figura nº 22 - Curva de compactação da M- 25% - Am-3	79
Figura nº 23 - Curva de compactação da M- 25% - Am-4	79
Figura nº 24 - Curva granulométrica da mistura 50% (M-50%	81
Figura nº 25 - Curva de compactação da M-50% -Am-1	83
Figura nº 26 - Curva de compactação da M-50% - Am-2	83
Figura nº 27 - Curva de compactação da M-50% - Am-3	83
Figura nº 28 - Curva de compactação da M-50% - Am-4	83
Figura nº 29 - Curva granulométrica da mistura 75% (M-75%)	85
Figura nº 30 - Curva de compactação da M-75% - Am-1	87
Figura nº 31 - Curva de compactação da M-75% - Am-2	87
Figura nº 32 - Curva de compactação da M-75% - Am-3	87
Figura nº 33 - Curva de compactação da M-75% - Am-4	87
Figura nº 34 - Curva granulométrica da mistura 100% (M-100%)	89
Figura nº 35 - Curva de compactação da M- 100% -Am-1	91
Figura nº 36 - Curva de compactação da M-100%- Am-2	91
Figura nº 37 - Curva de compactação da M-100%- Am-3	91
Figura nº 38 - Curva de compactação da M-100%- Am-4	91
Figura nº 39 - Curva de compactação do compósito CM-75% com 6% de teor em massa	96
Figura nº 40 - Curva de compactação do compósito CM-75% com 8% de teor em massa	96

Figura nº 41 - Curva de compactação do compósito CM-75% com 10% de teor em massa	96
Figura nº 42 - Curva de compactação do compósito CM-100% - com 7% de teor em massa	97
Figura nº 43 - Curva de compactação do compósito CM-100% com 9% de teor em massa	97
Figura nº 44 - Curva de compactação do compósito CM-100% com 11%de teor em massa	97
Figura nº 45 - Gráfico da resistência estatística x dias de cura	105
Figura nº 46 - Gráfico de variação volumétrica do compósito CM-75%	107
Figura nº 47 - Gráfico de variação volumétrica do compósito CM-100%	107

ÍNDICE DE FOTOS

PÁGINA

Foto nº 1 - Coleta de Amostra do Solo utilizado na pesquisa	44
Foto nº 2 - Quarteamento do RCD Reciclado miúdo do tipo misto e utilizado na pesquisa.	45
Foto nº 3 - Obtenção dos extratos lixiviados	46
Foto nº 4 - Obtenção dos extratos solubilizados	46
Foto nº 5 - Obtenção dos extratos digerido	47
Foto nº 6 - Determinação da Massa Específica pelo Método do Picnômetro	49
Foto nº 7 - Ensaio de Granulometria Combinada (sedimentação)	49
Foto nº 8 - Execução dos ensaios de Limites de Liquidez	51
Foto nº 9 - Execução dos ensaios de Limites de Plasticidade	51
Foto nº 10 - Execução dos ensaios de Limites de Contração	51
Foto nº 11 - Ensaio de compactação (Proctor)	51
Foto nº 12 - Absorção de água dos corpos de prova	55
Foto nº 13 - Ensaio de resistência à compressão	56
Foto nº 14 - Processo de escovação do ensaio de Durabilidade	56

ÍNDICE DE QUADROS

PÁGINA

Quadro nº 1 - Estimativa de geração de resíduos da construção civil em diferentes países.	12
Quadro nº 2 - Estimativa da quantidade do entulho produzido no país.	13
Quadro nº 3 - Índices de perdas (%) no processo construtivo.	14
Quadro nº 4 - Participação dos Resíduos de construção civil e demolição nos Resíduos sólidos urbanos e taxa de geração em localidades diversas	15
Quadro nº 5 - Composição dos resíduos de construção e/ou demolição (%) em diversas localidades.	17
Quadro nº 6 - Componentes do Entulho (%) em relação ao tipo de obra em que foi gerado.	18
Quadro nº 7 - Redução do impacto ambiental (%) da reciclagem de resíduos na produção em alguns materiais de construção civil, exceto transporte.	22
Quadro nº 8 - Produtos Obtidos a Partir do RCD e Utilização na pavimentação.	31
Quadro nº 9 - Especificações de agregados graúdos de RCD reciclados para concreto.	33
Quadro nº 10 - Classificação das misturas resíduo+ solo. conforme norma D 3282.	53

RESUMO

A geração de resíduos de construção civil constitui um grande problema ambiental. Em Piracicaba, SP, são geradas aproximadamente 620 toneladas/dia deste resíduo. O problema acarreta diversos prejuízos ambientais, tais como: disposição irregular dos resíduos agregando lixo e atraindo animais transmissores de doenças; entulhos em vias públicas e córregos afetando a drenagem e a estabilidade de encostas; degradação visual urbana; redução da vida útil de aterros e de recursos minerais não renováveis. O município busca atender às exigências da Resolução 307 do CONAMA, empreendendo ações para o reaproveitamento desses resíduos como agregado para pavimentação, fechamento de valas e confecção de artefatos de concreto. Há, entretanto, necessidade de sua utilização em maior escala, possibilitando que estes materiais passem a constituir alternativas economicamente viáveis. Assim, propõe-se sua utilização como agregado no compósito solo-cimento. Foram investigadas propriedades físicas, tecnológicas e químicas de misturas contendo resíduo de construção civil reciclado e solo em diferentes proporções resíduo/solo. Verificou-se que as misturas nas proporções de 50%, 75% e 100% atendem às especificações tecnológicas para emprego como solo-cimento. Quanto aos aspectos químicos, foram detectados alguns contaminantes em quantidade superior aos valores permitidos pela legislação. Todavia, a utilização do resíduo como agregado no solo-cimento se mostrou exequível e eficiente no encapsulamento destes contaminantes.

Palavras-chaves: Resíduos de Construção, Entulhos, Solo-Cimento, Encapsulamento de Resíduos, Agregado Alternativo

ABSTRACT

The generation of wastes of Civil Construction is a huge environment problem. In Piracicaba-SP, approximately 620 tons of these wastes are generated every day. This problem results in several environmental damages such as: irregular placing of wastes accumulating trash and attracting animals capable to transmit illness; rubble on public roads and streams affecting draining and stability on slopes; urban visual degradation; reduction of shelf-life of the levellings and non-renewable mineral sources. The town tries to attend to the requirements of the Resolution No. 307 of CONAMA, undertaking actions to re-use these wastes as aggregate for paving, closing of ditches and confection of artifact of concrete. There is, however, the necessity to use it in bigger scale, enabling these materials to become feasible economical alternatives. Therefore, it is proposed to use it as aggregate on the composite soil-cement. It has been researched its physical properties, technological and chemical of moistures containing recycled wastes of Civil Construction and soil in different proportions residue/soil. It was noticed that on the proportions 50%, 75% and 100% attend to the technological specifications for the use as soil-cement. As far as the chemical aspects are concerned, it was detected some contamination in higher quantity than the one allowed by legislation. However, the utilization of the residue as aggregate in the soil-cement showed to be feasible and efficient in the encapsulating process of these contaminated items.

Key - Words - Construction Wastes, Rubble, Soil-Cement, Ensapsulating Process, Alternative Aggregate.

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes dificuldades ambientais nos dias atuais, refere-se ao destino dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias, resíduos domésticos e, principalmente, resíduos gerados pela demolição e construção de obras civis.

Estes últimos representam problemas sérios para os municípios quando dispostos irregularmente, originando enchentes ocasionadas por assoreamento dos córregos, prejuízos à paisagem, obstrução dos logradouros públicos e proliferação de doenças, além de representar um custo significativo para o recolhimento destes resíduos dispostos ilegalmente (PINTO, 1999).

No Brasil, estima-se uma produção de 230 a 760 kg/hab.ano de resíduos de construção e demolição, baseado em estudo de geração deste resíduo em 10 cidades (PINTO, 1999).

Estudos da Prefeitura Municipal de Piracicaba em 2001 apresentaram uma produção de aproximadamente 620 t/dia de resíduo de construção e demolição que são dispostos em quatro áreas de bota-fora oficiais, dez áreas de bota fora não oficiais e mais de uma centena de locais de deposição irregular. As grandes áreas de descarte (bota-foras) e inúmeras deposições irregulares de entulho acabam degradando o ambiente e apresentam um aspecto visual pouco agradável a cidade. Baseando-se no exemplo de algumas cidades brasileiras a Prefeitura Municipal de Piracicaba, através do SEDEMA (Secretaria de Defesa do Meio Ambiente) e da EMDHAP (Empresa de Desenvolvimento Habitacional de Piracicaba), instituiu o projeto "Piracicaba sempre limpa" que trata da gestão sustentável do entulho objetivando o disciplinamento dos fluxos e da destinação do entulho, redução de custos públicos, institucionalização de agentes, reciclagem progressiva, perenização do sistema, geração de ocupação e renda, dar sustentação às ações de educação ambiental e dar apoio às ações sanitárias de controle de vetores epidêmicos. A implantação da gestão sustentável do entulho se dá de forma a facilitar o descarte correto através da oferta de vinte e uma áreas (pontos de entrega) para descarte voluntário de pequenos volumes de entulho, utensílios domésticos inutilizados e lixo seco reciclável; oferta de pequenos coletores cadastrados (disque coleta) e constituição de áreas privadas captadoras de grandes volumes (em torno de três áreas de transbordo e triagem e áreas de reciclagem). A gestão sustentável do entulho busca também disciplinar os envolvidos nos processos de geração e fluxos deste resíduo obrigando um plano de destinação de resíduos para obras privadas de maior custo; utilizando o poder de compra municipal para exigência

de plano de destinação dos resíduos de construção por partes dos executores de obras públicas; obrigando o uso apenas de coletores cadastrados e criando os aterros de resíduos da construção civil substituindo os atuais bota-foras. Além disso, a gestão sustentável do entulho incentiva a redução e reciclagem dos resíduos de demolição e construção reativando a recicladora de entulhos da EMDHAP possibilitando o uso imediato desses resíduos reciclados em obras públicas, elaborando um projeto de lei para obrigatoriedade do uso de reciclados em serviços públicos e dando o suporte tecnológico às iniciativas de reciclagem.

A reciclagem realizada atualmente nas dependências da EMDHAP ainda é pequena, pois o equipamento reciclador existente pode produzir no máximo 170 t/dia, mas que na prática dificilmente supera 110 t/dia. O material reciclado é proveniente de uma triagem realizada por populares cadastrados que separam os entulhos dos demais resíduos (metálicos, papéis, plásticos, madeiras etc.), sendo estes em sua grande maioria comercializados facilmente. Os entulhos são então separados de acordo com seus principais componentes, um rico em cimento, basicamente oriundo de concreteiras, e um outro rico em material cerâmico e argamassa misturados com solo e outros agregados. Os dois tipos de entulhos são reciclados separadamente sendo que os ricos em cimento são utilizados para confecção de blocos de concreto e pisos intertravados e os mistos são utilizados principalmente para operações de aterragens compactadas (fechamento de valas, por exemplo).

Foram realizadas experiências na SEMOB (Secretaria Municipal de Obras de Piracicaba) com os entulhos reciclados na utilização deste resíduo como componente de pisos viários e os resultados apresentados foram considerados satisfatórios.

O compósito é um material formado por uma mistura de combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes, que diferem na forma e na composição química, e que na sua essência, são insolúveis entre si (SMITH,1998). Os compósitos, segundo CALLISTER,2002 podem ser classificados em compósitos reforçados com fibras, compósitos reforçados com partículas e compósitos estruturais. Assim no ramo da construção civil o compósito mais utilizado é o concreto com cimento portland e classificado como compósito com partículas, pois consiste em um agregado de partículas ligadas entre si por meio de cimentação, onde o agregado é constituído por areia e brita, sendo que a cimentação se desenvolve pelo resultado das reações químicas entre o cimento e a água. O solo-cimento em uma analogia com o concreto nas devidas proporções e resguardado as diferenças, pode ser classificado como

compósito reforçado com partículas, onde a brita e a areia dá lugar ao solo e com uma quantidade bem menor de cimento portland.

O compósito solo-cimento é um produto bastante utilizado e consagrado em muitas obras e são vários os usos recomendados através da estabilização com o cimento entre os quais podem ser citados: base ou sub-base de pavimentos em estradas, vias urbanas, pátios industriais, estacionamentos e aeroportos; tijolos, blocos e painéis para construção de moradias; revestimento de barragens, canais, diques e reservatórios; revestimento e impermeabilização de túneis; estabilização de encostas e taludes; reconstituição da fundação e alçamento de placas de concreto além da melhoria de suporte em fundações fracas de pavimentos (PITTA,1980).

Em função das considerações acima é que se propõe esse estudo de viabilidade para aplicação do resíduo de construção e demolição reciclado como agregado no compósito solo-cimento. Desta forma, o estudo acaba por antecipar uma tendência de agregar valor ao resíduo em questão além de que as restrições legais ligadas à exploração de bens minerais na construção civil, quanto aos aspectos ambientais, são cada vez mais severas.

Justifica-se o presente trabalho em função da ausência de um estudo dos resíduos de construção e demolição na região de Piracicaba concernente a sua aplicabilidade como agregado no compósito solo-cimento. Também pode se justificar este trabalho pelo fato de o crescimento populacional e a conseqüente expansão urbana de Piracicaba reduzir drasticamente as áreas de empréstimo próximas da cidade para obtenção de solos que apresentam propriedades adequadas para utilização no compósito solo-cimento ou mesmo para utilização como sub-base ou tratamento primário de logradouros viários ou tapas buracos com compactação.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é o estudo de viabilidade de aplicação dos resíduos de construção e demolição reciclados como agregado no compósito solo-cimento, buscando uma utilização em maior escala deste resíduo reciclado.

Como objetivos específicos, pretende-se verificar a viabilidade tecnológica do uso do resíduo de construção e demolição (RCD) reciclado como agregado no compósito solo-cimento de acordo com normas técnicas e avaliar o comportamento desta aplicação sob o ponto de vista ambiental. Torna-se evidente que a aplicação de um resíduo como agregado na construção civil deve ser precedido de um estudo tecnológico e uma análise de possíveis riscos ambientais que essa aplicação possa oferecer, tais como contaminação do ambiente de uma edificação ou contaminação do solo e/ou lençol freático.

Este estudo pretende fornecer subsídios para uma apreciação pelo órgão de controle ambiental para efetivação da utilização mais adequada dos resíduos gerados pela construção civil nos canteiros de obras e em demolições.

O presente trabalho, ressalte-se, apesar de algumas considerações econômicas, não tem como objetivo uma avaliação de custo benefício para casos específicos, mas sim contribuir com subsídios para futuros estudos, tais como projetos pilotos de industrialização de componentes de solo-cimento e pavimentações experimentais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. RESÍDUOS

Segundo a norma técnica NBR nº 10004, Classificação de Resíduos Sólidos da (ABNT, 1987), os resíduos nos estados sólidos e semi - sólidos, são os que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição além de certos efluentes com características inviáveis para lançamento na rede pública ou outros corpos de água. Tais resíduos são divididos em 03 classes:

- Classe I ou perigosos: são aqueles que, isoladamente ou por mistura, em função de suas características de toxicidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, radioatividade e patogenicidade em geral, podem apresentar riscos à saúde pública (com aumento de mortalidade ou de morbidade) ou efeitos adversos ao meio ambiente, se manuseados ou dispostos sem os devidos cuidados.

- Classe II ou não inertes: são aqueles que não se enquadram na classe I ou na classe III.

- Classe III ou inertes: são aqueles que não se solubilizam ou que não tem nenhum de seus componentes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, quando submetidos a um teste padrão de solubilização conforme NBR 10006 - "Solubilização de resíduos" (ABNT, 1987).

Os resíduos podem também ser classificados de acordo com sua origem. Assim o resíduo pós-consumo são aqueles resultantes do consumo de um bem, gerados de forma difusa no ambiente construído e normalmente confundido com o resíduo sólido municipal. O tratamento desses resíduos dependem do sistema de coleta, que pode ser dispendioso. Portanto, a reciclagem de resíduo pós-consumo é viável quando o valor agregado ao produto é elevado, daí o sucesso da reciclagem das latas de alumínio e pouco sucesso da reciclagem das embalagens Tetrapack. Por outro lado os resíduos industriais são aqueles gerados de forma concentrada, facilitando sua recuperação (JOHN, 2000).

Resíduo perigoso pode ser definido simplesmente como sendo uma substância perigosa, descartada, abandonada, negligenciada, despejada ou designada como um material residual, ou uma forte interação com outras substâncias para se tornar perigosa. O resíduo perigoso poderia também ser definido de forma simples como sendo o material abandonado onde não deveria estar e que pode causar prejuízos aos

seres vivos do local e seus arredores. Três abordagens básicas são necessárias para definição dos resíduos perigosos: a)- descrição qualitativa da origem, tipo e constituintes; b)- classificação das principais características baseadas nos processos testados e c)- concentração de substâncias específicas perigosas. A eficácia de uma gestão de resíduo é avaliada pela redução da quantidade e do perigo dos resíduos (MANAHAN, 2001). Na tentativa de administrar os resíduos sólidos deve-se observar os seguintes procedimentos em relação a eles:

- a) não produzi-los;
- b) se produzi-los, produzir o mínimo;
- c) reciclá-los;
- d) se produzi-los de forma não reciclável, tratá-los, preferencialmente tornando-os não perigosos;
- e) se não for possível torná-los não perigosos, dispô-los de maneira segura; e
- f) uma vez dispostos, monitorá-los, para prevenir efeitos adversos.

A forma hierárquica na gestão de resíduos acima citada nem sempre pode ser obedecida, pois haverá casos em que a reciclagem vai requerer um volume mínimo de resíduo disponível em determinada região e uma concentração mínima da fase a ser reciclada no resíduo total. Assim pode ser desejável um incremento na geração de resíduos ou da concentração da fase a ser reciclada para que a reciclagem seja considerada economicamente viável e assim evitando a deposição do resíduo em aterro (ALLEN & ROSSELOT, 1994).

3.2. RECICLAGEM

Alguns conceitos de aproveitamento de resíduos são importantes para entender melhor a reciclagem. A figura 1 esquematiza os processos de aproveitamento de resíduos.

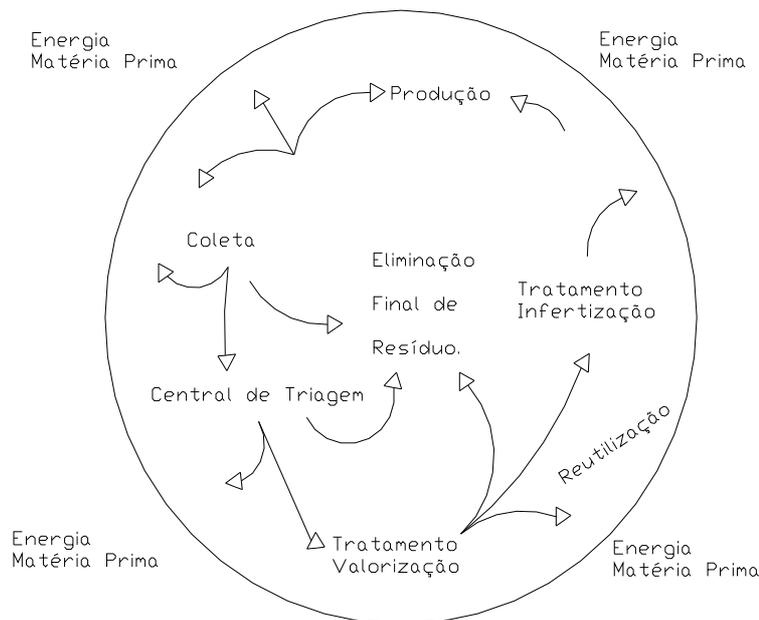


Fig. 1 - Esquemática dos processos de aproveitamento de resíduos (Redução de matéria prima e eficiência energética). Fonte ROCHA, JL; CHERIAF, M. (2004).

Dentro desses processos, alguns conceitos são considerados:

- a) Recuperação pode ser definida como a retirada do resíduo de seu circuito tradicional de coleta e tratamento (ex. recuperação de PET, papéis, dos sistemas tradicionais de coleta, ou ainda de lodos de tratamento de efluentes destinados à eliminação em aterros controlados).
- b) Valorização é quando se pretende dar um valor comercial a um determinado resíduo (ex. vidros para produção de silicatos e vitrocerâmicos).
- c) Reciclagem é o ato de introduzir o resíduo no seu ciclo de produção em substituição total ou parcial de uma matéria prima.

A vida útil de um produto é sempre limitada, após a qual o produto se transforma em resíduo. Mesmo os produtos duráveis têm vida útil finita, pois as atividades de manutenção normalmente incorporam grandes quantidades de energia nos materiais e pela 2ª lei da Termodinâmica, todo processo de transformação de energia dá-se a partir de uma forma mais nobre para uma menos nobre ou de menor qualidade. Assim, os produtos por mais duráveis que sejam, em algum momento vão se transformar em pós-consumo. Certos produtos não se enquadram de acordo com o especificado e acabam se tornando resíduos. Com isso, a reciclagem é condição para o desenvolvimento sustentável, pois é ela que permite fechar o ciclo (JOHN, 2000).

Sem dúvida, a reciclagem de resíduo apresenta vantagens potenciais sob o ponto de vista da sustentabilidade, contudo a reciclagem de um resíduo só é válida após a análise do ciclo de vida. Também é necessário que o novo material a partir do resíduo não venha a contaminar, nem internamente e nem externamente, as construções que usam tais resíduos, seja pela contaminação da água, radiação ou volatilização de frações orgânicas (VAN DER ZWAN, 1991).

JOHN (2000) salienta que os dois setores que melhor vêm desenvolvendo programas de reciclagens são a indústria cimenteira que recicla mais de cinco milhões de toneladas por ano de escória de alto forno, cinzas volantes, pneus etc. e o setor siderúrgico que recicla pelo menos 6 milhões de toneladas de sucata, evitando a geração de 2,3 milhões de toneladas de resíduos e de cerca de 11 milhões de toneladas de CO₂. Boa parte do aço utilizado no concreto armado produzido no Brasil é proveniente do arco elétrico, que utiliza como matéria prima principal a sucata de aço.

3.3. APLICAÇÃO DE ALGUNS RESÍDUOS COMO AGREGADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Nos últimos anos, o avanço nas pesquisas sobre aplicação de resíduos sólidos de diversas origens, como agregado na construção civil vem ganhando impulso e alguns exemplos são apresentados a seguir.

AGOPYAN et al (1990) desenvolveram um compósito com argamassa de aglomerantes alternativos (escória granulada de alto forno e cinza de casca de arroz) e fibras de coco. Ensaios demonstraram que um aumento de fibras eleva a resistência ao impacto e o teor de ar incorporado e reduz levemente a resistência à tração na flexão e compressão, contudo a forma de ruptura passa de frágil a dúctil, precedida de fissuração generalizada. Os resultados apontam para a possibilidade de construção de painéis com materiais reforçados com fibras vegetais.

NOLASCO (1993,a), avaliou a possibilidade de utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil. Os resultados de suas análises permitiram a conclusão da viabilidade de utilização do resíduo em sua forma "in natura" como agregado em várias situações: enchimento de blocos vazados cerâmicos e de concreto melhorando as características termo-acústicas destes componentes; utilização em lajes com a finalidade de caixão perdido, por se tratar de um agregado leve; base sobre lajes e sob contrapiso, na forma compactada, com função de absorver o ruído e impacto gerado por pisadas ressoadas no piso superior,

em edificações de múltiplos pavimentos etc. Já na forma de compósito resíduo + cimento, o comportamento plástico resultante da presença de fibras, as tensões máximas observadas, o desempenho termo-acústico e as propriedades em relação à perda de massa e propagação superficial de chama, sugerem algumas possibilidades de aplicação tais como forro, divisórias etc.

Pesquisa realizada pelo Depto. de Ciências Florestais e pelo IPEF - Instituto de Pesquisas Florestais da ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da USP em Piracicaba, aponta a utilização de resíduos da fabricação de papel na produção de blocos cerâmicos com melhor acabamento e maior resistência ao impacto. O processo de fabricação destes blocos com o resíduo é o mesmo utilizado na fabricação de blocos convencionais. Além dos bons resultados tecnológicos destes blocos a utilização de tais resíduos resolve o problema de disposição, reduzindo os custos e riscos ambientais para as indústrias de papel. A utilização deste resíduo permite também a redução do tempo de queima e assim reduzindo também o consumo de energia (NOLASCO, 1993,b).

CHAMIE (1994) analisou o encapsulamento de resíduos galvânicos em matriz cimentícia e demonstrou a eficiência deste processo e que permitiu a reclassificação destes resíduos de classe I para classe II segundo a NBR 10004 – ABNT. Para utilização adequada como argamassa, entretanto, este encapsulamento não foi tão eficiente pois apresentou no melhor dos traços uma queda de resistência ao longo do tempo.

PABLOS (1995) demonstrou a possibilidade de se confeccionar tijolos e blocos vazados através da utilização do resíduo sólido gerado pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila. Este material foi misturado com cimento com umidade suficiente e adequada para prensagem manual. Sob o aspecto químico, o processo de encapsulamento permitiu uma estabilização do resíduo. Em relação as propriedades físicas e mecânicas, os produtos obtidos apresentavam resultados razoavelmente satisfatórios, porém o autor recomendou outros estudos para analisar o comportamento destes produtos ao longo do tempo, devido a presença de certas substâncias químicas presentes no resíduo.

SAVASTANO Jr et al (1997), analisaram a viabilidade de aproveitamento de vários resíduos e sub-produtos da extração e processamento de fibras vegetais para uso como reforço de matrizes cimentícias para a construção civil. Entre os resíduos com potencial de aproveitamento, em função de suas propriedades de preços mais competitivos e de volume disponível, destacam-se os resíduos do sisal, do coco e rejeito

de celulose de eucalipto, além de resíduos do algodão. Estes resíduos prestam-se ao reforço de pastas cimentícias.

CHERIAF et al(2000) estudaram a aplicação de lodo da indústria têxtil e cinza pesada de termoelétrica, através da solidificação com cimento Portland. O processo além da estabilização química apresentou desempenho interessante destes resíduos na construção civil, além das cinzas pesadas geradas nas termoelétricas poderem ser utilizadas como elemento de solidificação do lodo têxtil.

Experiência interessante foi a apresentada por ARTHUR (2001), quando analisou a utilização de resíduo sólido gerado pelo descarte das areias de fundição fenólicas como componente do compósito solo- cimento. Os resultados físicos – mecânicos foram muito bons assim como a estabilização química da maioria das substâncias químicas. Exceção foi o fenol que, apesar de uma enorme diminuição do solubilizado, ainda não pode enquadrar-se na quantidade mínima exigida pela legislação.

BATTISTELLE (2002) estudou a viabilidade técnica do emprego de resíduo gerado na indústria de celulose e papel em tijolos de adobe. Trata-se de um produto de baixo custo e de simples produção artesanal de reduzido custo e baixo consumo energético. Os resultados comprovaram a viabilidade técnica da utilização deste e abrir novas perspectivas para a construção de habitações populares, além da busca de uma opção mais adequada para o resíduo do que sua simples deposição, reduzindo assim um impacto ambiental.

A utilização de escória de aciaria em concreto foi estudada por MASUERO et al (2000) quando observou que a adição de 20% desse resíduo torna o concreto com qualidade superior ao concreto convencional. No ensaio de resistência a compressão, o ganho de resistência foi em torno de 30%. A adição deste resíduo permitiu também uma economia de até 11 Kg de cimento por m³. A escória antes de ser utilizada deve passar por uma caracterização e verificar sua estabilidade através de alguns ensaios.

A utilização de escórias de alumínio na produção de concretos celulares alto clavados ou moldados em bloco (tijolos de concreto, painéis pré-moldado, contra piso e outros tipos de revestimento) foi pesquisada por ARAÚJO (2002). A escória atua como agente expensor que incorpora porosidade à massa. O emprego de concreto celular possibilita uma redução do corpo estrutural do edifício como vigas, colunas e pilares, e que também contribui para a diminuição no preço final da obra. A grande vantagem desta utilização de escórias de alumínio é a que possibilita uma redução acentuada dos custos de confecção dessas peças, seja pela substituição dos produtos convencionais

de alto custo, seja pela redução de quantidade de matéria prima (até 30% de redução de areia, cimento e cal).

3.4. CONSUMO DE MATÉRIAS PRIMAS NÃO RENOVÁVEIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O consumo de materiais naturais na construção civil cresce na mesma medida do crescimento populacional e da economia. Alguns dados à respeito foram apresentados por JOHN (2000):

a) O Japão estima o seu consumo de materiais em 2,6 bilhões de toneladas em 1995 (KASAI, 1998) ou 18,7 t/hab.ano;

b) Os Estados Unidos da América atingiram um consumo de 2,8 bilhões de toneladas de materiais em 1995 ou 10 t/hab.ano (MATOS & WAGNER, 1999);

c) No mundo o consumo em 1995 de materiais foi de 9,5 bilhões de toneladas, um pouco mais de 1,6 t/hab.ano (MATOS & WAGNER, 1999);

d) Para atender a esta oferta de materiais é necessário uma extração enorme de matérias primas naturais a tal ponto que se estima que países industrializados como Alemanha, Japão e Estados Unidos consomem entre 45 e 85 t/hab.ano de matérias primas naturais, sem incluir água e o ar.

e) No Brasil, baseado na produção de cimento portland, algo em torno 35 milhões de t/ano, estima-se um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados somente na produção de concretos e argamassas (traço médio de 1:6). A este valor deve-se acrescentar o volume de agregados utilizados em pavimentação e perdas.

3.5. GERAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil gera resíduos na produção de materiais e componentes, nas atividades de canteiros de obra, durante a manutenção, modernização e finalmente na demolição (JOHN, 1996).

Estima-se que 50% dos resíduos de construção e demolição nas grandes cidades brasileiras sejam gerados nos canteiros de obras e outros 50% são gerados pelas atividades de demolição e manutenção de obras (PINTO, 1999).

JOHN (2000) apresenta estimativas da geração de resíduos de construção civil em diferentes países e podem ser observados no quadro 1. As diferenças observadas

refletem a importância relativa das atividades de construção, manutenção e demolição em cada economia e também de taxa de perda de materiais na construção.

Quadro.1 - Estimativa de geração de resíduos da construção civil em diferentes países (JOHN, 2000).

PAÍS	Qant. anual		FONTE	OBS
	Mt/Ano	kg/Hab		
Suécia	1,2-6	136-680	EU(1999)	??,1996
Holanda	12,8-20,2	820-1300	Lauritzen(1998);Eu(1999)	
EUA	136-171	463-584	EPA(1998)	1996
Reino Unido	50-70	880-1120	Lauritzen(1998)	1995, 1996
Bélgica	7,5-34,7	735-3359	Lauritzen(1998),EU(1999)	
Dinamarca	2,3-10,7	440-2010	Lauritzen(1998),EU(1999)	
Itália	35-40	600-690	Lauritzen(1998),EU(1999)	
Alemanha	79-300	963-3658	Lauritzen(1998),EU(1999)	?;1994-1996
Japão	99	785	Kasai (1998)	1995
Portugal	3,2	325	EU (1999)	Exclui solos
Brasil	na	230-760	Pinto (1999)	Algumas cidades apenas

Outros dados estimativos sobre geração de resíduos na construção civil e demolição foram citados pelo mesmo autor:

a) o volume de resíduos de construção e demolição gerados nas cidades é igual ou superior aos resíduos sólidos municipais (EU, 1999);

b) na Europa, a estimativa média de geração de entulho varia de 600-918 kg/hab.ano, superior a estimativa de 390 kg/hab.ano de resíduo sólido municipal (LAURITZEN,1998).

c) no Brasil, os dados disponíveis ainda são insipientes, mas em estudos realizados em 10 cidades, a geração de RCD variou de 230 à 760 kg/hab.ano o que representa de 41% a 70% do resíduo sólido municipal (PINTO,1999);

d) exceção parece ocorrer nos EUA, onde a geração estimada de entulho é inferior à do resíduo municipal, ou seja, 463 kg/hab.ano de RCD (EPA,1998) contra 720 kg/hab.ano de resíduo municipal (EPA,1996). Esta disparidade é atribuída a uma menor geração de resíduos nas atividades de construção, ou mesmo ao menor peso da construção na economia norte americana (HENDRICKSON; HARVOATH, 2000).

A estimativa de quantidade do entulho produzido em algumas cidades brasileiras podem ser observadas pelo Quadro 2.

Quadro.2 - Estimativa da quantidade do entulho produzido no país.

Local Gerador	Geração estimada (t/dia)
São Paulo (1)	12400
Rio de Janeiro (1)	900
Brasília (1)	2833
Belo Horizonte (1)	3400
Porto Alegre (1)	1933
Salvador (4)	1453
Recife (1)	600
Curitiba (1)	2467
Fortaleza (1)	1667
Florianópolis (4)	636
Campinas (2)	1800
Jundiaí (2)	712
Ribeirão Preto (2)	1043
S. J. dos Campos (2)	733
S. J. do Rio Preto (2)	687
Santo André (2)	1013
Vitória da Conquista (2)	310
Uberlândia (3)	958
Guarulhos (3)	1308
Diadema (3)	458
Piracicaba (3)	620
FONTES: (1) ZORDAN (2003) (2) PINTO (1999); (3) PIRACICABA (2001) (4) XAVIER e ROCHA (2001)	

Durante o processo construtivo, o alto índice de perdas do setor é a principal causa do entulho gerado, embora nem toda perda se transforme efetivamente em resíduo, pois uma parte fica na própria obra, mas mesmo assim o entulho gerado corresponde em média a 50% do total desperdiçado (ZORDAN, 2003).

A perda de materiais em processos construtivos convencionais, conforme pesquisa nacional em doze estados e pesquisas anteriores foi verificada por PINTO (1999) e apresentados no quadro 3.

Quadro. 3 – Índices de perdas (%) no processo construtivo (Segundo PINTO, 1999)

MATERIAIS	PINTO (1)	SOIBELMAN (2)	FINEP/ITQC (3)
Concreto Usinado	1,5	13	9
Aço	26	19	11
Blocos e Tijolos	13	52	13
Cimento	33	83	56
Cal	102	-	36
Areia	39	44	44

FONTES:
(1) Valores de uma obra (PINTO, 1989)
(2) Média de 5 obras (SOILBELMAN, 1993)
(3) Mediana de diversos canteiros (SOUZA et al., 1998)

Nas obras de reformas, a falta de uma cultura de reutilização e reciclagem são as principais causas do entulho gerado pelas demolições do processo. Já nas obras de demolição, a quantidade gerada de resíduo não depende dos processos empregados ou da quantidade do setor, pois se trata do produto do processo, e essa origem sempre existirá (ZORDAN, 2003).

PINTO (1999) apresenta um modelo de estimativa de geração de resíduos de construção e demolição na área urbana baseado em três critérios de informações:

a) estimativa de área construída, baseada nos registros municipais de construção: baseia-se na massa estimada para as edificações, ou seja, 1200 Kg/m²; perda média de materiais nos processos construtivos de 25%; porcentual de perda de materiais removido como entulho de 50%, possibilitando assim estimar a taxa de geração de resíduos de construção na ordem de 150 kg/m² de construção (PINTO, 1989; PICCHI, 1993);

b) estimativa da geração de RCD a partir de ação dos coletores: baseada nas informações dos coletores; origem dos resíduos e

c) coleta pela administração pública: baseada no monitoramento de descargas nas áreas utilizadas como destino do RCD.

O mesmo autor conclui que a significativa geração de RCD em relação aos resíduos sólidos urbanos torna patente a insuficiência de caracterização destes últimos como vem sendo efetivada por órgãos públicos e agências ambientais nos últimos anos. Assim, verificou-se a participação do RCD nos resíduos sólidos urbanos (RSU) em algumas cidades (quadro 4).

Quadro 4 - Participação dos Resíduos de construção civil e demolição nos Resíduos sólidos urbanos e taxa de geração em localidades diversas (Segundo PINTO, 1999 e PIRACICABA, 2001)

Localidades	Participação dos RCD na Massa Total de RSU	Taxa de Geração (t/habitante/ano)
Piracicaba (2)	67%	0,59
Santo André - SP (1)	54%	0,51
São José do Rio Preto - SP (1)	58%	0,66
São José dos Campos - SP (1)	67%	0,47
Ribeirão Preto - SP (1)	70%	0,71
Jundiaí - SP (1)	62%	0,76
Vitória da Conquista - BA (1)	61%	0,40
Belo Horizonte - MG (1)	54%	0,34
Campinas - SP (1)	64%	0,62
Salvador - BA (1)	41%	0,23
Europa Ocidental (1)	~ 66%	0,7 a 1,0
Suíça (1)	~ 45%	~ 0,45
Alemanha (1)	> 60%	--
Região Bruxelas - Bélgica (1)	> 66%	--
EUA (1)	39%	--
Vermont State (E.U.A.) (1)	48%	--
Japão (1)	--	~ 0,68
Hong Kong (1)	--	~ 1,50
<p>FONTES: (1) PINTO, 1999. (2) PIRACICABA, 2001.</p>		

3.6 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

3.6.1. Aspectos Gerais

Os resíduos da construção civil são aqueles gerados em construções, reformas, reparos e demolições de obras civis de estruturas edificadas, estradas e

outras obras de infra-estrutura, além daqueles resultantes da preparação do terreno, tais como limpeza e escavação do solo.

O RCD se apresenta na forma sólida, com características físicas variadas, podendo apresentar - se tanto em dimensões e geometrias já conhecidas dos materiais de construção como a da areia e a da brita, como em formatos e dimensões irregulares como pedaços de madeira, argamassas, concretos, plásticos, metais etc (ZORDAN, 2003).

O agregado reciclado miúdo é um material predominantemente arenoso, com partículas finas não plásticas e uma das diferenças marcantes entre o agregado reciclado e o agregado convencional é a alta absorção de água do primeiro (CARNEIRO et al, 2000). As causas das mudanças de cor na fração miúda estão relacionadas a terra presente (ZORDAN,1997).

A maioria dos resíduos de construção são inertes. No entanto pode acontecer que a matéria prima utilizada altere a classificação de certos concretos produzidos com escórias de alto teor de metais pesados e quando reciclados podem gerar agregados prejudiciais ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores e usuários (CARNEIRO et al, 2000).

3.6.2. Composição

Os seguintes componentes podem ser considerados como parte dos resíduos de construção: blocos cerâmicos, tijolos, outros materiais de alvenaria, materiais cerâmicos de revestimento, argamassas a base de cimento e cal, concretos armados ou não, solos, resíduos de vegetação, rochas, madeiras e compensados, forros, gessos, telhas, pavimentos asfálticos, encanamentos, tubulações sanitárias, vidros, plásticos, papel, papelão e outras embalagens, metais, fiações elétricas, resinas, colas, tintas entre outros e em proporção que podem variar de acordo com o tipo de obra em que é originado, dos aspectos sócio-econômicos de cada região e dos processos construtivos adotados.

Embora há escassez de estatísticas no Brasil, em média, o entulho que sai dos canteiros de obras brasileiras é composto basicamente por 64% de argamassa, 30% de componentes de vedação como tijolos e blocos e 6% de outros materiais como concreto, rocha, areia, metálicos e plásticos (CORCUERA CAVALCANTI, 2003).

A composição dos resíduos de construção e/ou demolição em diversas localidades foram apresentadas por PINTO (1999) no quadro 5.

Quadro 5 - Composição dos resíduos de construção e/ou demolição (%) em diversas localidades (Segundo PINTO,1999)

Composição Percentual (discriminação conforme as fontes)	Composição dos RCD em obras brasileiras típicas	Composição Típica dos RCD em Hong Kong	Composição Típica dos RCD na Bélgica	Composição Típica dos RCD em Toronto
Argamassas	64,0	--	--	--
Asfalto	--	2,2	--	--
Materiais asfáltico	--	--	10,2	--
Concreto	4,2	31,2	38,2	--
Alvenaria	--	--	45,2	--
Madeira	0,1	7,9	2,1	34,8
Entulho, agreg. e cerâmicos	--	--	--	24,1
Entulho	--	7,7	--	--
Componentes cerâmicos	11,1	--	2,9	--
Blocos de concreto	0,1	0,8	--	--
Tijolos	18,0	5,2	--	--
Ladrilhos de concreto	0,4	--	--	--
Pedra	1,4	11,5	--	--
Areia	--	3,2	--	--
Cimento amianto	0,4	--	--	--
Gesso	--	--	0,2	--
Metais	--	3,3	0,2	7,7
Vidro	--	0,3	--	2,8
Papel cartão	--	--	--	4,3
Papel	--	--	--	3,5
Papel e orgânicos	0,2	--	--	--
Outros orgânicos	--	1,7	--	0,6
Plástico	--	--	0,4	2,5
Tubos plásticos	--	0,6	--	--
Acessórios	--	0,1	--	--
Têxteis	--	--	--	0,7
Borracha e couro	--	--	--	0,5
Finos	--	--	--	1,9
Outros mat. de construção	--	--	--	16,6
Solo	0,1	--	--	--
Lixo, solo e barro	--	23,8	--	--
Bambu e árvores	--	0,4	--	--
Sucata	--	0,1	--	--
Outros	--	--	0,6	--
TOTAL	100	100	100	100

O RCD apresenta em sua composição vários materiais que, isoladamente, são reconhecidos pela NBR 10004 - "Resíduos sólidos" - classificação (ABNT, 1987) como inertes (rochas, tijolos, vidros, alguns plásticos etc). Contudo não estão disponíveis até o momento, análises sobre a solubilidade do resíduo como um todo, de forma a garantir que não haja concentrações superiores às especificadas na forma referida acima, o que o enquadraria como "Resíduo de classe II – não inerte" (ZORDAN,2003). Devido a sua composição variada, os resíduos de construção e demolição, podem conter substâncias perigosas, como tintas, óleos, baterias, orgânicos incorporados em madeiras tratadas, tendo sido encontrado nos lixiviados dos aterros quantidades de substâncias tóxicas acima dos limites (EPA,1995).

OLIVEIRA et al (2001) constataram através de análises químicas e difratométricas, que o resíduo de concreto não pode ser considerado um material inerte, além do que, o material descartado em locais inadequados pode provocar a contaminação de águas e conseqüentemente a sua mineralização. Os resultados obtidos sugerem a reclassificação do resíduo de concreto de classe III – resíduos inertes, para a classe II – resíduos não inertes de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 1987).

Os componentes do RCD gerado em relação ao tipo de obra podem ser observadas pelo quadro 6.

Quadro 6 - Componentes do Entulho (%) em relação ao tipo de obra em que foi gerado (CARNEIRO et al, 2001),

Componentes Presentes(%)	Trabalhos Rodoviários	Escavações	Sobras de Demolição	Obras Diversas	Sobras de Limpeza
Concreto	48,0	6,1	54,3	17,5	18,4
Tijolos	-	0,3	6,3	12,0	5,0
Areia	4,6	9,6	1,4	3,3	1,7
Solo,Poeira,Lama	16,8	48,9	11,9	16,1	30,5
Rocha	7,0	32,5	11,4	23,1	23,9
Asfalto	23,5	-	1,6	-	0,1
Metais	-	0,5	3,4	6,1	4,4
Madeiras de Construção	0,1	1,1	7,2	18,3	10,5
Papel e Matéria Orgânica	-	1,0	1,6	2,7	3,5
Outros	-	-	0,9	0,9	2,0

Pelos trabalhos realizados por alguns autores, de 1997 à 2003, observa-se que não há um padrão para descrição da composição do RCD, mesmo assim é fácil notar que a maior parte do resíduo gerado possui potencial para reciclagem.

A composição dos entulhos de algumas localidades brasileiras podem ser observadas nas figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

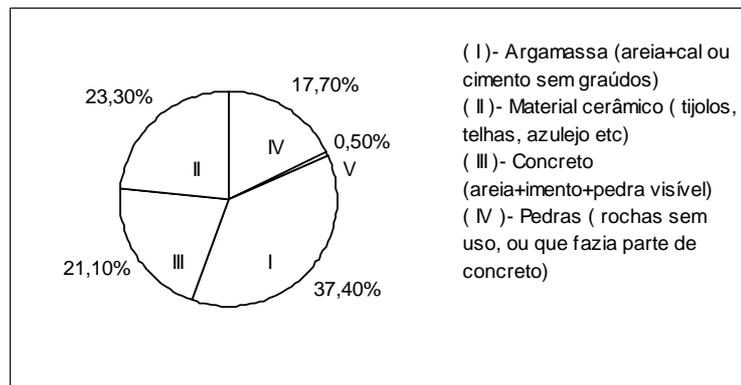


Fig. 2 - Composição do RCD reciclado na usina de reciclagem de Ribeirão Preto - SP.

Fonte: ZORDAN (1997).

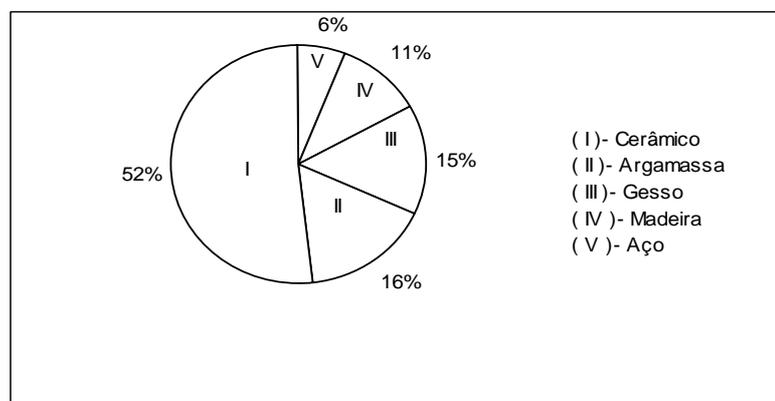


Fig.3 - Composição do RCD gerado em novas construções (volume) na cidade de Londrina-PR

Fonte: ANGULO (1998).

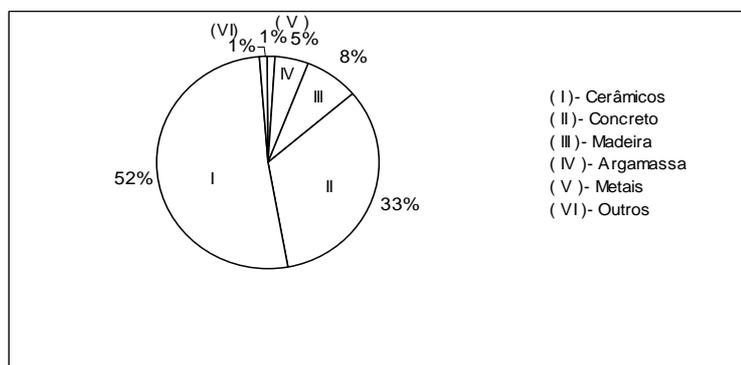


Fig. 4 - Composição do RCD gerado em demolição (em volume) na cidade de Londrina - PR.

Fonte: ANGULO (1998).

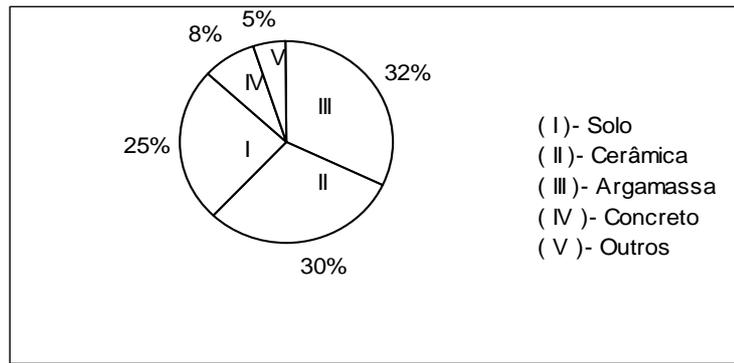


Fig. 5 - Composição do entulho depositado no aterro de Itatinga, São Paulo.
Fonte: BRITO FILHO (1999).

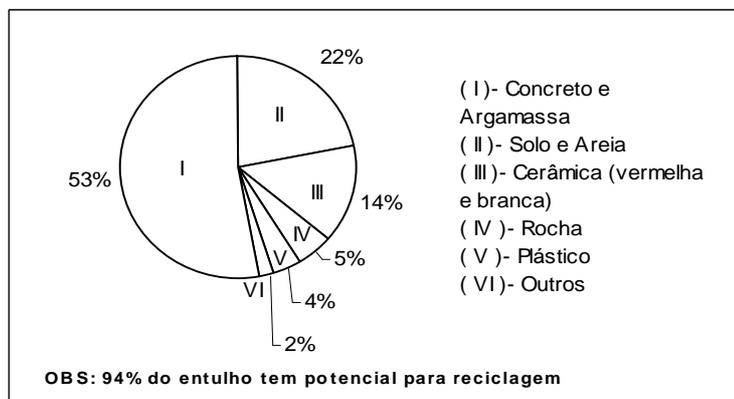


Fig. 6 - Composição do entulho gerado em Salvador - BA.
Fonte: CARNEIRO et al (2001).

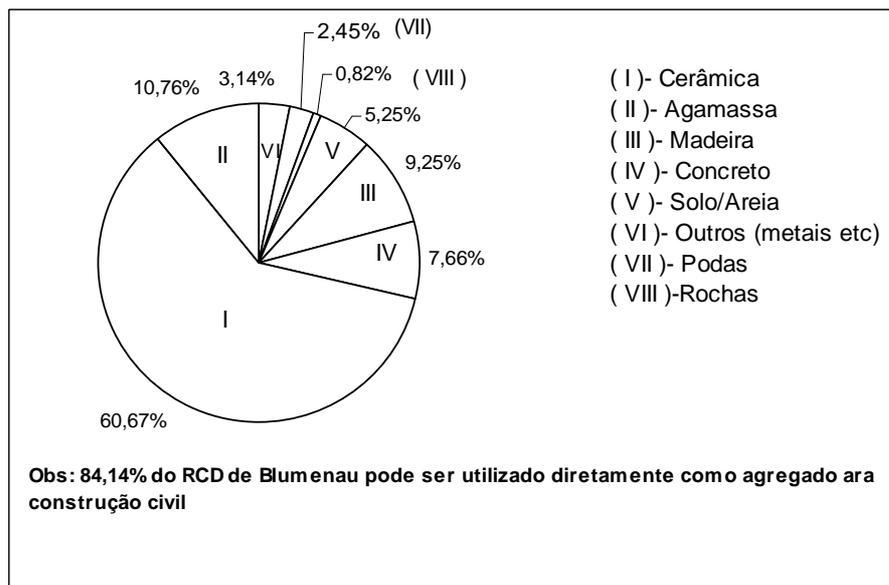


Fig. 7 - Composição do RCD gerado em Blumenau - SC.
Fonte: SARDÁ e ROCHA (2003)

3.6.3. Variabilidade dos Resíduos de Construção Civil

A composição de um RCD pode ser muito variada, assim uma caracterização física e química sistemática do entulho e do agregado reciclado deve ser feita para avaliar a variação de propriedades de forma a assegurar a qualidade do material reciclado e inclusive garantir o uso seguro, livre de riscos à saúde e sem agredir o meio ambiente.

A variabilidade do RCD pode se tornar um entrave à aplicação dos resíduos, não se conhecendo exatamente os efeitos que essa variação pode acarretar no desempenho dos produtos gerados pela reciclagem. A heterogeneidade das características do RCD é responsável pela limitação de sua aplicação em algumas situações como em concretos estruturais, blocos e argamassas. No Brasil, a pouca experiência em plantas de reciclagem acaba gerando agregados heterogêneos em composição e outras propriedades além das contaminações causadas pela ausência de um controle de qualidade. A análise de amostras de agregados graúdos de RCD reciclados em Santo André revelou uma variabilidade significativa (ANGULO,2000). O exemplo da variabilidade do RCD de Santo André pode ser verificado na figura 8.

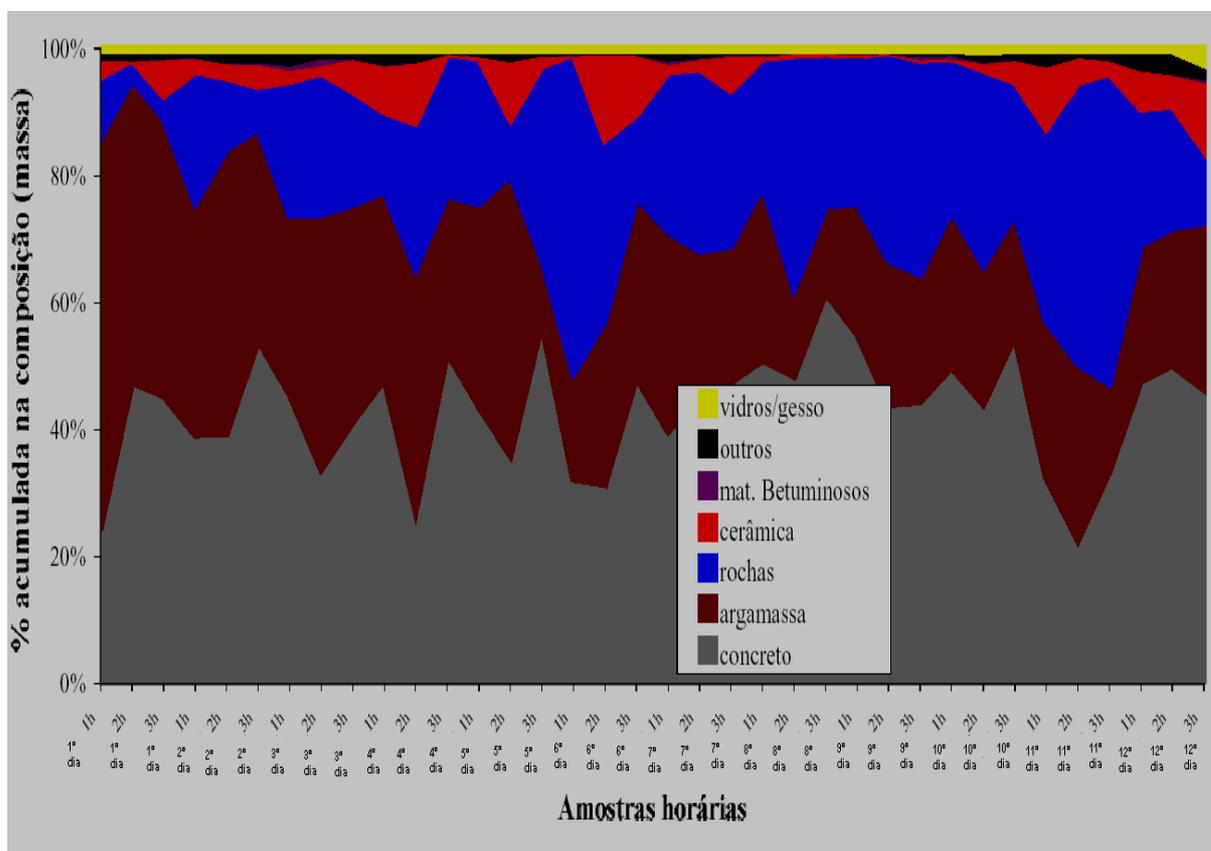


Fig.8 - Variabilidade do RCD de Santo André, 12 dias, Amostras Horárias (modificada de ANGULO, 2000)

3.7. A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil, com certeza um dos setores mais fortes da economia e principal consumidora de matérias primas e energia, acaba provocando um enorme impacto ambiental através da geração de resíduos e outras formas de poluição ambiental, havendo pois a necessidade de mudança em sua cadeia produtiva na busca do desenvolvimento sustentável. Uma das formas de se fazer essas mudanças é o que estão fazendo alguns governos municipais que vem agindo ativamente na reciclagem de resíduos de construção e demolição.

A redução do impacto ambiental através da reciclagem de certos materiais de construção podem se verificados pelo quadro 7.

Quadro 7 - Redução do impacto ambiental (%) da reciclagem de resíduos na produção em alguns materiais de construção civil, exceto transporte (Segundo JOHN 2000).

Impacto Ambiental	Alumínio	Aço	Vidro	Adição de escória ao cimento(%)		
				20	30	50
Energia	97	74	6	88	82	71
Matéria prima		90	54	20	30	50
Água		40	50			
Poluição do ar		86	22	20 *	30 *	50 *
Res. em geral		105	54			
Res. minerais		97	79			

* Considera-se a redução de poluentes no processo de clinquerização como CO₂

O setor de construção civil permite grandes possibilidades de reciclagem e os diferentes ramos da cadeia produtivas estão presentes em todas as regiões facilitando projetos de simbiose industrial que permite uma reciclagem local. Boa parte dos materiais consumidos pela construção civil são agregados para pavimentação, concreto, argamassa e elementos de alvenaria de produção regional.

A maioria dos componentes de construção é de produção simples reduzindo os requisitos e simplificando os processos. Isto facilita a possibilidade de utilização de agregados diferentes dos tradicionais. Esta produção mais simples pode significar que a quantidade de capital para a implantação da unidade de reciclagem seja reduzida. Existe enorme possibilidade de utilização de grandes volumes de produtos com baixa resistência mecânica se comparada com outros setores de engenharia, o que torna

possível a convivência com materiais que apresentam defeitos micro-estruturais e impurezas. A reciclagem de resíduos na construção civil resulta em uma oferta maior de produtos alternativos para uma mesma função e, possivelmente, de soluções mais adequadas para situações específicas, com ganhos de eficiência geral do processo (JOHN, 2000).

Apesar de todos aspectos da reciclagem na construção civil, algumas barreiras necessitam serem vencidas. Há necessidade de desenvolver produtos com vantagem tecnológicas em relação aos tradicionais (JOHN,1995). Há uma concepção por parte dos consumidores e até de técnicos da área de que um produto contendo resíduo possui qualidade inferior. Assim, necessário se faz que as resistências técnicas devem ser vencidas pela demonstração, através de pesquisas, do desempenho técnico e ambiental igual ou superior ao produto tradicional (JOHN,2000).

O mesmo autor conclui que a reciclagem é essencial para o desenvolvimento sustentável, uma vez que é impossível pensar em uma sociedade que não gerem resíduos, pois a reciclagem apresenta vantagens potenciais como a preservação de recursos materiais, redução de consumo de energia, redução da poluição e aterros, geração de empregos e aumento da competitividade da economia, apesar que cada situação específica deverá ser objeto de análise da situação, como a análise do ciclo de vida, na busca de melhores opções. Considera ainda que no Brasil as políticas de incentivo à reciclagem estão um pouco atrasadas em relação a vários países e existe um longo caminho a percorrer e concluiu também que a cadeia produtiva da construção civil já é a maior recicladora da economia e que possui um enorme potencial para aumentar o volume de materiais que recicla, dada a massa de materiais que consome, sua capilaridade regional, e as características dos seus materiais. Assim a reciclagem dos RCD é um desafio a ser enfrentado.

Alguns aspectos metodológicos devem ser levados em consideração quando se pretende desenvolver um novo produto gerado por reciclagem de resíduos tais como: o estudo do processo de produção e gestão do resíduo; suas eventuais variações sazonais ou tendência a longo prazo e custos de gestão do resíduo.

A caracterização do resíduo deve ser a mais completa possível. O novo produto deve ser estudado profundamente seguindo os conceitos da ciência dos materiais. Aspectos químicos relevantes devem ser compreendidos assim como uma avaliação da durabilidade e mais fundamentalmente ainda, uma avaliação do impacto ambiental. O risco de contaminação ambiental deve ser analisado através de ensaios de lixiviação, haja visto que a lixiviação é um fenômeno complexo e depende da forma

e das condições de exposição do produto, ao longo de seu ciclo de vida. O estudo de viabilidade econômica do novo produto pode ser realizado pelos métodos taxa de retorno e tempo de retorno. Contudo existe um forte risco de valorização do resíduo, caso a demanda por ele cresça. Assim é desejável que o modelo de negócio envolva uma garantia de manutenção de preço de resíduo por período de tempo suficientemente longo para amortizar os investimentos, de acordo com a taxa de retorno selecionada pelo investidor (JOHN,2000).

3.8. ASPECTOS LEGAIS DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL

As discussões sistemáticas sobre resíduos podem se consideradas ainda recentes e alguns projetos estão sendo discutidos pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente. Recentemente foi iniciada a discussão de uma política estadual de resíduos sólidos em São Paulo. Esse projeto de lei, aprovado pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente propõe uma política abrangente de resíduos, incluindo ferramentas para minimização e reciclagem de resíduos. A lei federal de crimes ambientais (nº 9605 de 12 de fevereiro de 1998) estabelece punição das transgressões a legislação ambiental vigente. O setor carece de estímulos às atividades de redução do impacto ambiental. O Ministério da Indústria, Comércio e Turismo criou em 1998 a portaria nº 92 (06/08/1998) que instituiu um grupo de trabalho interministerial objetivando a elaboração de um Programa Brasileiro de Reciclagem (PBR), que estabelecia mecanismos que permitiriam incrementar e valorizar a utilização como matérias primas, de resíduos industriais, minerais e agropecuários e estabeleceria o desenvolvimento do parque industrial nacional reciclador. A CETESB, através da lei nº 10311 (12/05/1999) do Estado de São Paulo, poderá emitir um certificado de qualidade ambiental, um selo verde a estabelecimentos paulistas que executem programas de proteção e preservação do meio ambiente de acordo com normas ambientais. Apesar deste selo verde não ser voltado para a certificação de produtos, trata-se de um avanço importante (JOHN,2000).

Desde 1999 um grupo formado por professores, construtores e caçambeiros vinha se reunindo para apresentar um texto que viria a ser a elaboração da Resolução 307 do CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente - até que foi promulgada em junho de 2002. Trata-se de um Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil englobando um Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil - público, destinado a pequenos geradores e Projetos de

Gerenciamento de Resíduo de Construção Civil - privado, destinado aos grandes geradores, como as construtoras (LOTURCO, 2004).

A Resolução 307 do CONAMA (2002) estabelece regras para que os envolvidos no processo de geração de resíduos não agridam o meio ambiente, priorizando a não geração de resíduos. Os resíduos foram divididos nas seguintes classes:

- Classe A - resíduos reutilizáveis;
- Classe B - resíduos recicláveis;
- Classe C - resíduos com reciclagem inviável e
- Classe D - resíduos perigosos.

Os grandes geradores deverão desenvolver projetos de gerenciamentos de resíduos de construção civil, assim as construtoras deverão definir procedimentos para manejo e destinação adequada para os resíduos, pois cada projeto passará por uma avaliação do órgão ambiental local e deverão contemplar as etapas de caracterização, triagem, acondicionamento, transporte e destinação. A Resolução 307 proíbe a disposição dos resíduos de construção em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de bota - fora, encostas, corpos de água, lotes vazios ou em áreas protegidas por lei. Já os pequenos geradores, responsáveis por 75 % do entulho gerado, terão de seguir as diretrizes dos Programas Municipais de Gerenciamentos de Resíduos da Construção Civil (LOTURCO, 2004).

3.9. A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

3.9.1. Histórico

A reciclagem é uma atividade que por razões de ordem prática e econômica vem motivada desde a antiguidade (JOHN 2000).

São comuns antigos exemplos de resíduos de construção na história das civilizações antigas como as vias romanas, igrejas renascentistas constituírem base usada por edificações do período seguinte (ITEC, 1995).

Por volta de 1860, há notícias de blocos de concreto britados como agregado de novos concretos na Alemanha. E na Alemanha também iniciou-se os primeiros estudos sistemáticos sobre as características dos agregados reciclados em 1928 (SCHULZ; HENDRICKS, 1992).

As experiências de reciclagem de entulho modernas tiveram início após a segunda guerra mundial na Europa. Os países movidos pela escassez financeira e de matérias primas, lançaram mão de britadeiras utilizadas em pedreiras, moendo os entulhos para a utilização na reconstrução de suas cidades (CORCUERA CAVALCANTI, 2003).

A partir de 1983 a reciclagem de materiais vem sendo regularmente praticada na Europa, Japão e Estados Unidos e vem desde então se tornando uma alternativa viável na construção civil. Desde 1983 também o arquiteto Tarcisio de Paula Pinto pesquisa o desperdício na construção civil na Ufscar e a possibilidade de reaproveitamento dessas matérias (TOALDO,1993).

Em novembro de 1991 foi inaugurada a usina de reciclagem de entulho de Itatinga, a primeira com essa função no Hemisfério Sul, localizada no bairro de Santo Amaro, zona Sul de São Paulo, sendo que a primeira obra que utilizou material reciclado desta usina, blocos de entulho reciclado, foi inaugurada em 1993, e tratava-se de um alojamento de 190 m² nas dependências de usina de Asfalto Municipal, no bairro da Barra Funda em São Paulo (TOALDO,1993).

Em novembro de 1995 inaugurou se a primeira usina de reciclagem de Belo Horizonte no Bairro Estoril (CHENNA, 2001)

3.9.2. Experiências Municipais de Reciclagem de Entulho no Brasil.

São Paulo foi a primeira cidade brasileira a contar com uma unidade recicladora, a usina de Itatinga. Os blocos de concreto produzidos com material reciclado teriam um custo 70% menor do que os tradicionais. Este desempenho despertou o interesse da EMURB (Empresa Municipal de Urbanização) que estudou a implantação de uma fábrica de blocos com capacidade de produção de 20 mil unidades/dia (TOALDO, 1993). A usina de Itatinga tinha capacidade para reciclagem de 700 m³/dia e durante algum tempo, o material britado foi empregado na pavimentação de vias públicas.

Belo Horizonte conta com um programa desde 1993 que prevê quatro estações de reciclagem com previsão de 8,8 mil toneladas/mês e conseqüente produção de 5500 m³ de agregados reciclados atingindo 80% de redução do custo de produção. O projeto conta ainda com uma rede de quatro estações de recepção de resíduos e nucleamentos de coletores, montada em áreas públicas de pequeno porte (CORCUERA CAVALCANTI, 2003). Em novembro de 1995 foi inaugurada a 1^o estação

de reciclagem projetada de Estoril com capacidade de 120 toneladas/dia a um custo estipulado de R\$ 100.000,00 (R\$ 65.000,00 em equipamento e R\$ 35.000,00 em infraestrutura) e a 2ª estação foi inaugurada no bairro de Pampulha com capacidade de 240 t/dia a um custo de R\$190.000,00 (R\$ 140.000,00 em equipamento e R\$ 50.000,00 em infraestrutura). Em 1996 foram reciclados 16.363 toneladas de entulho e a cada ano vem aumentando de forma significativa, assim em 2000 foram reciclados 95.212 toneladas de entulho, mas mesmo assim esta quantidade ainda é insuficiente frente às 714.900 toneladas aterradas no município, sendo que 50% desta quantidade é de solo e 50% possíveis de serem reciclados, ou seja, 357.450 toneladas. O custo de produção do entulho reciclado em Janeiro de 2000 era de R\$ 13,00/ton ou R\$ 15,80/m³. Para efeito de comparação com preços dos produtos convencionais foram avaliados os custos em Dezembro de 1999: cascalho de pedra, R\$ 13,92/m³; areia comum, R\$ 17,78/m³, brita nº 2, R\$ 18,84/m³ e escória de siderurgia, R\$ 6,50 /tonelada (CHENNA,2001).

Em 1993 a Prefeitura Municipal de Santo André tentou implantar um projeto para reciclagem de 30m³ de resíduos para a produção de 4 mil blocos/dia com forte redução de custos em relação aos blocos tradicionais. O estudo apresentado previu que para a geração de um volume de 115 m³ de entulho/dia haveria custo de 144 mil dólares na montagem dos equipamentos e outros 74 mil dólares na fábrica de componentes para 4 mil blocos/dia. O custo dessa reciclagem ficaria por volta de 2,5 dólares/m³ e os custos da época para o gerenciamento dos resíduos mais os custos dos agregados a serem substituídos somavam um total de 24,7 dólares/m³ portanto uma economia de 22,2 dólares/m³, um valor significativo segundo o arquiteto Tarcisio de Paula Pinto que participou do projeto. Mesmo assim, a usina não foi montada devido a problemas econômicos. Porém aquela prefeitura vem agora retomando os estudos de viabilização daquele projeto (CAMARGO, 1995).

A Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro adquiriu um moinho ANVI 500, que apesar de concebido para a reciclagem em obras, vem sendo utilizado para resolver o problema de disposição indevida de 30 m³/dia de entulho na Ilha de Paquetá. Esse material está sendo reciclado para uma produção de uma argamassa grossa utilizada no recapeamento de ruas, anteriormente feita com saibro e os resultados obtidos foram considerados excelentes e previa-se em uma segunda etapa a confecção de argamassa para baratear as construções populares da ilha (CAMARGO, 1995).

Em 1995, Ribeirão Preto desenvolveu um programa de gestão diferenciada dos RCD nos moldes de Belo Horizonte. Assim em 1996 entrou em operação a 1ª

central de reciclagem e vem obtendo resultados satisfatórios. Até 1999 a produção de reciclados permitiu a execução de 218 mil m² de pavimentação, equivalente a 31km de vias (PINTO,1999). Outras experiências com reciclagem também foram citadas por PINTO (1999) em Londrina no ano de 1994, São José dos Campos em 1996 e Piracicaba em 1997.

3.9.3 Processos de Reciclagem do RCD

Segundo COCUERA CAVALCANTI (2003) a reciclagem de entulho municipal envolve planejamento, infra-estrutura administrativa, pequenos locais de apoio para organização e triagem de entulho e a estação de reciclagem propriamente dita. A reciclagem de entulho pode ser feita por moedores ou britadores. O processo de reciclagem por britadores passa basicamente pela seleção, limpeza, trituração e classificação granulométrica dos materiais, para posterior utilização específica. Diferentemente das usinas de reciclagem municipais que utilizam máquinas de mineração, as obras prediais são atendidas por um equipamento móvel de pequeno porte, ou seja, um moinho que tritura entulho a base de argila e restos de argamassa, formando um agregado fino para argamassa de assentamento ou revestimento. Apesar destes equipamentos serem pequenos e modernos e não apresentarem riscos e nem incômodo a população, alguns cuidados são indicados como a adaptação nos equipamentos para evitar poeira e ruídos. Recomenda-se também a criação de um cinturão verde no perímetro da unidade recicladora evitando a entrada de passantes, formando uma barreira adicional ao pó e ao ruído remanescente gerado pela britagem e dar um aspecto de consciência ecológica ao conjunto.

Um exemplo básico de britagem de entulho é da usina recicladora de Belo Horizonte esquematizado na figura 9. Uma instalação simples e barata, cercada por barreiras vegetais e dotada de aspersores de água para a contenção do pó, a planta é dotada de baias para a seleção prévia do material recolhido, que é classificado conforme seu grau de pureza. O coração da usina é formado por um britador de impacto que permite a fragmentação do material em granulometrias variadas. Um eletroímã instalado sobre a correia transportadora de saída recolhe as barras de aço de armaduras, formando um “novelo” de fios e barras metálicas (CAMARGO, 1995).

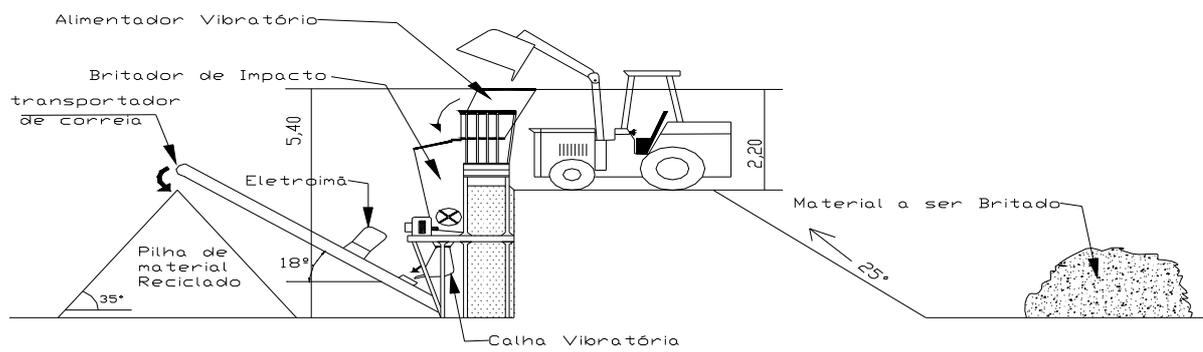


Figura 9. Usina de reciclagem de Belo Horizonte

Fonte: Modificado de CAMARGO (1995)

Quando a reciclagem é realizada por equipamentos moedores, o processo elimina apenas madeira e ferros transformando o restante do material em matéria prima para argamassa, sem classificação granulométrica (CAMARGO, 1995).

O fluxograma dos resíduos da construção civil em São Paulo é apresentada na figura 10 como exemplo de como proceder no processo de geração de resíduos buscando atender as exigências da Resolução 307 do CONAMA.

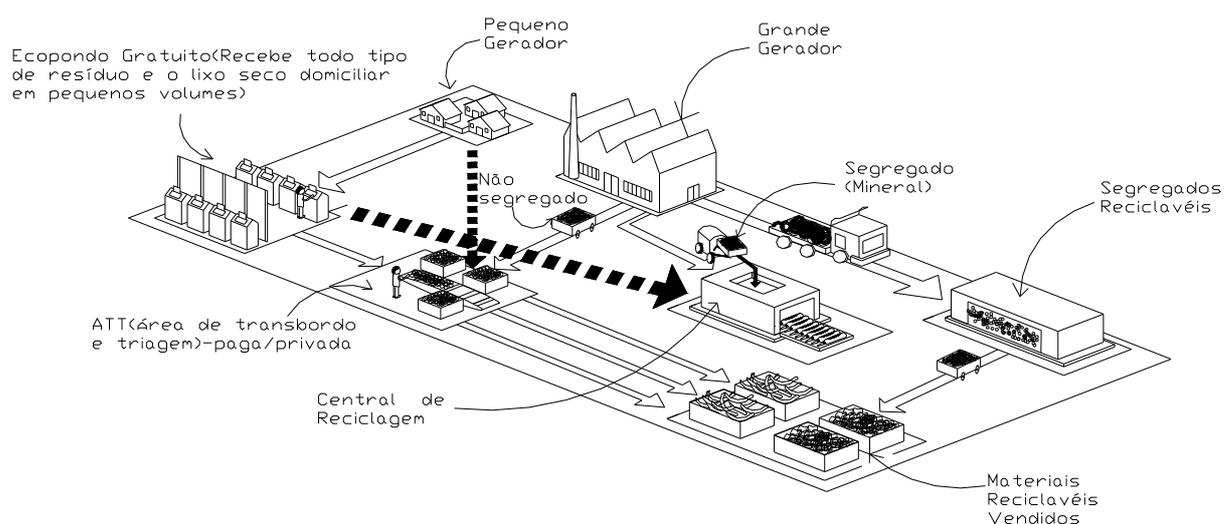


Figura 10 Fluxograma dos resíduos em São Paulo.

Fonte: Modificada de LOTURCO (2004)

3.10. AS POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO DO ENTULHO RECICLADO

São várias as possibilidades de utilização do RCD reciclado na construção civil, obviamente há de ser considerado as vantagens e certas limitações para cada tipo de utilização. De modo geral, os produtos à base de entulho reciclado não devem ser usados onde haja exigências estruturais. O gesso e o EPS (poliestireno expandido) são os grandes inimigos da reciclagem, pois a massa perde a liga e com EPS perde resistência (CORCUERA CAVALCANTI, 2003).

3.10.1. Utilização em Pavimentos.

A forma mais simples de utilização do RCD reciclado é na pavimentação como base, sub-base ou pavimento primário na forma de brita corrida, ou ainda em misturas de resíduos com solo. Como vantagens desta utilização pode se citar: a) forma de reciclagem que exige menor tecnologia, barateando o custo do processo; b) permite a utilização de todos os componentes minerais do entulho (tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.) não exigindo a separação de nenhum deles; c) economia de energia no processo de moagem do entulho, uma vez que, usando-o no concreto, parte do material permanece em granulometrias graúdas; d) possibilidade de uso em maior escala de entulho, inclusive aquele proveniente de demolições e pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/trituração; e) maior eficiência do resíduo quando adicionado aos solos saprolíticos em relação a adição com britas (a adição de apenas 20% de entulho reciclado ao solo saprolítico dobra o suporte deste solo ao passo que para aumentar o CBR do mesmo solo com britas são necessários dosagens a partir de 40%) e f-) aparentemente não há limitações para esse tipo de utilização. O entulho pode ser usado sozinho ou misturado ao solo e deve ser processado por britador até a obtenção da granulometria desejada e pode apresentar até 50% de contaminação prévia do solo. A eficiência dessa prática foi comprovada cientificamente quando utilizadas por diversas administrações municipais como São Paulo, Belo Horizonte e Ribeirão Preto (ZORDAN, 2003).

Na Europa a maior parte do RCD é aplicada na construção de estradas. De qualquer forma se faz necessário alguns critérios de seleção e classificação como os observados no quadro 8 (VAZQUES, 2001).

Quadro 8 - Produtos obtidos a partir do RCD e utilização na pavimentação (Segundo VAZQUES, 2001)

Material Obtido	Principal Componente	Componente Secundário	Aplicação
Concreto Triturado	≥ 80% concreto com uma densidade seca maior que 2,1t/m ³	≤ 10% pedra, cerâmica. ≤ 5% aglomerado asfáltico.	Sub-bases em qualquer tipo de estrada.
Cerâmica Triturada	≥ 85% do material mineral deve ter densidade seca menor que 1,6t/m ³	≤ 15% de outros materiais minerais. ≤ 10% aglomerado asfáltico.	Sub-bases para tráficos não pesados.
Material Residual Mixto Triturado	≥ 50% concreto com densidade seca maior que 2,1t/ m ³ ≤ 50% material mineral com densidade seca menor que 1,6t/ m ³	≤ 10% de outros materiais minerais. ≤ 5% de mistura asfáltica.	Sub-bases para qualquer tipo de estradas.

Uma capa de base, cujo uso está se popularizando, consiste de uma mistura de agregados graúdos com cimento como as usadas na França e Espanha, mas com substituição total do agregado graúdo natural pelo concreto triturado. O conteúdo de cimento deve ficar entre 3 e 5% e esta dosagem deve ser bastante estudada (VAZQUES,2001).

A utilização do RCD como agregado em bases de pavimentos não garante uma reciclagem massiva deste resíduo, pois este mercado não consegue consumir mais que 50% deste resíduo além de dificultar o envolvimento mais expansivo da iniciativa privada(ANGULO et al, 2002).

3.10.2. Utilização como Agregado para o Concreto

A utilização do RCD reciclado como agregado para o concreto é recomendada para concreto não estrutural e pode ser feito a partir da substituição dos agregados convencionais (areia e brita) pelo entulho reciclado. Citam-se como vantagens: a) utilização de todos os componentes minerais do entulho sem a necessidade de separação de nenhum dele; b) economia de energia no processo de moagem do entulho, c) possibilidade de um uso maior de entulho e d) possibilidade de melhorias no desempenho do concreto em relação aos agregados convencionais, quando se utiliza

baixo consumo de cimento. Como fator limitante cita-se a presença de faces polidas em materiais cerâmicos (pisos, azulejos, etc) que interferem negativamente na resistência à compressão do concreto produzido. A mistura é a tradicional, com cimento e água, esta em quantidade superior em função da alta absorção do entulho. Apesar das pesquisas indicarem eficiência do processo, alguns aspectos relacionados à durabilidade do concreto produzido precisam ainda serem analisados. Algumas prefeituras já utilizam blocos de concreto feitos com entulho reciclado (ZORDAN, 2003).

O agregado reciclado deve estar saturado para que o concreto que o utilize venha apresentar resultados satisfatórios. A resistência à compressão de concretos com entulho é aproximadamente 20% menor que o concreto convencional em certos traços utilizados (BRITO et al, 2001).

A utilização de RCD reciclado como agregado em concreto tem grande possibilidade para uma reciclagem massiva. No entanto, para tanto há necessidades de mudanças na gestão e no processamento do RCD como demolição seletiva, redução de contaminantes, mudança no layout das instalações de reciclagem, homogeneização, processamento à úmido do RCD e emprego de novos equipamentos de concentração e de britagem. A caracterização do RCD é primordial na escolha do processo de beneficiamento (ANGULO et al, 2002).

ANGULO e JOHN (2002) apresentam um estudo de viabilização do uso do RCD como agregado em concreto em função das especificações internacionais e especificações de um pesquisador brasileiro de agregados graúdos para tal finalidade (quadro 9). Foram utilizadas amostras provenientes da central de reciclagem de Santo André-SP, mas nenhum dos lotes de agregados apresentaram potencial para serem utilizados na produção de concreto estrutural e provavelmente este tipo de limitação deve ocorrer em outras usinas recicladoras brasileiras, pois os dados publicados, apesar de escassos, indicam uma participação da fração alvenaria (cerâmicos + argamassas) maior que 50% da massa total. Apenas 50% dos resíduos analisados poderiam ser utilizados como agregados em concreto, mesmo assim sem função estrutural de acordo com as especificações de LIMA (1999) e um pouco menos de acordo com a especificação holandesa. Assim, uma grande ênfase de reciclagem de RCD como agregado para concreto não parece ser a mais adequada à realidade brasileira. Com isso outras alternativas de reciclagem deste resíduo devem ser desenvolvidas.

**Quadro 9 - Especificações de agregados graúdos de RCD reciclados para concreto
(Segundo ANGULO e JOHN, 2002)**

EXIGENCIAS	JAPÃO	HOLANDA		RILEM		LIMA(1999)	
Natureza do agregado	concreto	concreto	Alvenaria ²	concreto	alvenaria	concreto	alvenaria
Max. Fck (mPa)	18	nd	nd	50-60	16-20	16	12
Condições de exposição			Pouca umidade	Classes de exposições(ENV206)		Sem presença de umidade	
				2,3 e 4	1		
Aplicação	Fundações edifícios comerciais térreos	Sem restrição		Sem restrição		Contrapisos bases vergas blocos	Contrapiso Bases vergas blocos
Massa específica >(kg/m ³)	2200	2100	nd	2000	1500	nd	nd
Absorção < % em massa	7	nd	nd	10	20	7	12
Passante # 0,075mm < % em massa	1	0,1	2	2	3	nd	nd
Teores de fases < (em massa)	10kg/m ³ ou 0,77% ⁴ argamassa e revestimento(d<1,95 kg/dm ³)	5% de outras	Argamassa (25%) cerâmica (20%) ³	10% d<2,2 kg/dm ³ 1 de outras	10% d< 1,8kg/dm ³	Argamassa (10%) Cerâmica (5%)	Argamassa (50%) Cerâmica (50%)
Max. de contaminantes(em massa) ¹	2kg/m ³ ou 1% ⁴	1% betume 0,5% outros	1	1	5	1(solo 5%)	1(solo 5%)
Teores de sulfatos (%massa)			1 (NEN 5930)	1 (BS812)	1 (BS812)		
Expansão por reação Álcali-Agregado				Regulamentos nacionais	Regulamentos nacionais		
Outros			Cloretos (NEN 5921)	"deicing salt test"			
<p>Observações</p> <p>1- Contaminantes são materiais betuminosos, madeira, vidro e outros que não fases como concreto, argamassa e cerâmica.</p> <p>2- É possível que se trate de alvenaria com blocos de concreto</p> <p>3- Uma razão para a limitação pode ser ciclos de gelo-degelo em materiais cerâmicos conforme contato pessoal com o pesquisador Johan Put da universidade de DELFT, Holanda,</p> <p>4- Cálculo realizado considerando-se a massa unitária dos agregados graúdos de RCD reciclados como 1300kg/ m³</p>							

3.10.3. Utilização Como Agregado em Argamassas

Foram realizados alguns estudos de desempenho da argamassa contendo entulho e alguns resultados demonstraram que o produto feito de entulho chega a apresentar resistência três vezes maior que a argamassa tradicional e isto se deve a recuperação das características originais desses materiais que viraram entulho, além da geração da pozolana que é proveniente da moagem de blocos cerâmicos de acordo com o engenheiro civil André Natenzon da Comercial ANVI, empresa fabricante de argamassadeiras. Ainda segundo Natenzon, esse material tem excelente resistência ao arrancamento (aderência) e um módulo de elasticidade maior do que o de argamassa tradicional, pelo fato dessa argamassa apresentar muita retenção de água. No ensaio de arrancamento, os resultados foram 10% maiores para a argamassa de entulho. Quanto a penetração de água, a argamassa de material reciclado apresentou uma taxa menor do que a argamassa tradicional (CAMARGO,1995).

A utilização do RCD reciclado como agregado de argamassa pode se dar usando entulho moído na granulometria da areia. As vantagens desse tipo de utilização são: a)- pode ser utilizado resíduo no local gerador processado por uma argamassadeira na própria obra eliminando custo com transporte; b)- o entulho moído proporciona um efeito pozolânico; c)- redução do consumo de cimento e da cal e d)- aumento de resistência de compressão das argamassas. Um inconveniente, contudo, se observa na argamassa de revestimento pois a mesma apresenta problemas de fissuração, ocasionados pela excessiva quantidade de finos presentes no entulho moído pelas argamassadeiras. Este tipo de reciclagem vem sendo utilizada por várias construtoras do país e pesquisas estão em andamento para tentar solucionar alguns inconvenientes pertinentes dessa técnica (ZORDAN,2003).

As argamassas a base de entulho são porosas e não devem ser utilizadas como impermeabilizantes (CORCUERA CAVALCANTI,2003).

O RCD reciclado a partir da seleção e moagem de bloco cerâmico, de concreto e de argamassa pode ser utilizado em argamassa de contra piso. A vantagem observada foi a de uma resistência à compressão e de uma resistência à tração para as argamassas de contra piso contendo entulhos maiores em relação à argamassa tradicional, ou seja, só areia. É necessária uma correção na relação água/cimento, pois a absorção de água nos entulhos é maior refletindo assim uma quantidade maior de água de amassamento na argamassa contendo entulhos (TURMINA e BARROS, 2001).

GRIGOLI (2001) apresentou um trabalho em que demonstra a geração de resíduos e utilização no próprio canteiro de obras em argamassas para assentamento de batentes, esquadrias e blocos cerâmicos; enchimento de rasgos na parede, degraus de escadas; chumbamentos de tubulações elétricas/hidráulicas e caixas elétricas; execução de embonecamento de tubulações; remendos e emendas em alvenarias e enchimento de rebocos internos.

3.10.4. Utilização como Agregado em Tijolos de Solo Estabilizado com Cimento.

Estudo realizado em Salvador-BA demonstrou a possibilidade de utilizar o agregado de entulho em tijolos de solo-cimento. Foi demonstrado que a proporção adequada para a fabricação de tijolos de solo-agregado reciclado-cimento com prensa manual encontra-se na faixa de 50 à 75% de agregado reciclado em substituição do solo saprolítico estudado, sendo que as demais proporções não atenderam as exigências especificadas. O estudo comprovou a utilização do RCD de Salvador reciclado em tijolos de solo-cimento, no entanto as características do solo e do RCD reciclado são diferentes em outros locais, portanto as proporções adequadas de RCD em relação ao solo empregado devem ser verificadas em cada caso distinto (NEVES et al, 2001).

3.10.5. Outros Usos

A utilização do RCD reciclado também pode se dar de outras formas, tais como: a) cascalhamento de estradas; b) preenchimento de vazios em construções; c) preenchimento de valas de instalações e d) reforço de aterros. A estabilidade de um aterro depende da adequada granulometria do material constituinte e da retirada dos materiais inconvenientes, como madeira, plástico, pneus, metais etc (ZORDAN,2003).

Aparentemente não há outro meio de utilização da parcela mineral dos RCD a não ser como agregado. No entanto, devido a provável alta porcentagem de sílica presente na parcela mineral do resíduo, usos potenciais como matéria prima para a indústria cerâmica e de vidro podem ser estudados (ANGULO e OUTROS,2002).

3.11. ENCAPSULAMENTO DE RESÍDUOS

Processo que designa solidificação, estabilização ou fixação de resíduos perigosos, tornando-os menos prejudiciais através da adição de aglomerantes e outros meios. Várias são as tecnologias aplicadas, tais como técnicas baseadas em cimento; materiais pozolânicos; termoplásticos; técnicas de polímeros orgânicos; encapsulamento com material inerte (ex. polietileno); técnica de auto - solidificação; técnica de transformação em vidro e produção de materiais sintéticos ou cerâmicas. As diferentes técnicas de encapsulamento dos resíduos perigosos apresentam vantagens e desvantagens que devem ser levados em consideração, assim como a compatibilidade de determinados tipos de resíduos com diferentes técnicas de solidificação/estabilização (CETESB, 1985).

A técnica de encapsulamento com cimento é a baseada na solidificação através da adição de cimento Portland ou produto inorgânico similar. É eficiente para resíduos com elevados teores de metais tóxicos, pois ocorrem a conversão de cátions multivalentes, em função do pH obtido na mistura com cimento, para carbonatos e hidróxidos insolúveis e os íons metálicos, também, podem ser retidos na estrutura cristalina que os minerais de cimento conseguem formar (CETESB, 1985).

O cimento apresenta muitas vantagens, pois trata-se de uma matéria prima abundante, barata e de tecnologia simples. A técnica baseada em cimento também é um sistema tolerante às variações químicas e resíduos com características que possibilitam a variação da quantidade de cimento usado para produzir produtos com alta capacidade de suporte, bons materiais de fundação como sub - base e de baixa permeabilidade. Esta técnica baseada em cimento é compatível para componentes dos resíduos tais como os oxidantes, metais pesados e materiais radioativos (CETESB, 1985).

3.12. SOLO-CIMENTO

3.12.1. Aspectos Históricos

A terra vem sendo utilizada desde o Neolítico na construção de abrigos, residências, palácios, pirâmides, muralhas, igrejas etc. Várias obras antigas permaneceram até hoje desafiando o tempo e as intempéries como as construções piramidais na Mesopotâmia (Iraque, 7000 a.C.), na Anatólia (Turquia, 5000 a.C.) e no

vale do Chimu (Peru,3000 a.C.); os Ziguartes do Irã etc (DIMARCO,1984).

Encontram-se referências no antigo testamento sobre a utilização de tijolos feitos com palhas nas construções egípcias (ÊXODO, 5:18).

Os espanhóis durante a época colonial trouxeram para a América Latina as técnicas construtivas com adobe que acabaram difundidas depois nos Estados Unidos (CEPED, 1999).

No Brasil, não há evidências que nossos nativos fizessem uso de técnicas construtivas com terra, porém com a chegada dos colonizadores portugueses e escravos africanos este método construtivo tornou-se absoluto no período colonial (CEPED, 1999).

As técnicas construtivas de terra chegaram ao Brasil com os portugueses durante o período colonial. Tratam-se de construções com taipa que acabou se difundido por todo o Brasil, caracterizando principalmente o planalto paulista. Assim foi o caso da cidade de São Paulo, carente de materiais tradicionais do litoral e de materiais trazidos do velho mundo e contando apenas com acessos primários acabou por se isolar em sua rusticidade. Desta forma, os habitantes da época tiveram de apelar aos “recursos da terra” obtendo desta forma construções baratas e resistentes. Esta situação durou até meados do século XIX quando a taipa foi substituída pelos tijolos (DIMARCO,1984).

Foi no âmbito rodoviário, as primeiras notícias de utilização da mistura de solo com cimento Portland nos EUA, quando o Eng^o Bert Reno experimentou pavimentar uma rua da cidade de Sarasota em 1915. Com a revolucionária descoberta da relação entre umidade e massa específica aparente na compactação de solos em 1929, permitiu-se um avanço enorme nos estudos científicos de estabilização com cimento. Experiência realizada pelo departamento de estradas e rodagem da Carolina do Sul entre 1932 e 1934 mostrou através de resultados satisfatórios o quão promissor foi o produto obtido, um produto endurecido que não se deteriorava sob a ação dos pneumáticos nem se deformava em tempo úmido, não se desintegrava e nem formava lama. Desta forma, a Portland Ciment Association (PCA) em 1935 passou a pesquisar intensivamente os teores de cimento para cada espécie de solo com a finalidade de garantir a durabilidade do produto acabado, sujeitos a solicitação de esforços e agentes externos (cargas mecânicas, variações térmicas e de umidade e meios agressivos).

No Brasil a primeira aplicação de solo-cimento em pavimentação se deu na construção da pista de circulação do aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro em 1940. Em seguida surgiram outras construções como a Estrada de Osasco, Estrada Federal Caxambu-MG - Areias-SP-, Estrada de Alcântara-RJ (PITTA, 1980).

Aplicações interessantes de solo-cimento ocorreram no Brasil. Assim foi o caso das paredes monolíticas, materiais de alvenaria sucedâneo do tijolo. Em 1945 uma experiência pioneira ocorreu em Santarém (PA) quando foi construído com tal material uma casa de bombas de 42m² para abastecimento das obras da construção do aeroporto local. Em 1948 foi projetada a construção do Hospital de Tuberculose de Manaus - AM com 10.800 m², que por falta de materiais de construção tradicionais, precariedade de mão de obra especializada e baseado em experiências anteriores, houve por bem a construção com solo-cimento em paredes monolíticas contando com o apoio tecnológico da ABCP e acabou redundando em uma experiência surpreendente (THOMAS, 1984).

Em 1963 mais de 60 barragens de terra nos EUA tiveram suas montantes projetadas em solo-cimento, além de um número de aplicações similares, práticas que vem sendo adotado onde se destacam as experiências pioneiras no Brasil dos diques de Moju, em Tucuruí (PA) e Rosana (SP) (PITTA, 2000).

Muitos arquitetos buscam adaptar as exigências da modernidade, em termos de conforto ambiental, utilizando-se da terra. Essas pesquisas sempre sofreram pressões por certos grupos que não aceitaram a divulgação de uma tecnologia que concorra com os materiais tradicionais. Apesar de muitas vantagens, há um grande preconceito contra a construção com terra por parte daqueles que associam esta técnica construtiva com padrões de pobreza (DIMARCO, 1984).

Apesar do custo reduzido das construções com blocos de solo-cimento que acaba favorecendo o setor social, ultimamente elas vem ganhando espaço no mercado de médio e alto padrão (FIGUEROLA,2004)

3.12.2. Aspectos Gerais

Solo-cimento é definido como um produto endurecido resultante de cura de uma mistura homogênea compactada de solo, cimento e água e eventualmente aditivos, em proporções estabelecidas em laboratório. Outras matérias primas como a brita, a escória de alto forno também são utilizáveis como matéria prima nas estabilizações com cimento

embora suas gêneses não as enquadram como solos propriamente ditos (PITTA, 1980).

O mesmo autor define o cimento Portland utilizado no compósito como um ligante hidráulico produzido através da pulverização de uma mistura calcinada composta basicamente por silicatos e aluminatos de cálcio a qual se adiciona gesso, para controle de tempo de pega.

Vários são os usos recomendados através da estabilização com cimento. As principais aplicações são:

- Base ou sub - base de pavimentos em estradas, vias urbanas, pátios industriais, estacionamentos e aeroportos;
 - Tijolos, blocos e painéis para construção de moradias;
 - Revestimento de barragens, canais, diques e reservatórios;
 - Revestimento e impermeabilização de túneis;
 - Estabilização de taludes e encostas;
- (PITTA, 1980).

3.12.3. Estabilização dos Solos com Cimento

“Estabilizar um solo natural é propiciar-lhe resistência ao cisalhamento e a abrasão, de modo a suportar cargas ou agentes externos sem deformações excessivas ou prejudiciais sob qualquer condição climática” (HOGENTOGLER, 1937).

Estabilização granulométrica é aquela que se dá somente com solo, podendo ser uma mistura. A estabilização se dá quando o material aumenta o atrito interno entre as partículas e a resistência ao cisalhamento. Este processo é possível com uma granulometria e uma compactação adequada. Um solo com poucos finos pode contar somente com o contato entre as partículas pois não é coesivo, permitindo uma alta permeabilidade e dificuldade de manuseio no campo. De outro lado, um solo com alto teor de finos, suas partículas graúdas ficam completamente envolvidas por elas, desaparecendo o contato entre os grãos, tornando-se praticamente impermeável, porém com baixa massa específica aparente. Desta forma, um teor adequado de finos de modo a preencher os vazios entre as partículas graúdas pode garantir ao material uma estabilização através de contato entre as partículas, apresentando uma maior resistência ao cisalhamento, um maior valor de massa específica aparente e de baixa permeabilidade. A resistência mecânica de um material compactado, porém submetido a uma saturação após a compactação, tende a diminuir, pois a lubrificação excessiva que a água promove nas partículas diminui o atrito interno. Para resguardar o grau de

estabilização do material ao longo do tempo providências são necessárias para evitar a penetração de água. A adição de cimento Portland, por exemplo, é um dos meios mais nobres e seguros de consegui-lo (PITTA, 1980).

O mesmo autor cita que ao se adicionar pequenas quantidades de cimento em solo coesivo no estado úmido e solto, a primeira ocorrência do processo estabilizador será a redução de plasticidade da fração argilosa, provavelmente causada pela liberação de íons de cálcio no início das reações de hidratação do cimento, através da troca de cátions, ou uma saturação de cátions adicionais nas partículas argilosas, provocando uma mudança de carga elétrica ao redor destas, que formam, pela atração elétrica, conglomerados com diâmetros maiores que as partículas naturais de tal forma que estas partículas tendem a ter comportamento de silte ou areia fina com pouca plasticidade ou coesão. Ao se compactar um solo adicionado de cimento com um certo teor de umidade, haverá uma cimentação de caráter químico que aumentará a intensidade no decorrer das reações de hidratação de cimento. A cimentação pode ser definida como a ligação ou encadeamento químico dos grãos de cimento vizinhos e de grãos de cimento e partículas de solo adjacentes a eles. Nos solos finos, os mecanismos estabilizadores levam ao surgimento de materiais hexagonais, gerados pelas ligações químicas entre as partículas de solo e os grãos de cimento. A matriz envolve fortemente as partículas conglomeradas e, ligando-se por sua vez as matrizes contíguas a ela, impede o deslizamento de umas sobre as outras, ou seja, gera ou aumenta a resistência ao cisalhamento. Ao mesmo tempo, o conjunto tende a tornar-se impermeável, impedindo que a água penetre no interior das células, o que poderia provocar a sensibilização e conseqüente expansão volumétrica das partículas finas não estabilizadas que se encontram, em maior ou menor quantidade, envolta pelos dos cimentados provocando a explosão da estrutura. A resistência à compressão é função direta dos elos cimentados, posto que as partículas finas do interior pouco ou nada contribuem para isso. Os solos finos exigem, em geral, teores elevados de cimento para a estabilização, tanto mais elevados quanto maior a plasticidade do solo. Já os solos granulares se estabilizam pela cimentação nos pontos de contato entre seus agregados grosseiros exigindo um teor menor de cimento, pois são mais insensíveis aos efeitos de expansão e retração volumétrica através de molhagem e secagem. A formação de estruturas cimentadas se dá por um processo similar ao que ocorre no concreto de cimento Portland, guardadas as diferenças, ou seja, no solo estabilizado com cimento a pasta não ocupa todos os vazios, por serem as quantidades de água e cimento muito inferiores às que formam a pasta do concreto e, por isso, a estrutura resultante é muito menos resistente do que o concreto.

3.12.4. Produção de Tijolos e Blocos de Solo-Cimento

Os tijolos e blocos de solo-cimento são alternativos atraentes para a construção com alvenaria. Após um curto período de cura, apresentam resistência à compressão simples nos mesmos valores dos correspondentes cerâmicos. As principais vantagens desses componentes de solo-cimento são que normalmente são produzidos no próprio canteiro de obras e com solo da região do local de aplicação; a regularidade de suas formas geométricas e acabamento requerem pouca argamassa para assentamento; são recomendáveis para paredes com elementos à vista; dispensam a queima, economizando combustível; e dispensam mão-de-obra especializada (ABCP, 1989).

3.12.5. As Propriedades do Solo no Compósito Solo - Cimento

De forma geral, todos os solos se prestam para o compósito de solo - cimento, desde que dosados convenientemente. Entretanto o emprego de um solo depende da viabilidade econômica, assim sendo é preciso levantar uma restrição: solos que dificultam as operações de execução em larga escala. Esta questão está correlacionada com a capacidade do equipamento utilizado, quantidade das partículas graúdas retidas na peneira de 4,8 mm superior a 45%, caso em que a mistura solo miúdo - cimento não preencheria os vazios por elas formados (PINTO, 1989).

3.12.6. A dosagem do Solo-Cimento

Através de ensaio análogo ao ensaio normal de compactação desenvolvido por PROCTOR (1933) é possível determinar a umidade ótima de compactação assim como determinar a massa específica aparente máxima. Já a fixação do teor de cimento no compósito solo-cimento depende mais dos objetivos a que propõe a mistura. PINTO (1989) exemplifica um caso de um solo misturado com pequena quantidade de cimento vai apresentar um valor de CBR (índice de suporte Califórnia) superior a qualquer outro material empregado na pavimentação flexível, graças a coesão química desenvolvida pelo cimento. No entanto, a ligação entre partículas uma vez quebrada jamais terá a mesma coesão, portanto a orientação para a dosagem de cimento deve estar baseada na permanência da coesão quando o solo-cimento for solicitado por fatores externos (ação do tráfego, esforços provenientes das variações climáticas). Assim técnicos do PCA criaram os ensaios de durabilidade no qual corpos de prova são submetidos a ciclos de molhagem secagem, de tal forma, a correlação entre estes resultados e os obtidos nas estradas permitirem fixar o teor de cimento.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. SOLO UTILIZADO

Foi escolhido um solo que apresenta textura média (teor de argila entre 15 e 35%), pois além de apresentar propriedades adequadas para um compósito solo-cimento, este tipo de solo ocorre com relativa abundância em áreas próximas do perímetro urbano de Piracicaba. São solos provenientes de coberturas Cenozóicas correlatas à Formação Rio Claro, ou solos provenientes da Formação Pirambóia que abrange grande parte do oeste do município de Piracicaba. Para efeito deste trabalho optou-se pelos primeiros em função de sua menor distância do centro urbano de Piracicaba. Este tipo de solo é pedologicamente denominado de Latossolo Vermelho Amarelo de acordo com a carta pedológica semi detalhada do Estado de São Paulo na escala 1:100.000, folha de Piracicaba SF-23-Y-A-IV (IAC,1989).

4.2. O RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADO ESCOLHIDO.

Desde o dia 02 de fevereiro de 2004, por imposição da resolução 307 do CONAMA, todo o RCD gerado em Piracicaba é deslocado para uma área de descarga através das inúmeras caçambas trazidas pelos coletores credenciados. Oficialmente encerrou o período de descarga em bota - foras oficiais ou não. Todo este material passa por uma triagem onde são separados os materiais de diversas naturezas: papeis, madeiras, sucatas metálicas, pneus, utensílios domésticos inutilizados etc. Os materiais recicláveis são então transportados para a central de reciclagem localizada nas dependências da EMDHAP. Atualmente chegam na EMDHAP aproximadamente 130 toneladas de material para reciclagem, e não há como receber mais que isso pois o equipamento reciclador não tem capacidade para reciclar uma quantidade maior.

A usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição instalada em Piracicaba é composta basicamente por um alimentador completo com moega, mesa e chassis; um britador de mandíbulas; um moinho de martelos e um sistema de peneiramento e bicas para saída de agregados graúdos (bica corrida), pedriscos e agregados miúdos.

Os agregados obtidos pela reciclagem do RCD na central recicladora da EMDHAP são de dois tipos principais conforme descrito a seguir:

a) agregado rico em cimento de coloração cinza, obtido pela reciclagem de RCD originário de concreteiras e, portanto praticamente isento de material cerâmico, de alvenaria, argamassa, solo e outros e que vem sendo utilizado na confecção de blocos e pisos intertravados de concreto em uma fábrica bloqueteira anexa à central recicladora.

b) agregado misto de coloração avermelhada, obtida pela reciclagem de RCD misto rico em material cerâmico, alvenaria, argamassa, solo etc e que vem sendo utilizado em obras viárias como sub-base, base ou tratamento primário realizadas pela SEMOB e em obras de instalação de dutos realizados pela SEMAE.

Os dois tipos de agregados podem possuir composição granulométrica variada, tanto grãos como miúdos, pois o equipamento reciclador permite esta variação, sendo o diâmetro máximo de 75mm e a peneira de menor abertura com diâmetro de 3,6mm. Desta forma, conforme a solicitação, a recicladora produz agregados tipo bica corrida, agregados grãos selecionados (9,8 à 75mm), pedriscos (3,6 à 9,8mm) e agregados miúdos ($\phi < 3,6\text{mm}$).

O agregado escolhido para a pesquisa foi de tipo misto avermelhado e miúdo ($\phi < 3,6\text{ mm}$) pois é o que mais se aproxima das características de um solo para a produção do compósito solo-cimento.

4.3. CIMENTO UTILIZADO

O cimento utilizado foi o do tipo CP II-E-32 (Cimento portland composto com escória de acordo com a NBR 11578) da marca VOTORAN.

4.4. COLETA DE AMOSTRAS

Para uma perfeita caracterização dos materiais utilizados neste trabalho foi realizada uma amostragem representativa de solo e várias amostragens do RCD reciclado.

4.4.1 Coleta de Amostra de Solo e Obtenção de Sub - Amostras

As amostras do solo escolhido foram retiradas entre 1 e 2 metros de profundidade (Foto 1) sendo que, após exaustiva homogeneização foi realizada uma divisão em oito partes iguais. As partes foram acondicionadas em caixas plásticas

perfazendo um total de aproximadamente 700 Kg, quantidade suficiente para o desenvolvimento dos trabalhos.



Foto 1. Coleta de amostra do solo utilizado na pesquisa. Anel viário de Piracicaba próximo ao Ceasa.

4.4.2. Coleta de Amostras de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados

O processo de reciclagem do RCD em Piracicaba ocorre sem um cronograma definido, sem horários definidos e sem estocagem. A reciclagem busca atender às necessidades da SEMOB, do SEMAE e da EMDHAP e conforme o material é reciclado, imediatamente é transportado para os locais onde será utilizado. Assim a amostragem foi realizada de forma ágil, onde houve uma perfeita comunicação entre o gerente de produção da usina recicladora e a equipe de coleta de amostra.

A amostragem foi realizada de acordo com os seguintes procedimentos:

a) durante a primeira quinzena para cada lote reciclado foram coletados aproximadamente 100kg do material de acordo com a norma técnica NBR 7216 “Amostragem de Agregados” (ABNT,1982) para coleta em depósitos.

b) ao término da primeira quinzena, as amostras foram reunidas, exaustivamente homogeneizadas e divididas em oito partes (Foto 2) exatamente iguais

produzindo uma quantidade total, algo em torno de 700kg, quantidade suficiente para atender a todas as etapas da pesquisa, tanto para caracterização química como para a caracterização física e também para as análises mecânicas subseqüentes.

c) Nas cinco quinzenas seguintes, dia a dia, para cada lote foi feito uma coleta e ao término de cada quinzena estas amostras foram reunidas para uma nova caracterização química e física para efeito de estudo de variabilidade.

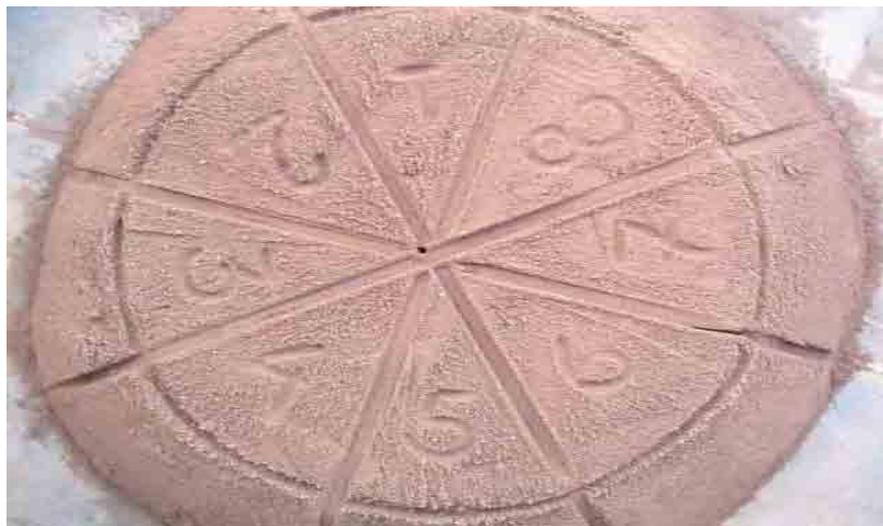


Foto 2. Quarteamento do RCD Reciclado miúdo do tipo misto e utilizado na pesquisa.

Atendendo aos procedimentos citados anteriormente foi possível uma análise de variabilidade dos entulhos reciclados para futuros estudos, tanto de caráter ambiental como de caráter tecnológico.

4.5. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO RCD RECICLADO

A caracterização química dos resíduos é de extrema importância para o estudo de aplicabilidade como agregado em construção civil e permite estabelecer o grau de periculosidade e precauções necessárias para o manuseio.

Para a realização desta caracterização foi importante uma amostragem adequada que permitiu uma avaliação da variabilidade dos resíduos reciclados. A amostragem foi realizada de acordo com a NBR 7216 “Amostragem de Agregados” (ABNT,1982) conforme citado em 4.4.2. a).

Os parâmetros analisados foram confrontados com os valores máximos permitidos pela norma técnica NBR 10004 “Classificação de Resíduos Sólidos” (ABNT,1987).

4.5.1. Ensaio de Lixiviação

Realizado de acordo com a norma técnica NBR 10005 “Ensaio de Lixiviação” (ABNT, 1987), ilustrado na foto 3. Este ensaio visa identificar a concentração de substâncias que se separam do material por meio de lavagem e percolação (CARNEIRO et al, 2001).



Foto 3. Obtenção dos extratos lixiviados

4.5.2. Ensaio de Solubilização

Realizado de acordo com a norma técnica NBR 10006 da “Ensaio de Solubilização” (ABNT, 1987), ilustrado na foto 4. Este ensaio busca identificar a concentração de substâncias solúveis em água presente no material (CARNEIRO et al,2001).



Foto 4. Obtenção dos extratos solubilizados

4.5.3. Extração do Digerido para Massa Bruta

A digestão do resíduo foi realizada de acordo com o Method 3050 - B “ Acid Digestion of Sediments Sludges and Soils” (EPA,1996), ilustrado na foto 5. Este tipo de digestão não garante a dissolução completa das amostras, pois a matéria é oxidada por ácidos em altas temperaturas, liberando os metais ligados a fração de óxidos e a outras frações minerais, com exceção dos silicatos. No entanto, os metais que não foram liberados dos silicatos através dos ácidos em alta temperatura, provavelmente nunca serão desprendidos para o meio ambiente.



Foto 5. Obtenção dos extratos digeridos

4.5.4. Análise dos Parâmetros Químicos

Os elementos químicos, com exceção do Cádmio (dos extratos solubilizados), do Potássio e Sódio (dos extratos lixiviados e solubilizados), foram analisados através de Espectrometria de Plasma induzido em argônio (Sistema ICP- AES: Inductively Couple Plasma - Atomic Emission Spectrometry). O espectrômetro de emissão atômica utilizado foi da marca Jobin Yvon, modelo JY 50 P, simultâneo com sistema de conexão de fundo e acoplado a amostrador automático Gilson. Os elementos determinados por este sistema foram o Alumínio, Boro, Cálcio, Cádmio (apenas dos extratos lixiviados e digeridos), Chumbo, Cromo, Ferro, Magnésio, Manganês, Níquel, Fósforo, Zinco, Vanádio, Enxofre, Molibdênio e Cobre.

Os elementos Potássio e Sódio (dos extratos lixiviados e solubilizados) foram analisados através de fotômetro de chamas Micronal .

O elemento químico Cádmio (do extrato solubilizado) foi analisado através de espectrofotometria de emissão óptica com fonte de plasma acoplado indutivamente (Sistema ICP-OES) com equipamento marca GBC.

Os demais compostos foram analisados através de procedimentos preconizados no “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 20 th Edition (CLESCERI e OUTROS,1998).

A dureza total (CaCO_3) determinada dos extratos solubilizados foi analisada seguindo os procedimentos citados por MACÊDO (2003).

4.5.5. Teor de Matéria Orgânica e Sólidos Voláteis

O conteúdo orgânico e de sólidos voláteis foram verificados pelo processo de queima em mufla a 600°C conforme modelo apresentado por SILVA (1997). Este tipo de determinação de matéria orgânica e sólidos voláteis é elaborado de forma qualitativa, ou seja, simples detecção.

4.6. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO RCD RECICLADO

Uma perfeita caracterização física dos resíduos se faz necessária para a obtenção de misturas do compósito solo-cimento. Assim fatores como a composição granulométrica, conteúdo de materiais pulverulentos e certos parâmetros físicos do resíduo utilizado como agregado devem ser analisados para obtenção de uma mistura perfeita no compósito solo-cimento.

4.6.1. Massa Específica dos Grãos e Massa Unitária do Agregado em Estado Solto

A massa específica dos grãos foi determinada de acordo com a norma técnica NBR 6508 “Solo: determinação da massa específica” (ABNT, 1984), ilustrado na foto 6. A massa unitária do agregado em estado solto foi determinada pela norma Técnica NBR 7251 “Agregado em estado solto - determinação da massa unitária” (ABNT, 1982).



Foto 6. Determinação da Massa Específica pelo Método do Picnômetro

4.6.2. Análise Granulométrica dos Agregados

Realizada de acordo com a norma técnica NBR 7217 “Agregados: determinação da composição granulométrica”(ABNT,1987).

4.6.3. Teor de Materiais Pulverulentos

Determinado de acordo com a norma técnica NBR 7219 “Agregados: determinação do teor de materiais pulverulentos” (ABNT,1982).

4.6.4. Análise Granulométrica Combinada

Realizada de acordo com a norma técnica NBR 7181 “Análise granulométrica combinada de Solos” (ABNT,1984), ilustrado na foto 7.



Foto 7. Ensaio de Granulometria Combinada (sedimentação)

4.6.5. Absorção d'Água de Agregado Miúdo

Determinada de acordo com a norma técnica NBR 9777 "Absorção de água em agregados miúdos (ABNT, 1987).

4.7. CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS RESÍDUO/SOLO COMO CONSTITUINTES DE COMPÓSITO SOLO-CIMENTO

A viabilidade técnica e econômica da aplicação do resíduo como constituinte de compósito solo-cimento está condicionada à capacidade de se utilizar um volume expressivo de resíduo. O estudo foi realizado com base na diluição do resíduo no solo escolhido nas seguintes proporções resíduo/solo: 0, 25, 50, 75 e 100%, que para efeito prático chamaremos de misturas M-0%, M-25%, M-50%, M-75% e M-100%, respectivamente.

Para a caracterização das misturas acima citadas, foram realizados vários ensaios descritos abaixo para cada proporção. A caracterização física destas misturas resíduo/solo permitiu uma classificação de acordo com a norma D3282: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes (ASTM, 2004), que facilitou o estudo de dosagem de cimento no compósito solo-cimento. Certas características das misturas resíduo/solo determinam o comportamento mecânico do compósito solo - cimento.

4.7.1. Massa Específica dos Grãos

Determinada de acordo com a norma técnica NBR 6508 "Solo: determinação da massa específica"(ABNT,1984).

4.7.2. Análise Granulométrica Combinada

Realizada de acordo com a norma técnica NBR 7181 "Solo: Análise granulométrica" (ABNT,1984).

4.7.3. Grau de Floculação e Grau de Dispersão

Determinado conforme método 1-18 “ Grau de Floculação e Dispersão” (EMBRAPA,1997).

4.7.4. Limites de Consistência

Determinados de acordo com as normas técnicas NBR 6459 “Solo: determinação do limite de liquidez” (ABNT,1984), NBR 7180 “ Solo- determinação do limite da plasticidade” (ABNT,1984), e NBR 7183 “Solo- determinação do limite de contração’ (ABNT,1984), ilustrados nas fotos 8, 9 e 10.



Fotos 8, 9 e 10. Execução dos ensaios de Limites de Consistência (Liquidez, Plasticidade e Contração)

4.7.5. Estudo de Compactação

Realizado de acordo com a norma técnica NBR 7182 “Solo: Ensaio de Compactação”(ABNT, 1986), ilustrado na foto 11.



Foto 11. Ensaio de compactação (Proctor)

4.7.6. Classificação Física das Misturas Resíduo/Solo

A classificação das misturas resíduo/solo conforme a norma D3282 “Standard Practice for Classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes” (ASTM,2004) e que pode ser observada pelo quadro 10, se dá baseada em parâmetros analisados de 4.7.1. à 4.7.4.

Quadro 10 - Classificação das misturas resíduo/solo. conforme Norma D 3282: Standard Practice for Classification of Soils and Soil - Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes (ASTM, 2004)

GRUPOS	Solos Granulares							Solos de Silte Argila			
	% passando na peneira de 0,074mm ≤35							% passando na peneira de 0,074mm > 35			
	A1		A3		A2			A4	A5	A6	A7
A1-a	A1-b			A2-4	A2-5	A2-6	A2-7			A7-5	A7-6
Porcentagem passando nas peneiras: 2mm(n.10) 0,42mm(n.40) 0,074mm(n.200)	50 máx. 30 máx. 16 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín 10 máx	35 máx	35máx	35máx	35máx	36 mín.	36 mín	36 mín.	36 mín
Características da fração passando na peneira de 0,42mm											
Límite de Liquidez				40máx	41mín	40máx	41mín	40máx	41mín	41mín	41mín
Índice de plasticidade	6máx		NP	10máx	10máx	11mín	11mín	10máx	11mín	(LL-30) máx	(LL-300) mín
Índice de grupo *	0	0	0	0	4máx			8máx	12máx	16máx	20máx
Constituintes usuais	Fragmentos de pedras, pedregulho e areia		Areia fina	Pedregulho areia, argiloso ou siltosos				Solos Siltosos		Solos Argilosos	
Funcionamento como sub-base	Excelente → Bom							Fraco → Pobre			

* índice de grupo (IG) $\rightarrow IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd$, onde

$a = (\% \phi < 0,074\text{mm}) - 35$

obs: $\% < 35 \rightarrow \% = 35$

$\% > 75 \rightarrow \% = 75$

$b = (\% \phi < 0.074\text{mm}) - 15$

obs: $\% < 15 \rightarrow \% = 15$

$\% > 55 \rightarrow \% = 55$

$c = LL - 40$

obs: $LL < 40\% \rightarrow LL = 40$

$LL > 60\% \rightarrow LL = 60$

$d = IP - 10$

obs: $IP < 10 \rightarrow IP = 10\%$

$IP > 30 \rightarrow IP = 30\%$

4.8. ESTUDO DE COMPACTAÇÃO E DOSAGEM DO COMPÓSITO SOLO-CIMENTO

Foram selecionadas duas das cinco misturas resíduo/solo citadas em 4.7. Para cada uma destas misturas selecionadas foram realizados o estudo de compactação e dosagem de cimento do compósito solo-cimento.

A norma técnica NBR 12253 “Solo-cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento” (ABNT, 1992) estabelece critérios para escolha do teor de cimento baseada na classificação do solo (mistura resíduo/solo) de acordo com a norma técnica D3282 “Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes” (ASTM, 2004). O critério de escolha definitiva do teor de cimento foi baseada nos ensaios de compactação de solo-cimento, realizados de acordo com a norma técnica NBR 12023 “Solo-cimento: ensaio de compactação” (ABNT,1992) com três teores de cimento diferentes, sendo o primeiro com 2% a menos do valor sugerido na NBR 12253, o segundo no valor sugerido e o terceiro com 2% a mais que o sugerido na mesma norma. Para efeito de economia o teor de cimento escolhido foi o menor deles e que apresentou resistência à compressão mínima especificada.

4.9. MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

Para a escolha do teor de cimento descrito em 4.8, foram moldados cinco corpos de prova para cada teor de cimento das duas misturas também citada em 4.8., perfazendo um total de 30 corpos de prova. A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma técnica NBR 12024 “Solo-cimento: moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos” (ABNT, 1992).

Com o teor de cimento escolhido, para cada uma das duas misturas, agora denominadas de compósitos, foram moldados para cada uma delas mais 26 corpos de prova, que foram utilizados da seguinte maneira: três corpos de prova para ensaio de absorção de água; seis corpos de prova para resistência aos 7 dias; seis corpos de prova para resistência aos 28 dias; seis corpos de prova para resistência aos 60 dias; seis corpos de prova para resistência aos 90 dias; três corpos de prova para ensaio de durabilidade; quatro corpos de prova para caracterização química e um corpo de prova ilustrativo. Os ensaios realizados de 4.10. à 4.13. referem -se a cada um dos dois compósitos escolhidos em 4.8.

4.10. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CORPOS DE PROVA

Realizada de acordo com a norma técnica NBR 13555 “Solo-cimento: determinação da absorção de água” (ABNT, 1996), ilustrado na foto 12.



Foto 12. Ensaio de absorção de água dos corpos de prova

4.11. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS DE PROVA

Realizados de acordo com a norma técnica NBR 12025 “Solo-cimento: determinação da compressão simples de corpos de prova cilíndricos” (ABNT,1990) aos 7, 28, 60 e 90 dias de moldagem, ilustrado na foto 13.



Foto 13. Ensaio de resistência à compressão

4.12. ENSAIO DE DURABILIDADE POR SECAGEM E MOLHAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Realizado de acordo com a norma técnica NBR 13554 “Solo-cimento: ensaio de durabilidade por molhagem e secagem” (ABNT, 1996), ilustrado na foto 14.



Foto 14. Processo de escovação durante o ensaio de durabilidade.

4.13. ANÁLISE QUÍMICA DOS COMPÓSITOS

A caracterização química de um resíduo vai demonstrar os parâmetros que se apresentam em quantidade maior que os estabelecidos pela norma técnica NBR 10004 “Classificação de resíduos sólidos” (ABNT, 1987). Assim os compósitos que se utilizam destes resíduos também precisam ser analisados sob o aspecto químico para comprovar a eficiência do encapsulamento dos referidos parâmetros. A metodologia de caracterização química destes compósitos deve ser a mesma empregada na caracterização química do resíduo citado em 4.5. Para esta fase analisar-se-á somente os parâmetros que apresentaram valores quantitativos superiores aos estabelecidos pela norma acima citada.

5. RESULTADOS

5.1. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO RCD RECICLADO

Os extratos lixiviados, solubilizados e digeridos foram preparados no Laboratório de Resíduos da EEP- Escola de Engenharia de Piracicaba. No mesmo local foram analisados a matéria orgânica e sólidos voláteis da massa bruta e a dureza total (CaCO_3) dos extratos solubilizados.

No IAC - Instituto Agrônomo de Campinas, foram analisados os seguintes parâmetros químicos: bário, cádmio (apenas extratos lixiviados e digeridos), chumbo, cromo, alumínio, cobre, ferro, manganês, cálcio, sódio (somente extratos lixiviados e solubilizados), potássio (somente extratos lixiviados e solubilizados), magnésio, molibdênio (somente extrato lixiviado e solubilizado), níquel, enxofre, zinco, fósforo (somente extrato digerido) e vanádio (somente extrato digerido).

Já no CEA- Centro de Estudos Ambientais da Unesp - Rio Claro, foram analisados os seguintes parâmetros : cádmio (apenas extrato solubilizado), fluoretos (somente extratos lixiviados e solubilizados), nitrato (somente extrato solubilizado), cloretos (apenas extrato solubilizado) e sulfatos (apenas extrato solubilizado).

Os resultados apresentados nas tabelas 1 e 2 correspondem ao do Lote I do RCD reciclado, utilizado efetivamente no estudo dos compósitos.

Por problemas técnicos este trabalho não contemplou as análises dos elementos químicos: arsênio, berílio, selênio, prata e mercúrio. Da mesma forma, também não foram analisados os compostos: cloretos, fenóis e surfactantes.

Tab.1- Resultados analíticos dos extratos lixiviados e solubilizados do RCD reciclado (Lote I)

Parâmetros	Unidade	Resultados Analíticos do RCD Reciclado								Valores máximos permitidos * V.M.P.	
		Lixiviado				Solubilizado				Lixiviado	Solubilizado
		Am 1	Am 2	Am 3	Média	Am 1	Am 2	Am 3	Média		
Bário	mg/L	**BC	**BC	**BC	**BC	**BC	**BC	**BC	**BC	100,00	1,00
Cádmio	mg/L	0,032	0,011	0,048	0,030	<0,004	—	—	<0,004	0,50	0,005
Chumbo	mg/L	0,022	0,027	0,062	0,037	0,063	0,011	0,031	0,035	5,00	0,05
Cromo	mg/L	0,009	0,002	0,000	0,004	0,027	0,027	0,007	0,020	5,00	0,05
Fluoretos	mg/L	0,79	—	—	0,79	0,80	—	—	0,80	150,00	1,50
Nitrato (N)	mg/L	—	—	—	—	2,71	—	—	2,71	—	10
Alumínio	mg/L	2,728	2,645	2,330	2,568	0,022	0,013	0,030	0,022	—	0,20
Cloretos	mg/L	—	—	—	—	15,6	—	—	15,6	—	250,00
Cobre	mg/L	0,000	0,004	0,018	0,007	0,005	0,004	0,004	0,004	—	1,00
Ferro	mg/L	0,021	0,025	0,012	0,019	0,010	0,001	0,005	0,005	—	0,30
Manganês	mg/L	200,72	196,01	212,61	203,11	0,012	0,018	0,018	0,016	—	0,10
Cálcio	mg/L	1091,2	1079,0	1104,4	1091,5	144,56	150,29	152,25	149,03	—	—
Sódio	mg/L	12,68	12,68	12,68	12,68	30,23	31,20	30,23	30,55	—	200,00
Potássio	mg/L	26,02	22,95	24,48	24,48	51,01	52,03	53,56	52,20	—	—
Magnésio	mg/L	128,07	126,22	135,26	129,85	15,29	15,95	15,80	15,68	—	—
Molibdênio	mg/L	0,026	0,046	0,033	0,035	0,041	0,035	0,029	0,035	—	—
Níquel	mg/L	0,008	0,007	0,011	0,009	0,000	0,012	0,029	0,014	—	—
Enxofre	mg/L	28,37	30,95	30,21	29,84	70,30	74,13	74,02	72,82	—	—
Zinco	mg/L	0,608	0,248	0,184	0,347	0,004	0,007	0,004	0,005	—	5,00
Sulfatos	mg/L	—	—	—	—	360	—	—	360	—	400,00
Dureza Total	mg/L	—	—	—	—	444	460	—	452	—	500,00
Ph inicial	—	9,80	9,82	9,83	9,82	—	—	—	—	—	—
Ph final	—	5,11	5,12	5,13	5,12	—	—	—	—	—	—
Vol. Ácido Acético	cm ³	295	295	295	295	—	—	—	—	—	—
Tempo de lixiviação	Hora	21,5	21,5	21,5	21,5	—	—	—	—	—	—

*V.M.P= Valores máximos permitidos pela NBR 10004 “ Classificação de Resíduos Sólidos” (ABNT, 1987) baseados nas listagens nº7 (Lixiviados) e nº8 (Solubilizados)

** BC = Baixa concentração não permitindo leitura

Tab.2- Resultados analíticos do extrato digerido (massa bruta) do RCD reciclado (Lote I)

Parâmetros	Unidade	Resultados analíticos de massa bruta do RCD reciclado				Valores máximos permitidos *V.M.P.
		Am 1	Am 2	Am 3	Média	
Bário	mg/Kg	186,6	187,8	186,3	186,9	—
Cádmio	mg/Kg	8,0	8,0	6,6	7,5	—
Chumbo	mg/Kg	26,2	252,0	6,5	94,9	1000,0
Cromo	mg/Kg	9,9	7,4	5,1	7,5	100,0(VI)
Alumínio	mg/Kg	14421	13498	12963	13627	—
Cobre	mg/Kg	19,7	15,9	17,4	17,7	—
Ferro	mg/Kg	9997	9544	9101	9547	—
Manganês	mg/Kg	220	201	208	210	—
Cálcio	mg/Kg	25371	23854	26044	25090	—
Magnésio	mg/Kg	5778	5551	6060	5796	—
Níquel	mg/Kg	3,4	4,3	7,5	5,1	—
Enxofre	mg/Kg	412,2	220,1	205,3	279,2	—
Zinco	mg/Kg	86,7	67,8	60,6	71,70	—
Fósforo	mg/Kg	226,1	229,1	229,4	228,2	—
Vanádio	mg/Kg	44,2	41,7	43,6	43,2	1000
**M.O. + S.V.	mg/Kg	50000	54000	51000	51700	—

*V.M.P.= Valores máximos emitidos pela NBR 10004 “ Classificação de Resíduos Sólidos” (ABNT,1987) baseados nas listagem nº9

** M.O. + S.V. = Matéria orgânica + Sólidos valáteis

5.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO RCD RECICLADO

Para esta caracterização, os trabalhos foram desenvolvidos nos laboratórios da E.E.P.-Escola de Engenharia de Piracicaba (Laboratórios de Solos, Materiais de Construção Civil e de Resíduos). Os parâmetros analisados foram os seguintes: massa específica dos grãos e massa unitária no estado solto (Tabela 3); Absorção de água (Tabela 4); Análise granulométrica de agregados (Tabela 5 e Figura 11); Teor de materiais pulverulentos (Tabela 6); Análise granulométrica combinada (Tabelas 7 e 8 e Figura 12).

Tab. 3- Massa específica dos grãos e massa unitária no estado solto do RCD reciclado.

AMOSTRA N^o	Massa específica dos Grãos (g/cm³)	Massa unitária (Kg/dm³)
1	2,718	1,197
2	2,730	1,208
3	2,717	1,202
4	2,659	—
Média	2,706	1,202

Tab. 4 - Absorção de água do RCD reciclado

Amostra N^o	Absorção de água de agregados miúdos (%)
1	6,77
2	6,09
3	6,26
Média	6,37

Tab. 5- Análise granulométrica do RCD Reciclado

Peneiras	MATERIAL RETIDO													% Ret.Acumulada			
	Massa (g)																
Nº	PORCENTAGEM(%)													% média da Fração * Com correção			
	Abertura (mm)	Am1	Am2	Am3	Am4	Média	Am1	Am2	Am3	Am4	Média	Am1	Am2		Am3	Am4	Média
1/4"	6,3																* com correção
4	4,8	0,17	0,48	0,62	0,78	0,51	0,03	0,10	0,12	0,16	0,10	0,03	0,10	0,12	0,16	0,10	0,09
8	2,4	19,40	27,05	28,91	19,28	23,66	3,88	5,41	5,78	3,86	4,73	3,91	5,51	4,02	4,83	4,73	4,03
16	1,2	46,46	62,88	63,05	62,59	58,75	9,30	12,56	12,60	12,52	11,75	13,21	18,07	16,54	16,58	11,75	10,01
30	0,6	96,02	104,75	98,91	91,47	97,79	19,20	20,95	19,78	18,29	19,56	32,41	39,02	34,83	36,14	19,56	16,66
50	0,3	142,78	132,23	131,98	141,8	137,20	28,56	26,45	26,4	28,36	27,44	60,96	65,47	64,68	63,19	63,58	23,37
100	0,15	123,86	114,34	115,91	119,05	118,29	24,77	22,87	23,18	23,81	23,66	85,73	88,34	87,86	87,00	87,24	23,66
200	0,074	46,14	35,59	37,70	41,22	40,15	9,23	7,12	7,55	8,24	8,03	94,96	95,46	95,41	95,24	95,27	8,03
FUNDO		25,17	22,68	22,92	23,81	23,65	5,03	4,54	4,59	4,76	4,73	100	100	100	100	100	18,84

Diâmetro Máximo= 2,4 mm
 Módulo de Finura=1,78
 * Considerando materiais pulverulentos

Tab. 6 - Teor de materiais pulverulentos do RCD reciclado (%)

Análise de Materiais Pulverulentos do RCD Reciclado	
Amostra 1	18,25
Amostra 2	18,36
Amostra 3	19,35
Amostra 4	19,38
Média	18,84

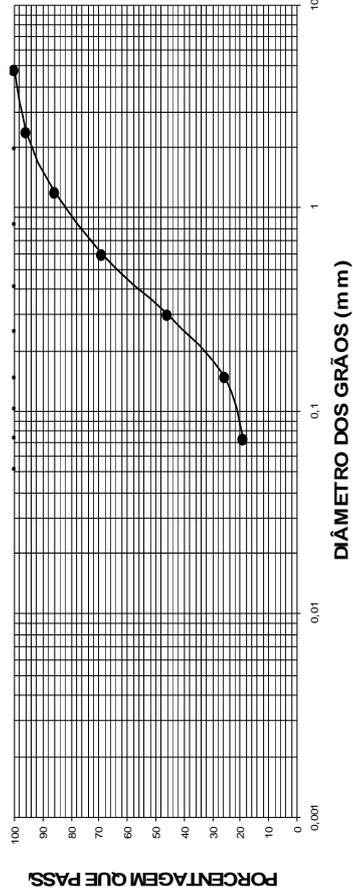


Fig. 11- Curva granulométrica de agregado do RCD reciclado

Tab. 7 - Análise granulométrica combinada do RCD reciclado

Amostra	Material Passante (%)																				
	ϕ (mm)																				
	4.8	2.00	1.20	0.60	0.42	0.25	0.15	0.075	0.065	0.047	0.033	0.023	0.017	0.012	0.0085	0.0060	0.0042	0.0030	0.0021	0.0013	0.00092
1	99.93	96.44	90.86	78.80	71.96	54.16	37.55	26.35	26.23	24.60	22.97	21.34	18.90	16.78	15.64	14.83	12.52	11.73	10.92	10.10	8.96
2	99.86	95.06	89.24	76.33	69.07	50.75	34.29	23.45	23.34	22.54	19.34	18.54	16.95	15.35	13.75	12.95	12.79	11.99	9.91	9.59	8.92
3	99.93	96.95	90.98	75.74	67.42	49.74	34.75	22.97	22.86	21.54	19.90	18.25	16.61	15.79	13.32	13.32	12.33	9.87	9.37	9.37	7.40
4	99.94	97.20	93.09	80.69	72.75	55.05	39.58	27.27	27.21	25.54	23.03	22.20	19.36	18.86	18.03	17.53	16.02	11.85	11.52	10.52	9.68
Média	99.92	96.41	91.04	77.89	70.30	52.43	36.54	25.01	24.91	23.56	21.31	20.08	17.96	16.70	15.19	14.66	13.42	11.36	10.43	9.90	8.74

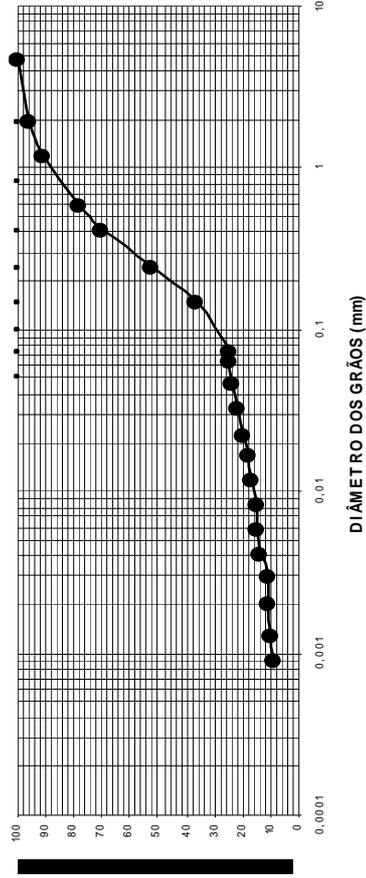


Fig.12 Curva granulométrica combinada do RCD reciclado

Tab. 8- Porcentagem das Frações do RCD reciclado

Int. (mm)	Fração	%
4,8 - 76	Pedregulho	0,08
2,0 - 4,8	Areia Grossa	3,51
0,42 - 2,0	Areia média	26,11
0,06 - 0,42	Areia fina	46,30
0,002 - 0,06	Silte	13,75
< 0,002	Argila	10,25

NBR 6502

Um solo granular é considerado bem graduado quando as partículas menores ocupam vazios correspondentes às maiores, criando um entrosamento que acaba resultando em maior resistência e menor compressibilidade, conferindo melhor comportamento sob o ponto de vista de engenharia. Esta característica dos solos granulares é expressa pelo coeficiente de não uniformidade definido pela relação: $CNU = D_{60}/D_{10}$, onde D_{60} é o diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas e D_{10} de forma análoga é o diâmetro que, na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 10%. Quanto maior for o valor de CNU mais bem graduada é a areia. Outro coeficiente não muito utilizado é o coeficiente de curvatura definido pela relação: $CC = (D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60})$ que detecta melhor o formato da curva granulométrica e que permite identificar eventuais descontinuidades (PINTO, 2002). Assim para a curva granulométrica da Fig. 11 temos:

$$CNU = D_{60} / D_{10} = 0,30 / 0,0014 = 214 \text{ e}$$

$$CC = D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60} = (0,12)^2 / 0,0014 \times 0,30 = 34$$

Um solo é considerado bem graduado quando o CNU é maior que seis e o CC esteja entre 1 e 3.

5.3. VARIABILIDADE DO RCD RECICLADO

Além da amostragem do RCD reciclado para os estudos dos compósitos (Lote I), foram realizadas mais cinco amostragens, conforme citado em 4.4.2. perfazendo um total de seis lotes, com a finalidade de observar as variações de alguns parâmetros físicos e químicos. Os parâmetros físicos determinados foram a massa específica dos grãos, distribuição granulométrica e limites de consistência que permitem a classificação do RCD reciclado de acordo com a norma técnica D - 3282 “ Standard Practice for Classification of Soils and Soil-aggregate mixtures for Highway Construction Purposes” (ASTM,2004) e a determinação de absorção de água de agregado miúdo. Os parâmetros químicos analisados foram os mesmos do lote I, utilizado nos estudos dos compósitos. Os resultados obtidos nesta etapa são apresentados nas tabelas 9, 10, 11, 12, 13 , 14, 15, 16, 17 e figura 13.

Tab. 9- Massa específica dos grãos de seis lotes de RCD reciclado

Lotes	Massa específica dos grãos (g/cm ³)
I	2,706
II	2,675
III	2,740
IV	2,721
V	2,672
VI	2,681
Média	2,699
S.D.*	0,028
C.V. %**	1,04

* SD= Desvio padrão

** CV= Coeficiente de variação = $S.D./\text{média} \times 100$ (%)

Tab. 10- Análise granulométrica dos seis lotes de RCD reciclado

LOTES	MATERIAL PASSANTE (%<) ϕ																				
	4,80	2,00	1,20	0,60	0,42	0,25	0,15	0,075	0,067	0,048	0,034	0,023	0,017	0,012	0,0087	0,0062	0,0044	0,0031	0,0023	0,0013	0,00094
I	99,92	96,41	91,04	77,89	70,30	52,43	36,54	25,01	24,91	23,56	21,31	20,08	17,96	16,70	15,19	14,66	13,42	11,36	10,43	9,90	8,74
II	99,91	93,48	87,02	75,41	67,77	49,05	33,51	22,21	21,68	19,57	17,97	16,86	15,64	13,81	12,86	12,47	11,59	9,70	9,20	8,82	7,43
III	99,94	92,06	87,28	76,46	68,52	50,02	33,93	22,08	21,95	19,30	17,70	16,26	15,17	13,76	12,67	10,84	9,94	8,93	8,73	7,96	5,77
IV	99,93	95,78	91,41	80,53	72,24	51,96	34,33	21,28	19,96	18,19	16,70	14,72	13,87	13,25	11,82	11,15	9,52	8,17	8,09	6,51	5,28
V	99,92	93,27	87,78	75,76	68,11	50,26	34,26	22,95	22,83	21,60	19,71	17,78	15,36	14,33	13,06	11,91	10,64	9,82	8,87	7,68	6,65
VI	99,90	92,60	85,61	72,94	61,35	47,72	31,91	21,47	21,26	19,88	17,41	15,54	14,61	13,07	11,97	10,96	10,35	9,17	8,77	5,93	5,32

Tab. 11- Frações granulométricas dos lotes de RCD reciclado

LOTES	FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS (%) E INTERVALOS EM mm					
	PEDREGULHO 4,8 - 76,0	AREIA GROSSA 2,0 - 4,8	AREIA MÉDIA 0,42 - 2,0	AREIA FINA 0,06 - 0,42	SILTE 0,002 - 0,06	ARGILA < 0,002
I	0,08	3,51	26,11	46,30	13,75	10,25
II	0,09	6,43	25,71	46,77	11,50	9,50
III	0,06	7,88	23,54	47,52	13,00	8,00
IV	0,07	4,15	23,54	52,84	11,40	8,00
V	0,08	6,65	25,16	47,61	12,00	8,50
VI	0,10	7,30	31,25	40,35	13,00	8,00

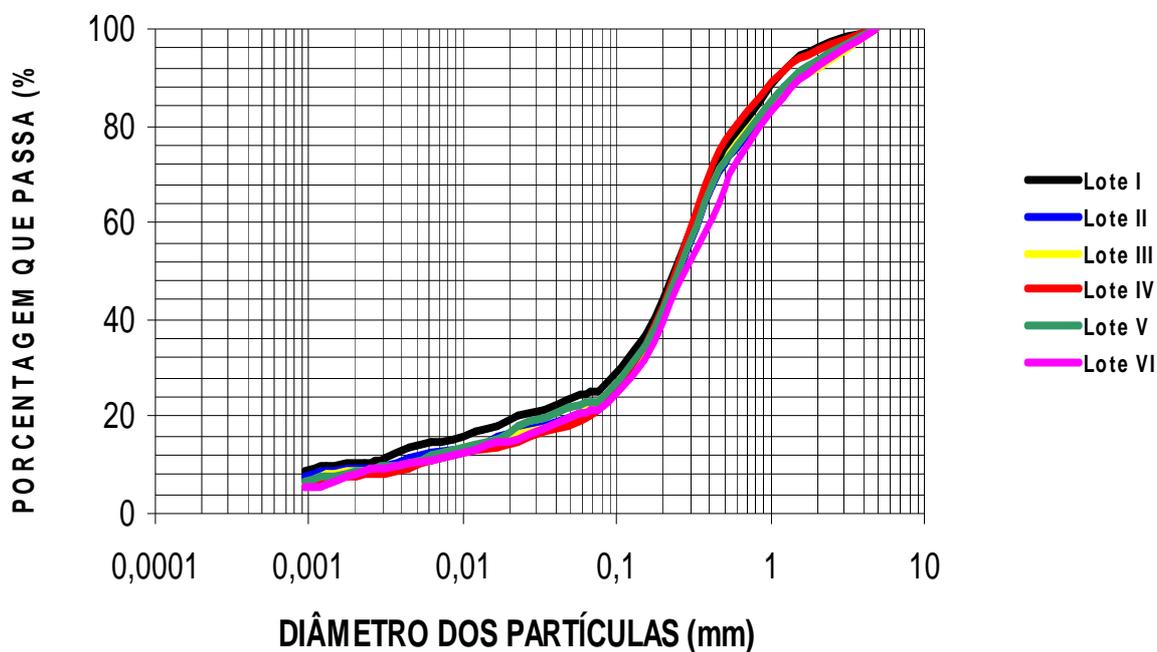


Fig. 13- Curvas granulométricas dos seis lotes de RCD reciclado

Tab.12- Limites de consistência (liquidez, plasticidade, índice de plasticidade e contração) dos seis lotes de RCD reciclado

LOTES	LIMITES (%)				
	* Liquidez	Plasticidade	Índice de plasticidade	Contração	Razão de contração
I	21	NP	NP	17	1,62
II	22	NP	NP	21	1,59
III	19	NP	NP	17	1,72
IV	20	NP	NP	19	1,67
V	22	NP	NP	20	1,63
VI	23	NP	NP	21	1,63

* O material não permite determinar os limites de liquidez e plasticidade, por serem excessivamente arenosos. Para efeito de avaliação, através de extrapolação em algumas tentativas, os valores apresentados de L.L. são aproximados.

Tab.13- Classificação dos seis lotes de RCD reciclado de acordo com a norma técnica D-3282 “ Standard Practice for Classification of Soils and Soil - Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes” (ASTM,2004)

LOTE	% Mat. c/ ϕ < 2mm	% Mat. c/ ϕ < 0,42 mm	% Mat. c/ ϕ < 0,074mm	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	I.G.	Classificação ASTM D-3282
I	96,41	70,30	25,01	21	NP	NP	0	A -2- 4
II	93,48	67,77	22,21	22	NP	NP	0	A- 2- 4
III	92,06	68,52	22,08	19	NP	NP	0	A- 2- 4
IV	95,78	72,24	21,28	20	NP	NP	0	A- 2- 4
V	93,27	68,11	22,95	22	NP	NP	0	A- 2- 4
VI	92,60	61,35	21,47	23	NP	NP	0	A- 2- 4

Tab.14- Absorção de água dos seis lotes de RCD reciclado

LOTE	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)
I	6,37
II	6,09
III	6,16
IV	4,61
V	6,85
VI	6,62

Tab.15- Resultados analíticos dos extratos lixiviados dos seis lotes de RCD reciclado

Parâmetros	Unidade	Resultados analíticos dos extratos lixiviados do RCD reciclado. Para cada lote, média de 3 amostras						* VMP	Dados estatísticos			
		Lotes							Lixiviado	Média	S.D	C.V. %
		I	II	III	IV	V	VI					
Bário	mg/L	**BC	**BC	**BC	**BC	**BC	**BC	100,00	**BC	—	—	
Cádmio	mg/L	0,030	0,032	0,033	0,018	0,042	0,007	0,50	0,027	0,012	46,14	
Chumbo	mg/L	0,037	0,048	0,018	0,035	0,018	0,019	5,00	0,029	0,013	43,44	
Cromo	mg/L	0,004	0,018	0,002	0,010	0,007	0,007	5,00	0,008	0,006	70,27	
Fluoretos	mg/L	0,79	0,62	1,08	0,89	0,75	0,74	150,00	0,812	0,158	19,42	
Alumínio	mg/L	2,568	0,968	1,672	1,174	1,212	1,013	—	0,435	0,609	42,45	
Cobre	mg/L	0,007	0,003	0,013	0,002	0,016	0,020	—	0,010	0,007	71,85	
Ferro	mg/L	0,019	0,011	0,007	0,018	0,002	0,002	—	0,010	0,008	76,48	
Manganês	mg/L	203,11	128,90	274,03	270,98	201,93	169,54	—	208,08	56,786	27,29	
Cálcio	mg/L	1091,5	1287,2	1224,8	1117,7	1295,6	1282,4	—	1216,53	90,613	7,45	
Sódio	mg/L	12,68	12,68	11,38	15,92	12,88	12,68	—	13,04	1,514	11,62	
Potássio	mg/L	24,48	26,02	26,02	31,12	26,53	27,04	—	26,87	2,252	8,38	
Magnésio	mg/L	129,85	121,28	151,53	148,69	182,69	171,39	—	150,91	23,478	15,56	
Molibdênio	mg/L	0,035	0,038	0,017	0,033	0,028	0,025	—	0,029	0,008	26,11	
Níquel	mg/L	0,009	0,014	0,014	0,005	0,004	0,018	—	0,011	0,006	52,25	
Enxofre	mg/L	29,840	25,312	59,565	44,958	29,785	30,964	—	36,74	13,026	35,46	
Zinco	mg/L	0,347	0,060	0,099	0,110	0,105	0,077	—	0,133	0,106	80,09	
pH inicial	—	9,82	9,90	10,44	9,84	10,54	10,68	—	10,20	0,392	3,84	
pH final	—	5,12	5,39	5,11	5,07	5,48	5,41	—	5,26	0,182	3,46	
Vol. Ácido acético	cm ³	295	327	293	272	330	328	—	—	—	—	
Tempo de Lixiviação	Horas	21,5	22,3	18,3	16	14,7	14,7	—	—	—	—	

* VMP= Valores máximos permitidos pela NBR 10004 “ Classificação de Resíduos Sólidos” (ABNT, 1987) baseados na listagem nº7

**B.C= Baixa concentração não permitindo leitura

Obs: Arsênio, Selênio, Prata, e Mercúrio - por problemas técnicos do aparelho não puderam ser analisados

Tab.16- Resultados analíticos dos extratos solubilizados dos seis lotes de RCD reciclado

Parâmetros	Unidade	Resultados analíticos dos extratos solubilizados do RCD reciclado. Para cada lote, média de 3 amostras						* VMP	Dados estatísticos			
		Lotes							Solubilizado	Média	S.D.	C.V. %
		I	II	III	IV	V	VI					
Bário	mg/L	B.C	B.C	B.C	B.C	B.C	B.C	1,00	**BC	-	-	
Cádmio	mg/L	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0,005	<0,004	-	-	
Chumbo	mg/L	0,035	0,044	0,028	0,019	0,073	0,026	0,05	0,038	0,0194	51,62	
Cromo	mg/L	0,020	0,028	0,058	0,015	0,041	0,052	0,05	0,036	0,0175	48,97	
Fluoretos	mg/L	0,80	0,89	1,33	1,15	0,92	0,45	1,50	0,923	0,302	32,76	
Nitrato (N)	mg/L	2,71	2,26	7,45	17,61	2,94	2,26	10	5,87	6,08	103,63	
Alumínio	mg/L	0,022	0,080	0,162	0,042	0,058	0,345	0,20	0,118	0,121	102,60	
Cloretos	mg/L	15,6	11,2	17,6	35,2	13,2	15,6	250,00	18,067	8,681	48,05	
Cobre	mg/L	0,004	0,006	0,037	0,009	0,006	0,008	1,00	0,012	0,0125	104,42	
Ferro	mg/L	0,005	0,003	0,003	0,005	0,004	0,005	0,30	0,004	0,001	23,60	
Manganês	mg/L	0,016	0,015	0,020	0,037	0,022	0,048	0,10	0,026	0,013	50,30	
Cálcio	mg/L	149,03	68,64	349,72	369,87	90,97	80,72	—	184,775	138,512	74,96	
Sódio	mg/L	30,55	27,95	30,23	18,20	31,53	34,13	200,00	28,765	5,550	19,30	
Potássio	mg/L	52,20	53,56	70,39	62,75	58,66	62,23	—	59,965	6,702	11,18	
Magnésio	mg/L	15,679	0,309	0,399	2,704	0,631	0,401	—	3,354	6,107	182,08	
Molibdênio	mg/L	0,035	0,043	0,038	0,034	0,020	0,017	—	0,031	0,010	33,18	
Níquel	mg/L	0,014	0,010	0,009	0,015	0,010	0,007	—	0,011	0,003	28,25	
Enxofre	mg/L	72,83	25,92	136,16	129,17	41,69	38,06	—	73,972	48,075	64,99	
Zinco	mg/L	0,005	0,006	0,005	0,006	0,007	0,006	5,00	0,006	0,001	12,90	
Sulfatos	mg/L	360	110	770	750	200	180	400,00	395,00	294,40	74,53	
Dureza total	mg/L	452	186	872	898	289	217	500,00	486	310,57	63,90	

* **VMP** = Valores máximos permitidos pela NBR 10004 “ Classificação de Resíduos Sólidos” (ABNT, 1987) baseados na listagem nº 8

BC = Baixa concentração não permitindo leitura

- Parâmetros que utrapassaram o **V.M.P.**

Tab.17- Resultados analíticos dos extratos digeridos (massa bruta) dos seis lotes do RCD reciclado

Parâmetros	Unidade	Resultados analíticos dos extrato digeridos do RCD reciclado. Para cada lote, média de 3 amostras						*VMP	Dados estatísticos			
		Lotes							Solubilizados	Média	S.D.	C.V. (%)
		I	II	III	IV	V	VI					
Bário	mg/kg	186,90	165,40	183,50	196,97	1456,93	185,13	—	395,80	519,944	131,36	
Cádmio	mg/kg	7,53	5,93	6,73	6,27	7,70	6,27	—	6,74	0,727	10,79	
Chumbo	mg/kg	94,90	10,03	13,10	27,07	343,47	57,17	1000,0	90,96	127,759	140,46	
Cromo	mg/kg	7,40	8,53	2,03	7,20	17,53	12,90	Cromo VI 100,0	9,26	5,332	57,55	
Alumínio	mg/kg	13627,1	14259,8	12980,8	13063,1	13814,8	13059,8		13467,57	517,777	3,84	
Cobre	mg/kg	17,67	13,67	21,60	29,20	16,00	16,30	—	19,07	5,608	29,40	
Ferro	mg/kg	9547,0	7659,5	8888,4	8418,6	9240,0	8336,8	—	8681,72	683,555	7,87	
Manganês	mg/kg	209,6	190,3	217,8	220,8	243,8	239,9	—	220,37	19,786	8,98	
Cálcio	mg/kg	25090,0	27800,0	26776,4	25497,4	28332,5	29433,2	—	27154,92	1682,137	6,19	
Magnésio	mg/kg	5796,1	5958,9	6232,0	5581,6	6819,9	6836,2	—	6204,12	527,117	8,51	
Níquel	mg/kg	5,07	4,17	43,80	9,07	5,60	4,63	—	12,06	15,649	129,79	
Enxofre	mg/kg	279,20	168,70	491,20	370,87	203,27	220,20	—	288,91	121,851	42,18	
Zinco	mg/kg	71,70	55,20	64,90	58,73	68,00	55,97	—	62,42	6,793	10,88	
Fósforo	mg/kg	228,20	207,17	237,33	354,00	567,07	218,67	—	302,07	140,379	46,47	
Vanádio	mg/kg	43,20	38,30	62,63	42,63	41,80	37,90	1000,0	44,41	9,199	20,71	
**MO + S.V.	mg/kg	52000	50000	55000	54000	44000	44000	—	49833,33	4833,91	9,70	

* **VMP** = Valores máximos permitidos pela NBR 10004 “ Classificação de Resíduos Sólidos” (ABNT,1987) baseados na listagem nº 9

Obs: Berílio, Mercúrio, Selênio e Arsênio por motivos técnicos não puderam ser analisados.

** **MO + SV** = Matéria Orgânica + Sólidos Voláteis

5.4. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS MISTURAS RESÍDUO/SOLO

Os parâmetros físicos analisados referem-se a cada uma das misturas resíduo/solo nas diluições de 0, 25, 50, 75 e 100%.

5.4.1. Mistura Resíduo/Solo com Diluição 0% = M - 0% (Solo)

Os parâmetros físicos analisados para esta diluição foram os seguintes: Massa específica dos grãos de solo; Análise granulométrica combinada do solo; Graus de floculação e dispersão do solo; Limites de consistência e Compactação do solo. Os resultados são apresentados nas tabelas numeradas de 18 à 23 e figuras de 14 à 18.

Tab. 18- Massa específica dos grãos do solo (M- 0%)

AMOSTRA N ^o	Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)
1	2,686
2	2,714
3	2,682
4	2,664
Média	2,687

Tab. 19 Análise Granulométrica combinada do solo (M - 0%)

Material Passante	
Amostra	ϕ (mm)
	4..8 2.00 1.20 0.60 0.42 0.25 0.15 0.075 0.061 0.044 0.031 0.021 0.015 0.011 0.0079 0.0056 0.0040 0.0028 0.0020 0.0012 0.00090
1	100 99.94 99.83 98.72 96.72 85.51 66.82 48.24 46.41 45.56 43.02 41.33 40.65 40.48 39.30 38.79 37.09 36.59 36.59 36.59
2	100 99.99 99.81 98.45 96.56 84.58 65.51 48.01 45.41 42.89 41.37 39.69 38.85 38.68 37.84 37.67 36.83 35.82 35.15 35.15
3	100 99.97 99.85 98.55 96.75 84.57 65.55 47.71 47.56 45.02 42.98 41.11 39.92 39.41 39.07 38.22 37.88 36.18 35.50 35.33 34.48
4	100 99.95 99.84 98.55 96.57 84.15 65.08 48.14 45.92 44.55 42.85 40.97 40.80 40.46 39.43 39.26 39.09 37.21 36.19 36.19 35.85
Média	100 99.96 99.83 98.57 96.65 84.70 65.74 48.03 46.33 44.51 42.56 40.78 40.06 39.76 38.91 38.57 38.15 36.58 35.86 35.82 35.52

Tab. 20 Porcentagem das frações da mistura M-0%

Int. (mm)	Fração	%
4,8 - 76	Pedregulho	0
2,0 - 4,8	Areia Grossa	0,04
0,42 - 2,0	Areia média	3,31
0,06 - 0,42	Areia fina	50,65
0,002 - 0,06	Silte	10,00
< 0,002	Argila	36,00

NBR 6502

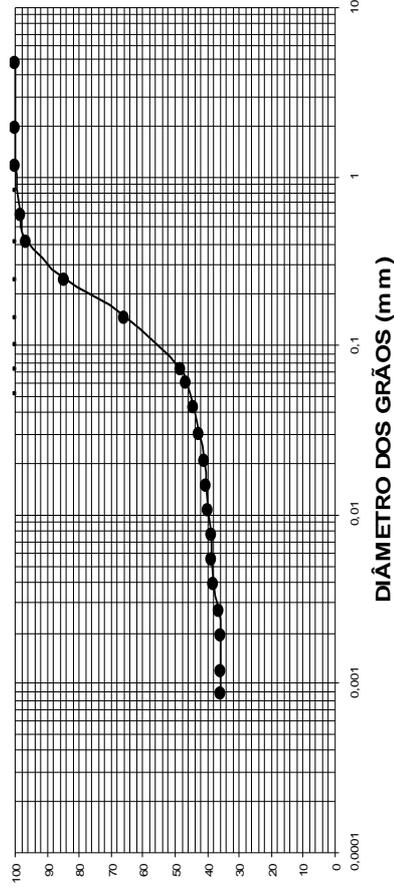


Fig. 14 Curva granulométrica do solo (M-0%)

Tab. 21- Graus de floculação e de dispersão do solo (M-0%)

Amostra	% Argila Total	% Argila sem dispersante	Grau de Floculação %	Grau de Dispersão %
1	36,00	2,50	93,06	6,94
2	36,00	2,50	93,06	6,94
Média	36,00	2,50	93,06	6,94

Grau de Floculação = % de Argila Total - % Argila sem Dispersante / % de Argila Total

Grau de Dispersão = 100 - % Grau de Floculação

Tab. 22- Limites de consistência do solo (M-0%)

Amostra	Limites (%)							
	Liquidez		Plasticidade		Índice de Plasticidade		Contração	
	*V. D.	**V.A.	V.D.	V.A.	V.D.	V.A.	V.D.	V.A.
1	29.20	29	18.72	19	10.48	10	14.93	15
2	30.30	30	17.78	18	12.52	12	15.21	15
3	30.90	31	17.86	18	13.04	13	15.21	15
4	31.80	32	21.32	21	10.48	11	16.32	16
Média	30.55	31	18.92	19	11.63	12	15.42	15

*V.D. = Valor determinado

** V.A. = Valor Adotado

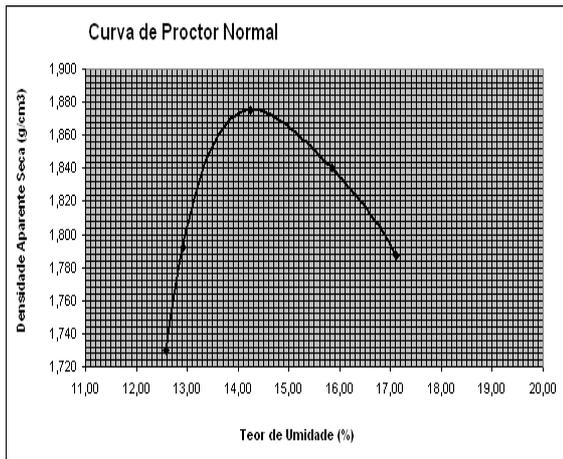


Fig.15 Curva de compactação do solo (M - 0%) Am - 1

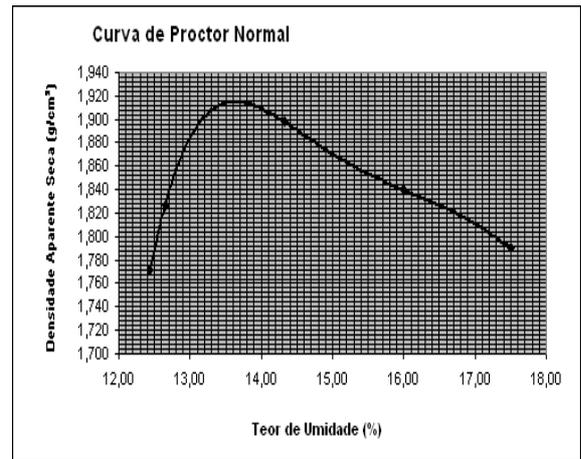


Fig.16 Curva de compactação do solo (M-0%) Am - 2

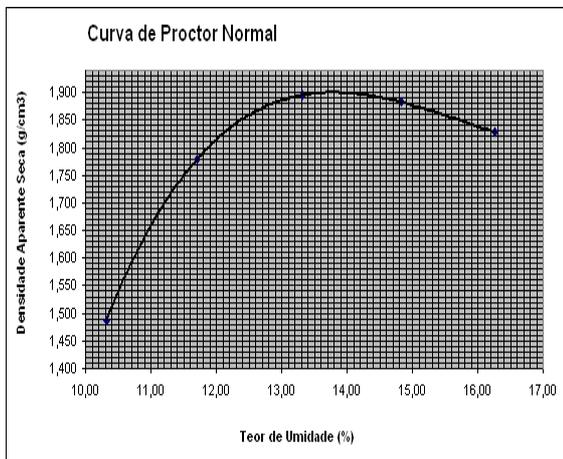


Fig. 17 Curva de compactação do solo (M-0%) Am - 3

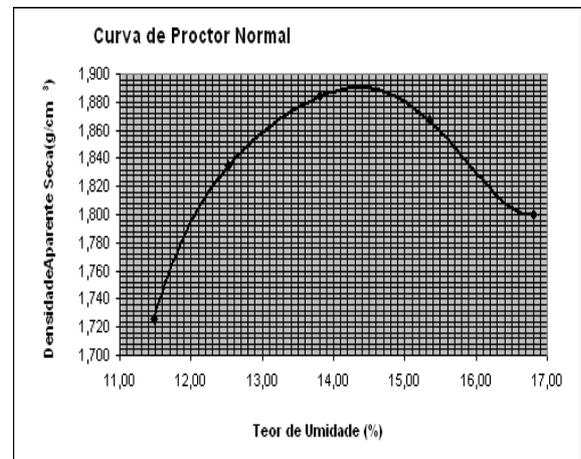


Fig. 18 Curva de compactação do solo (M - 0%) Am - 4

Tab. 23- Estudo de Compactação do Solo (M - 0%)

Amostra (n ^o)	Massa Específica Aparente seca Máxima (g/m ³)	Umidade Ótima (%)
1	1.876	14,30
2	1.920	13,60
3	1.900	13,75
4	1.888	13,50
Média	1.896	13,78

A classificação do solo (M - 0%), segundo a norma técnica D3282 “ Standard Practice for Classification of Soils and Soil - Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes (ASTM, 2004), foi obtida através dos seguintes dados:

% material < ϕ 2 mm = 99,96

% material < ϕ 0,42 mm = 96,65

% material < ϕ 0,074 = 48,03

L.L.= 31

L.P. = 19

I.P.= 12

I.G.= 3,00

Classificação= A-6 (*)

* **A- 6** : Grupo que contém material granulométrico que passa no mínimo 36% pela peneira nº 200 (0,075 mm) e o material que passa pela peneira nº 40 (0,420 mm) tenha no máximo um limite de liquidez de 40 % e um índice de plasticidade de no mínimo de 11% e corresponde a solos argilosos que podem conter uma certa quantidade de material arenoso.

5.4.2. Mistura Resíduo / Solo com Diluição 25%= M-25%

Os parâmetros físicos analisados para esta diluição são os mesmos citados em **5.4.1**. Os resultados são apresentados nas tabelas numeradas de 24 à 29 e figuras de 19 à 23.

Tab. 24 - Massa específica dos grãos da mistura 25% (M-25%)

AMOSTRA N ^o	Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)
1	2,691
2	2,678
3	2,689
4	2,734
Média	2,698

Tab. 25 - Análise granulométrica combinada da mistura 25% (M - 25%)

Material Passante																					
Amostra	ϕ (mm)																				
	4.8	2.00	1.20	0.60	0.42	0.25	0.15	0.075	0.062	0.045	0.032	0.021	0.016	0.011	0.0080	0.0057	0.0040	0.0029	0.0021	0.0011	0.00086
1,00	99,97	98,56	97,44	93,40	89,62	75,80	56,77	41,47	41,38	40,73	38,26	36,13	34,16	33,34	32,68	31,37	31,04	30,54	29,40	28,57	28,08
2,00	99,94	98,30	96,37	92,06	88,20	74,18	54,95	41,33	41,28	40,95	38,65	36,67	35,09	34,53	33,71	33,05	31,23	31,57	31,41	30,59	30,59
3,00	99,92	98,17	95,95	90,99	87,20	73,48	55,20	39,39	39,34	37,70	34,75	33,28	32,13	31,31	30,49	30,00	29,67	29,67	28,03	26,56	26,56
4,00	99,99	98,37	96,81	93,10	89,89	76,48	57,72	41,92	41,80	40,98	39,52	35,94	34,48	34,48	34,31	33,18	32,85	31,88	31,39	29,76	29,76
Média	99,96	98,35	96,64	92,39	88,73	74,99	56,16	41,03	40,95	40,09	37,80	35,51	33,99	33,42	32,80	31,90	31,45	30,92	30,06	28,75	28,75

Tab. 26 - Porcentagem das frações da mistura M-25%

Int. (mm)	Fração	%
4,8 - 76	Pedregulho	0,04
2,0 - 4,8	Areia Grossa	1,61
0,42 - 2,0	Areia média	9,62
0,06 - 0,42	Areia fina	47,73
0,002 - 0,06	Silte	11,00
< 0,002	Argila	30,00

NBR 6502

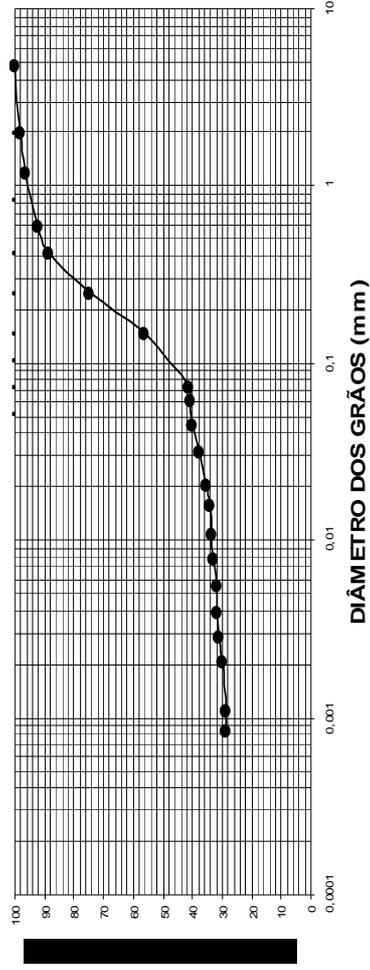


Fig.19- Curva granulométrica da mistura 25% (M - 25%)

Tab.27 - Graus de floculação e dispersão da mistura 25% (M-25%)

Amostra	% Argila Total	% Argila sem dispersante	Grau de Floculação %	Grau de Dispersão %
1	30	0	100	0
2	30	0	100	0
Média	30	0	100	0

Tab.28 - Limites de consistência da mistura 25% (M-25%)

Amostra	Limites (%)							
	Liquidez		Plasticidade		Índice de Plasticidade		Contração	
	*V. D.	**V.A.	V.D.	V.A.	V.D.	V.A.	V.D.	V.A.
1	27,45	27	15,59	16	11,86	12	13,88	14
2	25,20	25	15,82	16	9,38	9	14,07	14
3	26,80	27	15,43	15	11,37	11	14,39	14
4	27,70	28	16,63	17	11,07	11	13,65	14
Média	26,79	27	15,87	16	10,92	11	14,00	14

* V.D. = Valor determinado

**V.A. = Valor Adotado

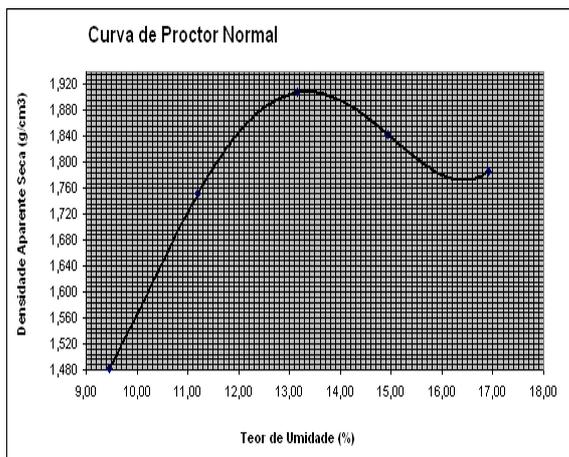


Fig. 20 Curva de compactação da M- 25% - Am-1

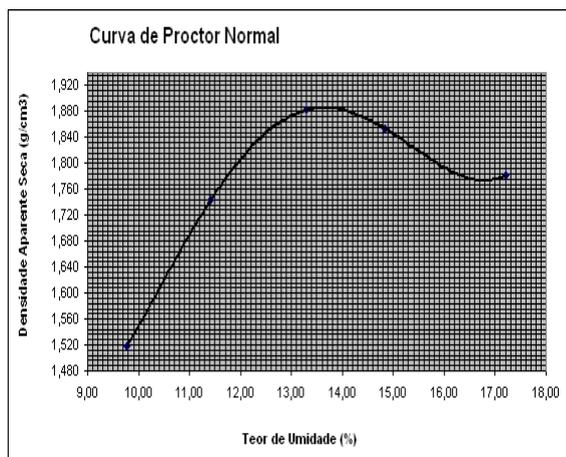


Fig. 21 Curva de compactação da M- 25% - Am-2

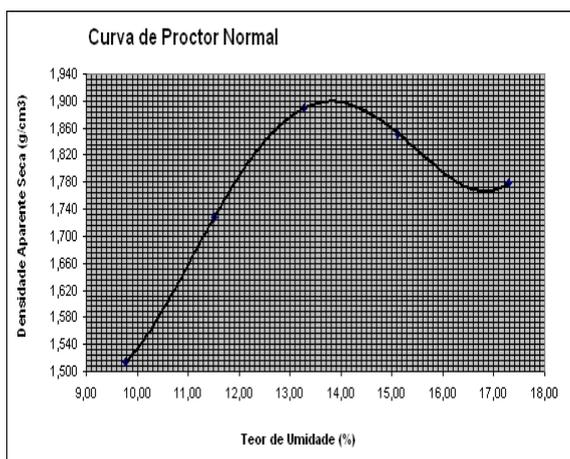


Fig. 22 Curva de compactação da M- 25% - Am-3

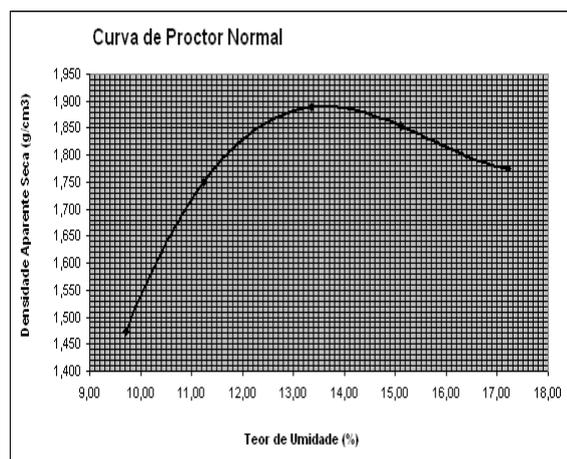


Fig. 23 Curva de compactação da M- 25% - Am-4

Tab.29 - Estudo de Compactação da mistura 25% (M-25%)

Amostra (n ^o)	Massa Específica Aparente seca Máxima (g/m ³)	Umidade Ótima (%)
1	1,912	13,40
2	1,888	13,60
3	1,900	13,70
4	1,895	13,50
Média	1.899	13,55

A classificação da mistura M - 25%, segundo a norma técnica D3282 (ASTM, 2004), foi obtida através dos seguintes dados:

% material < ϕ 2 mm = 98.35

% material < ϕ 0,42 mm = 88,73

% material < ϕ 0,075 mm = 41.03

L.L. = 27

L.P. = 15

I.P. = 12

IG = 2

Classificação: A-6

5.4.3. Mistura Resíduo / Solo com Diluição 50% = M-50%

Os parâmetros físicos analisados para esta diluição são mesmos citados em 5.4.1. Os resultados são apresentados nas tabelas numeradas de 30 à 35 e figuras de 24 à 28.

Tab.30 - Massa específica dos grãos da mistura 50% (M-50%)

AMOSTRA N^o	Massa Específica dos Grãos (g/cm³)
1	2,700
2	2,691
3	2,687
4	2,690
Média	2,692

Tab.31 - Análise granulométrica combinada da mistura 50% (M-50%)

Material Passante	
Amostra	ϕ (mm)
	4,8
	2,00
	1,20
	0,60
	0,42
	0,25
	0,15
	0,075
	0,066
	0,047
	0,034
	0,023
	0,017
	0,012
	0,0086
	0,0060
	0,0042
	0,0030
	0,0021
	0,0013
	0,00094
1	99,95
	92,83
	85,35
	80,69
	66,19
	49,15
	35,25
	34,63
	32,89
	30,28
	29,41
	27,67
	26,80
	25,06
	24,19
	22,47
	22,27
	20,88
	20,36
2	99,94
	97,63
	95,68
	89,66
	84,83
	69,89
	52,09
	36,81
	35,38
	31,86
	30,45
	29,92
	28,34
	26,58
	25,70
	23,94
	21,65
	21,47
	21,12
	20,59
3	99,94
	97,43
	94,85
	87,41
	82,17
	67,08
	49,68
	36,09
	35,92
	35,05
	32,43
	31,91
	30,69
	29,64
	29,64
	28,07
	26,68
	26,25
	25,46
	24,41
4	100,00
	97,72
	92,76
	85,31
	79,66
	64,47
	47,38
	33,90
	33,85
	31,92
	28,94
	27,71
	26,66
	23,68
	23,33
	21,58
	20,17
	19,82
	19,65
Média	99,96
	97,54
	94,03
	86,93
	81,84
	66,91
	49,58
	35,51
	35,25
	33,81
	30,88
	29,87
	28,74
	27,21
	26,24
	25,32
	23,67
	22,56
	21,91
	21,39
	20,78

Tab. 32 Porcentagem das frações da

Int. (mm)	Fração	%
4,8 - 76	Pedregulho	0,04
2,0 - 4,8	Areia Grossa	2,42
0,42 - 2,0	Areia média	15,70
0,06 - 0,42	Areia fina	47,34
0,002 - 0,06	Silte	13,00
< 0,002	Argila	21,50

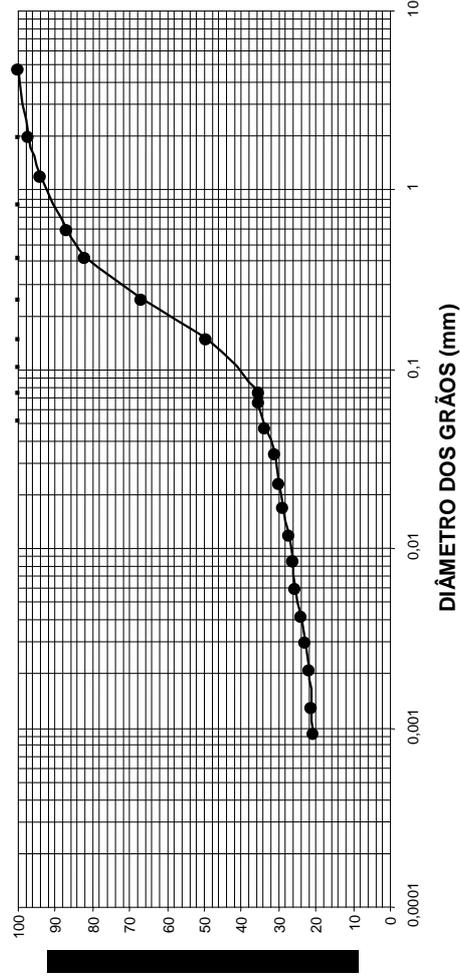


Fig.24 Curva granulométrica da mistura 50% (M-50%)

NBR 6502

Tab. 33- Graus de flocação e dispersão da mistura 50% (M-50%)

Amostra	% Argila Total	% Argila sem dispersante	Grau de	Grau de
			Flocação %	Dispersão %
1	21,50	0	100	0
2	21,50	0	100	0
Média	21,50	0	100	0

Tab.34 - Limites de consistência da mistura 50% (M-50%)

Amostra	Limites (%)							
	Liquidez		Plasticidade		Índice de Plasticidade		Contração	
	*V. D.	**V.A.	V.D.	V.A.	V.D.	V.A.	V.D.	V.A.
1	23.20	23	15.68	16	7.52	8	13.80	14
2	23.40	23	15.74	16	7.66	8	14.89	15
3	23.80	24	16.01	16	7.79	8	14.96	15
4	23.10	23	15.61	16	7.49	8	14.46	14
Média	23.38	23	15.76	16	7.62	8	14.53	15

*V.D. = Valor determinado

** V.A. = Valor Adotado

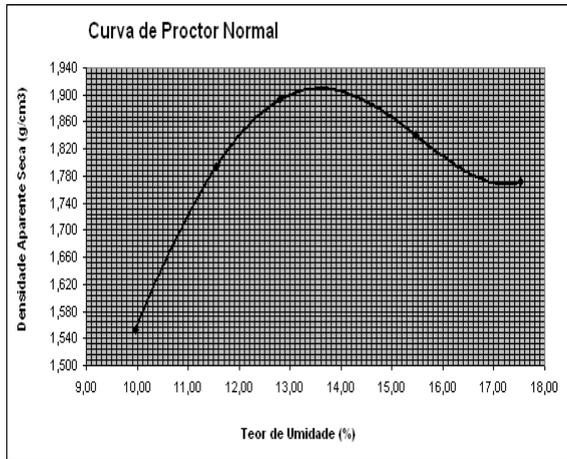


Fig. 25 Curva de compactação da M- 50%-Am-1

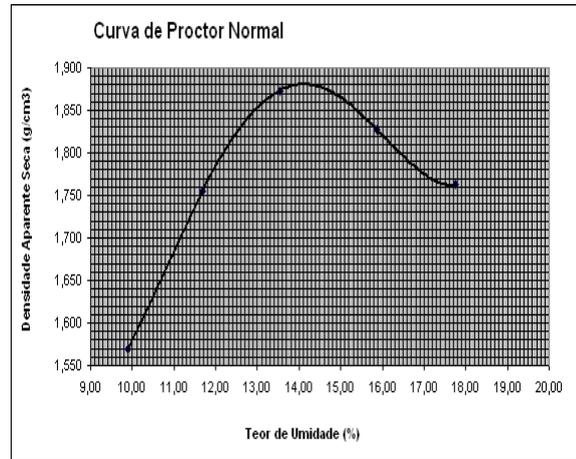


Fig.26 Curva de compactação da M-50%- Am-2

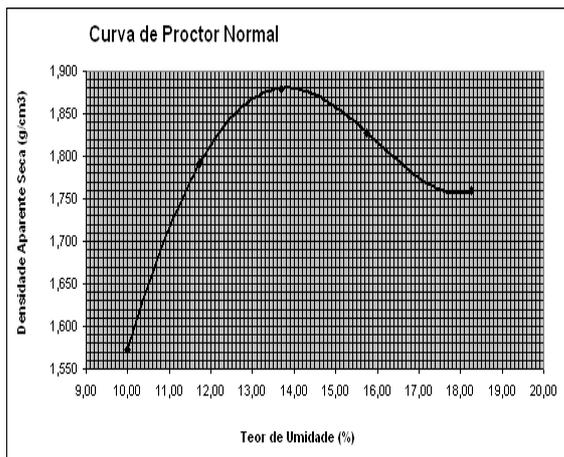


Fig. 27 Curva de compactação da M- 50% - Am-3

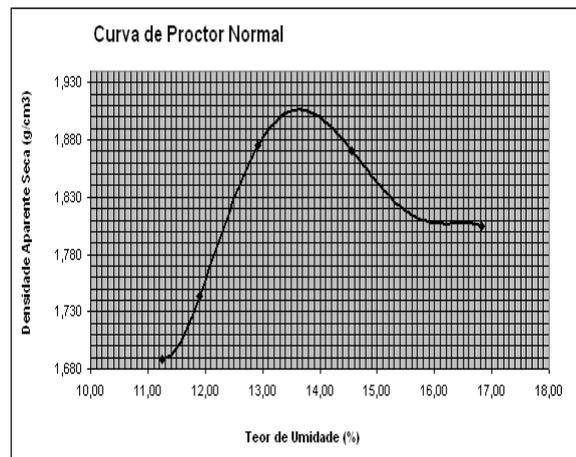


Fig. 28 Curva de compactação da M- 50% - Am-4

Tab.35 - Estudo de Compactação da mistura 50% (M-50%)

Amostra (n ^o)	Massa Específica Aparente seca Máxima (g/m ³)	Umidade Ótima (%)
1	1,915	13,50
2	1,880	14,01
3	1,880	13,80
4	1,920	13,70
Média	1,898	13,75

A classificação da mistura M - 50%, segundo a norma técnica D3282 (ASTM, 2004), foi obtida através dos seguintes dados:

% material < ϕ 2 mm = 97.54

% material < ϕ 0,42 mm = 81,84

% material < ϕ 0,074 mm = 35.51

L.L. = 23

I.P. = 8

IG = 0

Classificação: A-4 *

***A-4:** Grupo que contém material granulométrico que passa pelo menos 36% pela peneira nº 200 (0,075 mm) e com material passante pela peneira nº 40 (0,425 mm) que tenha no máximo um valor de 40% do limite de liquidez e um máximo de 10% no valor do índice de plasticidade. Corresponde aos solos siltosos ou solos areno siltosos.

5.4.4. Mistura Resíduo / Solo com Diluição 75% = M-75%

Os parâmetros físicos analisados para esta diluição são os mesmos citados em 5.4.1. Os resultados são apresentados nas tabelas numeradas de 36 à 41 e figuras de 29 à 33.

Tab.36 - Massa específica dos grãos da mistura 75% (M-75%)

AMOSTRA N ^o	Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)
1	2,710
2	2,661
3	2,772
4	2,721
Média	2,704

Tab.37- Análise granulométrica combinada da mistura 75% (M-75%)

Material Passante	
Amostra	φ(mm)
	4.8 2.00 1.20 0.60 0.42 0.25 0.15 0.075 0.067 0.049 0.035 0.023 0.017 0.012 0.0087 0.0063 0.0044 0.0031 0.0022 0.0013 0.00094
1,00	99,97 96,78 91,20 81,32 74,89 59,26 44,31 30,77 29,53 27,27 24,84 23,10 21,71 20,84 20,15 19,80 17,54 17,37 17,19 15,63 14,24
2,00	99,97 98,00 92,58 82,00 75,58 59,75 43,54 31,50 29,47 25,00 22,88 20,22 18,96 17,56 16,67 15,96 14,19 13,12 12,95 11,70 11,53
3,00	99,93 97,12 91,24 79,41 72,73 57,00 39,18 26,95 26,94 22,94 20,33 18,77 17,03 16,68 15,29 14,25 13,21 12,69 11,64 11,30 10,77
4,00	99,97 97,51 92,64 84,02 78,60 63,26 47,85 33,66 33,55 31,12 29,38 27,99 26,77 25,90 25,03 24,17 23,47 20,86 19,82 18,60 17,04
Média	99,96 97,35 91,92 81,69 75,45 59,82 43,72 30,72 29,87 26,58 24,36 22,52 21,12 20,25 19,29 18,55 17,10 16,01 15,40 14,31 13,40

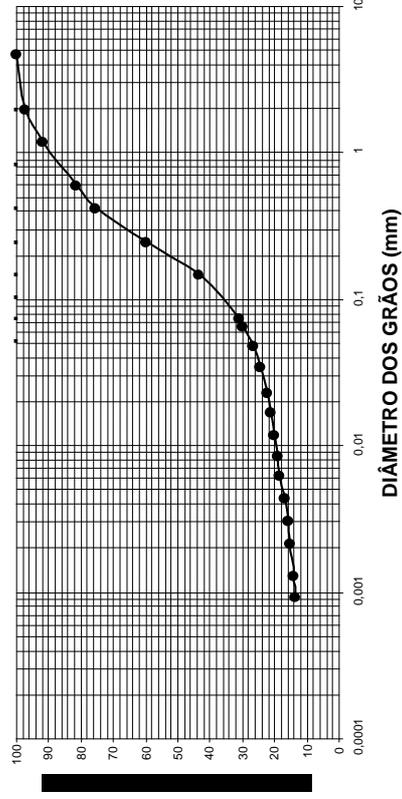


Fig.29 Curva granulométrica da mistura 75% (M-75%)

Tab. 38 Porcentagem das frações da mistura M-75%

Int. (mm)	Fração	%
4,8 - 76	Pedregulho	0,04
2,0 - 4,8	Areia Grossa	2,61
0,42 - 2,0	Areia média	21,90
0,06 - 0,42	Areia fina	45,95
0,002 - 0,06	Siltite	13,50
< 0,002	Argila	16,00

NBR 6502

Tab. 39- Graus de floculação e dispersão da mistura 75% (M-75%)

Amostra	% Argila Total	% Argila sem dispersante	Grau de Floculação %	Grau de Dispersão %
1	15,00	0	100	0
2	15,00	0	100	0
Média	15.00	0	100	0

Tab.40 - Limites de consistência da mistura 75% (M-75%)

Amostra	Limites (%)							
	Liquidez		Plasticidade		Índice de Plasticidade		Contração	
	*V. D.	**V.A.	V.D.	V.A.	V.D.	V.A.	V.D.	V.A.
1	22.80	23	15.79	16	7.01	7	16.18	16
2	21.70	22	14.67	15	7.03	7	16.42	16
3	22.20	22	15.93	16	6.27	6	15.51	16
4	22.30	22	14.75	15	7.55	8	15.34	15
Média	22.25	22	15.29	15	6.93	7	15.86	16

* V.D. = Valor determinado

** V.A. = Valor Adotado

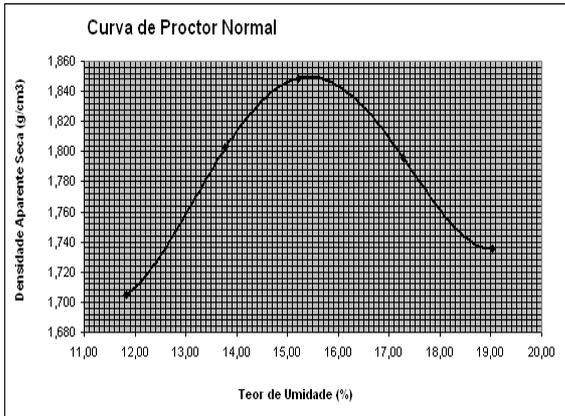


Fig. 30 Curva de compactação da M- 75% - Am-1

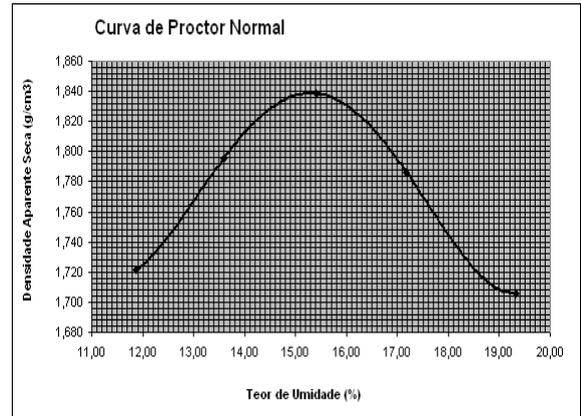


Fig. 31 Curva de compactação da M- 75%- Am-2

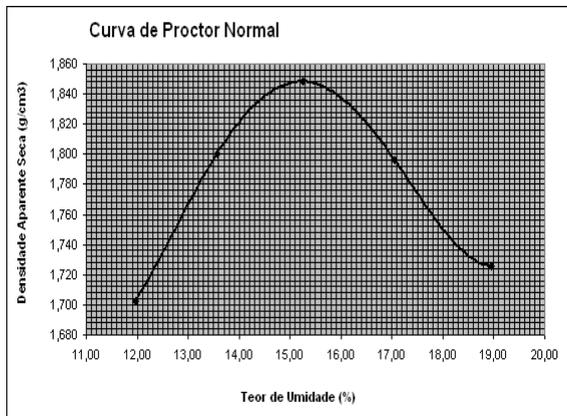


Fig. 32 Curva de compactação da M- 75%- Am-3

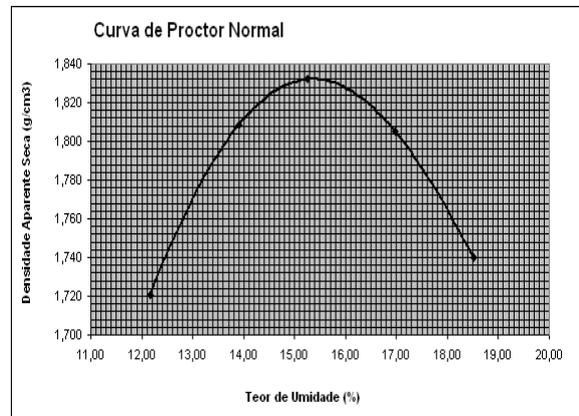


Fig. 33 Curva de compactação da M- 75% -Am-4

Tab.41 - Estudo de compactação da mistura 75% (M-75%)

Amostra (n ^o)	Massa Específica Aparente seca Máxima (g/m ³)	Umidade Ótima (%)
1	1,848	15,50
2	1,840	15,30
3	1,848	15,24
4	1,832	15,26
Média	1,842	15,33

A classificação da mistura M - 75%, segundo a norma técnica D3282 (ASTM, 2004), foi obtida através dos seguintes dados:

% material < ϕ 2 mm = 97,35

% material < ϕ 0,42 mm = 75,45

% material < ϕ 0,074 mm = 30.72

L.L. = 22

I.P. = 7

IG = 0

Classificação: A- 2-4

5.4.5. Mistura Resíduo / Solo com Diluição 100% = M-100% (RCD Reciclado)

Os parâmetros físicos analisados para esta diluição são os mesmos citados em 5.4.1. Os resultados são apresentados nas tabelas numeradas de 42 à 47 e figuras de 34 à 38.

Tab. 42- Massa específica dos grãos do RCD reciclado (M-100%)

AMOSTRA N^o	Massa Específica dos Grãos (g/cm³)
1	2,718
2	2,730
3	2,717
4	2,659
Média	2,706

Tab. 43 - Análise granulométrica combinada do RCD reciclado (M-100%)

Amostra	φ(mm)	Material Passante (%)																			
		4.8	2.00	1.20	0.60	0.42	0.25	0.15	0.075	0.065	0.047	0.033	0.023	0.017	0.012	0.0085	0.0060	0.0042	0.0030	0.0021	0.0013
1	99.93	96.44	90.86	78.80	71.96	54.16	37.55	26.35	26.23	24.60	22.97	21.34	18.90	16.78	15.64	14.83	12.52	11.73	10.92	10.10	8.96
2	99.86	95.06	89.24	76.33	69.07	50.75	34.29	23.45	23.34	22.54	19.34	18.54	16.95	15.35	13.75	12.95	12.79	11.99	9.91	9.59	8.92
3	99.93	96.95	90.98	75.74	67.42	49.74	34.75	22.97	22.86	21.54	19.90	18.25	16.61	15.79	13.32	13.32	12.33	9.87	9.37	9.37	7.40
4	99.94	97.20	93.09	80.69	72.75	55.05	39.58	27.27	27.21	25.54	23.03	22.20	19.36	18.86	18.03	17.53	16.02	11.85	11.52	10.52	9.68
Média	99.92	96.41	91.04	77.89	70.30	52.43	36.54	25.01	24.91	23.56	21.31	20.08	17.96	16.70	15.19	14.66	13.42	11.36	10.43	9.90	8.74

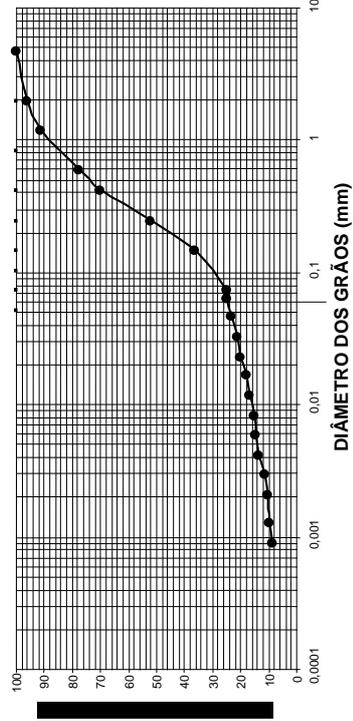


Fig.34 Curva granulométrica da mistura 100% (M-100%)

Tab. 44 Porcentagem das frações da mistura

M-100%		
Int. (mm)	Fração	%
4,8 - 76	Pedregulho	0,08
2,0 - 4,8	Areia Grossa	3,51
0,42 - 2,0	Areia média	26,11
0,06 - 0,42	Areia fina	46,30
0,002 - 0,06	Silte	13,75
< 0,002	Argila	10,25

NBR 6502

Tab. 45- Graus de floculação e dispersão do RCD reciclado (M 100%)

Amostra	% Argila Total	% Argila sem dispersante	Grau de Floculação %	Grau de Dispersão %
1	10,25	0,0	100%	0
2	10,25	0,0	100%	0
Média	10,25	0,0	100%	0

Tab. 46- Limites de consistência do RCD reciclado (M 100%)

Amostra	Limites (%)			
	Liquidez	Plasticidade	Índice de Plasticidade	Contração
1	NL	NP	NP	18,19
2	NL	NP	NP	18,09
3	NL	NP	NP	15,13
4	NL	NP	NP	17,85
Média	NL	NP	NP	17,32

Observações: O material não permitiu determinar os limites de Liquidez e Plasticidade por ser excessivamente arenoso. Para efeito de avaliação, através de valores extrapolados em algumas tentativas, o limite de liquidez fica em torno de 21%

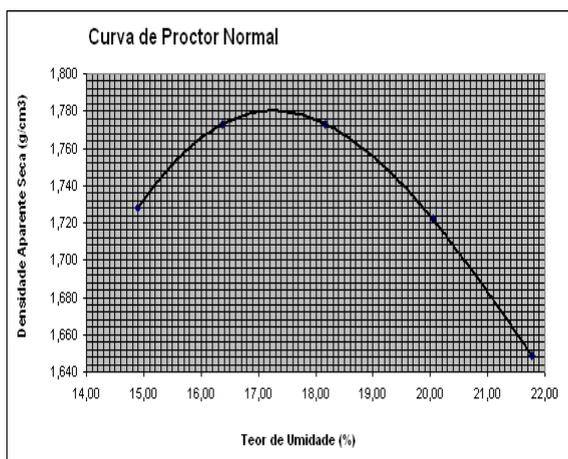


Fig.35 Curva de compactação da M- 100% -Am-1

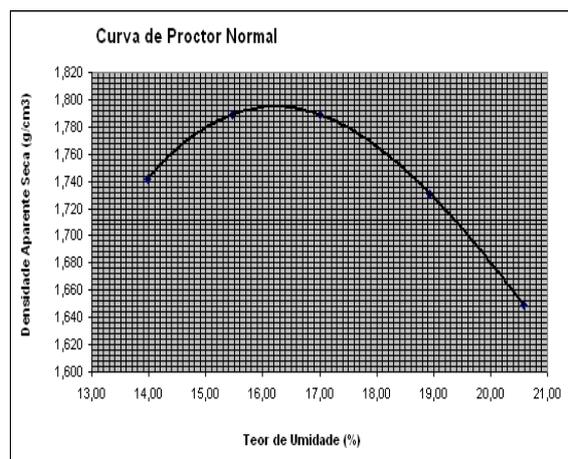


Fig. 36 Curva de compactação da M-100%- Am-2

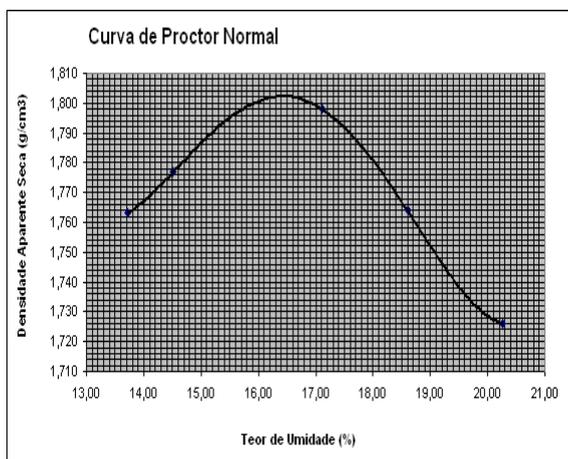


Fig. 37 Curva de compactação da M-100%- Am-3

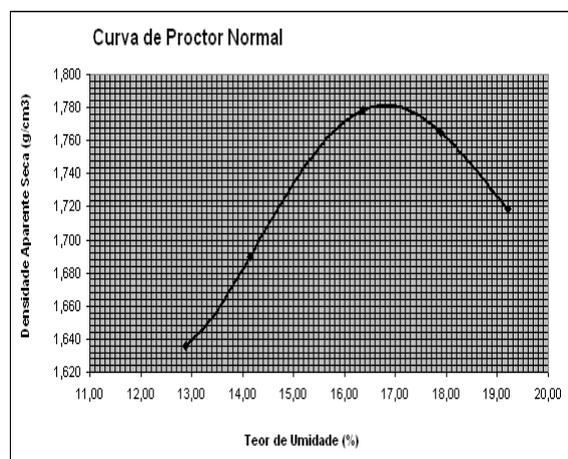


Fig. 38 Curva de compactação da M-100%- Am-4

Tab. 47 - Estudo de compactação do RCD reciclado (M 100%)

Amostra (n ^o)	Massa Específica Aparente seca Máxima (g/m ³)	Umidade Ótima (%)
1	1.782	17,25
2	1.788	16.70
3	1.802	16,50
4	1.782	16,90
Média	1.788	16,83

A classificação do RCD reciclado (M - 100%), segundo a norma técnica D3282 (ASTM, 2004), foi obtida através dos seguintes dados:

% do material < ϕ 2mm = 96,41

% do material < ϕ 0,42mm = 70,30

% do material < ϕ 0,074 = 25,01

L.L. \pm 21,0 %

I.P. = NP

IG = 0

CLASSIFICAÇÃO= A-2 - 4 (*)

* **A-2-4:** Sub- grupo que contém no máximo 35% de material granulométrico que passa pela peneira n^o 200(0,075mm) e com material passante na peneira n^o 40 (0,425) que apresenta um valor máximo de 40% do limite de liquidez e um índice de plasticidade de no máximo 10%. Este sub- grupo corresponde ao cascalho ou areia, argilosos ou siltosos e trata-se de um bom agregado para sub-base de pavimentação

5.4.6. Resumo da Caracterização Física das Cinco Misturas Resíduo / Solo.Tab. 48

Tab. 48- Caracterização física das cinco misturas Resíduo / Solo

MISTURA	Compactação											Índice de Grupo-IG	Classificação ASTM D-3282
	Massa Específica dos grãos (g/cm ³)	Massa específica Máxima Aparente seca (g/cm ³)	Umidade Ótima(%)	% mat. com $\phi < 0,075$ mm	% mat. com $\phi < 0,002$ mm	Grau de Floculação (%)	Grau de Dispersão (%)	Limite de Liquidez LL (%)	Limite de Plasticidade de L.P. (%)	Índice de Plasticidade I.P.(%)	Limite de Contração L.C.(%)		
M - 0%	2,687	1,896	13,78	48,03	36,00	93,06	6,94	31	19	12	15	3	A-6
M - 25%	2,698	1,899	13,55	41,03	30,00	100,00	0	27	16	11	14	2	A-6
M - 50%	2,692	1,898	13,75	35,51	21,50	100,00	0	23	16	07	15	0	A-4
M - 75%	2,704	1,842	15,33	30,72	16,00	100,00	0	22	15	07	16	0	A-2-4
M - 100%	2,706	1,788	16,83	25,01	10,25	100,00	0	21	NP	NP	17	0	A-2-4

5.4.7. Escolha das Misturas Resíduo / Solo

Baseados nos resultados dos ensaios realizados anteriormente e na classificação das misturas obtidas verificou-se que as misturas nas proporções de 50, 75, 100%, conforme demonstrado na tabela 49, atendem as especificações tecnológicas para emprego em solo - cimento.

Tab. 49 - Classificação das misturas Resíduo / Solo e as especificações exigidas para os compósitos Solo - Cimento

Mistura Resíduo + Solo (Relação resíduo/Solo)	Especificação para materiais empregados em paredes monolíticas sem função estrutural NBR 13553		Especificação para materiais empregados em sub-base ou base de solo cimento NBR 11798		Especificação para materiais empregados em tijolos maciços e blocos vazados com utilização de prensa Hidráulica NBR 10833		Especificação para materiais empregados em blocos vazados sem função estrutural NBR 10834		Especificação para materiais empregados em tijolo - maciço NBR 8491	
	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N
M - 0%	X	-	-	X	X	-	X	-	X	-
M - 25%	X	-	-	X	X	-	X	-	X	-
M - 50%	X	-	X	-	X	-	X	-	X	-
M - 75%	X	-	X	-	X	-	X	-	X	-
M - 100%	X	-	X	-	X	-	X	-	X	-

S - Mistura se enquadra nas especificações

N - Mistura não se enquadra nas especificações

As misturas que atendem a todas as exigências apresentadas são: M -50%; M - 75% e M - 100%. Como o objetivo desta pesquisa é a utilização máxima de resíduo foram escolhidas as misturas M - 75% e M - 100%.

5.5. ESTUDO DE DOSAGEM DOS COMPÓSITOS

5.5.1. Escolha dos Teores de Cimento

Para escolha dos teores de cimento das duas misturas escolhidas (M -75% e M -100%) foram realizados primeiramente os ensaios de compactação com três teores de cimento com o objetivo de determinar o teor de umidade ótimo para a moldagem de corpos de prova. Para as misturas M -75% e M -100% baseados na classificação da norma D-3282 “Standard Practice for Classification of Soils and Soil- Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes” (ASTM, 2004) e em conformidade com a NBR 12253 “Solo-Cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento (ABNT,1992) o teor de cimento sugerido em massa para o ensaio de compactação das duas misturas é 7%. No entanto, o teor sugerido é para materiais convencionais que apresentam massa específica aparente seca máxima entre 2,0 e 2,1 g/cm³. Desta forma para a mistura M -75% com massa específica aparente seca máxima no valor de 1,84 g/cm³ e a mistura M-100% com massa específica aparente seca máxima de 1,80 g/cm³ a mesma norma recomenda teores de cimento em massa de 10% e 11% respectivamente. Assim optou-se pelo estudo de compactação das misturas com cimento utilizando-se os seguintes teores de cimento:

- a) M-75% : 6 , 8 e 10%;
- b) M-100%: 7 , 9 e 11%.

Para efeito prático estas duas misturas agora com cimento serão chamadas de compósitos CM-75% e CM-100% respectivamente.

Os resultados dos ensaios de compactação dos dois compósitos são apresentados nas tabelas 50 e 51 e nas figuras numeradas de 39 a 44.

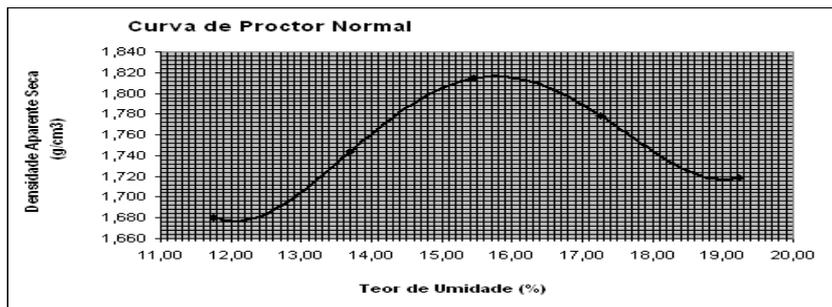


Fig. 39 Curva de compactação do compósito CM- 75% com 6% de teor em massa

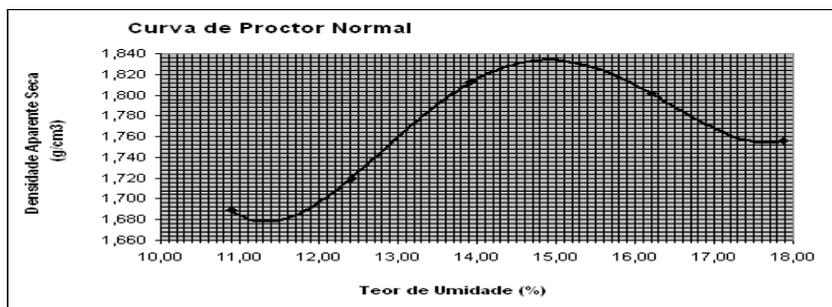


Fig. 40 Curva de compactação do compósito CM- 75% com 8% de teor em massa

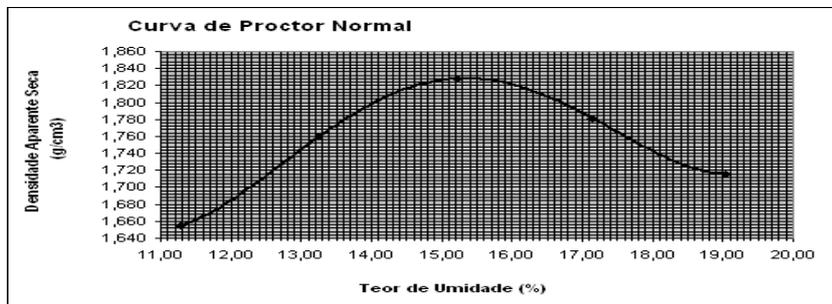


Fig. 41 Curva de compactação do compósito CM- 75% com 10% de teor em massa

Tabela 50 - Estudo de compactação do compósito CM- 75%

Teor de Cimento em massa (%)	Massa Específica	
	Aparente Seca Máxima (g/cm ³)	Umidade Ótima(%)
6	1,816	15,70
8	1,836	14,90
10	1,824	15,40

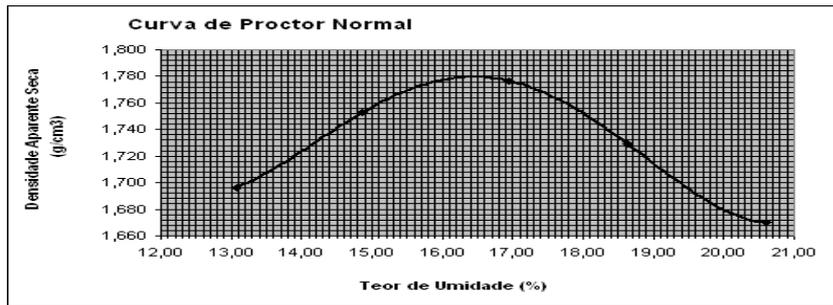


Fig. 42 Curva de compactação do compósito CM-100% - com 7% de teor em massa

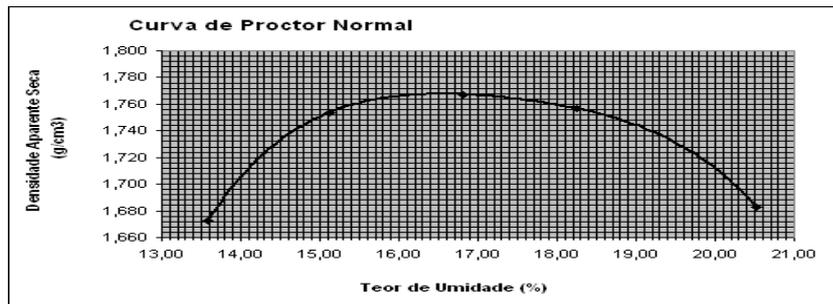


Fig. 43 Curva de compactação do compósito CM-100% com 9% de teor em massa

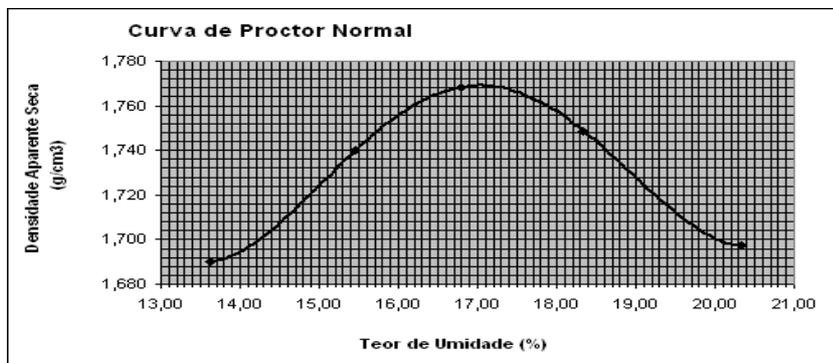


Fig. 44 Curva de compactação do compósito CM-100% com 11% de teor em massa

Tabela 51 - Estudo de compactação do compósito CM-100%

Teor de Cimento em massa (%)	Massa Específica Aparente seca máxima (g/cm ³)	Umidade Ótima(%)
7	1,780	16,45
9	1,768	16,60
11	1,768	17,00

5.5.2. Moldagens dos Corpos - de - Prova dos Compósitos Solo-Cimento

Após o estudo de compactação dos dois compósitos solo-cimento apresentados nas tabelas 50 e 51, foram moldados cinco corpos-de-prova cilíndricos, com cada um dos três teores de cimento escolhidos para cada um dos dois compósitos escolhidos, conforme norma NBR 12024 “Solo-Cimento: Moldagem e cura dos corpos - de - prova cilíndricos” (ABNT,1992) . Estes corpos-de-prova cilíndricos foram utilizados para a realização dos ensaios de compressão simples aos 7 dias para a fixação dos teores de cimento e os resultados obtidos dos dois compósitos são apresentados nas tabelas 52 e 53. A escolha dos teores de cimento para os dois compósitos (CM-75% e CM-100%) recaiu sobre os menores e que permitiram uma tensão de ruptura à compressão mínima de 2,1 MPa aos 7 dias de acordo com a NBR 12025 “ Solo-Cimento: Determinação da compressão simples de corpos - de - prova cilíndricos “ (ABNT, 1990).Para o compósito CM-75% este teor foi de 8% e para o compósito CM-100% este teor foi de 7%. Para efeito prático, optou - se para ambos os compósitos um teor de massa de 8%, mesmo porque, este pequeno incremento, no compósito CM-100%, vem auxiliar no processo de encapsulamento de eventuais contaminantes presentes no RCD reciclado

Após a fixação dos teores de cimento dos dois compósitos, foram moldados mais 40 corpos-de-prova cilíndricos para cada um deles, para serem utilizados da seguinte maneira: seis corpos-de-prova para ensaio de resistência aos 7 dias; seis corpos-de-prova para ensaio de resistência aos 28 dias; seis corpos-de-prova para ensaio de resistência aos 60 dias; seis corpos-de-prova para ensaio de resistência aos 90 dias, três corpos-de-prova para ensaios de absorção de água, três corpos-de-prova para ensaio de durabilidade por molhagem e secagem; quatro corpos-de-prova para ensaios químicos, um corpo - de - prova ilustrativo e cinco corpos-de-prova de reserva. (Tabelas 54 e 55)

Tabela 52- Moldagem de corpos de prova dos compostos CM-75% e Resistência à compressão aos 7 dias para escolha do teor de cimento

C.P.	CM-75%																		
	6 %					8 %					10 %								
	1	2	3	4	5	Média	1	2	3	4	5	Média	1	2	3	4	5	Média	
Massa específica aparente seca máx. do ensaio (g/cm ³)	1,816	1,816	1,816	1,816	1,816	1,816	1,836	1,836	1,836	1,836	1,836	1,836	1,824	1,824	1,824	1,824	1,824	1,824	1,824
Massa específica aparente máx. seca da moldagem (g/cm ³)	1,780	1,786	1,782	1,793	1,782	1,785	1,814	1,813	1,801	1,780	1,780	1,780	1,803	1,807	1,797	1,787	1,787	1,787	1,796
Grau de compactação (%)	98,02	98,35	98,13	98,73	98,13	98,29	98,80	98,75	98,09	96,95	96,95	97,93	98,95	99,07	98,52	97,97	97,97	97,97	98,46
Teor de umidade ótimo no ensaio (%)	15,70	15,70	15,70	15,70	15,70	15,70	14,90	14,90	14,90	14,90	14,90	14,90	15,40	15,40	15,40	15,40	15,40	15,40	15,40
Teor de umidade da moldagem (%)	16,04	15,79	15,91	15,77	15,98	15,90	15,11	15,06	15,21	15,22	15,33	15,19	15,32	15,51	15,49	15,68	15,75	15,55	15,55
Varição do teor de umidade da moldagem(%)	0,34	0,09	0,21	0,07	0,28	0,20	0,21	0,16	0,31	0,32	0,43	0,29	-0,08	0,11	0,09	0,28	0,35	0,15	0,15
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	1,88	1,60	1,85	1,60	1,63	1,72	2,94	3,22	2,88	3,04	2,77	2,97	2,74	2,64	2,94	2,81	2,99	2,83	2,83

Tabela 53- Moldagem de corpos de prova dos compósitos CM-100% e Resistência à compressão aos 7 dias para escolha do teor de cimento

C.P.	7 %					9 %					11 %							
	1	2	3	4	5	Média	1	2	3	4	5	Média	1	2	3	4	5	Média
Massa específica aparente seca máx. do ensaio (g/cm ³)	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,768	1,768	1,768	1,768	1,768	1,768	1,768	1,768	1,768	1,768	1,768	1,768
Massa específica aparente máx. seca (g/cm ³)	1,752	1,748	1,744	1,777	1,750	1,754	1,755	1,762	1,768	1,752	1,758	1,759	1,745	1,750	1,745	1,759	1,749	1,750
Grau de compactação (%)	98,43	98,20	97,98	99,83	98,31	98,54	99,26	99,66	100,00	99,10	99,43	99,49	98,70	98,98	98,70	99,49	98,93	98,98
Teor de umidade ótimo no ensaio (%)	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45	16,60	16,60	16,60	16,60	16,60	16,60	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
Teor de umidade da moldagem (%)	16,66	16,83	16,75	16,38	16,56	16,64	16,64	16,72	16,39	16,63	16,78	16,63	16,92	17,20	17,14	17,07	17,17	17,10
Variação do teor de umidade da moldagem (%)	0,21	0,38	0,30	-0,07	0,11	0,19	0,04	0,12	-0,21	0,03	0,18	0,03	-0,08	0,20	0,14	0,07	0,17	0,10
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	2,30	2,31	2,52	2,78	2,74	2,53	3,60	3,49	3,51	3,59	3,28	3,49	3,31	3,51	3,54	3,60	3,35	3,46

Tab.54 - Moldagem de corpos de prova para ensaios do compósito CM -75% com 8% de teor de cimento em massa.

Compósito CM-75% com 8% de teor de cimento em massa						
C.P.	Massa específica seca máx. no ensaio de compactação (g/cm³)	Massa específica seca máx. na moldagem (g/cm³)	Grau de compactação (%)	Teor de umidade ótimo no ensaio de compactação (%)	Teor de umidade da moldagem (%)	Variação do teor de umidade (%)
1	1,836	1,790	97,49	14,90	15,08	0,18
2	1,836	1,781	97,00	14,90	14,99	0,09
3	1,836	1,793	97,66	14,90	15,15	0,25
4	1,836	1,772	96,51	14,90	15,13	0,23
5	1,836	1,767	96,24	14,90	15,26	0,36
6	1,836	1,752	95,42	14,90	15,40	0,50
7	1,836	1,773	96,57	14,90	14,89	-0,01
8	1,836	1,759	95,81	14,90	14,92	0,02
9	1,836	1,777	96,79	14,90	15,05	0,15
10	1,836	1,749	95,26	14,90	15,05	0,15
11	1,836	1,787	97,33	14,90	14,83	-0,07
12	1,836	1,747	95,15	14,90	15,24	0,34
13	1,836	1,774	96,62	14,90	15,00	0,10
14	1,836	1,788	97,39	14,90	14,71	-0,11
15	1,836	1,774	96,62	14,90	15,26	0,36
16	1,836	1,771	96,46	14,90	15,70	0,80
17	1,836	1,786	97,28	14,90	15,33	0,43
18	1,836	1,758	95,75	14,90	14,99	0,09
19	1,836	1,778	96,84	14,90	14,99	0,09
20	1,836	1,779	96,90	14,90	14,84	-0,06
21	1,836	1,769	96,35	14,90	15,23	0,33
22	1,836	1,764	96,08	14,90	15,02	0,12
23	1,836	1,787	97,33	14,90	15,14	0,24
24	1,836	1,767	96,24	14,90	15,16	0,26
25	1,836	1,770	96,41	14,90	14,92	0,02
26	1,836	1,783	97,11	14,90	14,71	-0,19
27	1,836	1,773	96,57	14,90	15,07	0,17
28	1,836	1,773	96,57	14,90	14,88	-0,02
29	1,836	1,769	96,35	14,90	14,95	0,05
30	1,836	1,780	96,95	14,90	14,88	-0,02
31	1,836	1,786	97,28	14,90	15,08	0,18
32	1,836	1,754	95,53	14,90	15,30	0,40
33	1,836	1,781	97,00	14,90	14,87	-0,03
34	1,836	1,764	96,08	14,90	14,82	-0,08
35	1,836	1,782	97,06	14,90	15,20	0,30
36	1,836	1,759	95,81	14,90	15,20	0,30
37	1,836	1,764	96,08	14,90	15,00	0,05
38	1,836	1,788	97,39	14,90	14,95	0,05
39	1,836	1,781	97,00	14,90	15,18	0,18
40	1,836	1,778	96,84	14,90	15,16	0,16

Tab.55 - Moldagem de corpos de prova para ensaios do compósito CM -100% com 8% de teor de cimento em massa.

Compósito CM-75% com 8% de teor de cimento em massa						
C.P.	Massa específica seca máx. no ensaio de compactação (g/cm ³)	Massa específica seca máx. na moldagem (g/cm ³)	Grau de compactação (%)	Teor de umidade ótimo no ensaio de compactação (%)	Teor de umidade da moldagem (%)	Varição do teor de umidade (%)
1	1,774	1,750	96,65	16,53	16,78	0,25
2	1,774	1,747	98,48	16,53	16,84	0,31
3	1,774	1,735	97,80	16,53	16,40	-0,13
4	1,774	1,755	98,93	16,53	16,20	-0,33
5	1,774	1,748	98,53	16,53	16,49	-0,04
6	1,774	1,745	98,37	16,53	16,49	-0,04
7	1,774	1,740	98,08	16,53	16,59	0,06
8	1,774	1,740	98,08	16,53	16,35	-0,18
9	1,774	1,734	97,75	16,53	16,57	0,04
10	1,774	1,743	98,25	16,53	16,33	-0,20
11	1,774	1,732	97,63	16,53	16,66	0,13
12	1,774	1,739	98,03	16,53	16,23	-0,30
13	1,774	1,752	98,76	16,53	16,18	-0,35
14	1,774	1,727	97,35	16,53	16,01	-0,52
15	1,774	1,747	98,48	16,53	16,44	-0,09
16	1,774	1,731	97,58	16,53	16,38	-0,15
17	1,774	1,751	98,70	16,53	16,44	-0,09
18	1,774	1,742	98,20	16,53	16,20	-0,33
19	1,774	1,750	98,65	16,53	16,57	0,04
20	1,774	1,757	99,04	16,53	16,35	-0,18
21	1,774	1,752	98,76	16,53	16,32	-0,31
22	1,774	1,751	98,70	16,53	16,37	-0,16
23	1,774	1,753	98,82	16,53	16,55	0,02
24	1,774	1,736	97,86	16,53	16,41	-0,12
25	1,774	1,751	98,70	16,53	16,26	-0,27
26	1,774	1,755	98,93	16,53	16,31	-0,22
27	1,774	1,752	98,76	16,53	16,39	-0,14
28	1,774	1,752	98,76	16,53	16,35	-0,18
29	1,774	1,750	98,65	16,53	16,35	-0,18
30	1,774	1,728	97,41	16,53	16,48	-0,05
31	1,774	1,726	97,29	16,53	17,09	0,56
32	1,774	1,742	98,20	16,53	16,52	-0,01
33	1,774	1,741	98,14	16,53	16,50	-0,03
34	1,774	1,741	98,14	16,53	16,47	-0,06
35	1,774	1,741	98,14	16,53	16,39	-0,14
36	1,774	1,742	98,20	16,53	16,50	-0,03
37	1,774	1,744	98,31	16,53	16,45	-0,08
38	1,774	1,746	98,42	16,53	16,37	-0,16
39	1,774	1,745	98,37	16,53	16,45	-0,08
40	1,774	1,746	98,42	16,53	16,29	-0,24

5.6. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples dos compósitos CM-75% e CM-100% foram realizados com seis corpos-de-prova, número que permite o cálculo de resistência estatística. Foram realizados ensaios aos 7, 28, 60, e 90 dias. Os resultados são apresentados nas tabelas 56, 57, 58, e 59 e figura 45.

Tab.56- Ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura dos compósitos CM-75% e CM-100%

COMPÓSITO	CM-75% c/ T.C.=8%				CM- 100% c/ T.C.= 8%			
	Área (mm ²)	Altura (mm)	Carga (N)	Resistência (MPa)	Área (mm ²)	Altura (mm)	Carga (N)	Resistência (MPa)
1	8028,55	138,18	16660	2,08	8176,81	134,60	22148	2,71
2	8234,83	137,90	17640	2,14	8181,93	134,90	22002	2,69
3	8218,23	138,23	19208	2,34	8222,38	135,45	18130	2,20
4	8205,79	137,70	18228	2,22	7995,79	134,93	16660	2,08
5	8259,75	137,98	19992	2,42	8201,64	136,18	17248	2,10
6	8209,94	137,03	20384	2,48	8218,23	135,78	22540	2,74
f _{c7}	Resistência média			2,28				2,42
* f _{ckest.}	Resistência estatística			2,13				2,12

Resistência especificada pela NBR 11798 “Materiais para sub-base ou base de solo-cimento” (ABNT,1990) ≥ 2,10 MPa aos 7 dias

* $f_{ckest} = f_{c7} - ts$, onde f_{c7} = média da resistência aos 7 dias, t = coeficiente de Student para 80% de confiabilidade com determinação = 0,920 e S = desvio padrão = $[\sum (f_{c7} - f)^2 / n-1]^{1/2}$. NBR 12254 “Execução de sub-base de solo cimento” (ABNT, 1990)

Tab.57- Ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura dos compósitos CM-75% e CM-100%

COMPÓSITO	CM-75% c/ T.C.=8%				CM- 100% c/ T.C. = 8%			
	Área (mm ²)	Altura (mm)	Carga (N)	Resistência (MPa)	Área (mm ²)	Altura (mm)	Carga (N)	Resistência (MPa)
1	7963,09	137,10	26656	3,35	7967,18	136,65	20776	2,61
2	7873,53	136,15	29694	3,77	8147,88	136,65	27244	3,34
3	7942,69	137,42	26656	3,36	7906,04	135,60	27440	3,47
4	7922,32	135,53	26950	3,40	7930,46	136,43	25676	3,24
5	7918,25	136,98	24304	3,07	8176,81	135,65	29596	3,62
6	8193,36	137,78	25088	3,06	7975,35	136,55	24990	3,13
f _{c28}	Resistência média			3,34				3,24
f _{ck est.}	Resistência estatística			3,10				2,92

Tab.58- Ensaio de resistência à compressão simples aos 60 dias de cura dos compósitos CM-75% e CM-100%

COMPÓSITO	CM-75% c/ T.c. = 8%				CM-100% c/ T.c. =8%			
	Área (mm ²)	Altura (mm)	Carga (N)	Resistência (MPa)	Área (mm ²)	Altura (mm)	Carga (N)	Resistência (MPa)
1	7930,47	138,00	19110	2,41	7918,25	133,55	23912	3,02
2	8131,36	134,38	20972	2,58	7954,93	134,73	23128	2,91
3	7946,77	136,73	22344	2,81	7950,85	136,00	29694	3,73
4	7987,61	134,38	20580	2,58	7967,18	135,73	28714	3,60
5	7967,18	136,78	21364	2,68	7979,43	135,40	25480	3,19
6	806,63	135,38	23226	2,87	7975,35	134,90	26754	3,35
f _{c60}	Resistência média			2,66				3,30
f _{ck est}	Resistência estatística			2,50				3,00

Nota→ Após os 28 dias de cura em câmara úmida, os corpos - de - prova foram mantidos apenas em sombra e sem umidade.

Tab.59- Ensaio de resistência à compressão simples aos 90 dias de cura dos compósitos CM-75% e CM-100%

COMPÓSITO	CM-75% c/ T.c. = 8%				CM-100% c/ T.c. = 8%			
	Área (mm ²)	Altura (mm)	Carga (N)	Resistência (MPa)	Área (mm ²)	Altura (mm)	Carga (N)	Resistência (MPa)
Determinações								
1	8103,39	136,20	21756	2,68	7889,42	135,58	25480	3,23
2	8075,49	135,78	24500	3,03	7838,3	134,18	27342	3,49
3	7873,68	135,88	22050	2,80	7709,41	135,38	29106	3,78
4	7697,74	136,05	19208	2,50	8000,01	135,25	28420	3,55
5	8107,38	136,85	23362	3,25	7928,83	135,53	24010	3,03
6	7736,67	137,08	21952	2,84	8111,36	135,90	19698	2,43
$f_{c90} =$	Resistência média			2,85				3,25
$f_{ck\ est} =$	Resistência estatística			2,61				2,81

***Após os 28 dias de cura em câmara úmida os corpos - de - prova foram mantidos apenas em sombra sem umidade**

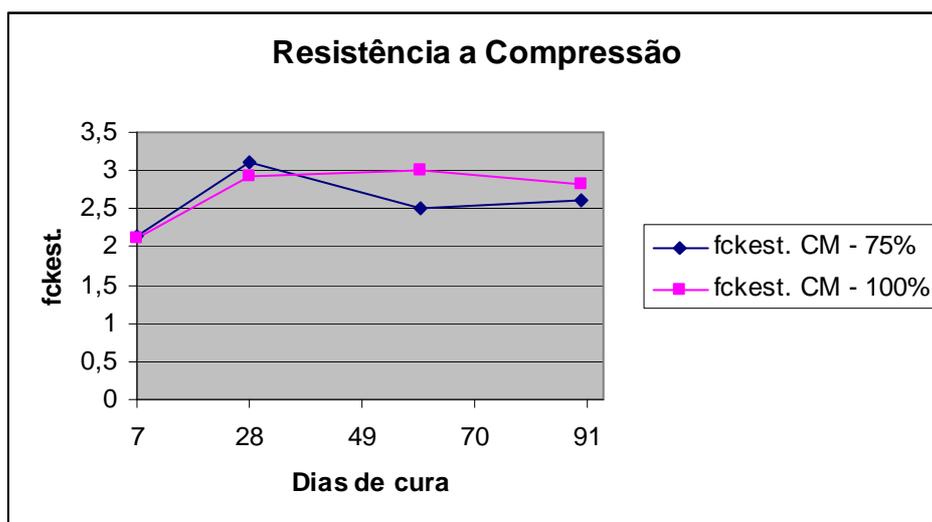


Figura 45 - Gráfico da resistência estatística x dias de cura

5.7. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO D'ÁGUA

Os resultados do ensaio de absorção d'água dos compósitos CM-75% e CM-100% são apresentados na tabela 60.

Tab.60- Ensaio de absorção d'água aos 7 dias de cura dos compósitos CM-75% e CM-100%

COMPÓSITO	CM-75%			CM -100%		
	1	2	3	1	2	3
Determinações						
Massa aos 7 dias de cura (g)	2075	2031	2079	2065	2004	2069
Massa seca após estufa (g)	1834	1774	1810	1789	1743	1787
Massa saturada 24h Im. (g)	2113	2042	2086	2069	2019	2076
Absorção %	15,21	15,11	15,25	15,65	15,83	16,11
Absorção média %		15,19			15,86	

Absorção d' água especificada pela NBR 13553 “ Materiais para emprego em parede monolítica de solo- cimento sem função estrutural” (ABNT,1996) $\leq 20\%$ aos 7 dias

5.8. DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA, VARIAÇÃO DA UMIDADE E VARIAÇÃO DE VOLUME PRODUZIDAS POR CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM DE CORPOS-DE-PROVA DE SOLO-CIMENTO

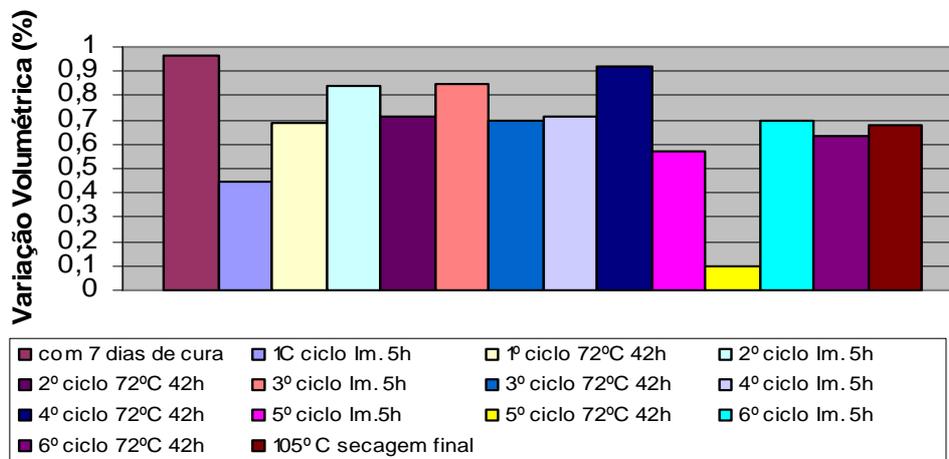
Os resultados obtidos pelo ensaio de durabilidade por molhagem e secagem dos compósitos CM-75% e CM-100% são apresentados na tabela 61 e figuras 46 e 47.

Tab. 61- Determinação da perda de massa dos compósitos CM-75% e CM-100%

C.P	CM -75%)Perda de massa	CM-100% Perda de
	%	massa%
1	1,61	2,43
2	1,74	4,91
Média	1,67	3,67

Perda de massa para solo A-2-4 especificada pela NBR 13553 “ Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural”(ABNT,1996) $\leq 14\%$

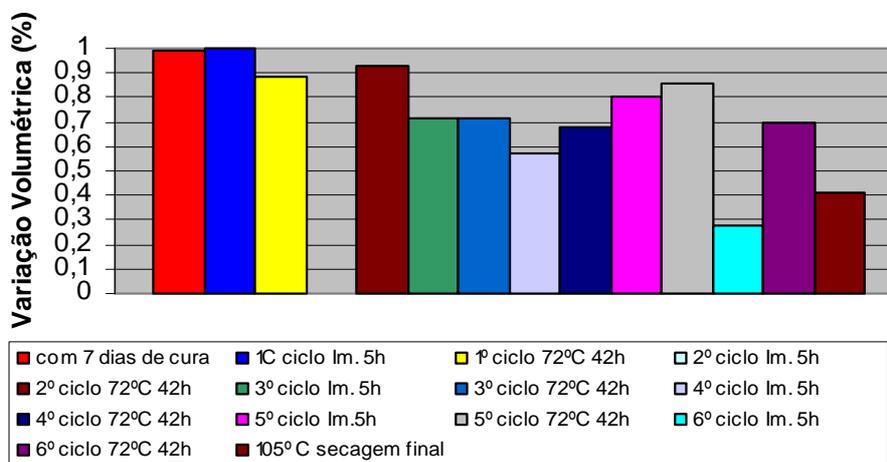
Varição Volumétrica CM-75%



Varição de volume especificada pela NBR 13553 “Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural” (ABNT,1996) $\leq 1\%$

Fig.46- Gráfico de variação volumétrica do compósito CM-75%

Varição Volumétrica CM-100%



Varição de volume especificada pela NBR 13553 “Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural” (ABNT,1996) $\leq 1\%$

Fig.47 Gráfico de variação volumétrica do compósito CM 100%

5.9. ANÁLISE QUÍMICA DOS COMPÓSITOS

As moldagens dos compósitos CM-75% e CM-100% foram realizadas com RCD reciclado do lote I. Dos parâmetros analisados deste lote, nenhum deles apresentou concentração superior aos valores máximos permitidos pelas listagens nºs 7, 8 e 9 da NBR 10004 “Classificação de Resíduos Sólidos” (ABNT, 1987). Como um dos objetivos deste trabalho é verificar a eficiência do encapsulamento de substâncias perigosas, efetuou-se a análise química dos compósitos CM-75% e CM-100% referente ao parâmetro nitrato, mesmo com concentração inferior ao valor máximo permitido, haja visto se tratar de uma substância bastante solúvel na presença de água e de difícil encapsulamento. Deste modo foram analisados os extratos lixiviados e solubilizados de ambos os compósitos aos 7 dias de cura, cujos resultados são apresentados na tabela 62.

Tab.62 - Resultados analíticos de nitrato dos compósitos CM-75% e CM-100%

Parâmetro Analítico	Extratos Lixiviados		Extratos Solubilizados	
	CM-75%	CM-100%	CM-75%	CM-100%
Nitrato (mg N/L)	0,20	0,20	0,20	0,66
Valor máximo permitido pela listagem nº 8 da NBR 10004 para extratos solubilizados: 10 mg/L				

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O RCD reciclado utilizado neste trabalho pode ser caracterizado como um material de predominância arenosa, que apresenta baixa plasticidade e contração. Deve conter em sua composição significativa quantidade de produtos cerâmicos, pois a absorção de água verificada é maior que a de agregados miúdos tradicionais. Este fato influenciou o resultado do ensaio de compactação (proctor) com energia normal, que apresentou teor de umidade ótima maior que o esperado para materiais arenosos. Observou-se ainda que a massa específica dos grãos do RCD reciclado é ligeiramente maior do que a de uma areia quartzosa. Sua massa unitária no estado solto apresentou um valor de $1,20 \text{ Kg/dm}^3$, pouco inferior à da areia quartzosa. A curva granulométrica apresenta coeficiente de não uniformidade relativamente alto expressando uma ótima graduação. Observa-se, no entanto, que o coeficiente de curvatura é alto. Isto revela uma peculiaridade granulométrica causada por excesso de areia fina a média em relação às partículas grosseiras e partículas silto-argilosas. Esta característica também influenciou o resultado do ensaio de proctor que apresentou massa específica aparente seca máxima inferior à de um solo convencional. De qualquer forma, as características físicas do RCD reciclado permitem sua utilização como agregado no compósito de solo-cimento. O grau de dispersão nulo apresentado pelo RCD reciclado sugere que o material não apresenta susceptibilidade apreciável aos processos erosivos hídricos.

Em relação à variabilidade das características físicas do RCD reciclado, verificou-se que todos os lotes apresentaram pequenas variações no que se refere aos aspectos granulométricos e aos limites de consistência, que permitiram enquadrá-los no mesmo grupo (A-2-4), da classificação D-3282 “Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes “ (ASTM, 2004). As massas específicas dos grãos de todos os lotes não apresentaram grandes diferenças entre si com coeficiente de variação de 1,04%. A absorção de água praticamente é a mesma em todos os lotes com a exceção do lote nº 4 que deve conter em sua composição menos produtos cerâmicos.

A análise das características químicas do lote I do RCD reciclado permite as seguintes considerações:

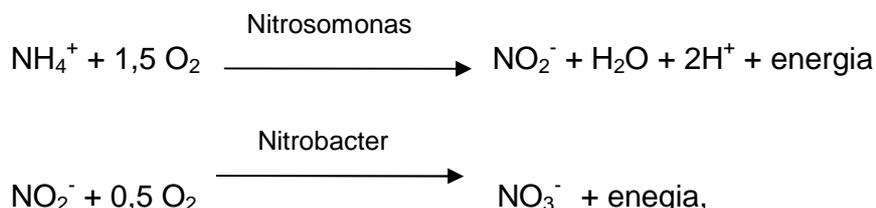
a) O teor de matéria orgânica não pôde ser avaliado com exatidão, uma vez que na metodologia empregada para sua determinação, este vem acrescido de sólidos voláteis e até mesmo por pequena quantidade de CO_2 desprendido do CaCO_3 .

b) A concentração de nitrato do extrato solubilizado foi de 12 mg/L. No entanto para efeito de classificação de resíduos, de acordo com a norma técnica NBR 10004 “Classificação de Resíduos Sólidos” (ABNT, 1987), esta concentração deve ser expressa em mg N/L e desta forma a concentração fica em 2,71 mg/L, portanto abaixo de 10 mg N/L (concentração máxima permitida pela listagem nº 8 desta norma)

O estudo da variabilidade química do RCD reciclado com amostras dos lotes I, II, III, IV, V e VI, revelaram o seguinte:

a) O nitrato (lote IV); o chumbo (lote V); o cromo (lotes III e IV); o alumínio (lote VI); o sulfato (lotes III e IV) e a dureza total (lotes III e IV) referentes aos extratos solubilizados, ultrapassaram os limites estabelecidos pela listagem nº 8 da norma NBR 10004 (ABNT, 1987).

b) A presença de nitrato provavelmente se deve a ação de bactérias nitrificantes, que se desenvolvem com maior ou menor facilidade de acordo com o ambiente de disposição, sobre o íon amônio e cujas reações foram demonstradas por MALAVOLTA, 1980:



Para o NH_4^+ , este estudo não conseguiu detectar sua origem. Há também a possibilidade de o RCD já conter nitrato oriundo de materiais sanitários;

c) Pode-se atribuir o excesso de dureza total apresentado em alguns lotes, a forte presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no RCD;

d) A origem do sulfato provavelmente está relacionada principalmente à presença de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$);

e) O forte odor de amônia detectado nos lotes III e IV quando umedecidos, pode ser atribuído à presença de amônio que em uma reação, em ambiente alcalino, pode reagir com o OH^- gerando a amônia: $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$;

f) Nos lotes III e IV detectou-se ainda, além do nitrato e da dureza total, uma quantidade maior de enxofre em relação aos demais lotes, nos extratos lixiviados, solubilizados e digeridos. Nesses lotes de amostras, o sulfato se apresentou em quantidade superior ao estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 1987).

g) Apesar de alguns parâmetros químicos dos extratos solubilizados serem encontrados em quantidades superiores ao permitido pela NBR 10004 (ABNT, 1987), há que se levar em consideração que muitas vezes estes contaminantes já fazem parte da composição das matérias primas utilizadas na elaboração de certos materiais de construção.

As análises dos parâmetros químicos investigados indicam que o RCD reciclado nem sempre pode ser considerado totalmente inerte quando se leva em conta os lotes individualmente. No entanto, considerando-se as médias dos valores obtidos, verifica-se que estas ficam abaixo dos limites estabelecidos pela norma NBR 10004. Verificou-se ainda em muitos casos, valores elevados do coeficiente de variação entre os lotes no que se refere aos parâmetros químicos.

Com base na caracterização de cinco misturas resíduo/solo com proporções variando de 0 a 100% (0, 25, 50, 75 e 100%), verificou-se que três atendem às especificações atinentes ao emprego do solo-cimento, ou seja, as proporções de 50% (M - 50%), 75% (M - 75%) e 100% (M - 100%). No sentido de maximizar a utilização deste resíduo, foram escolhidos para o prosseguimento dos trabalhos as misturas M-75% e M-100%.

A escolha dos teores de cimento para os compósitos com mistura 75% (CM-75%) e 100% (CM-100%), foi realizada de tal forma que estes fossem os menores possíveis e permitissem atingir tensão de ruptura à compressão de no mínimo 2,1 MPa aos 7 dias. Para o compósito CM-75% este teor foi de 8% e para o compósito CM-100% foi de 7%. Entretanto, para efeito de padronização, adotou-se para ambos o teor de 8% em massa. Este pequeno incremento no teor de cimento contribui para o efetivo encapsulamento de eventuais contaminantes presentes no resíduo reciclado.

Após a moldagem de 40 corpos - de - prova para cada um dos compósitos foram realizados os ensaios de resistência à compressão aos 7, 28, 60 e 90 dias e verificou-se que esta resistência aumentou de 7 para 28 dias de idade. No entanto o mesmo não ocorreu de 28 para 60 dias e neste caso, o compósito CM-75% teve redução significativa na sua resistência e o compósito CM-100% praticamente manteve a resistência inalterada. A resistência à compressão simples aos 90 dias do compósito CM-75% apresentou um pequeno acréscimo em relação aos 60 dias e a do compósito CM-100%, um pequeno declínio. Deve-se ressaltar que a cura dos corpos - de - prova após 28 dias ocorreu apenas sob sombra e sem umidade.

Os valores de absorção de água aos 7 dias determinados através de ensaios para os dois compósitos atendem perfeitamente às exigências especificadas. Da mesma forma, os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem, permitiram determinar a perda de massa e variação volumétrica, sendo os valores encontrados considerados satisfatórios.

Análises dos extratos lixiviados e solubilizados dos compósitos CM-75% e CM-100%, apresentados na tabela 62, mostraram redução significativa dos valores obtidos em relação ao nitrato, ou seja, de 2,71 mg N/L no RCD reciclado para 0,66 mg N/L no extrato solubilizado do compósito CM-100%. Estas análises sugerem que a aplicação do RCD reciclado no compósito solo-cimento seja uma alternativa eficiente de encapsulamento do nitrato presente.

7. CONCLUSÕES

A análise da caracterização física do RCD reciclado objeto deste estudo possibilita as seguintes conclusões:

a) O material, uma areia fina à média siltosa pouco argilosa, constitui um agregado alternativo miúdo. Sua curva granulométrica apresenta coeficiente de curvatura alto, causado pelo excesso de areia fina a média em relação às partículas grosseiras e silto-argilosas;

b) O resíduo apresenta baixa plasticidade e baixa contração, indicando que seu pequeno conteúdo de argila tem características não expansivas;

c) Detectou-se alta absorção de água em relação aos agregados quartzosos convencionais, devido à presença de produtos cerâmicos em sua composição;

d) A massa específica dos grãos é ligeiramente maior que a dos agregados arenosos naturais e sua massa unitária é pouco menor que a das areias quartzosas;

e) A massa específica seca máxima obtida no ensaio de compactação é menor que a de um solo convencional e isto se deve ao alto valor de coeficiente de curvatura conforme já discutido anteriormente. Por sua vez, o teor de umidade ótima é maior que o esperado para um solo com características arenosas, revelando a presença de materiais cerâmicos na composição do RCD reciclado;

f) O alto grau de floculação do material sugere que este seja pouco susceptível aos processos de erosão hídrica;

g) O RCD reciclado pode ser considerado homogêneo com relação à variabilidade nas propriedades físicas dos seis lotes estudados. Foram observadas pequenas variações granulométricas e nos limites de consistência. Todos os lotes estão enquadrados no mesmo grupo (A-2-4) da classificação D3282 (ASTM, 2004). Além disto, a massa específica dos grãos apresenta pequenas diferenças entre si nos seis lotes. Da mesma forma, os teores de absorção de água apresentam valores próximos entre si;

Quanto às propriedades tecnológicas, verificou-se que:

a) As misturas nas proporções de 50%, 75% e 100% atendem às especificações para emprego como solo-cimento;

b) As misturas nas proporções de 75% e 100% são as mais adequadas porque permitem o emprego do resíduo em maior escala;

c) Ensaios de dosagem mostraram que a quantidade de cimento a ser adicionada varia entre 7 a 8% em massa, permitindo desta forma ao solo-cimento atingir resistência à compressão mínima de 2,1 Mpa, aos 7 dias de cura.

d) Ensaios de resistência à compressão; absorção de água; determinação da perda de massa; variação de umidade e variação de volume produzidas por ciclos de molhagem e secagem de corpos-de-prova evidenciaram a exequibilidade da aplicação do RCD como agregado em compósito solo-cimento, atendendo as especificações para este emprego.

A caracterização química, por sua vez, permitiu concluir que:

a) Entre os parâmetros químicos analisados do lote I não foram detectadas concentrações superiores as permitidas pelas listagens n^os 7, 8 e 9 da norma técnica NBR 10004 “Classificação de Resíduos Sólidos” (ABNT, 1987);

b) A presença de sulfato e dureza total ocorrem em valores próximos aos permitidos pela mesma norma;

c) Observou-se em análise de variabilidade que incluiu seis lotes de amostras, variação significativa. Em extratos solubilizados, foram determinados valores para nitrato, chumbo, cromo, alumínio, sulfato e dureza total que ultrapassam os máximos permitidos pela norma NBR 10004 em pelo menos um dos lotes. No entanto, as concentrações apresentaram valores médios inferiores aos máximos permitidos pela mesma norma.

d) A grande variabilidade dos resultados analíticos relativos aos parâmetros químicos do RCD reciclado, sugere a realização de análises químicas mais completas e freqüentes, incluindo elementos e substâncias não contemplados na presente pesquisa;

e) A presença de sulfato no RCD reciclado merece ser mais bem estudada, face a possibilidade da reação com o aluminato-tricálcico do cimento hidratado provocando expansão volumétrica e desagregação, conforme esclarece SHERWOOD, 1957;

f) A presença de matéria orgânica no RCD reciclado, potencialmente responsável pelo retardamento do endurecimento do cimento, também requer investigação mais detalhada;

Verificou-se, com base nos resultados das análises químicas, que o emprego do RCD reciclado em solo-cimento apresenta-se como uma alternativa eficiente de encapsulamento do nitrato presente no extrato solubilizado deste resíduo.

São necessários ainda estudos de viabilidade econômica, que deverão incluir necessariamente projetos piloto de industrialização de componentes de solo-cimento, pavimentações experimentais; monitoramento de construções com o objetivo de verificar a ocorrência de defeitos técnicos não previstos, entre outros;

A exemplo da prática adotada em mineração, a estocagem e caracterização prévia do resíduo permitiriam sua homogeneização, evitando os inconvenientes causados pela variabilidade observada entre os lotes. A homogeneização evitaria também problemas como a variação de cores ou das propriedades tecnológicas de materiais utilizados em uma mesma obra.

A utilização do solo-cimento com o emprego do RCD reciclado, além de contribuir na solução de problemas com a geração de resíduos da construção, também mostra-se como uma alternativa para resolver os problemas de falta de moradias populares ou ainda para a pavimentação de baixo custo em bairros periféricos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN,V.; JOHN, V.M.; DEROLLE,A. Construindo com fibras vegetais. **Revista Construção**, São Paulo, n. 2200,p 17-20, abril 1990.

ALLEN, D. T.; ROSSELOT, K.S. Pollution Prevention at the Macro Scale: Flows of Wastes, Industrial Ecology and Life Cycle Analysis. **Waste Management**, v. 14, n. 3/4,p.317-328, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS-ASTM. **Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes**. West Conshohocken: ASTM International,2004.Designation:D3282 - 93 (Reapproved 2004)

ANGULO,S.C. **Produção de Concretos com Agregados Reciclados**.1998. 86f.Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Londrina, Londrina,1998.

ANGULO,S.C. **Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados**. 2000.155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia).Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANGULO, S.C.;JOHN, V.M. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade.In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9.,2002, Foz do Iguaçu, **Anais...** Foz do Iguaçu : **ENTAC, 2002. p.** 1613-24

ANGULO, S.C.; ULSEN,C.; KAHN,H.;JOHN,V.M. Desenvolvimento de Novos Mercados para a Reciclagem massiva de RCD. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL,5.,2002, São Paulo. Anais... São Paulo: IRACON, 2002.p. 293-308.

ARAÚJO,E.G.(Coord.) Desenvolvimento de agente expansor a base de escória de alumínio para a produção de concretos celulares auto-clavados ou moldados in loco. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n. 81,p. 76-78,2002.

ARTHUR,R.C.J. **Utilização de resíduos sólidos gerados pelo descarte das areias de fundição, em solo-cimento**. 2001.48 f.Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação em Engenharia Ambiental)-Escola de Engenharia de Piracicaba, Fundação Municipal de Ensino,Piracicaba,2001..

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com a utilização de prensas hidráulicas. (BT-112)** São Paulo, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Absorção de água em agregados miúdos - NBR 9777. Rio de JANEIRO, 1997.

— Agregados: amostragem - NBR 7216. Rio de Janeiro, 1982.

— Agregados: determinação da composição granulométrica - NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados: determinação do teor de materiais pulverulentos -NBR 7219. Rio de Janeiro, 1982.

— Agregado em estado solto: determinação da massa unitária - NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.

— Bloco utilizado de solo-cimento sem função estrutural -NBR 10834. Rio de Janeiro, 1994.

— Ensaio de Lixiviação - NBR 10.005. Rio de Janeiro, 1987.

— Ensaio de Solubilização - NBR 10.006. Rio de Janeiro, 1987.

— Execução de sub-base ou base de solo-cimento - NBR 12254. Rio de Janeiro, 1990.

— Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica - NBR 10833. Rio de Janeiro, 1989.

— Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural - NBR 13553. Rio de Janeiro, 1996.

— Materiais para sub-base ou base solo-cimento - NBR 11798. Rio de Janeiro, 1990.

— Resíduos Sólidos: classificação - NBR 10.004. Rio de Janeiro, 1987.

— Rochas e solos : Termologia - NBR 6502. Rio de Janeiro, 1995.

— Solo: Análise granulométrica - NBR 7181. Rio de Janeiro, 1984.

— Determinação do limite de concentração - NBR 7183. Rio de Janeiro, 1984.

— Solo: Determinação do limite de liquidez - NBR 6459. Rio de Janeiro, 1984.

— Solo: Determinação do limite de plasticidade - NBR 7180. Rio de Janeiro, 1984.

— Solo: Determinação da massa específica - NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984.

— Solo: Ensaio de compactação - NBR 7182. Rio de Janeiro, 1986.

— Solo-Cimento: Determinação da absorção de água - NBR 13555. Rio de Janeiro, 1996.

— Solo-Cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - NBR 12025. Rio de Janeiro, 1990.

— Solo-Cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento - NBR 12253. Rio de Janeiro, 1992.

— Solo-Cimento: Ensaio de compactação - NBR 12023. Rio de Janeiro, 1992.

— Solo-Cimento: Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - NBR 13554. Rio de Janeiro, 1996.

— Solo-Cimento: Moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos - NBR 12024. Rio de Janeiro, 1992.

— Tijolo maciço de solo-cimento - NBR 8491. Rio de Janeiro, 1984.

BATTISTELLE, R.A.G. **Análise da Viabilidade de técnicas do Resíduo da Indústria de celulose e papel em tijolos de adobe.** 2002. 172 f. Tese (Doutorado em ciências da engenharia ambiental)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

BRITO FILHO, J.A. A cidade versus entulho. In: DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 1999. p.56-67.

BRITO, L. A.; CAVALCANTE, J. R.; CHERIAF, M. Utilização de entulho de construção civil como agregado graúdo, para a confecção de novos concretos. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL- MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 2001. p. 203-213.

CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC,2002.

CAMARGO, A. minas de entulho.**Construção**, São Paulo, n.15, p. 15-24, mar./abril.1995.

CARNEIRO, A. P.et al. Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado.In: ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DO MEIO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2000, Salvador. **Anais...** Salvador: ENTAC, 2000.

CARNEIRO, A.P. et al. Características do entulho e do agregado reciclado. IN: RECICLAGEM de entulho para a produção de materiais de construção - Projeto Entulho bom Salvador: EDUFBA, 2001. p. 142-86.

CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO. **Manual de construção com solo-cimento**. 4. ed. São Paulo: ABCP;1999.

CHAMIE,S.L. **Encapsulamento de resíduo de lamas galvânicos através da solidificação em matrizes de cimento**.1994.246f.Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo,1994.

CHENNA, S. I. M. O Manejo e a reciclagem de entulho em Belo Horizonte. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES,4.2001,São Paulo.**Anais..**São Paulo: Ibracon,2001.p.3-10.

CHERIAF,M. ; ROCHA,J.C.; LUZ,C.R. **Valorização de lodos da indústria têxtil como novo material de construção civil**. Florianópolis, UFSC,2000.

CLESCERI,L,S.; GREENBEK,A.E.; EATON,A,D.; **Standard methods for the examination of watie and wastwadn**. 20. ed. Washington; American Pjblic Health Association,1998.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Resíduos sólidos industriais**. São Paulo, 1985.

CORCUERA CAVALCANTI,D.K. **Políticas para reciclagem de resíduos da construção civil**. Disponível em:<www.geocities.com/politicas para a reciclagem de resíduos da construção civil.htm> Acesso em: 29 dez. 2003.

DIMARCO, A.R. Pelos caminhos da terra. **Projeto**,São Paulo, n. 65, jul.1984.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 4. ed. Rio de Janeiro,1997.

EUROPEAN UNION.**Construction and demolition waste management practive and their economic impacts**.Washington, 1999. European commission. Report to DGX1.

FIGUEROLA, V. Alvenaria de solo-cimento. **Téchne**, São Paulo, n. 85, p. 30-36,2004.

GRIGOLI, A. S. Entulho em Canteiro de Obra Utilizado como Material de Construção : **Uma** Alternativa Inadiável. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL -MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES,4., 2001.**Anais...** São Paulo: Ibracon, 2001.p.251-264.

HENDRICKSON, C ; HARVOATH, A Resource use and environmental emission of U. S. construction sectors. **J Construct. Engineering and Management**, v.126, n.1, p. 38-44, jan,2000.

HOGENTOGLER, C. A. **Engineering properties of soil**. New York: McGraw-Hill, 1937.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Carta pedológica semi detalhada do Estado de São Paulo**.Campinas, 1989.Escala 1:100000. Folha de Piracicaba (SF-234-Y-A-IV).

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓN DE CATALUNYA. **ITEC & Generalitat de Catalunya**. Catalunha: Departament de Medi Ambient. Junta de Resios, 1995.

JOHN, V. M; Novas Tecnologias para a construção habitacional. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2.,1995,São Paulo. **Anais...** Bauru:1995. p. 108-113.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercados para resíduos In: SEMINÁRIO SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, Bauru. **Anais...** São Paulo: ANTAC 1996. p. 21-31.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: Contribuição a metodologia de pesquisa e desenvolvimento.2000.102f. Tese (Livre Docente) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo,São Paulo, 2000.

KASAI, Y. **Barriers to the use of Construction by Products and the use of Recycled Aggregate**. In: HENDERSON & LIMBACHIYA, (Ed.).Concrete in Japan: use of Recycled Concrete Aggregate. DHIR: Tomas Telford, 1998 - p 433-44.

LAURITZEN, E. K. **The Global Challeng of Recycled Concrete**. In: Henderson & Limbachiya, (Ed.). Use of recycled concrete aggregate. DHIR: Tomas Telford, 1998. p506-19.

LIMA, J.A.R. **Proposição de diretrizes para a produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 204f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LOTURCO,B. A Nova lei do lixo. **Téchne**, São Paulo, n.82,p.52-55, jan. 2004.

MACÊDO, J.A.B. **Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e microbiológicas** 2. ed.Belo Horizonte:CRQ, 2003.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**.São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. p. 122 -23

MANAHAN, S. E. **Fundamentals of environmental chemistry**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.

MASUERO, A. B.; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. Emprego de escória de resíduos sólidos industriais. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS, 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000.

MATOS; G; WAGNER, L. **Consumption o materials in the United States 19001995**. Us Geological Survey, 1999.

NEVES.C.M.M; CARNEIRO, A.P; COSTA,D.B. Uso do agregado reciclados em tijolos de **solo** estabilizado com cimento. In: PROJETO ENTULHO BOM: reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Salvador : EDUFBA, 2001. p. 228-60.

NOLASCO, A.M. **Utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para construção civil**.1993.110f. Dissertação (Mestrado em arquitetura)-Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

NOLASCO, A.M.. Blocos cerâmicos utiliza resíduos da indústria de papel.**Revista Construtores**, São Paulo, n. 3142, p.22-22. 1993.

OLIVEIRA, M. J. E.; MATTOS, J. T.; ASSIS, C. S.. Resíduos de concreto: Classe III Versus Classe II. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL-MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES,4.,2001,São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 2001.p.87-95.

PABLOS,J.M. **Utilização do resíduo sólido gerado pelo descartes da areias de fundição aglomerada com argila no setor de construção civil**.1995.57f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

PICCHI,F.A. **Sistemas de qualidade**: Uso em empresas de construção de edifícios.1993.- Tese (Doutorado em Engenharia)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

PINTO,C.S. **Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento**.5ª ed. São Paulo: ABCP, 1989.

PINTO,C.S.: **Curso básico de mecânica dos solos**, 2. ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2002.

PINTO, T.P. **Perda de materiais em processos construtivos tradicionais**. São Carlos: Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de São Carlos, 1989/. Datilografado.

PINTO,.T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**.1999.189f.Tese (Doutorado em Engenharia)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PIRACICABA. Prefeitura Municipal. **Resíduos de construção em Piracicaba: diagnóstico geral**.Piracicaba, 2001.

PIRACICABA. Prefeitura Municipal. **Resíduos de construção em Piracicaba**. Plano para a Gestão Sustentável. 2002

PITTA, M.R. **Características Tecnológicas dos Solos Estabilizados com o Cimento**. São Paulo : ABCP, 1980.

PITTA, M.R. **Solo cimento para revestimento de barragens de terra, diques e reservatório**. São Paulo: ABCP, 2000.

PROCTOR, R.R.; Fundamental principles of soil compaction. **Engineering news record**, n.111, p. 245-48, 1933.

ROCHA, J.L.; CHERIAF, M. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Coleção Habitare v. 4. Disponível em : < Atp/ www. Habitare.infohab.org.br > Acesso em: 30 mar. 2004.

SARDÁ, M.C; ROCHA, J.C. Potencialidades do uso de RCD gerado no município de Blumenau em suas obras públicas. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEL, 3., 2003, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2003.

SAVASTANO JR., H.; NOLASCO, M.; LUZ, P.H.C. Análise de resíduos e sub-produtos da agroindústria de fibras vegetais do Brasil para uso em materiais de construção. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL, 2. SIMPÓSIO DO CURSO CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL, 4., 1997, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EESC-USP 1997.

SHERWOOD, P.T. **Stabilization o weathered and sulphate bearing clays**. London: Geotechnique, 1957.

SHULZ, R.R.; HENDRICKS, C.F. **Recycling of demolished concrete and masonry**. London: E & FNSpon, 1992. (Report 6.).

SILVA, M.O.S.A. **Análises físico-químicos para controle de Estações de Tratamento de Esgotos**. São Paulo: CETESB, 1997.

SMITH, W. F. **Princípios de ciência e engenharia de material**. Alfragide: Mc Graw-Hill de Portugal, 1998. p-768.

SOILBEMAN, L. **As perdas de materiais na construção de edificações: sua incidência e seu controle**. 1993, 172 f. Dissertação (Mestrado em engenharia). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

SOUZA, U.B.L. et al. Perdas de materiais nos canteiros de obras: a quebra do mito. **Qualidade na construção**, São Paulo, v.2, n.13, p. 10-15, 1998.

THOMAZ, C.A. **Paredes monolíticas de solo-cimento: Hospital Adriano Jorge- Manaus**. São Paulo: ABCP, 1984.

TOALDO, E. Para não virar pó. **Construção**, São Paulo, n. 2348. p.10, fev. 1993.

TURMINA, R. F.; BARROS, M. M. S. B. Estudo da viabilidade técnica de contrapisos com agregados de entulho de obra. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL-MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES,4., 2001,São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibracon,2001. p.265-74.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Construction and demolition waste Landfills**. May 18,1995.Daft Report.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Inductively coupled plasma - atomic emission spectrometry**, Washington,1996 (Method 6010-B)

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Characterization of building-related construction and demolition debris in the United States**. Washington,1998. Report nº EPA 530 – R- 98 -010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. RESOURCE CONSERVATION AND RECOVERY ACT-RCRA. **Environmental indicators progress report**. Washington: EPA, Office of Solid Waste, 1996.

VAN DER ZWAN,J.T.H. Application of waste materials a success now, a success in the future. In: GOUMANS van der SLOOT, aalbers (Ed.). Waste Materials in Construction. London: Elsevier,1991, 869-88.

VAZQUEZ, E. Aplicacion de nuevos materiales reciclados em La Construccion Civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES,4.,2001,São Paulo.**Anais...** São Paulo: Ibracon,2001.p. 11-21.

XAVIER, L. L.; ROCHA, J. C. Diagnóstico do resíduo da construção civil início do caminho para o uso potencial do entulho. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. MATERIAIS E SUAS APLICAÇÕES,4.,2001,São Paulo.**Anais...** São Paulo: Ibracon,2001. p. 57-63.

ZORDAN,S.E.**A Utilização do entulho como agregado na confecção do concreto**. 1997.140f. Dissertação (Mestrado em engenharia)- Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas,Campinas, 1997.

ZORDAN,S.E.**Entulho da indústria da construção civil**: ficha técnica. Disponível em:<[www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho ind ccivil.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm)> Acesso em :29 dez. 2003.