



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 


Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

MAURO SERGIO ZAKIA JABUR ARRUDA

**CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PROVENIENTE DE USINAS DE
BENEFICIAMENTO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO PARA
ANÁLISE DE SUA INFLUÊNCIA NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS
LATERÍTICOS**

Sorocaba
2020



MAURO SERGIO ZAKIA JABUR ARRUDA

**CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PROVENIENTE DE USINAS DE
BENEFICIAMENTO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO PARA
ANÁLISE DE SUA INFLUÊNCIA NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS
LATERÍTICOS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini

Sorocaba
2020



Arruda, Mauro Sergio Zakia Jabur.

Caracterização do material proveniente de usinas de beneficiamento de materiais de construção para análise de sua influência na estabilização de solos lateríticos / Mauro Sergio Zakia Jabur Arruda, 2020
124 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini

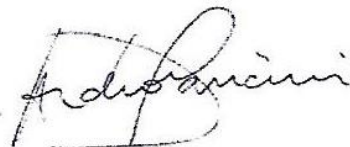
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental, Bauru, 2020

1. Resíduos de construção. 2. Agregado miúdo reciclado. 3. Solo laterítico. 4. Ensaio normal de compactação. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Civil. II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Campus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de MAURO SERGIO ZAKIA JABUR ARRUDA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE BAURU.

Aos 24 dias do mês de novembro do ano de 2020, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE Mestrado de MAURO SERGIO ZAKIA JABUR ARRUDA, intitulada **CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PROVENIENTE DAS USINAS DE BENEFICIAMENTO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO PARA ANÁLISE DE SUA INFLUÊNCIA NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI (Orientador - Participação Virtual) do Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia, Campus de Sorocaba, UNESP, Prof. Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA (Participação Virtual) do Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de São José dos Campos - UNESP, Profa. Dra. ANDRESSA CECILIA MILANESE (Participação Virtual) do Departamento de Edificações / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: **aprovado**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo Presidente da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI

À minha esposa Virginia e às minhas filhas
Ana Luiza, Patrícia e Beatriz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini pela admirável capacidade técnica, pelas orientações e pelas demonstrações de amizade, confiança e incentivo, fundamentais para que este trabalho pudesse ser realizado.

Agradeço à Prof.^a Dr.^a Maria Lúcia Pereira Antunes e ao Prof. Dr. Roger Augusto Rodrigues, que participaram da banca de qualificação deste trabalho com interesse, gentileza e orientações fundamentais para a construção final desta dissertação.

Agradeço ao técnico de laboratório de mecânica dos solos, Eduardo Soares dos Santos, do Instituto Federal de São Paulo, campus Itapetininga – SP, pela amizade, auxílio, disposição e pelo apoio referente aos instrumentos e ferramentas necessárias para a realização do programa experimental.

Ao técnico de laboratório de química, Douglas Mendes da Silva Del Duque, do Instituto Federal de São Paulo, campus Itapetininga – SP, pelo auxílio, colaboração e ajuda durante os ensaios realizados.

Ao Prof. Me. Gustavo José Lauer Coppio do Instituto Federal de São Paulo, campus Itapetininga – SP, pela colaboração, generosidade, disposição e amizade demonstrados no auxílio para a realização dos ensaios no canteiro de obras.

Aos meus professores da pós-graduação da UNESP, principalmente o Prof. Dr. Alexandre Marco da Silva e o Prof. Dr. Fabiano Tomazini da Conceição pela capacidade, dedicação e interesse pela motivação e aprendizado dos alunos.

Aos meus colegas professores, funcionários e ao Diretor Geral do Instituto Federal de São Paulo, campus Itapetininga – SP pelo total apoio e colaboração.

Aos proprietários e funcionários das usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição das cidades de Araraquara, Jundiaí e Itapetininga, pela educação e receptividade por ocasião das visitas.

Resumo

As quantidades de resíduos de construção e demolição (RCD) representam quase a metade do total de resíduos sólidos gerados e nem sempre são destinadas adequadamente, contribuindo assim para o desperdício de materiais e a degradação do meio ambiente. Sua maior parte é composta de partículas de origem mineral que podem ser recicladas por processos de beneficiamento simples, como triagem e moagem para cominuição de suas partículas. Para que o material reciclado seja aceito como uma matéria prima de boa qualidade e que haja maior desenvolvimento de novos mercados são necessárias ações no sentido de incentivar um maior número de usinas, melhorar seu funcionamento e divulgar mais informações sobre os resultados obtidos quando se usa RCD na construção civil. Neste trabalho foram colhidas amostras de RCD das usinas de reciclagem de três cidades do Estado de São Paulo: Araraquara, Jundiaí e Itapetininga e com esse material, procurou-se através de análises de laboratório, especificamente a partir de ensaios normais de compactação, conhecer os valores de máxima densidade seca e respectiva umidade ótima, de um solo de comportamento laterítico utilizado para aterros, e da mistura deste com os resíduos de construção e demolição nas proporções de 25% e de 50%. Dentre os tipos de materiais produzidos nas usinas de RCD (pedregulho, agregado graúdo e agregado miúdo), o material usado para análise neste trabalho foi o de granulometria mais fina, o agregado miúdo que, porém, não foi reprocessado em uma nova britagem para cominuição de suas partículas, mas sim, usado nos ensaios como ele sai das usinas de reciclagem e se apresenta para uso. Os resultados indicam um solo arenoso laterítico fino que apresenta o valor máximo de densidade seca de $2,03 \text{ kg/dm}^3$ com a umidade ótima de 10,5% que, ao ser misturado com RCD na proporção de 25% em peso, tem sua densidade seca máxima diminuída cerca de 3% e sua umidade ótima aumentada em torno de 2%. Verifica-se que quando a proporção da mistura é aumentada para 50%, há pouca variação nos valores das densidades secas máximas e das umidades ótimas.

Palavras-chave: Resíduos de Construção e Demolição; Solo; Agregado Miúdo; Ensaio Normal de Compactação.

Abstract

The amounts of construction and demolition waste (CDW) represent almost half the total of solid waste produced and it is not always properly discarded, contributing to material waste and degradation of the environment. Most of it is a mixture of mineral source particles which can be recycled in simple beneficiation processes such as sorting and crushing for comminution of its particles. In order to get the recycled material approval as raw material of good quality and greater development of new markets, actions are necessary to encourage the largest number of factories, improve its operation and spread information on the results obtained when CDW is used in civil engineering. In this study, CDW samples were collected from the recycling factories of three cities in São Paulo State: Araraquara, Jundiaí and Itapetininga. They were analysed in laboratory, using specifically normal tests of aggregation, with the purpose of obtaining the values of maximum dry density and its optimum moisture of a soil of laterite behavior which is used in embankments and the mixture of this soil with the waste of construction and demolition at the proportion of 25% and 50%. Among the materials produced in the CDW plants (pebbles, large aggregate and small aggregate), the material used in this study was the thinner one, the small aggregate, which was not reprocessed in a new crushing for comminution of its particles but the way it is sold by the recycling factories, ready for use. The results show a sandy and thin laterite soil that has the value of maximum dry density of 2.03 kg/dm³ reached with optimum moisture of 10.5% that, when mixed with CDW at the proportion of 25% in weight, has its maximum dry density reduced approximately to 3% and its optimum moisture increased around 2%. It is noted that when the proportion of the mixture is increased to 50%, there is a little variation in the values of the maximum dry density and the optimum moisture.

Keywords: Construction and Demolition Waste; Soil; Small Aggregate; Normal Compression Test.

Lista de Figuras

Figura 3.1 - Deposição de entulhos e RCD em via pública.....	19
Figura 3.2 - Caçambas utilizadas para remoção de RCD em Itu, SP.....	20
Figura 3.3 - Evolução da taxa de crescimento do PIB e da taxa do setor.....	24
Figura 3.4 - Sequência de datas das principais leis ambientais.....	25
Figura 3.5 - Estado de SP - localização das regiões estudadas.....	32
Figura 3.6 - Gráfico de barras - valores pelo PIB e RCD gerados.....	34
Figura 3.7 - Geração de resíduos em milhões de dólares em função do PIB.....	39
Figura 3.8 - Corte de terreno - camada superficial de solo laterítico.....	44
Figura 3.9 - Curvas granulométricas de alguns solos brasileiros.....	46
Figura 3.10 - Curvas de compactação de diversos solos brasileiros.....	47
Figura 4.1 - Produção dos agregados produzidos na Usina de Araraquara.....	50
Figura 4.2 - Produção dos agregados produzidos na Usina de Jundiaí.....	52
Figura 4.3 - Produção dos agregados produzidos na Usina de Itapetininga.....	55
Figura 4.4 - Amostras de solo no município de Boituva/SP.....	57
Figura 4.5 - Equipamentos de ensaio da massa específica dos grãos.....	61
Figura 4.6 - Ensaio de Granulometria das Amostras.....	65
Figura 4.7 - Ensaio Normal de Compactação.....	66
Figura 5.1 - Curva granulométrica (1) do solo laterítico.....	76
Figura 5.2 - Curva granulométrica (2) do solo laterítico.....	78
Figura 5.3 - Curva granulométrica do RCD de Araraquara.....	80
Figura 5.4 - Curva granulométrica do RCD de Jundiaí.....	81
Figura 5.5 - Curva granulométrica do RCD cinza de Itapetininga.....	83
Figura 5.6 - Curva granulométrica do RCD vermelho de Itapetininga.....	84
Figura 5.7 - Curvas granulométricas dos materiais estudados.....	85
Figura 5.8 - Gráfico do ensaio de compactação do solo laterítico.....	86
Figura 5.9 - Gráficos de compactação de solo com RCD de Araraquara.....	88
Figura 5.10 - Compactação do solo e da mistura solo-RCD de Araraquara.....	89
Figura 5.11 - Gráficos de compactação de solo com RCD de Jundiaí.....	91
Figura 5.12 - Compactação do solo e da mistura solo-RCD de Jundiaí.....	92
Figura 5.13 - Gráfico de compactação com RCD cinza de Itapetininga.....	94
Figura 5.14 - Compactação do solo e da mistura solo-RCD de Itapetininga.....	95

Figura 5.15 - Gráficos de compactação com RCD verm. Itapetininga.....	97
Figura 5.16 - Compactação solo e mistura solo-RCD verm. Itapetininga.....	98
Figura 5.17 - Curvas do solo e das misturas solo-RCD cinza e vermelho.....	100

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Taxas de crescimento do PIB e do setor da construção civil.....	23
Tabela 3.2 - População, Área, Densidade Demográfica e Geração de RCD.....	32
Tabela 3.3 - Principais índices das cidades estudadas.....	33
Tabela 3.4 - Comparação geração RCD – Europa, China, USA	38
Tabela 4.1 - Materiais e quantidades coletadas na Usina de Araraquara.....	50
Tabela 4.2 - Materiais e quantidades coletadas na Usina de Jundiaí.....	52
Tabela 4.3 - Materiais e quantidades coletadas na Usina de Itapetininga.....	54
Tabela 4.4 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	64
Tabela 5.1 - Cálculo do teor de umidade da amostra de solo laterítico.....	69
Tabela 5.2 - Cálculo do teor de umidade da amostra de RCD Araraquara.....	69
Tabela 5.3 - Cálculo do teor de umidade da amostra de RCD Jundiaí.....	70
Tabela 5.4 - Teor de umidade do RCD de Itapetininga cinza.....	70
Tabela 5.5 - Teor de umidade do RCD de Itapetininga vermelho.....	70
Tabela 5.6 - Massa específica da amostra de solo laterítico.....	71
Tabela 5.7 - Massa específica da amostra de RCD de Araraquara.....	71
Tabela 5.8 - Massa específica da amostra de RCD de Jundiaí.....	72
Tabela 5.9 - Massa específica do RCD cinza de Itapetininga.....	72
Tabela 5.10 - Massa específica do RCD vermelho de Itapetininga.....	73
Tabela 5.11 - Massa específica dos grãos (ρ_s).....	73
Tabela 5.12 - Peso específico aparente, índice de vazios e grau de saturação.....	74
Tabela 5.13 - Resumo da análise granulométrica (1) do solo laterítico.....	75
Tabela 5.14 - Resumo da análise granulométrica (2) do solo laterítico.....	77
Tabela 5.15 - Resumo da análise granulométrica do RCD de Araraquara.....	79
Tabela 5.16 - Resumo da análise granulométrica do RCD de Jundiaí.....	81
Tabela 5.17 - Resumo da granulometria do RCD de Itapetininga.....	82
Tabela 5.18 - Resumo da granulometria do RCD de Itapetininga verm.....	84
Tabela 5.19 - Teores de umidade e densidades secas do solo laterítico.....	86
Tabela 5.20 - Densidades secas do solo com 25% de RCD de Araraquara.....	87
Tabela 5.21 - Densidades secas do solo com 50% de RCD de Araraquara.....	88
Tabela 5.22 - Densidade seca e umidade dos ensaios de compactação.....	89
Tabela 5.23 - Densidades secas do solo com 25% de RCD de Jundiaí.....	90

Tabela 5.24 - Densidades secas do solo com 50% de RCD de Jundiaí.....	90
Tabela 5.25 - Densidade seca e umidade dos ensaios de compactação.....	92
Tabela 5.26 - Densidades solo com 25% de RCD cinza de Itapetininga.....	93
Tabela 5.27 - Densidades solo com 50% de RCD cinza de Itapetininga.....	93
Tabela 5.28 - Densidade seca e umidade dos ensaios de compactação.....	95
Tabela 5.29 - Densidades solo com 25% de RCD verm. de Itapetininga.....	96
Tabela 5.30 - Densidades solo com 50% de RCD verm. de Itapetininga.....	96
Tabela 5.31 - Densidade seca e umidade dos ensaios de compactação.....	98
Tabela 5.32 - Densidade seca e umidade dos ensaios (Itapetininga).....	99
Tabela 5.33 - Índices físicos dos materiais estudados (cinza e vermelho).....	101
Tabela 5.34 - Economia no custo de materiais da mistura solo com RCD.....	104

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – DEFINIÇÕES	18
3.2	ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE RCD.....	22
3.3	ALGUMAS LEIS BRASILEIRAS RELACIONADAS À RCD.....	25
3.3.1	<i>RESOLUÇÃO CONAMA.....</i>	25
3.3.2	<i>LEI FEDERAL DO SANEAMENTO BÁSICO.....</i>	27
3.3.3	<i>POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....</i>	28
3.4	GERAÇÃO E RECICLAGEM DE RCD NO BRASIL	29
3.4.1	<i>Indicadores de RCD em função do PIB em algumas cidades do Estado de São Paulo</i>	31
3.4.2	<i>RCD em Araraquara, Jundiaí e Itapetininga.....</i>	35
3.5	GESTÃO E GERAÇÃO DE RCD NO MUNDO	36
3.6	RECICLADOS DE RCD – ESTUDOS PARA USOS E APLICAÇÕES	40
3.7	SOLO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO	42
3.7.1	<i>Definições.....</i>	42
3.7.2	<i>Granulometria e curva de compactação.....</i>	45
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
4.1	MATERIAIS EMPREGADOS	49
4.1.1	<i>Materiais coletados na usina de Araraquara.....</i>	49
4.1.2	<i>Materiais coletados na usina de Jundiaí.....</i>	51
4.1.3	<i>Materiais coletados na usina de Itapetininga</i>	54
4.1.4	<i>Solo Laterítico (coletado no município de Boituva/SP).....</i>	57
4.2	MÉTODOS	58
4.2.1	<i>Determinação do teor de umidade (w).....</i>	58

4.2.2	<i>Determinação da massa específica (ρ)</i>	59
4.2.3	<i>Determinação da massa específica dos grãos (ρ_s)</i>	60
4.2.4	<i>Índices calculados a partir de outros índices</i>	62
4.2.5	<i>Determinação das curvas granulométricas</i>	63
4.2.6	<i>Determinação da densidade seca máxima e da umidade ótima</i>	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1	CÁLCULOS DOS TEORES DE UMIDADE	69
5.2	CÁLCULOS DAS MASSAS ESPECÍFICAS	71
5.3	CÁLCULOS DAS MASSAS ESPECÍFICAS DOS GRÃOS	73
5.4	PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO, ÍNDICE DE VAZIOS E GRAU DE SATURAÇÃO.....	74
5.5	DETERMINAÇÃO DAS GRANULOMETRIAS	75
5.5.1	<i>Análise granulométrica do solo laterítico</i>	75
5.5.2	<i>Análise granulométrica da amostra de Araraquara</i>	79
5.5.3	<i>Análise granulométrica da amostra de Jundiá</i>	80
5.5.4	<i>Análise granulométrica da amostra cinza de Itapetininga</i>	82
5.5.5	<i>Análise granulométrica da amostra vermelha de Itapetininga</i>	83
5.6	DENSIDADE SECA MÁXIMA E UMIDADE ÓTIMA	86
5.6.1	<i>Solo Laterítico</i>	86
5.6.2	<i>Solo misturado com RCD de Araraquara</i>	87
5.6.3	<i>Solo misturado com RCD de Jundiá</i>	90
5.6.4	<i>Solo misturado com RCD cinza de Itapetininga</i>	93
5.6.5	<i>Solo misturado com RCD vermelho de Itapetininga</i>	96
5.6.6	<i>Comparação - RCD cinza e vermelho de Itapetininga</i>	99
5.7	ÍNDICES FÍSICOS REFERENTES AO PONTO ÓTIMO DAS MISTURAS	101
5.8	ANÁLISE PRELIMINAR DAS VANTAGENS ECONÔMICAS DO USO DE RCD EM ATERROS.....	103
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	106
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SOLO LATERÍTICO.....	114
	APÊNDICE B – GRANULOMETRIA DO RCD DE ARARAQUARA E JUNDIAÍ.....	116
	APÊNDICE C – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO RCD DE ITAPETININGA	118
	APÊNDICE D – CURVAS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS DE SOLO COM RCD.....	120
	APÊNDICE E – VALORES DE MÁXIMA DENSIDADE E UMIDADE ÓTIMA DAS MISTURAS DE SOLO COM RCD.....	123

1 INTRODUÇÃO

O Brasil está em constante crescimento populacional e isso causa um déficit habitacional que faz com que o setor da construção civil esteja sempre em atividade, receba grandes aportes financeiros por parte dos investidores e do governo e seja sempre mencionado quando os índices de desemprego atingem níveis elevados, porque as atividades relacionadas à construção absorvem em abundância os mais variados tipos de trabalhadores.

Acompanhando o crescimento da indústria da construção há um aumento na extração de recursos naturais, como pedra e areia, usados nas obras. Segundo a U.S. Geological Survey, maior agência de água, terra, ciências biológicas e mapeamento civil dos Estados Unidos, a remoção de areia e cascalho para a construção civil em escala global pode exceder a 15 bilhões de toneladas por ano. De acordo com Marques Filho (2016), apenas em rochas e terra os homens removem anualmente o equivalente a dois Montes Fuji que possui 3.776 metros de altitude.

Além de serem causadoras de um alto consumo de recursos naturais, todas as construções acabam gerando resíduos, chamados de resíduos de construção e demolição (RCD) que, se não forem adequadamente direcionados, podem causar grandes danos ao meio ambiente. Apesar das dificuldades em se obter informações, pode-se dizer que o Brasil gera aproximadamente algo em torno de 50 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição por ano e que grande parte desse material é simplesmente descartada em aterros destinados a receber resíduos inertes, não conseguindo ser reaproveitada em quantidades significativas no setor da construção civil.

As construções residenciais, comerciais e industriais existentes em nosso país possuem em sua maior parte uma grande variedade de quantidades prováveis de tijolos cerâmicos, argamassas de assentamento e de reboco, concreto armado, pisos, azulejos e todo tipo de

material que é proveniente das areias e das argilas vindas do solo. A maioria dessas construções, tendo passado um bom tempo de uso, já foi ou está sendo demolida para dar lugar a outras obras, e o material residual dessas demolições merece maior atenção, com o fim de evitar impactos ambientais negativos que ocorrem quando estes resíduos são destinados a aterros sanitários junto com os resíduos domésticos, por exemplo, ou quando são simplesmente abandonados em terrenos baldios ou em beiras de estradas.

O material proveniente da reciclagem desses resíduos é atualmente pouco ou mal utilizado, pois, ao se tomar como exemplo o uso de RCD como agregado miúdo na mistura para fabricação do concreto em substituição à areia natural, observa-se que esse procedimento não tem gerado bons resultados para uso em estruturas de concreto armado (pilares, vigas e lajes) e seu aproveitamento em sub-bases na construção de estradas, embora seja bastante empregado, não é suficiente para absorver significativamente a grande capacidade de oferta atual.

O uso de RCD na fabricação de artefatos de cimento, como blocos para alvenaria, peças de concreto para piso, guias e sarjetas tem sido testado e fabricado pelas próprias usinas, porém esses materiais somente são absorvidos em obras realizadas por algumas prefeituras municipais porque os construtores particulares tem ampla oferta desses produtos fabricados com agregados naturais a preços competitivos. Resta seu uso como material de recapagem de estradas vicinais devido à sua dureza e ao seu alto grau de permeabilidade.

É preciso que haja interesse de parte da iniciativa privada em trabalhar com reaproveitamento e reciclagem de RCD, mas, para que isso aconteça, esse tipo de negócio precisa se apresentar lucrativo, porém vários são os fatores que não tornam viáveis os investimentos no setor, por exemplo: a falta de fiscalização do poder público e a oferta abundante de materiais novos no mercado.

Considerando-se que o material que será estudado contém areia, partículas de um material vítreo de alta dureza, e micro partículas de cimento, e que isso confere aos resíduos de construção e demolição (RCD) um maior espaço entre as partículas e que os solos de comportamento laterítico são muito usados em aterros e na construção de estradas porque adquirem alta capacidade de suporte quando compactados, respondendo muito bem a esforços solicitados, é importante conhecer se há influência significativa na mistura de ambos com relação à estabilização e homogeneidade, principalmente nos resultados dos ensaios de compactação conhecendo-se a densidade seca máxima alcançada e a umidade aplicada no ponto ótimo de compactação.

Dessa maneira, poderia haver o consumo de uma quantidade maior além de um melhor aproveitamento desse material na construção civil, sendo esperado até mesmo que ele possa ter seu uso em alguns casos praticamente generalizado, diminuindo fortemente seus impactos ambientais negativos bem como a necessidade de extração de novos recursos naturais para obtenção de materiais similares.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral investigar experimentalmente a viabilidade técnica de um possível aproveitamento do agregado miúdo que sai das usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD), quando este é misturado a solos com características lateríticas, para uso em aterros de construção civil.

Nesse sentido a sequência do trabalho baseia-se na coleta de amostras de RCD em três usinas de diferentes cidades do Estado de São Paulo e de uma amostra de solo de comportamento laterítico, na determinação de alguns de seus índices físicos para caracterização e definição dos mesmos e na realização de ensaios normais de compactação com as misturas de solo com RCD nas proporções de 25% e de 50%, visando avaliar os benefícios dessa mistura para aplicabilidade em aterros que são usuais na construção civil.

2.2 Objetivo Específico

O objetivo específico que se quer atingir é gerar curvas de compactação através da determinação das máximas densidades secas e das umidades ótimas correspondentes, da mistura de um determinado tipo de solo usado para aterros, com resíduos de construção e demolição em diferentes proporções de quantidades que sejam fáceis de serem repetidas, se for o caso, em grande escala, nas próprias construções.

Pretende-se chegar a resultados que demonstrem a viabilidade de se adicionar agregado miúdo de resíduos de construção e demolição a solos lateríticos com o objetivo de seu uso para os mais diversos tipos de pequenos aterros na construção civil e conseguir, após a aplicação do processo de compactação, manter a homogeneidade dessas misturas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos de Construção e Demolição – Definições

Neste capítulo são abordados alguns conceitos e definições referentes à geração, destinação e reciclagem de resíduos de construção e demolição.

No Brasil faz-se referência aos materiais que são gerados e descartados pelas construções e demolições como RCD (resíduos de construção e demolição), em publicações e periódicos traduzidos de outros países, é encontrada em inglês a sigla CDW (construction and demolition waste).

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são considerados como tal quando provenientes das atividades de novas construções, de reformas ou de demolições das construções existentes, estradas, pontes e outras estruturas construídas pelo homem, além de materiais provenientes de limpezas de terrenos com presença de solos (ANGULO, 2000; WEI-HONG et al., 2004; YUAN; SHEN, 2011).

Em geral os RCD são compostos por blocos de concreto, tijolos, blocos de alvenaria e outros tipos de materiais de construção (GU et al., 2019).

As obras civis têm gerado grandes quantidades de RCD que, se não forem adequadamente direcionadas, podem causar grandes danos ao meio ambiente (PENTEADO; ROSADO, 2016).

Os RCD podem causar uma série de problemas econômicos e ambientais na medida em que, muitas vezes, são descartados de forma inadequada, porque constituem uma das maiores quantidades de resíduos sólidos gerados pelos municípios (TOWNSEND et al., 1999; PAZ; LAFAYETTE, 2016; MAH et al., 2016).

Conforme surgem questões relacionadas aos impactos ambientais e ao potencial de reciclagem dos componentes de resíduos de construção e demolição, explica Cochran et al.

(2007), dá-se um destaque maior a eles, embora sua natureza inerte faça com que sua importância seja muitas vezes minimizada, apesar dos grandes volumes envolvidos.

É comum observar a prática de descarte ilegal de RCD em locais públicos, cursos d'água e encostas, dificultando uma gestão sustentável dos RCD no país (NUNES; MAHLER, 2020).

De acordo com Pinto (1999), a necessidade de se ter uma política pública para a destinação desses resíduos é evidenciada pelo fato de que, nos locais em que não há, os geradores de RCD descartam esse material da maneira mais fácil e econômica que conseguem, criando áreas ilegais de deposição em terrenos baldios ou em beiras de estradas vicinais. Esse descarte é mostrado na figura 3.1.

Figura 3.1 - Deposição ilegal de entulhos e RCD em via pública na cidade de São Carlos, SP.



Fonte: O Autor.

Os efeitos dessa deposição irregular de RCD aparecem na degradação dessas áreas e causam impactos ambientais geralmente associados a ela que podem, além de comprometer o tráfego e a drenagem urbana, favorecer a multiplicação de vetores patogênicos, como baratas, moscas, vermes, bactérias, fungos e vírus e a proliferação de animais como ratos e escorpiões, podendo causar até mesmo o assoreamento de córregos (PINTO, 1999).

Os impactos ambientais causados por RCD incluem alto consumo de energia, aumento da emissão de gás causador do efeito estufa e danos ao meio ambiente, como: sedimentação, erosão do solo e enchentes (ESA; HALOG; RIGAMONTI, 2017).

De acordo com a definição da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) os resíduos de construção e demolição são classificados em três grupos:

Grupo 1 – materiais compostos de cimento, cal, areia e brita (concretos, argamassa, blocos de concreto).

Grupo 2 – outros materiais cerâmicos, como telhas, manilhas, tijolos e azulejos.

Grupo 3 – materiais como solo, gesso, metal, madeira, papel, plástico, matéria orgânica, vidro e isopor e, desses, alguns são recolhidos para reutilização e reciclagem própria.

Esses materiais são geralmente retirados das construções e demolições através de caçambas, mostradas na figura 3.2, que possuem capacidade para três e quatro metros cúbicos e enviados para áreas de transbordo e triagem sendo, a seguir, depositados em um aterro de inertes nos municípios que não possuem usinas de reciclagem.

Nesses aterros, deve-se prever uma disposição adequada, de acordo com os princípios de engenharia que norteiam esse tipo de empreendimento, além de se preservar a possibilidade de sua exploração futura, como material de construção em forma bruta, ou reciclado (ZUQUETTE, 2015).

Figura 3.2 - Caçambas utilizadas para remoção de RCD na cidade de Itu, SP com capacidade para 3m³ (a) e 4m³ (b). Fotos tiradas em 09 de janeiro de 2020.



(a)



(b)

Fonte: O Autor.

Segundo Polito (2015), o fato de a construção civil ser reconhecidamente uma forte consumidora de recursos naturais e energéticos, além de grande geradora de resíduos, implica na necessidade de controlar e buscar a redução tanto do consumo de matérias-primas de origem natural como da geração desses mesmos resíduos.

De acordo com Herrador et al. (2012), é necessário incentivar a realização de obras de construção que sejam sustentáveis, no sentido de diminuir ou até mesmo evitar o depósito de grandes quantidades de resíduos de construção e demolição em aterros sanitários e em locais que não são adequados para isso.

Conforme salientam Souza et al. (2004), as ações para melhorar a geração de RCD podem acontecer nas várias etapas do processo de produção envolvendo diferentes agentes da cadeia produtiva, destacando-se algumas medidas para a redução da geração de resíduos diretamente na fonte, reutilização ou reciclagem deles e, finalmente, a sua deposição adequada.

A utilização de resíduos da própria construção civil como matéria-prima, desde que não traga prejuízos à segurança de uma obra contribui, portanto, para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas em 2015, ocasião em que os 193 países membros adotaram uma nova agenda para 2030 com 169 metas interdependentes que compõe um total de 17 objetivos.

Esses ODS seguem os mesmos princípios do documento intitulado “O futuro que queremos” divulgado como resultado da Conferência Rio+20 realizada em 2012 pela ONU.

Ainda de acordo com Polito (2015), torna-se necessário que os construtores realizem o controle e inventário de todos os resíduos gerados; suas características, sua quantidade, transporte, destinação e que os respectivos responsáveis possuam regularidade junto aos órgãos ambientais para que se possa realizar um adequado gerenciamento dos resíduos de construção e demolição.

A falta de políticas governamentais locais específicas para a gestão de RCD agrava os problemas de coleta, transporte e disposição desses resíduos (PINTO, 1999).

O gerenciamento adequado dos resíduos de construção e demolição quando realizado, respeitando-se aspectos técnicos e ambientais, gera ações ecologicamente corretas que promovem o reaproveitamento e a reciclagem desse tipo de resíduo (PENTEADO; ROSADO, 2016).

O reaproveitamento dos RCD pode diminuir significativamente os impactos das obras no meio ambiente (HERRADOR et al., 2012).

Diferentes práticas de gerenciamento de RCD podem ser categorizadas pelo princípio de três Rs: reduzir, reutilizar e reciclar. A redução é considerada como o procedimento mais efetivo e eficiente de gerenciamento de resíduos de construção e demolição (TAM; LU, 2016).

Ainda de acordo com Tam e Lu (2016), o reuso de materiais significa usá-lo na construção mais de uma vez, na mesma função ou em outra, sendo a opção mais desejável após a redução porque o processo mínimo é alcançado.

Quando a redução e o reuso se tornam muito dispendiosos, a reciclagem é o desejável porque oferece três benefícios: a redução da demanda de novos recursos, a redução do transporte e do custo de produção de energia e o uso do resíduo que seria simplesmente depositado em aterros de inertes (TAM; LU, 2016).

Reciclar e reutilizar materiais residuais pode ajudar a diminuir a demanda por recursos naturais virgens escassos e simultaneamente reduzir o custo de disposição em aterros e em outros locais (AFSHAR et al., 2017).

Em alguns países da Europa o reaproveitamento e a reciclagem de RCD tornaram-se atividade atraente para a iniciativa privada porque possuem já uma confiável consciência ambiental além de ampla infraestrutura do setor de gerenciamento de RCD e, além disso, têm uma restrita oferta de materiais novos (GÁLVEZ-MARTOS et al., 2018).

3.2 Estimativas de geração de RCD

De acordo com Pinto (1999) e John (2000), os resíduos de construção e demolição representam em média, tanto no Brasil como em outros países, cerca de 50% dos resíduos sólidos urbanos. Sabe-se sobre os dados de geração dos resíduos sólidos urbanos, porém os dados disponíveis sobre geração de resíduos de construção e demolição são escassos, portanto é possível utilizar em alguns casos essa relação de 50% entre eles.

São várias as tentativas de se desenvolver fórmulas para estimar a geração de RCD tanto a níveis locais quanto regionais ou até mesmo a níveis nacionais. A estimativa de geração de RCD por habitante no Brasil gira em torno de 500 kg/ano (PINTO, 1999).

Pesquisas fornecem estimativas baseadas em geração de RCD por metro quadrado de novas construções, por estruturas demolidas ou pelo número de habitantes daquele local (MENEGAKI; DAMIGOS, 2018).

Ainda de acordo com Menegaki e Damigos (2018), em todos os casos há a interferência de grandes obras de infraestrutura que porventura estejam em execução naquele período, a interferência da densidade populacional da região estudada e também a interferência da renda por pessoa dos geradores de RCD.

O crescimento praticamente constante do setor da construção civil no país faz com que o setor se torne um dos pilares da economia brasileira, respondendo por 14% do Produto Interno Bruto (PAZ; LAFAYETTE, 2016).

Pela definição do IBGE, Produto Interno Bruto (PIB) é a soma de todos os bens e serviços finais produzidos por um país, por um estado ou por uma cidade, geralmente em um ano. O PIB não é o total da riqueza existente, é um indicador de fluxo de novos bens e serviços finais produzidos durante um período.

Souza (2012) explica que na participação de diversos setores da economia sobre o PIB devem ser considerados três aspectos: a produção, a demanda e a renda. Para a participação da construção civil as perspectivas mais adequadas são as da produção e da demanda, que representam, respectivamente, quanto um setor econômico está produzindo ao mercado (na saída), e quanto ele está consumindo em insumos do mercado fornecedor (na entrada).

Ainda de acordo com Souza (2012), outros indicadores de índices conseguidos através do cálculo pelo PIB tais como: resíduos reutilizados ou reciclados por construção pelo PIB ou ainda, resíduos depositados em aterros sanitários por construção pelo PIB também podem ser utilizados para análise do desempenho do gerenciamento de RCD nos diferentes municípios do Estado, dependendo sempre de que haja viabilidade de dados.

As políticas habitacionais e obras de infraestrutura, além de megaeventos esportivos impulsionaram os valores da participação do setor de construção civil no PIB ao longo dos últimos anos, porém os problemas de gestão ineficaz nas ações governamentais para realização desses eventos desencadearam na recente crise econômica e subsequente retração do setor da construção civil (NUNES et al., 2020).

São apresentados na tabela 3.1, os índices levantados no site do IBGE, disponíveis para dez anos (2008 a 2017) referentes à taxa de crescimento do PIB do Brasil e os consequentes índices de crescimento do setor da construção civil no PIB onde se constata a inconstância do primeiro em contraste com a regularidade do segundo.

Tabela 3.1 - Valores das taxas de crescimento do PIB e do setor da construção civil em %, para o período de 2008 a 2017.

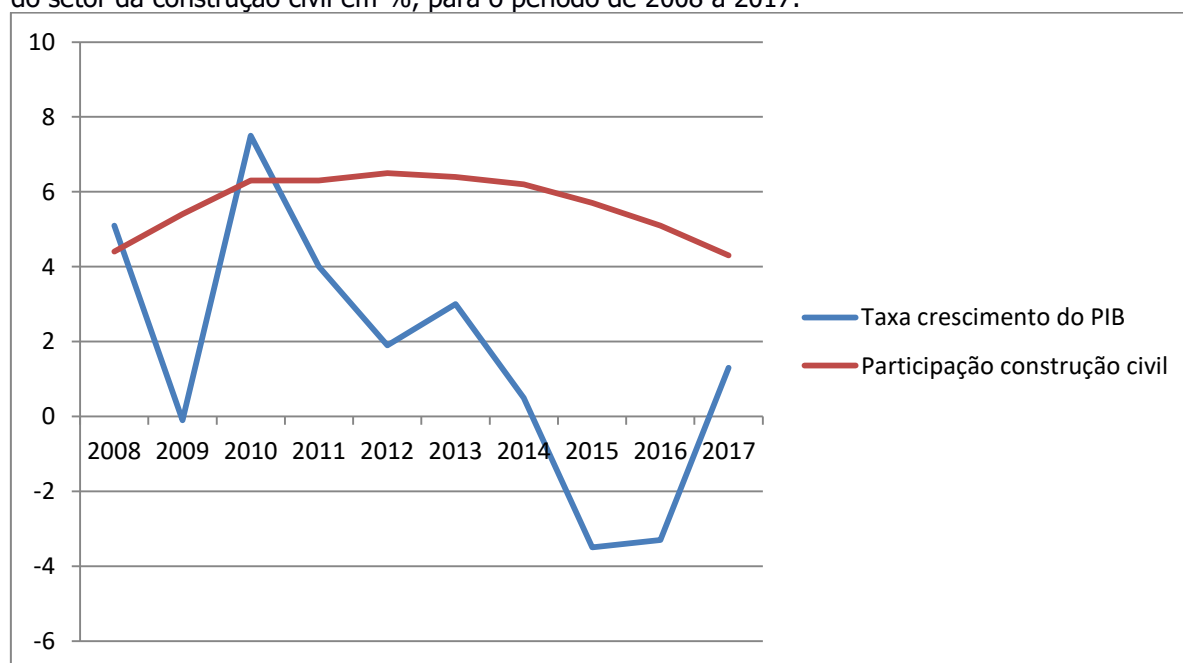
Ano	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Taxa crescimentos PIB	5,1	-0,1	7,5	4,0	1,9	3,0	0,5	-3,5	-3,3	1,3
Setor construção civil	4,4	5,4	6,3	6,3	6,5	6,4	6,2	5,7	5,1	4,3

Fonte: IBGE (2020).

Pode-se observar que a contribuição do setor da construção civil para o cálculo do PIB brasileiro foi, em média, de 5,66% para o período de 2008 a 2017. O gráfico da figura 3.3 mostra a dissonância existente entre as grandes variações das taxas de crescimento do PIB em dez anos e a constância das taxas de participação do setor da construção civil no mesmo período.

Em artigo apresentado no XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Fialho et al. (2014) demonstram que, embora tenha havido grande variação nos resultados do crescimento percentual do PIB brasileiro, que se mostrou inconsistente ao longo dos anos houve pouca variação da participação do setor da construção civil no PIB em dez anos.

Figura 3.3 - Gráfico que aponta a evolução da taxa de crescimento do PIB e da taxa correspondente do setor da construção civil em %, para o período de 2008 a 2017.



Fonte: IBGE (2020).

Nota-se que a taxa de crescimento PIB em um período de dez anos variou bastante tendo atingido picos positivos de 7,5% em 2010 e negativos de 3,5% em 2015, mas a taxa de participação do setor da construção civil no PIB não apresentou grandes variações, mantendo-se entre 5% e 6% com média de 5,66%.

3.3 Algumas Leis brasileiras relacionadas à RCD

Até o início do século atual havia enorme dificuldade com a fiscalização da deposição de RCD em lugares inadequados porque muitas pessoas viam os resíduos de construção e demolição como sendo de baixa periculosidade e, desta forma, os descartavam da maneira mais econômica que conseguiam, às margens de estradas vicinais e rodovias ou em terrenos baldios.

Essa prática começou a mudar a partir dos anos 2000 quando se começou a ter legislações que tentam disciplinar principalmente o descarte irregular de RCD. A figura 3.4 mostra a sequência das implantações das principais legislações que tratam do assunto.

Figura 3.4 - Sequência de datas das principais leis ambientais.



Fonte: O Autor.

Pode-se destacar que a Lei que instituiu a Política Nacional dos Resíduos Sólidos estabeleceu prazos para que os municípios elaborassem seus Planos Municipais de Resíduos Sólidos e, aqueles que ainda se utilizavam de lixões, para que acabassem com eles e construíssem aterros sanitários adequados e que isso acontecesse até agosto de 2014, porém, segundo o Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana que é elaborado pelo Sindicato das Empresas de Limpeza Urbana no Estado de São Paulo (SELUR), referente a 2019 mais da metade dos 5.570 municípios do país ainda encaminham seus resíduos sólidos para áreas denominadas lixões.

3.3.1 RESOLUÇÃO CONAMA

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA publicou a resolução nº 307 de 05 de julho de 2002 na qual estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. A referida resolução, com os devidos complementos nº 341 de 2003 e

nº 348 de 2004, estabelece quatro classificações para os resíduos de construção e demolição que são as seguintes:

Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, oriundos de construções, demolições, reformas, reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem, reparos de edificações como argamassa, concreto, componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.) bem como de processos de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, guias etc.) produzidas nos canteiros de obras.

Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.

Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação (isopor ou qualquer outro material que não se encaixe na classe D).

Classe D – são resíduos perigosos, contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de processos de construção ou demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas ou instalações industriais, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (tintas, solventes, vernizes etc.).

A resolução define também que os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos sólidos urbanos, em áreas de bota fora, em encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei. Destaca ainda que os geradores de resíduos deverão ter como objetivo prioritário a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Através da resolução nº 448 de 19 de janeiro de 2012, que alterou alguns artigos da resolução nº 307, o CONAMA determinou a todos os municípios e ao Distrito Federal a responsabilidade de implementação de um Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil que deve estabelecer diretrizes técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores, em conformidade com os critérios técnicos do sistema de limpeza urbana local e também para os grandes geradores, os quais deverão elaborar seus próprios Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil para apresentá-los, junto com o projeto do empreendimento para análise pelo órgão competente da Prefeitura Municipal na ocasião do pedido do alvará para construção, sendo que eles deverão contemplar os procedimentos necessários para o manejo e a destinação de forma

ambientalmente adequados, podendo, desta maneira, possibilitar a participação das responsabilidades de todos os geradores de resíduos.

3.3.2 LEI FEDERAL DO SANEAMENTO BÁSICO

A Lei Federal do Saneamento Básico (Lei nº 11445/2007) e o Decreto que a regulamenta (Decreto nº 7217/2010) fizeram com que as prefeituras municipais elaborassem suas Políticas Municipais de Saneamento Básico que são diretrizes gerais e devem usar, como instrumento fundamental para implementar essas políticas, os Planos Municipais de Saneamento Básico, estes definidos como estudos que trazem diagnóstico, objetivos e metas para o saneamento básico e que podem ou não ser regulamentados por instrumento legal (lei, decreto, portaria ou outro).

Não há na Lei Federal do Saneamento Básico nenhuma exigência a esse aspecto, porém após 31/12/2019, a existência do Plano passou a ser condição necessária para o acesso a recursos orçamentários da União ou a recursos de financiamentos geridos ou administrados por órgão ou entidade da administração pública federal, quando destinados a serviços de saneamento básico, além disso, constitui-se item obrigatório para a validação dos contratos de delegação de serviços públicos de saneamento. O prazo vem sendo redefinido periodicamente, pois o Decreto nº 7217 indicava 31/12/2013 que passou para 31/12/2015, depois para 31/12/2017 quando finalmente chegou-se ao prazo atual por meio do Decreto nº 9254 de 29/12/2017.

Em 2017, segundo levantamento do IBGE, 41,5% dos municípios brasileiros possuíam Planos Municipais de Saneamento Básico, e desses, 79,8% contemplavam o item limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos (IBGE, 2017).

Conforme estabelecido no Decreto nº 7217, os planos devem abranger os quatro serviços de saneamento básico: abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo de águas pluviais urbanas.

Define-se marco regulatório como um conjunto de regras e leis que regulam o funcionamento de setores que tem agentes privados prestando serviços de utilidade pública e, em junho de 2020 o Congresso Nacional aprovou o Marco Legal do Saneamento Básico, com a intenção de abrir espaços para a entrada de bilhões de reais em investimentos da iniciativa privada no setor. Entre as novas regras aprovadas pelo Legislativo está a abertura de licitação

para o serviço de água e esgoto, a autorização para a entrada da iniciativa privada nas concessões e um prazo para os municípios acabarem com os lixões.

3.3.3 *POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS*

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) indica que deve haver gestões integradas entre as partes responsáveis para conseguir um bom gerenciamento ambiental para os resíduos sólidos apresentando para isso um conjunto de ações, princípios e metas de comportamento.

Gomes et al. (2014), ressalta que a Política Nacional de Resíduos Sólidos tem como um de seus princípios estabelecer a responsabilidade compartilhada pela destinação de seus resíduos entre governo, empresas e população e que, além disso, o poder público municipal fica obrigado a elaborar, implementar e executar planos para o gerenciamento desses resíduos que são os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.

A Lei nº12.305/2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos no país determinou que em todas as cidades brasileiras, a partir de 2014, não seriam mais permitidos os lixões que são locais onde são armazenados, como destinação final, os resíduos gerados por seus habitantes, e também que elas deveriam, até o final do ano de 2012, elaborar seus respectivos planos de gerenciamento de resíduos sólidos. A referida Lei, em seu artigo 7º, define como objetivo da Política Nacional de Resíduos Sólidos: a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; e também: o incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados. Em seu artigo 13º, com relação à classificação dos resíduos quanto à origem, define que: são resíduos da construção civil os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil inclusive os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.

3.4 Geração e reciclagem de RCD no Brasil

A variação das quantidades de RCD geradas por construções é alta quando comparada às quantidades geradas por demolições. Em diversos países, os resíduos de construção representam de 19% a 52% do total de RCD sendo que os resíduos de demolição representam de 48% a 81% (ANGULO, 2000).

No Brasil foram feitos alguns estudos com o intuito de determinar a quantidade de RCD considerando somente as construções (MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009; PINTO, 1999; SOUZA et al., 2004) e os resultados obtidos para geração de RCD por unidade de área em m² em construções verticais mostraram uma grande variação oscilando entre 50 kg/m² e 150 kg/m². Essa variação, de acordo com esses autores, foi devida a um pior, ou melhor, grau do nível de controle realizado nos canteiros de obras.

Já com relação à geração de RCD produzida por reformas das edificações, pouco se tem pesquisado a respeito, sendo que Morales, Mendes e Angulo (2006) realizaram estudos sobre a geração de RCD a partir de reformas e obtiveram resultados por unidade de área de 470 kg/m².

Os rejeitos das coletas seletivas efetuadas pelos municípios também contém RCD, como mostra um estudo realizado por Moura, Pinheiro e Carmo (2018), considerando dados colhidos junto à maior cooperativa do município de Blumenau – SC, sendo que foram analisados rejeitos do processo de triagem da coleta seletiva no decorrer de um ano obtendo resultados para fazer uma classificação de 101 amostras em 17 categorias perfazendo um total de 3.893 kg. Esses rejeitos foram avaliados mensalmente para que se determinasse sua composição e sazonalidade e o resultado apontou que 30,5% do total foram descartados e enviados para aterros de inertes e que, desse total 1,4% eram de resíduos de construção e demolição.

Dados de 2015 indicam uma geração anual de RCD no Brasil de 45 milhões de toneladas (MENEGAKI; DAMIGOS, 2018). Essa quantidade é similar à reportada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019) ao considerar que o responsável por recolher RCD é o gestor da obra e que esses números refletem, em sua maioria, aos resíduos que foram abandonados em vias e logradouros públicos.

O último recenseamento realizado no Brasil aconteceu no ano de 2010, sendo que deveria haver outro neste ano de 2020, porém a pesquisa foi transferida para 2021 por causa da pandemia da COVID 19, então pelos dados do IBGE, a população estimada do país para o

ano de 2018 é de aproximadamente 210 milhões de pessoas e, destes, vivem na área urbana 177 milhões. Com esses dados, tem-se um total de resíduos da ordem de 88,50 milhões de toneladas gerados no ano de 2018 pela população urbana brasileira, se considerarmos que cada habitante gera uma média de 500 kg de RCD por ano, estimativa que está de acordo com Pinto (1999).

Levantamentos realizados nas cidades de Vitória da Conquista (BA), Salvador (BA), Belo Horizonte (MG), Campinas (SP), Ribeirão Preto (SP), São José dos Campos (SP), Santo André (SP) e Jundiaí (SP) indicaram para o período de um ano, uma variação entre 230 kg/hab para a primeira a 760 kg/hab para a última, sendo que a mediana dos resultados da amostra foi de 510 kg/hab que é um valor coerente com as estimativas estrangeiras (JOHN; AGOPYAN, 2000).

Os dados levantados para o período entre 2014 e 2015 no Brasil, indicam que o setor de reciclagem de resíduos de construção e demolição constitui-se aproximadamente de 310 usinas que são classificadas em pequenas e médias empresas (BRASIL ENGENHARIA, 2015).

A geração anual, em 2014, de resíduos de construção e demolição foi de 84 milhões de metros cúbicos e todas as usinas de reciclagem juntas, produziram cerca de 17 milhões de metros cúbicos de reciclados de RCD (IBGE, 2015). O restante do material gerado seguiu para aterros sanitários, aterros de inertes ou outras destinações. Em resumo, dos 84 milhões de m³ de RCD gerados em 2014, apenas aproximadamente 20% desse total foi enviado, corretamente, para usinas de reciclagem. Ainda de acordo com o IBGE (2015), das aproximadamente 310 usinas de RCD existentes no país, 54% delas estão instaladas no estado de São Paulo, ou seja, em torno de 167 usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição encontra-se em solo paulista, que contava em 2019 com 645 municípios e uma população de 45.919.049 habitantes (IBGE, 2019).

Destaca-se que esse dado nos mostra que, mesmo dentro do estado com maior número de usinas de RCD de todo o país, aproximadamente 74% das cidades ainda não as possuem.

Os estados que vem logo abaixo de São Paulo em número de usinas de RCD são o Rio de Janeiro e o Paraná, ambos com 7% do total de usinas existentes no Brasil e isso nos indica que cada um deles conta atualmente com algo em torno de 22 usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição (BRASIL ENGENHARIA, 2015). O Rio de Janeiro possuía em 2019 uma população estimada de 17.264.943 habitantes e o Paraná cerca de 11.433.957 habitantes (IBGE, 2019).

Entre os anos de 2010 e 2014 houve um aumento no número de usinas de RCD no Brasil devido à adoção, por parte das grandes cidades, do Plano Integrado de Resíduos da Construção Civil (PGRCC), que foi imposto através da Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente em 2002 e que passou a exigir a obrigatoriedade de destinação dos resíduos de construção e demolição (CONAMA, 2002).

3.4.1 Indicadores de RCD em função do PIB em algumas cidades do Estado de São Paulo

Considerando os dados do IBGE levantados em 2019 referentes à população do Brasil, de 210.147.125 habitantes, verifica-se que o estado de São Paulo, com 21,85% do total da população brasileira, conta com mais da metade das usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição instaladas no país (IBGE, 2019).

O Sindicato da Indústria da Construção Civil (SINDUSCON) em conjunto com a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo elaborou um questionário atribuindo notas que resultou em um índice de gestão de resíduos (IGR) com a finalidade de avaliar os programas e as ações empreendidas pelos 645 municípios do Estado de São Paulo no que se refere à destinação dos resíduos de construção e demolição tendo apurado os seguintes resultados:

- 437 municípios responderam o questionário
- 257 municípios já possuem sistema de coleta implantado
- 200 municípios realizam ações educativas voltadas ao reaproveitamento
- 82 municípios possuem programa integrado de gerenciamento

Das 645 cidades que formam o Estado de São Paulo algumas se tornaram sedes das regiões a que pertencem porque cresceram mais que as outras que estão ao seu redor e podem oferecer mais oportunidades de emprego, maior rede de assistência médica, maior variedade de escolas e cursos preparatórios de qualidade para ingresso nas faculdades e um comércio mais abrangente, acessíveis aos habitantes das demais cidades.

Nesta análise foram escolhidas seis dessas grandes cidades do interior de São Paulo que cresceram e se tornaram polos de desenvolvimento em suas regiões e estão localizadas de tal maneira que circundam o Estado, mostradas na figura 3.5, são elas: São José do Rio Preto, Ribeirão Preto, Campinas, São José dos Campos, Sorocaba e Presidente Prudente.

Figura 3.5 - Mapa do Estado de SP mostrando a localização das regiões das cidades estudadas.



Fonte: IEA (2020).

Dados obtidos por Pinto e Gonzáles (2005) sobre a geração de RCD em algumas cidades do Estado indicaram valores, por habitante, de:

- São José do Rio Preto = 660 kg/ano
- Ribeirão Preto = 710 kg/ano
- Campinas = 620 kg/ano
- São José dos Campos = 470 kg/ano

A média aritmética simples dos quatro dados de geração de RCD levantados acima resulta em 615 kg/hab/ano.

São apresentados na tabela 3.2, os perfis das seis cidades estudadas com relação a alguns dados e principalmente quanto à geração estimada de resíduos de construção e demolição no ano de 2019.

Tabela 3.2 - População, Área, Densidade Demográfica e Geração de RCD das cidades estudadas.

Cidades	População Estimada (2019) (hab)	Área (km²)	Densidade demográfica (hab/km²)	RCD (2019) (ton)
São José do Rio Preto	460.671	431,94	1.066,52	230.335
Ribeirão Preto	703.293	650,92	1.080,46	351.646
Campinas	1.204.073	794,57	1.515,38	602.036
São José dos Campos	721.944	1.099,41	656,66	360.972
Sorocaba	679.378	450,38	1.508,46	339.689
Presidente Prudente	228.743	560,64	408,00	114.371

Fonte: IBGE (2020).

A responsabilidade sobre as quantidades geradas de RCD não ficam restritas somente ao gerenciamento dos resíduos de construção, são reflexo direto dos perfis das populações locais como o território, a economia local, o desenvolvimento da conscientização ambiental, entre outros.

Um indicador que pode refletir a eficiência das práticas de gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) é o volume de resíduos gerados pelo produto interno bruto PIB em toneladas por reais investidos pelo setor da construção civil.

Os dados fornecidos pela Agência Paulista de Promoção de Investimentos e Competitividade para o ano de 2017 indicaram um valor para o PIB do Brasil de R\$ 6.559.900.000,00 e para o Estado de São Paulo um valor para o PIB de R\$ 2.094.600.000,00, o que representa 31,93 % do total (INVESTSP, 2020).

A grande dificuldade encontrada para que o levantamento dos indicadores de desempenho seja analisado é o fato de que se depende da viabilidade de dados e que nem sempre esses dados estão disponíveis quando se realiza a pesquisa.

São apresentados na tabela 3.3 os números indicativos das seis cidades estudadas no ano de 2017 (último ano em que o IBGE apresentou dados completos sobre as cidades brasileiras) com relação aos resíduos de construção e demolição, ao PIB das respectivas cidades com as participações correspondentes do setor de construção civil além do resultado do cálculo de geração de RCD por mil reais investidos na construção civil.

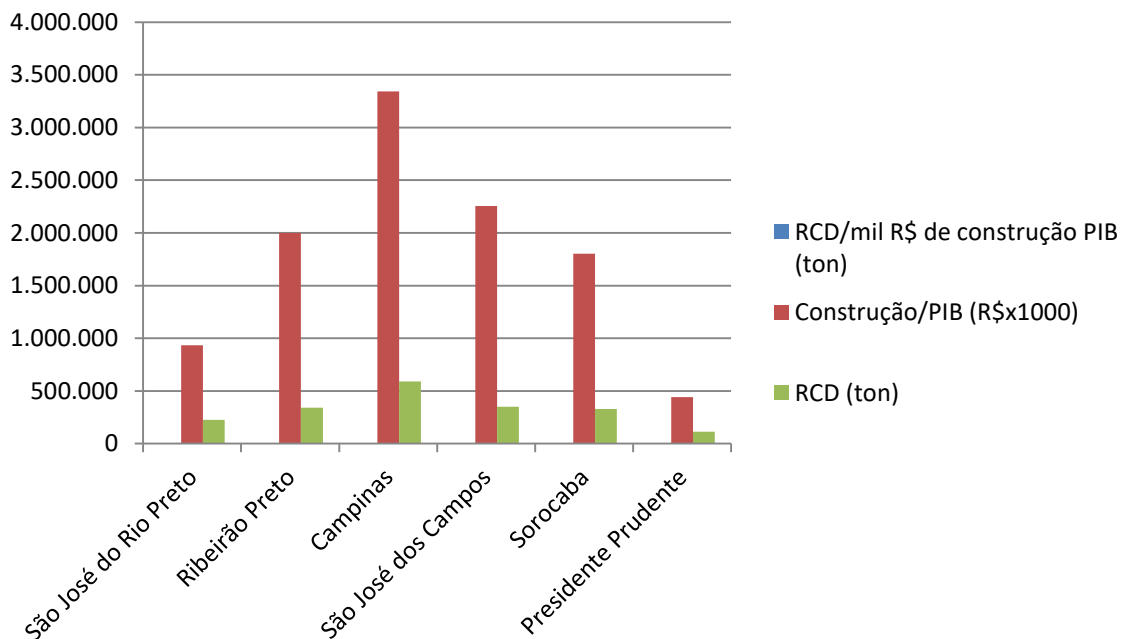
Tabela 3.3 – Principais índices das cidades estudadas.

CIDADES	RCD (ton)	PIB (R\$x1000)	Construção/PIB (R\$x1000)	RCD/mil R\$ de construção PIB (ton)
São José do Rio Preto	225.328	16.493.968,04	933.558,59	0,241
Ribeirão Preto	341.151	35.315.843,18	1.998.876,72	0,171
Campinas	591.214	59.053.563,02	3.342.431,67	0,177
São José dos Campos	351.609	39.829.403,91	2.254.344,26	0,156
Sorocaba	329.935	31.852.858,43	1.802.871,79	0,183
Presidente Prudente	112.635	7.806.812,76	441.865,60	0,255

Fonte: IBGE (2020).

Os dados da Tabela 3.3 são apresentados na Figura 3.6, onde é possível observar uma regularidade nas relações entre o valor investido em construção pelo PIB, a geração total de RCD e a geração de RCD por mil reais investidos em construção.

Figura 3.6 - Gráfico de barras que mostra os valores investidos em construção pelo PIB e os RCD gerados / nº de habitantes e por mil reais investidos nas construções.



Fonte: Adaptado de IBGE (2020).

A pesquisa mostra que as cidades de Ribeirão Preto e Sorocaba possuem índices parecidos quando se analisa a participação da construção civil sobre o PIB e ambas mostram um valor investido em construção que representa o dobro do valor referente a São José do Rio Preto, e quatro vezes maior que os da cidade de Presidente Prudente. O motivo talvez seja porque essas duas cidades formam, juntamente com Campinas, um eixo central do Estado além de possuírem bons acessos à capital. Já São José dos Campos representa a região do Vale do Rio Paraíba até a divisa com o Estado do Rio de Janeiro possuindo excelente desenvolvimento industrial e econômico, portanto apresentando altos índices de valores investidos em construção civil. A cidade que mais se destaca no Estado é Campinas que, por sua localização possui ótimas vias de acesso, as quais lhe proporciona um enorme desenvolvimento econômico e financeiro e apresenta o maior PIB do interior com a participação do setor da construção civil.

Os indicadores também sugerem que as cidades situadas na região localizada em torno da cidade de Campinas apresentam o melhor desenvolvimento econômico entre as cidades do estado de São Paulo e, conseqüentemente maior participação do setor da construção civil no PIB.

3.4.2 RCD em Araraquara, Jundiá e Itapetininga

Para atender à Resolução CONAMA n° 307, a Prefeitura de Araraquara implantou em 2005, o Sistema de Gestão Sustentável de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos e o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PIGRCC), através da Lei Municipal n° 6352/2005, regulamentada pelo Decreto 8431/2006. Esse plano abrange dois tipos de geradores de resíduos de construção, os pequenos e os grandes. Para os grandes geradores passou-se a exigir projetos de gerenciamento de resíduos e para os pequenos geradores foram criados pontos de entrega de volumosos (PEV) devidamente licenciados pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) e pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA) de Araraquara. No ano de 2013, por intermédio de seu Departamento Autônomo de Água e Esgotos, a Prefeitura elaborou um Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), que faz parte de um Plano Municipal de Saneamento Básico. Segundo esse Plano de Gestão, os resíduos de construção e demolição, são denominados resíduos de construção civil (RCC) e podem ser popularmente conhecidos como entulho de obras, caliça ou metralha.

A Prefeitura da cidade de Jundiá para estar em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos de 2010 e com a Política Municipal de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Municipal n° 8574 de 28 de dezembro de 2015, criou, em 2017, um projeto de gestão sustentável chamado de Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos que se tornou exemplo de destinação de resíduos de construção e demolição. Foi instituído o Controle de Transporte de Resíduos (CTR) que possui a função de monitorar o processo de descarte e beneficiamento dos RCD, onde as caçambas são catalogadas de acordo com as classes dos resíduos determinadas pelo CONAMA em seu artigo 3°, n° 307, de 05 de julho de 2002. O CTR fornece informações sobre o gerador, o transportador, as características do resíduo (classe, quantidade e descrição), além de fornecer instruções para a operação do processo de coleta e transporte. Grande parte do material produzido na usina de Jundiá é utilizada pela Prefeitura na manutenção de estradas vicinais, em obras de drenagem urbana e

como sub-base de pavimentos, construção de calçadas, guias, sarjetas e materiais pré-moldados em geral, sendo sua utilização bastante ampla na construção civil sem função estrutural.

A Prefeitura do município de Itapetininga elaborou seu plano municipal de resíduos sólidos ainda no ano de 2012, e ele passou a vigorar através da Lei Municipal nº 5.648, de 23 de novembro de 2012, e traz no item 9.5, IX do Anexo, a definição de “aterro de resíduos da construção civil” como sendo uma área onde serão empregadas técnicas de disposição no solo de resíduos da classe A, sendo esta definida pela Resolução CONAMA. São utilizados princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, para que haja possibilidade de seu uso futuro ou de futura destinação da referida área, além de constar que uma porcentagem pequena dos resíduos gerados em Itapetininga será depositada em locais chamados Ecopontos (áreas destinadas a receber até um metro cúbico de entulhos de construção), para ser posteriormente reaproveitada na recuperação de estradas rurais. O Plano traz como meta, no item 10.5, IX do Anexo, desenvolver programas prioritários para implementação de novos Ecopontos, triagem e reutilização de resíduos, além de incentivar a presença de operadores da iniciativa privada para atendimento da demanda de resíduos da construção civil.

3.5 Gestão e geração de RCD no mundo

Na Alemanha e na Ucrânia, segundo Menegaki e Damigos (2018), os próprios geradores de resíduos de construção e demolição são obrigados a fazer uma classificação deles e, após, encaminhá-los para reciclagem ou reuso. Na Espanha há uma legislação nacional que define as obrigações de cada um dos elementos envolvidos na construção. Na Austrália as políticas de gestão de resíduos estão focadas de forma a incentivar práticas de construção sustentável além de promoverem o reuso do RCD no próprio local onde ele foi gerado.

Ainda de acordo com Menegaki e Damigos (2018), nos Estados Unidos vários contratos celebrados para a construção de estradas estaduais e federais especificam o uso de material reciclado em sua construção. No Japão a reciclagem de certos materiais de demolição e o uso de agregados reciclados em trabalhos de pavimentação é obrigatória. Na China, políticas do governo estão sendo desenvolvidas a níveis estaduais e, no interior do país,

regulamentos encorajam o uso de materiais reciclados de construção em obras de terra em bases e sub-bases de estradas.

O Reino Unido gerou em 2012, cerca de 200 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo a metade desse montante constituída de resíduos de construção e demolição (ESA; HALOG; RIGAMONTI, 2017).

A geração de RCD nos Estados Unidos durante o ano de 2014 atingiu a marca de 534 milhões de toneladas, sendo 28,9 milhões de toneladas geradas diretamente por sobras de construção civil e 505,1 milhões de toneladas geradas por atividades de demolição (MENEGAKI; DAMIGOS, 2018).

Na China a geração de RCD em 2014 chegou a 1,13 bilhões de toneladas, na Europa a geração de RCD em 2014 foi de 333 milhões de toneladas e na Austrália, também em 2014, a geração de RCD foi de 19,5 milhões de toneladas. Dados de 2015 indicam uma geração de RCD no Brasil de 45 milhões de toneladas (MENEGAKI; DAMIGOS, 2018).

Já Tam e Lu (2016) propõem em seu trabalho que seja estabelecido um indicador universal, o qual viria facilitar a avaliação da performance de cada localidade através de diferentes economias com relação ao gerenciamento e à geração de resíduos de construção e demolição. Esse indicador seria um índice de geração de resíduos (IGR) que poderia ser calculado pelo volume gerado em metros cúbicos ou pela quantidade em toneladas ou por metro quadrado de área construída ou ainda pelas quantidades: a requerida pelo projeto ou a efetivamente comprada.

Esse índice teria a finalidade de:

- Fornecer informações quantitativas para orientar diferentes práticas de gerenciamento de RCD a um nível de projeto.
- Ajudar a aumentar a conscientização das pessoas envolvidas com a indústria da construção civil.
- Auxiliar empreiteiros e construtores com o desenvolvimento de estratégias efetivas de gerenciamento de RCD.

Ainda segundo Tam e Lu (2016), a interação e a comparação entre os IGR de diversas economias poderia identificar a consequência da utilização de diferentes técnicas de construção, procedimentos de trabalho e práticas comuns. Tam e Lu (2016) também usaram indicadores de geração de resíduos de construção e demolição em função do Produto Interno Bruto (PIB), obtendo resultados em milhões de toneladas de RCD gerados por milhões de dólares investidos em construção e demolição.

Sendo o PIB uma medida monetária de valor ou de mérito de trabalho na construção, ao se produzir cada unidade, (por exemplo, milhões de reais) de mérito de construção, a construção propriamente dita irá gerar certa quantidade de resíduos. Conseqüentemente, esse indicador pode ser usado para medir qual cidade ou região do Estado se torna mais ou menos dispendioso em termos de geração de resíduos de construção e demolição (TAM e LU, 2016).

Os dados referentes à geração de resíduos de construção e demolição pelo PIB foram obtidos com base na densidade populacional e a previsão de valores de construção pelo PIB de cada país, considerando-se o PIB do país e a participação do setor de construção civil no PIB desse país.

Na tabela 3.4 são apresentados dois indicadores representativos de geração de RCD em toneladas por milhões de dólares de construção considerando o produto interno bruto e RCD em toneladas por habitante (per capita), calculado para o período de 2014 comparando a Austrália, China, Estados Unidos e alguns países da Europa (TAM e LU, 2016).

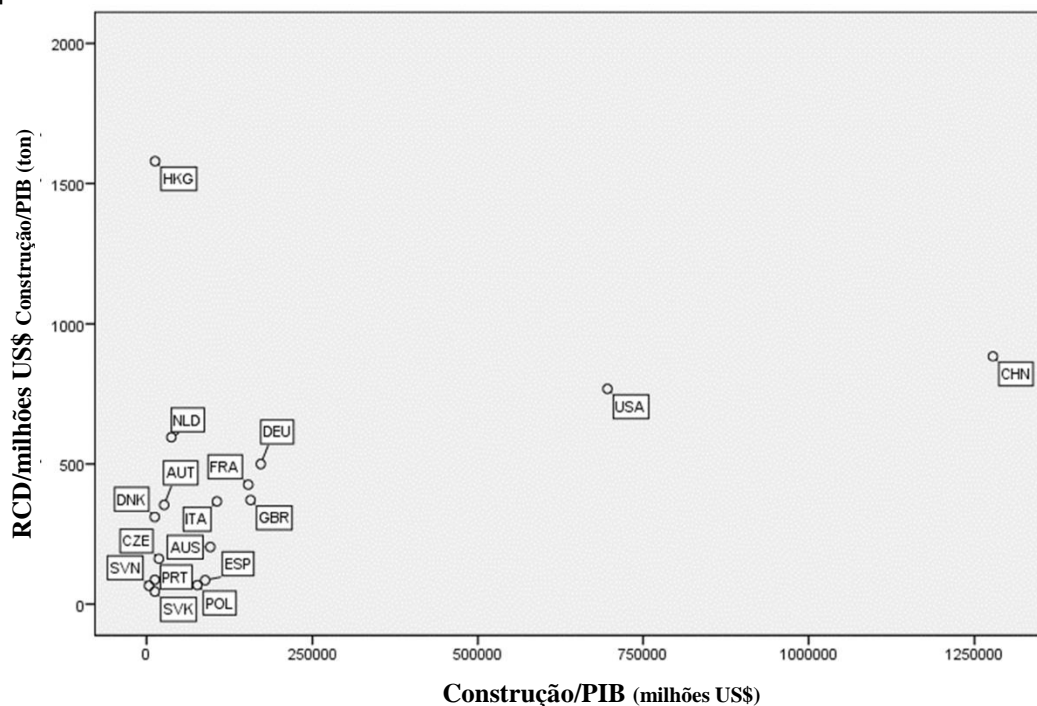
Tabela 3.4 – Comparação da geração de RCD entre países da Europa, China, USA, Hong Kong e Austrália em 2014.

País	RCD (mil ton)	Construção/PIB (milhões US\$)	Densidade (hab/m²)	RCD/milhões US\$ (ton)	RCD/hab. (ton)
China	1.130.000	1.277.866	145,3	884,3	0,828
USA	534.000	695.788	34,8	767,5	1,676
Alemanha	85.986	172.045	232,1	499,8	1,062
França	65.308	153.205	121,1	426,3	0,985
Ucrânia	58.249	156.721	267,1	371,7	0,902
Itália	38.809	105.867	206,7	366,6	0,638
Holanda	22.227	37.354	500,6	595,0	1,318
Hong Kong	20.273	12.824	6.885,2	1.580,8	2,804
Austrália	19.496	95.934	3,1	203,2	0,831
Áustria	9.411	26.575	103,5	354,1	1,102
Espanha	7.491	88.138	92,9	85,0	0,161
Polônia	5.167	76.375	124,1	67,7	0,136
Dinamarca	3.837	12.348	134,4	310,7	0,680
Rep. Tcheca	3.015	18.695	136,3	161,3	0,286
Portugal	1.073	12.400	113,5	86,6	0,103
Eslováquia	558	12.444	112,7	44,8	0,103
Eslovênia	238	3.637	102,4	65,4	0,115

Fonte: Adaptado de Menegaki e Damigos (2018); Tam e Lu (2016).

O gráfico da figura 3.7 procura mostrar como as diferenças na geração de RCD tornam-se bastante significativas na medida em que há grandes variações relativas aos milhões de dólares investidos na construção civil.

Figura 3.7 – Mostra a geração de RCD em toneladas por milhões de dólares de construção pelo PIB dos países citados na tabela 3.4.



Fonte: Adaptado de Menegaki e Damigos (2018).

A análise feita por Menegaki e Damigos (2018), observando os valores da tabela 3.4 e do gráfico da figura 3.7, explica que são encontradas grandes variações na geração de resíduos quando se relacionam os dados com o volume de negócios que movimentam o setor da construção civil. Fica demonstrado que, em média, é gerado algo em torno de 400 toneladas de RCD por milhão de dólares investidos em construção, sendo que Hong Kong, China e USA geram quantidades bastante significativas se comparadas com a média, e que os indicadores referentes a Hong Kong são quase quatro vezes maiores que a média e duas vezes maiores que a China e USA. No sentido contrário, Eslováquia, Eslovênia, Polônia, Espanha e Portugal geram quantidades pequenas se comparadas com a média, ficando abaixo de 100 toneladas por milhão de dólares aplicados no setor.

Não há explicações definidas para a origem dessas diferenças, valores altos podem estar relacionados com grandes projetos de infraestrutura sendo executados naquele período, além de que países mais ricos são maiores geradores de resíduos. Também ainda há que se

considerar a densidade populacional, fator que igualmente interfere na geração de resíduos de construção e demolição.

3.6 Reciclados de RCD – estudos para usos e aplicações

Os RCD geralmente podem ser reaproveitados após um processamento em locais apropriados, como nas usinas de reciclagem. Nessas instalações, após triagem prévia (para excluir contaminantes, como gesso, papel, madeira, metais e outros), os resíduos são triturados, peneirados e vendidos em diferentes granulometrias. A triagem prévia é indispensável antes da reciclagem ou outras atividades de tratamento porque embora a grande maioria dos materiais de construção seja inerte e gerenciada como resíduos não perigosos estes resíduos podem conter substâncias prejudiciais ao meio ambiente (DUAN; LI, 2016).

Os resíduos quando chegam às usinas de reciclagem, descreve Zuquette (2015), são colocados em uma área de triagem e passam por uma fase de catação, ocasião em que são retirados os materiais que não são classe A, como vidros, metais, madeiras entre outros. Além disso, quando estão sendo encaminhados para a britagem, por meio de esteiras rolantes transportadoras, os materiais são submetidos a uma separação magnética para retirada de pregos, pontas de ferro e outros pedaços de metais.

Os produtos fabricados pelas usinas de reciclagem são materiais granulares de variadas dimensões e os equipamentos usuais existentes nessas usinas são tratores de caçamba para movimentação do material, alimentadores, transportadores de correia, britadores e conjunto de peneiras para a classificação granulométrica dos agregados produzidos (ZUQUETTE, 2015).

Vários estudos foram conduzidos nos últimos anos visando caracterizar, reaproveitar ou reciclar resíduos de construção e demolição para uso em obras civis.

Os RCD reciclados são mais utilizados como material de sub-base na construção de estradas e vias públicas, na recuperação de estradas vicinais, em projetos de drenagem, material de preenchimento para preparação de terrenos e na fabricação de blocos de concreto para vedação, entre outras aplicações que exigem pouco desempenho mecânico; entretanto, esse mercado além de ser pouco rentável, não é suficiente para consumir todo o RCD gerado (ANGULO et al., 2002).

Zuquette (2015) relata ainda que os usos mais comuns dos materiais que são produzidos em usinas de reciclagem são na composição de argamassas e concretos não

estruturais, blocos de vedação, pisos intertravados e outros artefatos de concreto, além de poderem compor camadas de pavimentos e servirem de revestimento primário em estradas de terra e servirem também para aterros.

Após um monitoramento, por um período de oito anos, de um pavimento asfáltico construído com agregado reciclado em camadas de sub-base e base, os parâmetros obtidos apresentaram o mesmo nível dos materiais granulares naturais tradicionalmente utilizados e demonstraram o potencial técnico das misturas de agregados para sub-base e base do referido pavimento (REZENDE et al., 2016).

A realização de um estudo de campo que considerou condições reais de tráfego de veículos verificou a viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como material de um pavimento composto por concreto, mistura asfáltica e agregado de resíduos cerâmicos (HERRADOR et al., 2012).

A composição dos resíduos de construção e demolição é um fator importante para determinar suas possibilidades de uso explica John e Agopyan (2000), porque as porções compostas de areia e concreto podem ser melhores aproveitadas em substituição aos agregados de origem mineral (produção de concreto estrutural, por exemplo) já a porção que contém em sua composição quantidades de argamassas e produtos de cerâmica vermelha dará como resultado RCD caracterizados como agregados de menor resistência mecânica e maior absorção de água.

Em algumas usinas é possível ocorrer ainda uma separação prévia dos resíduos em material cinza, onde visualmente predominam os componentes de construção de natureza cimentícia (como blocos, argamassas e concreto) e em material vermelho, onde predominam os componentes de construção de natureza argilosa (como tijolos e telhas) (ANGULO, 2005).

De acordo com Awoyera et al. (2018), estudos com RCD vermelho, originado pela reciclagem de resíduos que contém cerâmica vermelha, misturado a solo laterítico resultando agregados laterizados contendo 90% de cerâmica fina e 10% de laterite (solo com grande concentração de hidróxidos de ferro e alumínio) apresentaram bons resultados quando usados substituindo agregados miúdos na produção de concreto apresentando uma redução em sua resistência de cerca de 9% quando comparada a um caso de referência, sendo que esse resultado foi considerado aceitável.

O trabalho desenvolvido por Cristelo et al. (2018), mostra que em Portugal foram realizadas experiências com RCD misturados à cinza volátil alcalina ativada (FA), um subproduto obtido a partir do carvão mineral usado em usinas termoelétricas que passa por

um processo químico que transforma estruturas vítreas em compósitos cimentantes. O agregado reciclado foi analisado com e sem a adição do precursor cinza volátil (FA) considerando diferentes porções de peso RCD/FA sendo que os resultados obtidos mostraram um aumento da força de compressão e do módulo de elasticidade, atingindo valores acima dos limiares considerados para trabalhos geotécnicos tais como fundações de estradas de rodagem e de estradas de ferro, infraestrutura de diques e aterros, que são considerados como aplicações efetivas para o uso de RCD.

Com o objetivo de determinar a possibilidade da ocorrência de recalques, devido ao esmagamento, em aterros e em estruturas de pavimentos submetidos a carregamento estático e dinâmico durante sua vida útil, Afshar et al. (2017) estudaram a quebra de partículas individuais de RCD com diferentes mineralogias, formas e microestruturas.

Analisando concreto britado reprocessado quanto à compressibilidade, através de ensaios de compressão unidimensional, Soleimanbeig e Edil (2015) concluíram ser viável o uso dos materiais estudados para aplicações em grande volume, como preenchimento de aterros nas estruturas de contenção e em reparos de rodovias.

Experiências com argila misturada a escórias residuais de construção de diferentes tamanhos de partículas, por meio de ensaios de compactação, foram realizados por Gu et al. (2019) que analisaram os efeitos do teor e do tamanho das partículas sobre a densidade seca máxima e a umidade ótima das diferentes misturas.

3.7 Solo de comportamento laterítico

3.7.1 Definições

O solo laterítico é muito comum no Brasil, aparecendo em abundância, principalmente no Estado de São Paulo, que por ser economicamente bem desenvolvido é também o maior gerador de resíduos de construção e demolição. Os solos com comportamento laterítico ocupam um espesso horizonte superficial poroso com minerais estáveis, tais como magnetita, quartzo, caulinita e ilmenita devido à intensa migração de partículas pela ação do intemperismo. Estes solos são muito empregados para a construção de barragens, terraplanagens, pavimentações e outras obras de engenharia (BENATTI; MIGUEL, 2013; PEREIRA et al., 2019; SILVEIRA; RODRIGUES, 2020).

Sob o ponto de vista da Engenharia Civil, de acordo com sua granulometria, os solos podem ser classificados em argilosos, siltosos ou arenosos, e adquirem comportamento laterítico após sofrerem evoluções pedogênicas quando estão localizados em regiões tropicais favoráveis a isso. Sobre sua constituição temos que os solos lateríticos têm sua fração argila constituída predominantemente de minerais cauliníticos e apresentam elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, donde sua peculiar coloração avermelhada (PINTO, 2006).

De acordo com Vargas (1977), os solos de comportamento laterítico são solos superficiais, porosos, formados em locais com clima tropical onde existem estações bem definidas, secas no inverno e úmidas no verão. Possuem coloração avermelhada e aparecem em abundância em nosso país, em especial no Estado de São Paulo, a espessura de suas camadas pode atingir mais de 10 metros e recobrem extensas zonas do Brasil Centro-Sul. Apesar de também se apresentarem na forma argilosa, como é o caso das argilas vermelhas porosas dos espigões da cidade de São Paulo, normalmente são encontrados apresentando granulometria arenosa.

A laterização pode ocorrer em qualquer tipo de solo superficial, nos ensina Massad (2016), nos solos residuais (solos de decomposição de rocha que permanecem no próprio local de sua formação), nos solos coluvionares (solos residuais transportados pela ação da gravidade a pequenas distâncias, geralmente encontrados no pé das encostas naturais) e nos solos sedimentares (formados pelo transporte de sedimentos por meio de grandes volumes de água), desde que o clima seja quente e úmido e que haja drenagem.

São exemplos de solo laterítico os solos porosos da Região Centro-Sul do Brasil, oriundos de solos residuais dos mais variados tipos de rocha (granitos, gnaisses, basalto, arenito, etc.) e as argilas vermelhas do centro da cidade de São Paulo que são originalmente sedimentares (MASSAD, 2016).

Pinto (2006) nos explica que devido ao alto índice de vazios entre suas partículas, os solos com comportamento laterítico apresentam-se em seu estado natural com características de boa drenagem, não saturados, o que os tornam de fácil trabalhabilidade, mas com pequena capacidade de suporte, porém adquirem uma alta resistência após sua compactação e, por isso, são muito usados na construção de estradas e na execução de aterros. Depois de compactado, um solo laterítico apresenta contração se o teor de umidade diminuir, mas não apresenta expansão na presença de água (PINTO, 2006).

Segundo Nogami e Villibor (2007), o interesse pelo emprego desse tipo de solo, em obras de pavimentação urbana se deve, principalmente, ao seu baixo custo em relação aos materiais convencionalmente empregados e, também, à ocorrência de solos lateríticos em grande escala no território brasileiro. Os solos locais utilizados para bases de pavimentos, muito frequentes em grande parte do interior do Estado de São Paulo, são solos arenosos lateríticos de granulação fina, denominados Solos Arenosos Finos Lateríticos (NOGAMI e VILLIBOR, 2007).

A figura 3.8 apresenta o perfil de um subsolo mostrando o corte de um terreno com uma faixa de solo laterítico bastante visível acima da camada mais amarelada que se apresenta no meio do corte.

Figura 3.8 - Corte de terreno que mostra a camada superficial de solo laterítico, acima da faixa mais amarelada. Município de Taubaté, Julho de 2019.



Fonte: O Autor.

3.7.2 **Granulometria e curva de compactação**

A análise da curva granulométrica de um determinado solo nos permite determinar as dimensões de suas partículas e nos fornece as respectivas proporções em que elas se encontram. Segundo as dimensões das suas partículas e dentro de determinados limites convencionais, as frações constituintes dos solos recebem designações próprias (CAPUTO, 2011).

Essas frações, de acordo com a escala granulométrica da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), são:

- Pedregulho – conjunto de partículas cujas dimensões (diâmetros equivalentes) estão compreendidas entre 76 mm e 4,8 mm;
- Areia, entre 4,8 mm e 0,05 mm;
- Silte, entre 0,05 mm e 0,005 mm;
- Argila, inferiores a 0,005mm.

De acordo com Pinto (2006), a análise do tamanho das partículas de um solo pode ser realizada de duas maneiras, por peneiramento, se o solo for constituído de partículas visíveis a olho nu, ou por sedimentação quando se tratar de solos mais finos. O peso do material que passa em cada peneira é chamado de porcentagem que passa, e representado graficamente em função da abertura da peneira correspondente, em escala logarítmica. A abertura de cada peneira, então, é considerada como sendo o diâmetro equivalente das partículas, porque elas não são esféricas. A menor peneira que geralmente é empregada nos laboratórios para ensaios granulométricos é a de n° 200, cuja abertura é de 0,075 mm.

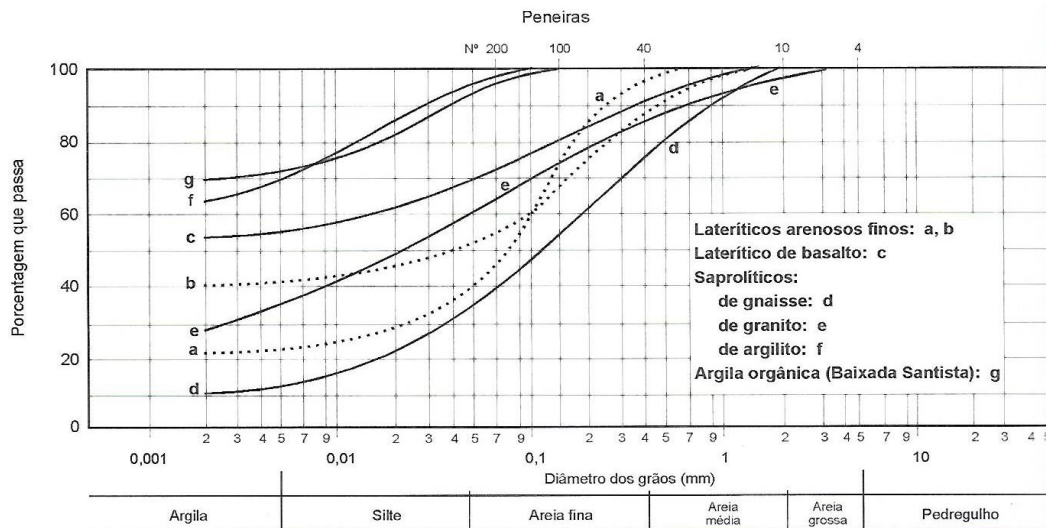
A classificação dos solos deverá agrupar solos de comportamentos semelhantes, segundo Sória (1985), para facilitar as análises quando há um grande número de amostras além de prever o comportamento dos solos, correlacionando um solo com outros em que são conhecidos seus índices classificatórios.

De acordo com Pinto (2006), existem dois sistemas de classificação de solos que são mais empregados mundialmente, o sistema de classificação unificada e o sistema rodoviário de classificação. Ambos se baseiam em dois tipos de análise para classificar os solos: a granulometria e os limites de Atterberg (limites de liquidez e índices de plasticidade).

Pela classificação unificada os solos que possuem mais de 50% em massa de suas partículas retidas na peneira n° 200 são identificados como pedregulho (G) ou areia (S) que podem ser bem (W) ou mal (P) graduados (predominância de partículas dentro de certa faixa de diâmetros). Pelo sistema rodoviário de classificação os solos que possuem mais de 65% em

massa de suas partículas retidas na peneira nº 200 são considerados solos de granulação grosseira que são subdivididos em A-1, A-2 e A-3.

Figura 3.9 – Curvas granulométricas de alguns solos brasileiros.



Fonte: Pinto (2006, p.24).

A compactação de um solo é o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de seus vazios e, assim, aumentar sua resistência, tornando-o mais estável, além de melhorar suas características quanto à permeabilidade, compressibilidade e absorção de água (CAPUTO, 2011).

A compactação é a densificação de um solo por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como em pequenas valetas, até soquetes manuais possam ser empregados e visa principalmente dois aspectos: aumentar o contato entre os grãos e tornar o aterro mais homogêneo (PINTO, 2006).

Para se atingir uma compactação uniforme e eficiente em um aterro é necessário haver um controle desse procedimento, feito através do acompanhamento por engenheiro ou técnico, durante todo o processo da execução do aterro (POULOS, 1988).

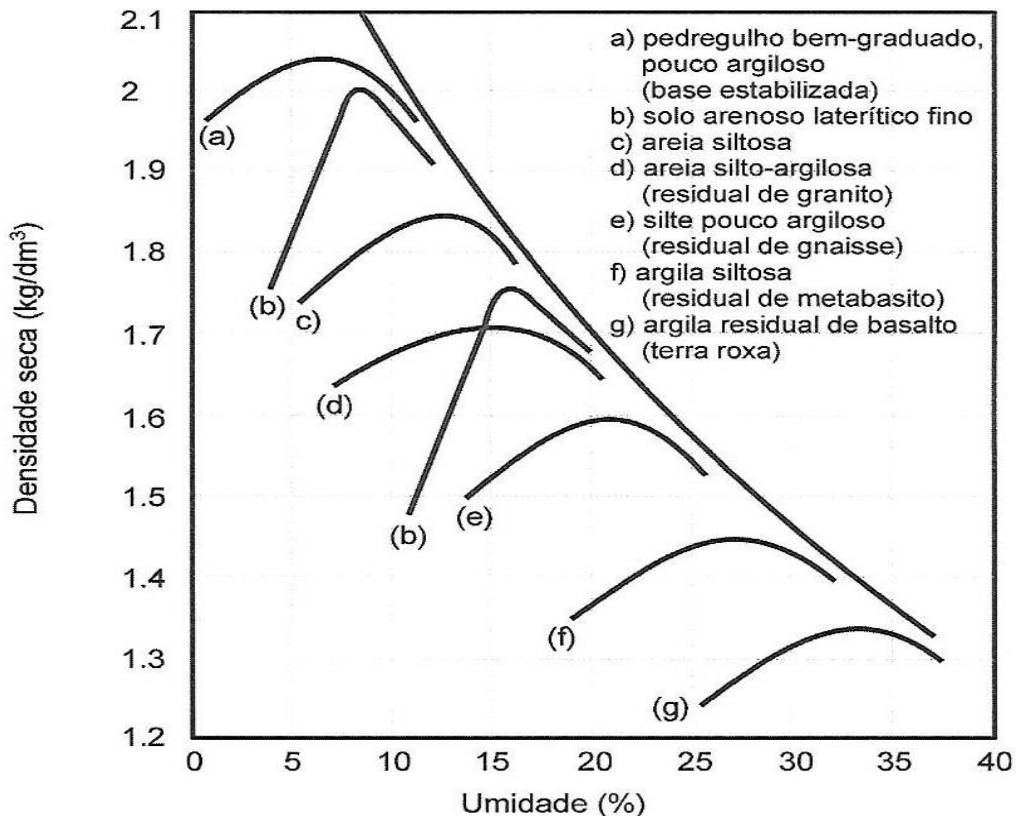
Quando o controle da compactação de um aterro não é realizado adequadamente, pode haver uma considerável dispersão de valores do grau de compactação, comprometendo o desempenho do aterro (NOORANY, 1990).

O grau de compactação é a relação entre a densidade seca e a densidade seca máxima, que aumenta à medida que aumenta a umidade até um determinado valor ótimo de umidade a partir do qual tende a reduzir a densidade seca devido ao excesso de água que passa a ocupar os vazios do solo prejudicando a eficiência da compactação (BRAJA; KHALED, 2014).

No ramo seco (abaixo do teor de umidade ótima), à medida que se adiciona água, ocorre um efeito de lubrificação, o que possibilita uma maior aproximação das partículas de solo. No ramo úmido (acima do teor de umidade ótima), a água passa a existir em excesso, o que provoca um afastamento das partículas de solo e a consequente diminuição da densidade (MASSAD, 2016).

A densidade máxima e consequente umidade ótima de um solo nos fornece uma curva de compactação bastante representativa de cada tipo de solo, como demonstrado na figura 3.10 e, de maneira geral, destaca Pinto (2006), densidades secas máximas da ordem de 2 kg/dm³ a 2,1 kg/dm³ e umidades ótimas baixas, de aproximadamente 9% a 10%, são representativas de areias com pedregulhos, bem graduadas e pouco argilosas. Areias finas lateríticas, mesmo que a fração areia seja mal graduada, podem apresentar umidades ótimas de 12% a 14% com densidades secas máximas de 1,9 kg/dm³.

Figura 3.10 – Curvas de compactação de diversos solos brasileiros.



Fonte: Pinto (2006, p.80).

Nesse sentido destaca ainda Pinto (2006), que os solos lateríticos apresentam o ramo ascendente da curva de compactação nitidamente mais íngreme do que os solos residuais e os solos transportados não laterizados e que essa peculiaridade é empregada na identificação dos solos lateríticos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais Empregados

Neste trabalho foram colhidas amostras de RCD em usinas de reciclagem de três cidades do Estado de São Paulo: Araraquara, Jundiá e Itapetininga. O material produzido por essas usinas são: pedregulho, chamado nas usinas de rachão, agregado graúdo e agregado miúdo também chamado de bica corrida. Algumas usinas de reciclagem separam os resíduos que recebem, em cinza (os que contêm apenas material proveniente de areias e concretos) e vermelho (os que contêm cerâmica vermelha). O motivo dessa separação reside no fato de que os reciclados cinza possuem maior demanda que os reciclados misturados cinza-vermelho.

4.1.1 *Materiais coletados na usina de Araraquara*

A usina de reciclagem “Morada do Sol – Ambiental” está localizada na estrada municipal Sesmaria de Ouro, nº 750 – Bairro Pinheirinho em Araraquara, SP. No local são produzidos, além do material reciclado de RCD (agregado miúdo, agregado graúdo e rachão), também lascas e cavacos de madeira. Trata-se de uma usina de reciclagem de propriedade particular que vende a maior parte de seus produtos reciclados para a prefeitura do município realizar obras de reparos e recapagem de estradas vicinais.

A usina conta com área de transbordo e triagem, máquina retroescavadeira, caminhão basculante, triturador, peneiras e correias transportadoras. Possui também triturador de madeiras que transforma os rejeitos desse material em cavacos.

A empresa consegue comercializar toda sua produção de derivados de madeira para alimentar as caldeiras de uma lavanderia industrial de materiais hospitalares existente na

região. Os materiais e as quantidades obtidas aleatoriamente no dia 24/07/2019 na usina de Araraquara, são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Materiais e quantidades coletadas na Usina de Araraquara.

Materiais	Quantidades (kg)
Agregado miúdo (bica corrida)	10,32
Agregado graúdo (pedra nº 1)	9,22
Pedregulho (rachão)	7,48

Fonte: O Autor.

A figura 4.1 mostra algumas fotos da usina de reciclagem de RCD localizada na cidade de Araraquara.

Figura 4.1 - Apresenta fotografias do local, mostrando a produção dos agregados produzidos na usina de Araraquara.



a) vista geral.



b) esteira de alimentação.



(c) distribuição dos materiais.



d) casa de máquinas.

Figura 4.1 – (continuação).



e) madeira separada após a triagem
Fonte: O Autor.



f) esteira rolante com cavacos de madeira

4.1.2 *Materiais coletados na usina de Jundiaí*

A usina “SBR – Soluções em Britagem de Resíduos” está localizada no município de Jundiaí, Estado de São Paulo e oferece a comercialização de seus materiais no mercado da construção, embora tenha grande parte de sua produção utilizada pela própria prefeitura do município. A usina fabrica blocos de concreto processados com seus agregados miúdos e fornece o restante de sua produção para serviços de manutenção e sub-base de pavimentação de estradas vicinais.

De acordo com informações obtidas na própria usina, ela atua desde 2013 e produz cerca de 3.000 toneladas de RCD por mês e isso representa um reaproveitamento e reciclagem de 70% de material que antes era descartado para aterros. O custo de operação da usina equivale a uma economia de 80% sobre o custo do descarte desse material.

Os materiais e as quantidades obtidas aleatoriamente no dia no dia 23/10/2018 na usina de Jundiaí são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Materiais e quantidades coletadas na usina de Jundiáí.

Materiais	Quantidades (kg)
Agregado miúdo (bica corrida)	9,76
Pedrisco	9,56
Agregado graúdo (pedra nº 1)	9,02
Pedregulho (rachão)	5,94

Fonte: O Autor.

A sequência de operação da usina é composta de uma triagem visual, mesa de catação e esteira rolante, separação dos resíduos em classe A e classe B e finalmente a britagem e peneiramento dos resíduos classe A. A Figura 4.2 apresenta fotografias do local, mostrando a produção dos agregados produzidos na usina de Jundiáí.

Figura 4.2 - Apresenta fotografias do local, mostrando a produção dos agregados produzidos na usina de Jundiáí.



a) entrada da usina.



b) vista geral.



c) área de transbordo e triagem.



d) material após triagem.

Figura 4.2 – (continuação).



e) depósito de materiais.



f) chegada de materiais.



g) produção de pedrisco.



h) pedrisco.



i) produção de bica corrida.

Fonte: O Autor.



j) produção de rachão.

4.1.3 **Materiais coletados na usina de Itapetininga**

A usina de reciclagem “Irmãos Anselmo” está localizada no Bairro Capão Alto em Itapetininga, SP com acesso pela rodovia Gladis Bernardes Minhoto, km 67. É uma empresa particular que possui área de transbordo e triagem, uma máquina retroescavadeira, caminhão basculante, triturador, peneiras e esteira rolante. Comercializa sua produção proveniente da reciclagem de RCD geralmente com a prefeitura do município que a usa para a recuperação de estradas vicinais.

Ela atende particulares interessados em usar os RCD em pequenos aterros, em reparos de estradas vicinais e, com menor frequência, para uso do agregado miúdo substituindo a areia na confecção de concreto.

A empresa tem feito testes no sentido de fabricar artefatos de cimento como guias, blocos e pisos intertravados.

Os materiais e as quantidades obtidas aleatoriamente no dia 05/12/2018 na usina de Itapetininga são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Materiais e quantidades coletadas na usina de Itapetininga.

Materiais	Quantidades (kg)
Agregado miúdo (bica corrida-cinza)	8,66
Agregado miúdo (bica corrida-vermelho)	9,58
Agregado graúdo (pedra nº 1)	6,62
Agregado graúdo (pedras 2 e 3)	3,88
Pedregulho (rachão)	7,06

Fonte: O Autor.

A figura 4.3 mostra algumas fotos da usina de reciclagem de RCD localizada na cidade de Itapetininga.

Figura 4.3 - Apresenta fotografias do local, mostrando a produção dos agregados produzidos na usina de Itapetininga.



a) chegada de materiais.



b) descarte após triagem.



c) polímeros após triagem.



d) isopor após triagem.



e) material após triagem.



f) transporte por máquinas.

Figura 4.3 – (continuação).



g) alimentação do triturador.



h) agregado miúdo vermelho.



i) agregado graúdo.



j) produção de rachão.

Fonte: O Autor.

Nas visitas às usinas foi possível observar a enorme quantidade de diferentes materiais que vem misturado nas caçambas, fazendo com que a triagem na área de transbordo seja uma das etapas mais importantes do procedimento de reciclagem. Continua havendo necessidade de um trabalho forte de conscientização do pessoal que trabalha nas obras para que sejam responsabilizados pelos carregamentos corretos das caçambas de tira entulhos. É importante destacar as diferenças entre as usinas com relação à organização, à área de transbordo e triagem, às quantidades recicladas e à qualidade final dos agregados reciclados.

Quanto às usinas de reciclagem, há uma grande defasagem no número de usinas existentes, pois não foram construídas ainda na maioria das cidades, estas ainda mal conseguiram elaborar seus Planos de Gestão de Resíduos Sólidos e isso porque praticamente foram obrigadas pela Resolução CONAMA e pelas Leis de Saneamento e Política Nacional dos Resíduos Sólidos.

4.1.4 ***Solo Laterítico (coletado no município de Boituva/SP)***

Para caracterizar o sistema pedológico do município de Boituva, o trabalho de Versolato (2019), utilizou a classificação de solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) segundo a qual, no município de Boituva predominam os solos argissolos vermelho-amarelos e latossolos vermelhos. Esses solos situam-se sobre sedimentos arenosos da formação Botucatu com predominância absoluta da fração areia (CLEMENTE et al., 1986).

A amostra de solo laterítico utilizada nos ensaios foi retirada em seu estado natural no município de Boituva às margens da rodovia estadual Boituva – Tatuí, SP 129 na altura do km 15. Do local, na data de 01 de julho de 2019, foram extraídos aleatoriamente 25,79kg de solo.

A Figura 4.4 mostra o local onde foram retiradas as amostras de solo laterítico, localizado no município de Boituva/SP.

Figura 4.4 - Local onde foram extraídas aleatoriamente as amostras de solo no município de Boituva/SP.



a)

Fonte: O Autor.



b)

4.2 Métodos

O RCD a ser utilizado para análise neste trabalho será o de granulometria mais fina, o agregado miúdo, que não deverá ser reprocessado em uma nova britagem para cominuição de suas partículas, mas sim, deverá ser usado nos ensaios em seu estado natural, ou seja, como ele sai das usinas de reciclagem e se apresenta para uso.

Os ensaios com solos de comportamento laterítico misturados com RCD terão proporções fáceis de serem repetidas, se for o caso, em grande escala, isto é, nas próprias construções, porque a escolha de mistura de solo com 25% de RCD e de solo com 50% de RCD possuem a linguagem dos canteiros de obras, com suas meias-medidas e com seus um quarto de medidas, sempre usadas no dia a dia.

Para se caracterizar o comportamento de um solo, sob o ponto de vista da engenharia, é importante a determinação de alguns índices físicos relacionados a esse solo que nos mostra as diversas proporções das três fases, sólida, líquida e gasosa, encontradas nesse solo, tanto em termos de massa quanto de volume (PINTO, 2006).

Segundo Caputo (2011), as propriedades dos solos dependem dos seus constituintes e das proporções relativas entre eles, assim como da interação das fases, sólida, líquida e gasosa sobre as outras.

Para a identificação dos solos a partir das partículas que os constituem, são empregados dois tipos de ensaio: a análise granulométrica e os índices de consistência. Três índices físicos de um solo são determinados diretamente no laboratório: o teor de umidade, o peso específico dos grãos e o peso específico natural (PINTO, 2006).

Os ensaios experimentais com as amostras de solo e de RCD foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Curso Técnico em Edificações do Instituto Federal de São Paulo, Campus de Itapetininga.

4.2.1 *Determinação do teor de umidade (w)*

A norma que regulamenta o cálculo dos teores de umidade dos solos é a NBR 6457/86 e ela recomenda a realização de três determinações por amostra. Foi tomada uma quantidade de solo laterítico e dos RCD obtidos nas usinas, cujas granulometrias correspondem aos valores retidos nas peneiras, destorroada e colocada, em estado natural, em cápsulas metálicas cilíndricas. Após a pesagem das cápsulas vazias e cheias, elas foram colocadas em estufa à

temperatura de 105°C por 18 horas até atingirem a constância de peso. Após a secagem em estufa, as cápsulas permaneceram no dessecador até atingirem a temperatura ambiente e, após isso foram pesadas novamente.

O teor de umidade foi encontrado dividindo-se a diferença do peso úmido menos o peso seco pelo peso seco menos o peso da cápsula, expresso em porcentagem e calculando a média entre os valores das três determinações.

4.2.2 **Determinação da massa específica (ρ)**

A norma que regulamenta o cálculo da massa específica dos solos é a NBR NM 52/03 e define massa específica como sendo a relação do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Foram pesados 500 g de solo laterítico e de RCD obtidos nas usinas, cujas granulometrias correspondem ao maior valor retido nas peneiras, os frascos com as amostras foram preenchidos com água até próximo da marca de 500 cm³. Os frascos foram agitados manualmente de forma a eliminar as bolhas de ar e depois colocados em um banho mantido à temperatura de 21°C. Após uma hora, completou-se com água até a marca de 500 cm³ e determinou-se a massa total. As amostras então foram retiradas dos frascos e colocadas em estufa à temperatura de 105°C por 18 horas até atingirem a constância de peso. Após a secagem em estufa, as amostras foram esfriadas à temperatura ambiente em dessecador e pesadas novamente.

A massa específica foi encontrada com a utilização da Equação 1:

$$\rho = m / (V - V_a) - [(m_s - m) / \rho_a] \quad (1)$$

$$\rho_{\text{água}} = 0,998203 \text{ g/cm}^3;$$

M = massa da amostra seca em estufa;

V = volume do frasco;

V_a = volume de água adicionado ao frasco;

M_s = massa da amostra na condição saturada superfície seca;

$$V_a = (m_2 - m_1) / \rho_a \quad (2)$$

m₁ = massa do conjunto frasco + agregado;

m₂ = massa total frasco + agregado + água.

4.2.3 **Determinação da massa específica dos grãos (ρ_s)**

A norma que regulamenta o cálculo da massa específica dos grãos dos solos é a NBR 6508/84 e baseia-se no procedimento, de acordo com Pinto (2006), da análise de certa massa conhecida colocada em um picnômetro e que, após completarmos com água destilada até a marca demarcatória e determinarmos o peso total, temos que o peso do picnômetro completado só com água, mais o peso do solo, menos o peso do picnômetro com solo e água, é o peso da água que foi substituída pelo solo. Desse peso, calcula-se o volume de água que foi substituído pelo solo e que é o volume do solo. Com o peso e o volume, temos o peso específico das partículas do solo.

Os procedimentos do ensaio são os seguintes: coloca-se um peso seco conhecido de amostras de solo laterítico e de RCD obtidos nas usinas, cujas granulometrias correspondem ao maior valor retido nas peneiras em um picnômetro previamente calibrado como descrito a seguir:

Pesa-se o picnômetro vazio, adiciona-se água destilada até o menisco demarcatório, coloca-se na bomba de vácuo por 15min, retira-se e coloca-se no banho termostático até constância de temperatura a 20°C e leva-se à balança sem colocar as mãos (amostra protegida com papel). Completa-se com água destilada, repete-se o procedimento três vezes e calcula-se a média.

Em seguida adiciona-se água destilada até um pouco abaixo da linha demarcatória e, após, agita-se em dispersor mecânico por 20 min. e aplica-se a pressão de vácuo também por aproximadamente 20 min. para eliminar as bolhas de ar e, a seguir, coloca-se o picnômetro em banho termostático até estabilizar a temperatura de 20°C e, após, completa-se com conta gotas a água do picnômetro até que se atinja a base do menisco da marcação de referência e determina-se a massa.

A massa específica das partículas foi encontrada com a utilização das Equações (3) a (6):

$$m_s = m_u / (1+w) \text{ (g)} \quad (3)$$

$$m = m_s + m_p - m_{\text{final}} \text{ (g)} \quad (4)$$

$$v = m / \rho_a \text{ (cm}^3\text{)} \quad (5)$$

$$\rho_s = m_s / v \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (6)$$

m_u = massa da amostra em estado natural;

m_p = 368,28g (massa do picnômetro calibrado);

w = teor de umidade da amostra;

m_{final} = massa do picnômetro com amostra e água;

$\rho_{\text{água}} = 0,998203 \text{ g/cm}^3$ (densidade da água à 20°C).

Os ensaios para a determinação da massa específica das partículas foram realizados utilizando os seguintes equipamentos:

Picnômetro de 250ml calibrado a 20°C,

Balança semi analítica 1kg,

Aparelho de banho termostático a 20°C,

Bomba de vácuo para remoção do ar aderente às partículas,

Agitador magnético,

Funil de vidro e conta-gotas.

A Figura 4.5 apresenta fotografias do laboratório, mostrando alguns equipamentos usados no procedimento.

Figura 4.5 – Fotos dos equipamentos utilizados durante o procedimento do ensaio.



a) Fotos do material pesado na balança eletrônica.

Figura 4.5 – (continuação).



b) Fotos do material submetido à bomba de vácuo.



c) Fotos do material no agitador magnético.

Fonte: O Autor.

4.2.4 Índices calculados a partir de outros índices

Nos laboratórios de solo, quando se coloca na balança certa quantidade de um elemento qualquer, se determina a massa que é a quantidade de matéria ali existente, porém na prática da engenharia de solos, trabalha-se com pesos que é o produto da massa pela aceleração da gravidade. Para saber o valor do peso a partir da massa adota-se o valor arredondado de 10 m/s^2 para a aceleração da gravidade ao invés do valor real de $9,81 \text{ m/s}^2$. As massas específicas são representadas pela letra grega ρ (rô) e os pesos específicos pela letra γ (gama).

Peso específico aparente seco (γ_d) é a relação entre o peso da parte sólida dos solos e o volume total. Corresponde ao peso específico que o solo teria com suas partículas secas, se isso pudesse ocorrer sem alterar seu volume. Números de referência entre 13 e 19 kN/m³ (PINTO, 2006).

$$\gamma_d = \gamma_n / (1+w) \quad (7)$$

Índice de vazios (e) é a relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas de um solo. Números de referência entre 0,5 e 1,5 (PINTO, 2006).

$$e = (\gamma_s / \gamma_d) - 1 \quad (8)$$

Grau de saturação (s) é a relação entre o volume de água e o volume de vazios existentes em um determinado solo. Varia de 0 (solo seco) a 100% (solo saturado).

$$s = (\gamma_s \cdot w) / (e \cdot \gamma_w) \quad (9)$$

4.2.5 **Determinação das curvas granulométricas**

O ensaio de granulometria foi feito adotando-se os seguintes procedimentos: pesa-se uma quantidade de 1 kg de material em seu estado natural seco ao ar livre, coloca-se na peneira superior do conjunto de peneiras (# 4,76mm), (o símbolo # refere-se à abertura das peneiras. Seria diâmetro se essas aberturas fossem circulares) e coloca-se na mesa vibratória de peneiras por 2min, após o peneiramento retira-se toda a coluna de peneiras do peneirador e coloca-se numa bancada, remove-se a peneira superior, realiza-se um peneiramento manual para que haja a remoção da fração passante e ela possa cair na peneira de abertura imediatamente inferior e então, retira-se o seu conteúdo colocando o material em um copo de Becker para efetuar a pesagem. Repete-se esse procedimento para todas as outras peneiras subsequentes e os resultados das pesagens servem de base para o cálculo da distribuição granulométrica.

O conjunto de peneiras usado para realização do ensaio foi o da série normal segundo a NBR 7211 da ABNT (2005), composto por sete peneiras com aberturas nominais de: 4,76 mm (# 3/16"); 2,36 mm (# 8 malhas); 1,19 mm (# 16 malhas); 0,59 mm (# 30 malhas); 0,297 mm (# 50 malhas); 0,149 (# 100 malhas); 0,0745 (# 200 malhas).

A distribuição granulométrica dos agregados miúdos devem atender aos limites estabelecidos pela norma NBR NM 248 (2003), que seguem apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo extraídos.

Peneira com abertura de malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,76 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,19 mm	5	20	30	50
0,59 mm	15	35	55	70
0,297 mm	50	65	85	95
0,149 mm	85	90	95	100

Fonte: Adaptado de NBR NM 248 (2003).

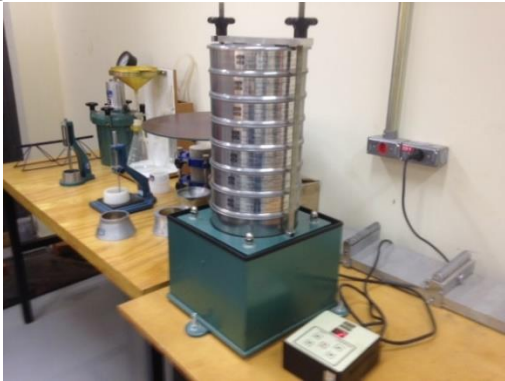
As definições de módulo de finura e de dimensão máxima característica, dadas pela NBR NM 248 (2003), são as seguintes:

- Módulo de finura – soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.
- Dimensão máxima característica – grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

De acordo com a NBR NM 248 (2003), o módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 mm a 2,90 mm; o módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 mm a 2,20 mm e o módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 mm a 3,50 mm.

A Figura 4.6 apresenta fotografias do laboratório, mostrando alguns equipamentos usados no procedimento.

Figura 4.6 – Fotos do Ensaio de Granulometria das Amostras.



a) Jogo de peneiras na mesa vibratória.



b) Retirando o material das peneiras.



c) Pesagem do material na balança eletrônica.
Fonte: O Autor.



d) Pesagem do material na balança eletrônica.

4.2.6 ***Determinação da densidade seca máxima e da umidade ótima***

Os valores da densidade seca máxima e da umidade ótima, obtidas em um ensaio normal de compactação dependem da natureza do material porque, para que as partículas se juntem, a granulometria e a plasticidade exercerão grande influência no processo de compactação.

A compactação de um solo, de acordo com Pinto (2006), é a sua densificação por meio de um rolo compactador, equipamentos mecânicos ou até mesmo soquetes manuais e tem como objetivo aumentar o contato entre os grãos e tornar o local onde ele foi depositado mais resistente e homogêneo. Com a redução do índice de vazios e a consequente diminuição do volume há um aumento da densidade que é função da umidade em que o solo estiver. Quando se compacta com umidade baixa, não se consegue uma boa redução dos vazios por causa do atrito entre as partículas e se a umidade for muito elevada às partículas deslizarão entre si e a

densidade também diminuirá. A capacidade de suporte de um solo é determinada através do Ensaio de Proctor que foi padronizado pela norma NBR 7182/86.

A descrição do ensaio foi retirada de Pinto (2006) e inicia-se colocando uma porção de solo em um cilindro padrão e aplicando-se 26 golpes com um soquete de massa igual a 2,5 kg caindo de uma altura de 30,5 cm. Essa primeira porção de solo deve ocupar cerca de um terço da altura do cilindro, após repete-se o processo mais duas vezes e acerta-se o volume raspando o excesso de solo depois de retirar-se o anel complementar. Determina-se a massa específica do corpo de prova obtido e seu teor de umidade. A amostra é destorroada e sua umidade aumentada em mais ou menos 2% e nova compactação é feita obtendo-se novo par de valores densidade seca – umidade. Repete-se a operação até que se perceba que a densidade seca, depois de ter subido, volte a cair em duas operações sucessivas. Com os dados obtidos, desenha-se a curva de compactação, densidade seca em função da umidade, associa-se uma reta equidistante aos pontos ascendentes e outra aos pontos descendentes e unem-se as duas extremidades por uma curva parabólica. O ápice dessa curva nos fornece a máxima densidade seca à qual corresponde uma umidade ótima.

Para a realização do ensaio, as quantidades de solo laterítico e de cada um dos resíduos que representam os agregados miúdos provenientes das três usinas de reciclagem foram pesados e misturados manualmente nas proporções em massa de 25% e de 50% de RCD com o solo por aproximadamente dez minutos, até atingirem aspecto uniforme e homogêneo.

A figura 4.7 apresenta algumas fotos mostrando os detalhes do Ensaio Normal de Compactação.

Figura 4.7 – Fotos do Ensaio Normal de Compactação.



a) Anel complementar e soquete.



b) Compactação da amostra.

Figura 4.7 – (continuação).



c) Cilindro padrão e corpo de prova.
Fonte: O Autor



d) Cápsula na balança eletrônica.

No gráfico do ensaio, pode-se traçar a curva de saturação, que corresponde ao lugar geométrico dos valores de umidade e densidade seca, com o solo saturado. Podem-se traçar ainda, curvas correspondentes a igual grau de saturação (PINTO, 2006).

A densidade máxima e a umidade ótima são encontradas com a utilização das seguintes fórmulas detalhadas abaixo.

a) Cálculo dos teores de umidade do solo compactado (w):

$$w = (M_u - M_e) / (M_e - M_c) \quad (10)$$

M_u = massa da amostra úmida;

M_e = massa da amostra seca;

M_c = massa da cápsula.

b) Cálculo da densidade do corpo de prova (kg/dm^3):

$$\gamma_c = M_c / V_c \quad (11)$$

$$V_c = 0,974 \text{ dm}^3 \quad \therefore (\varnothing = 10 \text{ cm e } h = 12,4 \text{ cm})$$

c) Cálculo da densidade seca (kg/dm^3):

$$\gamma_s = \gamma_c / (1+w) \quad (12)$$

As curvas de saturação são determinadas em função do grau de saturação utilizando-se a seguinte equação:

$$\rho_d = (S \cdot \rho_s \cdot \rho_w) / (S \cdot \rho_w + \rho_s \cdot w) \quad (13)$$

ρ_d = massa específica seca máxima

S = grau de saturação

ρ_s = massa específica dos grãos do solo

ρ_w = massa específica da água

w = teor de umidade

As equações determinam famílias de curvas que dependem somente da densidade dos sólidos, por exemplo, para saturação $S = 1$ a equação ficará igual a:

$$\rho_d = (\rho_s \cdot \rho_w) / (\rho_w + \rho_s \cdot w) \quad (14)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Cálculos dos teores de umidade

As tabelas de 5.1 a 5.5 mostram os valores determinados no laboratório para o cálculo dos teores de umidade (w) das amostras.

Tabela 5.1 - Cálculo do teor de umidade da amostra de solo laterítico.

Ensaio nº	1	2	3
Massa da amostra úmida (g)	139,78	59,75	66,83
Massa da amostra seca (g)	135,90	57,90	64,63
Massa da cápsula (g)	31,70	7,17	7,30
Teor de umidade (%)	3,72	3,65	3,84
Média das três determinações (%)			3,74
Coefficiente de variação (%)			2,57

Fonte: O Autor.

Tabela 5.2 - Cálculo do teor de umidade da amostra de RCD Araraquara.

Ensaio nº	1	2	3
Massa da amostra úmida (g)	179,22	61,80	67,38
Massa da amostra seca (g)	171,39	59,13	64,25
Massa da cápsula (g)	30,73	7,23	7,20
Teor de umidade (%)	5,57	5,14	5,49
Média das três determinações (%)			5,40
Coefficiente de variação (%)			4,24

Fonte: O Autor.

Tabela 5.3 - Cálculo do teor de umidade da amostra de RCD Jundiaí.

Ensaio n°	1	2	3	
Massa da amostra úmida (g)	154,46	59,46	60,43	
Massa da amostra seca (g)	144,93	55,45	56,50	
Massa da cápsula (g)	29,90	7,26	7,21	
Teor de umidade (%)	8,28	8,32	7,97	
Média das três determinações (%)				8,19
Coeficiente de variação (%)				2,34

Fonte: O Autor.

Tabela 5.4 - Cálculo do teor de umidade da amostra de RCD de Itapetininga cinza.

Ensaio n°	1	2	3	
Massa da amostra úmida (g)	71,37	67,76	69,43	
Massa da amostra seca (g)	67,24	63,63	65,35	
Massa da cápsula (g)	7,28	7,36	7,17	
Teor de umidade (%)	6,89	7,34	7,01	
Média das três determinações (%)				7,08
Coeficiente de variação (%)				3,29

Fonte: O Autor.

Tabela 5.5 - Cálculo do teor de umidade da amostra de RCD de Itapetininga vermelho.

Ensaio n°	1	2	3	
Massa da amostra úmida (g)	71,32	70,90	71,40	
Massa da amostra seca (g)	67,09	66,58	67,23	
Massa da cápsula (g)	7,15	7,29	7,31	
Teor de umidade (%)	7,06	7,29	6,96	
Média das três determinações (%)				7,10
Coeficiente de variação (%)				2,38

Fonte: O Autor.

5.2 Cálculos das massas específicas

As tabelas de 5.6 a 5.10 mostram os valores determinados no laboratório para o cálculo das massas específicas (ρ) das amostras:

Tabela 5.6 - Cálculo da massa específica da amostra de solo laterítico.

	Amostra A	Amostra B	Média
m frasco (g)	198,02	191,24	
m_s (g)	500,02	500,03	
m_1 (g)	698,04	691,27	
m_2 (g)	965,45	956,62	
m (g)	481,36	481,39	
V_a (cm ³)	267,89	265,83	
$V - V_a$ (cm ³)	232,11	234,17	
$(m_s - m) / \rho_a$ (cm ³)	18,69	18,67	
ρ (g/cm ³)	2,26	2,23	2,25

Fonte: O Autor.

Tabela 5.7 - Cálculo da massa específica da amostra de RCD de Araraquara.

	Amostra A	Amostra B	Média
m frasco (g)	189,49	187,94	
m_s (g)	500,06	500,05	
m_1 (g)	689,55	687,99	
m_2 (g)	939,03	941,18	
m (g)	471,34	471,31	
V_a (cm ³)	249,93	253,65	
$V - V_a$ (cm ³)	250,07	246,35	
$(m_s - m) / \rho_a$ (cm ³)	28,77	28,79	
ρ (g/cm ³)	2,13	2,17	2,15

Fonte: O Autor.

Tabela 5.8 - Cálculo da massa específica da amostra de RCD de Jundiá.

	Amostra A	Amostra B	Média
m frasco (g)	191,54	188,04	
m_s (g)	500,03	500,02	
m_1 (g)	691,57	688,06	
m_2 (g)	939,36	924,95	
m (g)	459,33	459,76	
V_a (cm ³)	248,24	237,32	
$V - V_a$ (cm ³)	251,76	262,68	
$(m_s - m) / \rho_a$ (cm ³)	40,77	40,33	
ρ (g/cm ³)	2,18	2,07	2,13

Fonte: O Autor.

Tabela 5.9 - Cálculo da massa específica da amostra de RCD cinza de Itapetininga.

	Amostra A	Amostra B	Média
m frasco (g)	193,48	193,29	
m_s (g)	500,05	500,06	
m_1 (g)	693,53	693,35	
m_2 (g)	961,08	944,35	
m (g)	464,71	466,44	
V_a (cm ³)	268,03	251,45	
$V - V_a$ (cm ³)	231,97	248,55	
$(m_s - m) / \rho_a$ (cm ³)	35,40	33,68	
ρ (g/cm ³)	2,36	2,17	2,27

Fonte: O Autor.

Tabela 5.10 - Cálculo da massa específica da amostra de RCD vermelho de Itapetininga.

	Amostra A	Amostra B	Média
m frasco (g)	191,47	195,23	
m _s (g)	500,02	500,05	
m ₁ (g)	691,49	695,28	
m ₂ (g)	947,05	944,43	
m (g)	463,39	465,14	
V _a (cm ³)	256,02	249,60	
V – V _a (cm ³)	243,98	250,40	
(m _s -m) / ρ _a (cm ³)	36,70	34,97	
ρ (g/cm ³)	2,24	2,16	2,20

Fonte: O Autor.

5.3 Cálculos das massas específicas dos grãos

A tabela 5.11 mostra os valores determinados no laboratório para o cálculo das massas específicas dos grãos (ρ_s) das amostras:

Tabela 5.11 - Cálculo da massa específica dos grãos (ρ_s).

	Solo	RCD	RCD	RCD cinza	RCD verm.
	laterítico	Araraquara	Jundiá	Itapetininga	Itapetininga
m _u (g)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
w (%)	3,74	5,40	8,19	7,08	7,10
m _s (g)	28,92	28,46	27,73	28,02	28,01
m _{final} (g)	386,86	385,48	385,30	385,27	384,86
m (g)	10,34	11,26	10,71	11,03	11,43
v (cm ³)	10,36	11,28	10,73	11,05	11,45
ρ _a (g/cm ³)	0,998203	0,998203	0,998203	0,998203	0,998203
ρ _s (g/cm ³)	2,792	2,523	2,584	2,536	2,446
γ _s (kN/m ³)	27,92	25,23	25,84	25,36	24,46

Fonte: O Autor.

5.4 Peso específico aparente seco, índice de vazios e grau de saturação

A tabela 5.12 mostra os valores determinados no laboratório para o cálculo do peso específico aparente seco (γ_d), do índice de vazios (e) e do grau de saturação (s) das amostras.

Tabela 5.12 - Cálculo do peso específico aparente seco (γ_d), índice de vazios (e) e grau de saturação (S).

	Solo laterítico	RCD Araraquara	RCD Jundiaí	RCD cinza Itapetininga	RCD verm. Itapetininga
W (%)	3,74	5,40	8,19	7,08	7,10
γ_n (kN/m ³)	22,50	21,50	21,30	22,70	22,00
γ_s (kN/m ³)	27,92	25,23	25,84	25,36	24,46
γ_d (kN/m ³)	21,69	20,40	19,69	21,20	20,54
e	0,29	0,24	0,31	0,20	0,19
S (%)	36	57	68	90	91

Fonte: O Autor.

Nota-se que os materiais que provavelmente foram melhores britados além de terem passado por uma triagem mais bem feita, provenientes das usinas de Araraquara e Jundiaí, mostraram nos ensaios graus de saturação próximos a 60%, números considerados normais, enquanto os materiais provenientes da usina de Itapetininga chegaram à casa dos 90%. Como o grau de saturação é a relação entre o volume de água e o volume de vazios de um determinado solo, os valores indicam que os RCD com mais impurezas em seu conteúdo, como micropartículas de madeira, vidro, plástico, etc. possuem menos poros que são os responsáveis pela absorção de água.

5.5 Determinação das granulometrias

5.5.1 Análise granulométrica do solo laterítico

Primeiro ensaio:

Amostra A (1000,91g)

Amostra B (1000,31g)

A tabela 5.13 mostra os valores da primeira análise granulométrica do solo laterítico que teve as maiores porcentagens de massa retidas nas peneiras de # 0,297 e # 0,149 mm.

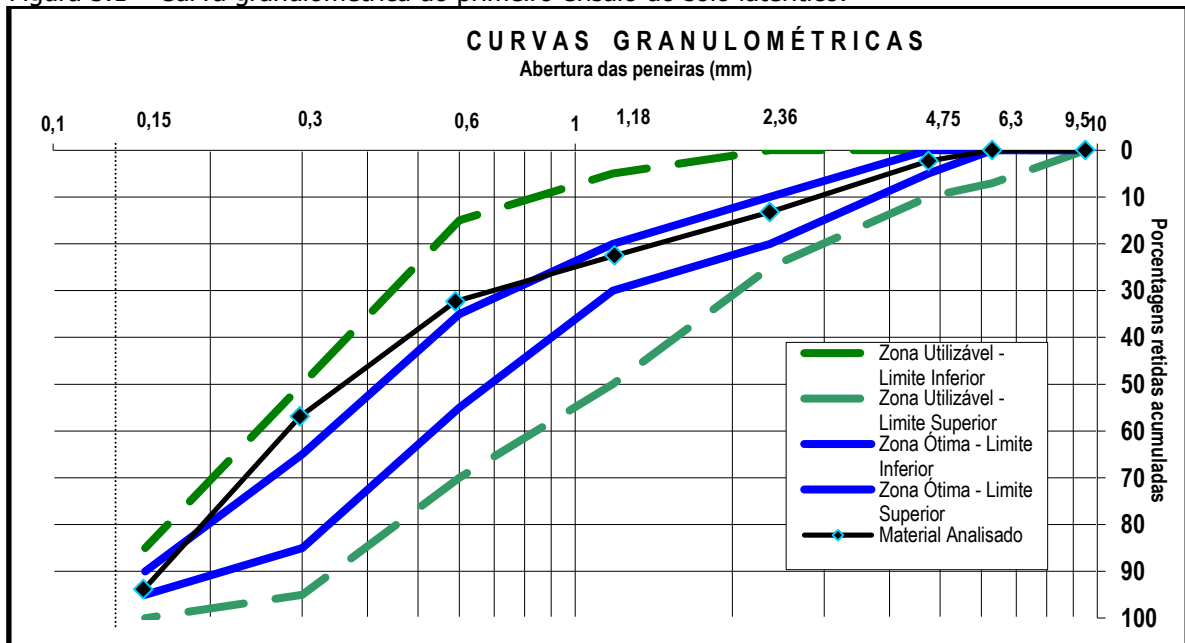
Tabela 5.13 – Resumo da primeira análise granulométrica do solo laterítico.

Resumo da análise granulométrica do solo laterítico									
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas <= 4 %	Média das massas retidas (%)	Massa retida acumulada (%)	Faixas em relação às % retidas acumuladas			
	Ensaio nº 1	Ensaio nº 2				Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,76	2,2%	2,3%	0,1%	2,3%	2,3%	0	0	5	10
2,36	10,1%	11,9%	1,8%	11,0%	13,3%	0	10	20	25
1,19	8,9%	9,6%	0,6%	9,3%	22,5%	5	20	30	50
0,59	9,9%	9,8%	0,2%	9,8%	32,3%	15	35	55	70
0,297	23,9%	25,3%	1,4%	24,6%	56,9%	50	65	85	95
0,149	38,6%	35,3%	3,3%	36,9%	93,9%	85	90	95	100
0,0745	6,4%	5,9%	0,4%	Módulo de finura = 2,21		Dimensão máxima característica = 4,76 mm			

A passagem do solo laterítico pelas peneiras mostra uma constância de material retido nas quatro primeiras totalizando 32% do total, aumentando a quantidade quase três vezes mais na quinta peneira e quatro vezes mais na sexta peneira indicando um solo de graduação não uniforme. Esse resultado, conforme explicação no item 3.7.2, indica um solo SP se a classificação for pelo sistema unificado e um solo A-3 se a classificação for pelo sistema rodoviário, sendo ambas referentes às areias finas mal graduadas.

A amostra apresentou poucos finos passando pela peneira de # 0,0745mm. O módulo de finura foi igual a 2,21 e a dimensão máxima característica (que é considerada, segundo Pinto (2006) como diâmetro equivalente das partículas porque elas não são esféricas) indicada no ensaio foi de 4,76mm.

Figura 5.1 – Curva granulométrica do primeiro ensaio do solo laterítico.



Para que a curva de granulometria do solo laterítico se mantivesse na zona ótima teria que, na peneira de # 0,59mm ter material retido acumulado entre 35 e 55%, sendo que tem 32,3% e, na peneira de # 0,297mm teria de ter entre 65 e 85% sendo que aparece com 56,9%. Essas quantidades, porém, ainda deixam a curva granulométrica do solo laterítico dentro da zona utilizável.

Como o solo laterítico estudado apresentou poucos finos após o ensaio de granulometria, foram colhidas novas amostras no mesmo local e feito com elas outro ensaio de granulometria. O resultado, embora com poucas diferenças, confirmou a pequena quantidade de finos da primeira amostra.

Segundo ensaio:

Amostra A (1000,0 g)

Amostra B (1000,0 g)

A tabela 5.14 mostra os valores da segunda análise granulométrica do solo laterítico que, a exemplo do primeiro ensaio também teve as maiores porcentagens de massa retidas nas peneiras de # 0,297 e # 0,149 mm.

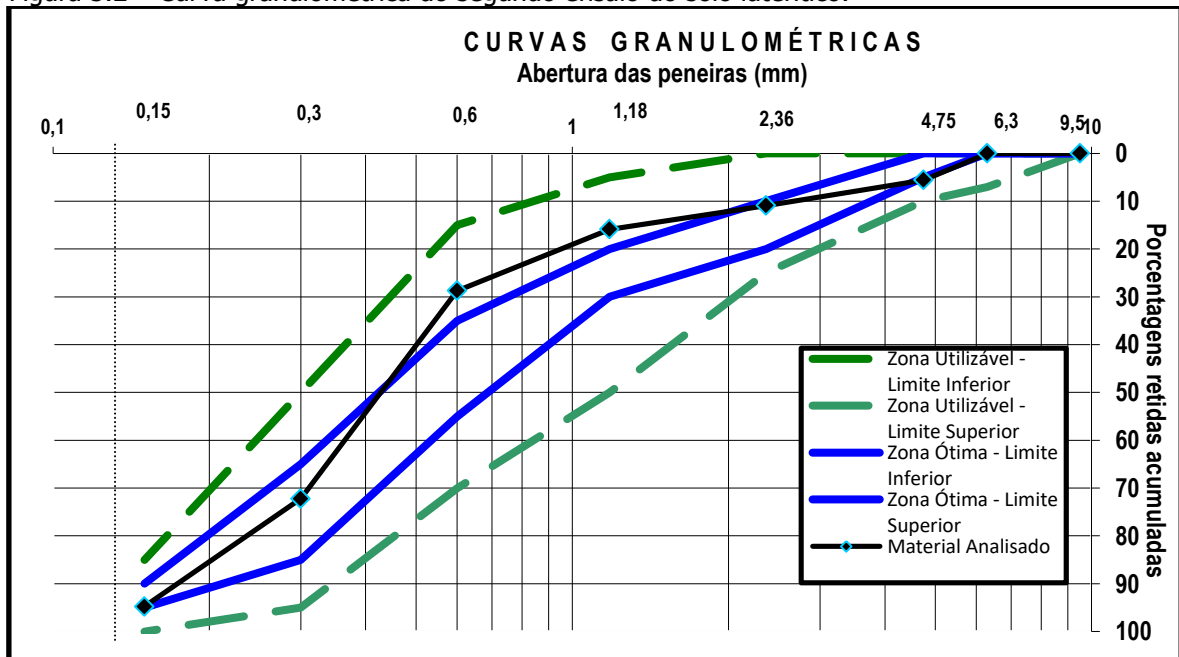
Tabela 5.14 – Resumo da segunda análise granulométrica do solo laterítico.

Resumo da análise granulométrica do solo laterítico									
Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas < = 4 %	Média das massas retidas (%)	Massa retida acumulada (%)	Faixas em relação às % retidas acumuladas			
	Ensaio nº 1	Ensaio nº 2				Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,76	6,3%	4,8%	1,5%	5,6%	5,6%	0	0	5	10
2,36	5,4%	5,3%	0,1%	5,4%	10,9%	0	10	20	25
1,19	4,8%	5,1%	0,4%	5,0%	15,9%	5	20	30	50
0,59	12,4%	13,3%	0,9%	12,9%	28,7%	15	35	55	70
0,297	42,9%	44,0%	1,1%	43,5%	72,2%	50	65	85	95
0,149	23,3%	21,8%	1,6%	22,6%	94,8%	85	90	95	100
0,0745	4,9%	5,6%	0,7%	Módulo de finura = 2,28		Dimensão máxima característica = 6,3mm			

A passagem do solo laterítico pelas peneiras mostra uma constância de material retido nas três primeiras totalizando 16% do total, dobrando essa quantidade na quarta peneira e apresentando mais de 60% de material retido na quinta e na sexta peneiras indicando um solo de graduação não uniforme. Esse resultado, conforme explicação no item 3.7.2, indica um solo SP se a classificação for pelo sistema unificado e um solo A-3 se a classificação for pelo sistema rodoviário, sendo ambas referentes às areias finas mal graduadas.

A amostra apresentou poucos finos passando pela peneira de # 0,0745mm. O módulo de finura foi igual a 2,28 e a dimensão máxima característica indicada no ensaio foi de 6,3mm.

Figura 5.2 – Curva granulométrica do segundo ensaio do solo laterítico.



Para que a curva de granulometria do solo laterítico se mantivesse na zona ótima teria que, na peneira de # 0,59mm ter material retido acumulado entre 35 e 55%, sendo que tem 28,7% e, na peneira de # 1,18mm teria de ter entre 20 e 30% sendo que aparece com 15,9%. Essas quantidades, porém, ainda deixam a curva granulométrica do solo laterítico dentro da zona utilizável.

Nota-se que o formato das curvas das duas amostras apresentadas pela análise da granulometria por peneiramento do solo laterítico é bastante semelhante.

5.5.2 *Análise granulométrica da amostra de Araraquara*

amostra A (1000,16g)

amostra B (1000,08g)

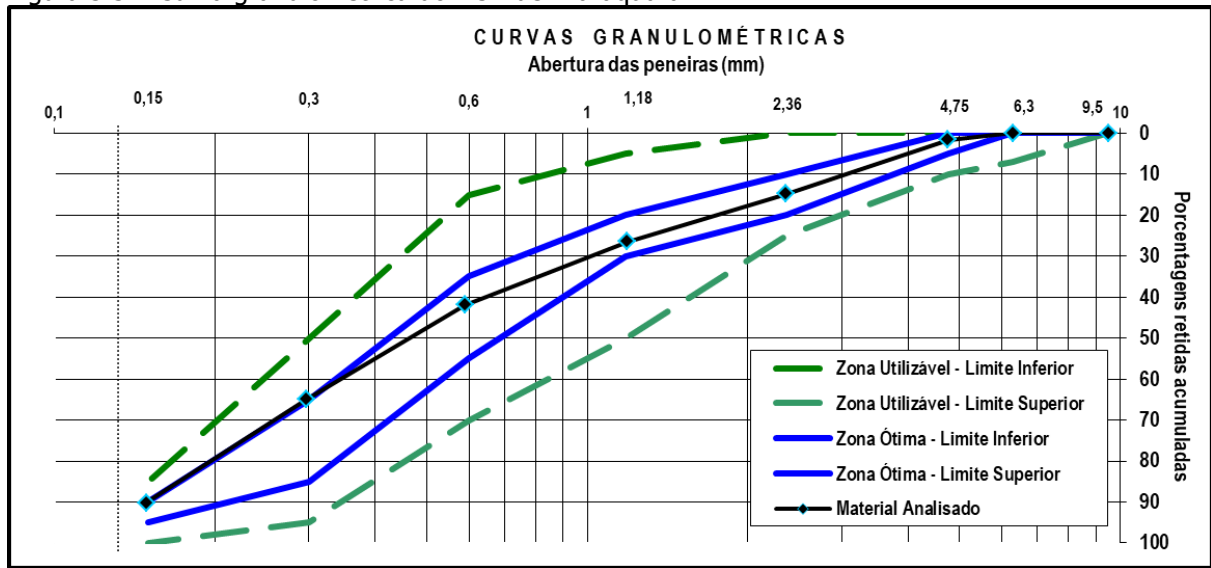
A tabela 5.15 mostra os valores da análise granulométrica do RCD de Araraquara que teve a maior porcentagem de massa retida na peneira de # 0,149 mm.

Tabela 5.15 – Resumo da análise granulométrica do RCD de Araraquara.

Resumo da análise granulométrica do RCD ARARAQUARA									
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas <= 4 %	Média das massas retidas (%)	Massa retida acumulada (%)	Faixas em relação às % retidas acumuladas			
	Ensaio nº 1	Ensaio nº 2				Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,76	1,4%	1,8%	0,4%	1,6%	1,6%	0	0	5	10
2,36	12,0%	14,4%	2,4%	13,2%	14,8%	0	10	20	25
1,19	10,4%	12,9%	2,5%	11,6%	26,4%	5	20	30	50
0,59	14,9%	16,0%	1,1%	15,5%	41,9%	15	35	55	70
0,297	24,6%	21,6%	3,0%	23,1%	64,9%	50	65	85	95
0,149	26,9%	23,7%	3,2%	25,3%	90,3%	85	90	95	100
0,0745	9,8%	9,7%	0,1%	Módulo de finura = 2,4		Dimensão máxima característica = 4,76mm			

O ensaio granulométrico do RCD de Araraquara mostra que o material retido nas quatro primeiras peneiras totalizam quase 42% do total, e na quinta e sexta peneiras há um percentual de material retido de 48% indicando um material de graduação com baixa uniformidade. Mostra também que o módulo de finura foi igual a 2,40 e a dimensão máxima característica indicada no ensaio foi 4,76mm. Como no caso anterior, foi pouca a porcentagem de finos que passou pela peneira de # 0,0745mm.

Figura 5.3 – Curva granulométrica do RCD de Araraquara.



A curva de granulometria do RCD de Araraquara se mantém na zona ótima com quantidades retidas acumuladas até próximo de 50% e então passa a tangenciar a curva que separa a zona ótima da zona utilizável em seu limite inferior.

5.5.3 *Análise granulométrica da amostra de Jundiaí*

amostra A (1006,94g)

amostra B (1003,56g)

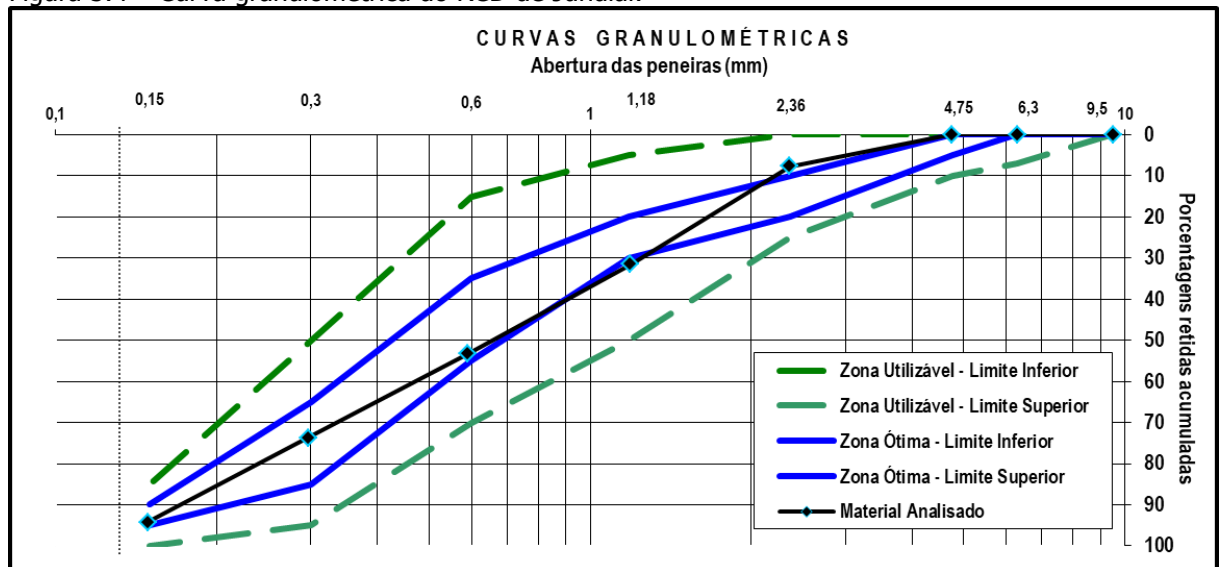
A tabela 5.16 mostra os valores da análise granulométrica do RCD de Jundiaí que teve as maiores porcentagens de massa retidas nas peneiras de # 1,19 mm; de # 0,59 mm; de # 0,297 mm e # 0,149 mm. Essas quatro peneiras retiveram praticamente 80% do total das partículas da amostra.

Tabela 5.16 – Resumo da análise granulométrica do RCD de Jundiáí.

Resumo da análise granulométrica do RCD JUNDIÁÍ									
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas <= 4 %	Média das massas retidas (%)	Massa retida acumulada (%)	Faixas em relação as % retidas acumuladas			
	Ensaio nº 1	Ensaio nº 2				Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,76	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	5	10
2,36	7,2%	8,1%	0,9%	7,7%	7,7%	0	10	20	25
1,19	23,1%	24,8%	1,7%	23,9%	31,6%	5	20	30	50
0,59	21,9%	21,6%	0,2%	21,8%	53,3%	15	35	55	70
0,297	20,0%	20,9%	1,0%	20,4%	73,8%	50	65	85	95
0,149	22,1%	19,0%	3,0%	20,5%	94,3%	85	90	95	100
0,0745	5,8%	5,6%	0,3%	Módulo de finura = 2,61		Dimensão máxima característica = 4,76mm			

O ensaio granulométrico do RCD de Jundiáí mostra um material retido nas peneiras com uma sequência que se repete indicando ser um material de graduação uniforme. Mostra também que o módulo de finura foi igual a 2,61 e a dimensão máxima característica indicada no ensaio foi 4,76mm. Poucos finos representaram a porcentagem de finos que passou pela peneira de # 0,0745mm.

Figura 5.4 – Curva granulométrica do RCD de Jundiáí.



A curva de granulometria do RCD de Jundiáí se mantém na zona ótima sendo que na peneira de # 2,36mm as quantidades retidas tangenciam a curva que separa a zona ótima da zona utilizável em seu limite inferior e nas peneiras de # 1,19mm e de # 0,59mm as

quantidades retidas a tangenciam em seu limite superior. A curva indica um material de graduação uniforme.

5.5.4 *Análise granulométrica da amostra cinza de Itapetininga*

amostra A (1000,61g)

amostra B (1000,20g)

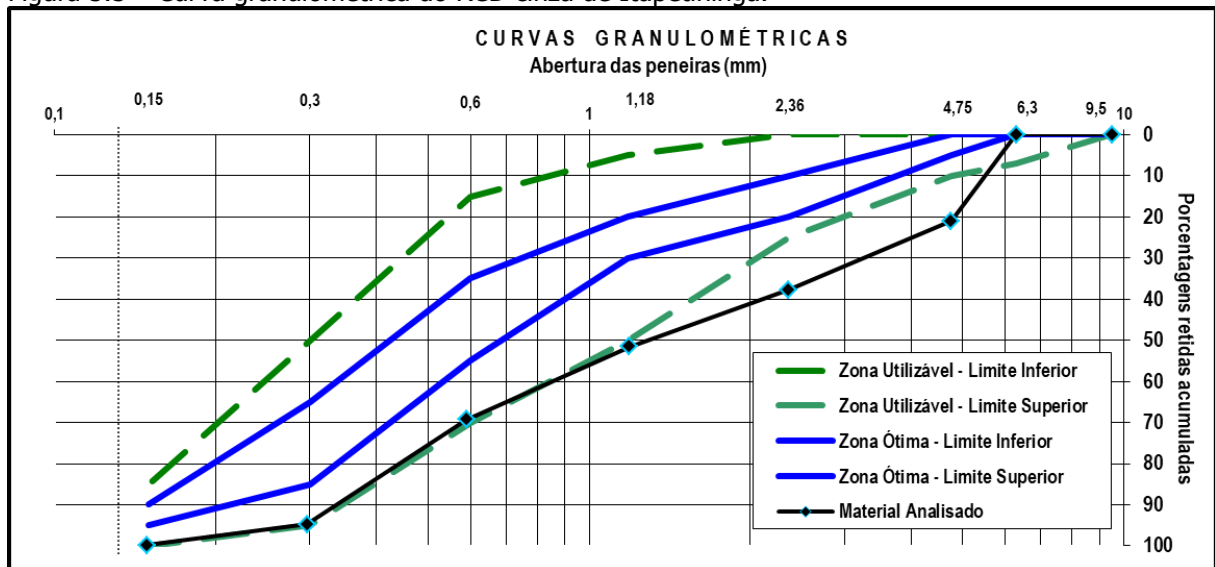
A tabela 5.17 mostra os valores da análise granulométrica do RCD cinza de Itapetininga que teve a maior porcentagem de massa retida na peneira de # 0,297 mm.

Tabela 5.17 – Resumo da análise granulométrica do RCD cinza de Itapetininga.

Resumo da análise granulométrica do RCD Itapetininga cinza									
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas <= 4 %	Média das massas retidas (%)	Massa retida acumulada (%)	Faixas em relação às % retidas acumuladas			
	Ensaio nº 1	Ensaio nº 2				Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,76	20,4%	21,7%	1,3%	21,0%	21,0%	0	0	5	10
2,36	16,7%	16,7%	0,0%	16,7%	37,7%	0	10	20	25
1,19	13,8%	13,9%	0,0%	13,8%	51,6%	5	20	30	50
0,59	17,9%	17,5%	0,4%	17,7%	69,3%	15	35	55	70
0,297	26,0%	24,8%	1,3%	25,4%	94,7%	50	65	85	95
0,149	5,0%	5,3%	0,3%	5,2%	99,9%	85	90	95	100
0,0745	0,2%	0,1%	0,0%	Módulo de finura = 3,74		Dimensão máxima característica = 6,3mm			

O ensaio granulométrico do RCD cinza de Itapetininga mostra uma grande parcela de material retido na peneira de # 4,76mm indicando ser um material não muito bem processado na usina. Apresenta em seguida quase 45% de material com graduação uniforme e depois tem em torno de 25% retido na peneira de # 0,297mm e isso o caracteriza como um material de granulação aberta. Mostra também que o módulo de finura foi igual a 3,74 e a dimensão máxima característica indicada no ensaio foi 6,3mm. A amostra não apresentou finos que passassem pela peneira de # 0,0745mm.

Figura 5.5 – Curva granulométrica do RCD cinza de Itapetininga.



A curva de granulometria do RCD cinza de Itapetininga está bem acima do limite superior da zona utilizável com relação à peneira de # 4,76mm que é de 10% de material retido e também com relação à peneira de # 2,36mm que é de 25% de material retido. A partir da peneira de # 1,19mm a curva representativa do material retido passa a tangenciar a curva que indica zona utilizável em seu limite superior.

5.5.5 *Análise granulométrica da amostra vermelha de Itapetininga*

amostra A (1000,19g)

amostra B (1000,80g)

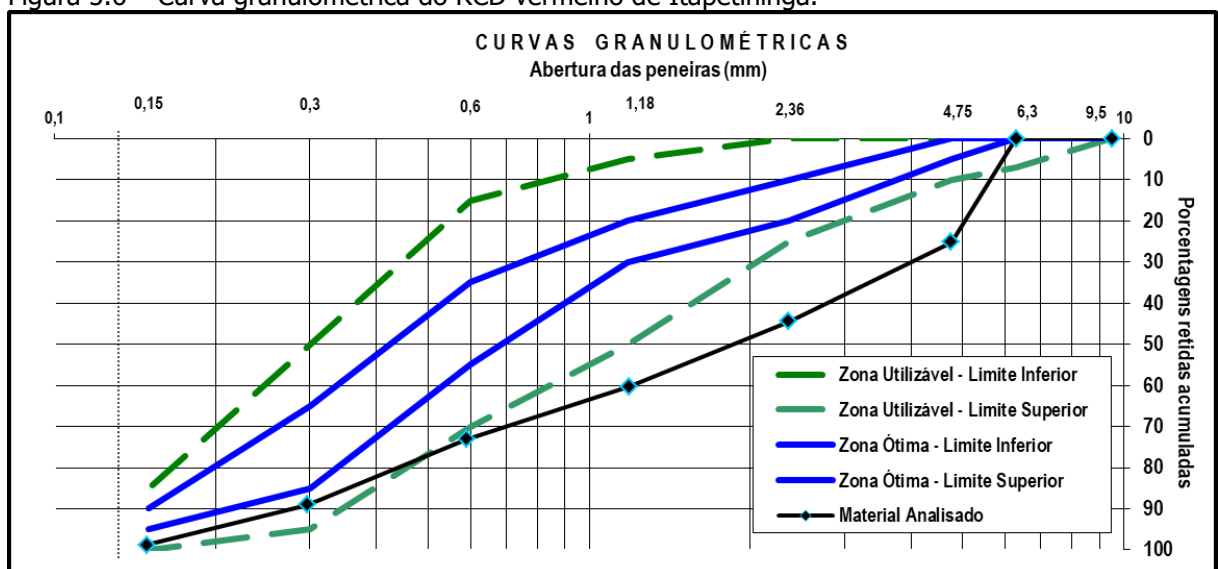
A tabela 5.18 mostra os valores da análise granulométrica do RCD vermelho de Itapetininga que teve a maior porcentagem de massa retida na peneira de #4,76mm.

Tabela 5.18 – Resumo da análise granulométrica do RCD vermelho de Itapetininga.

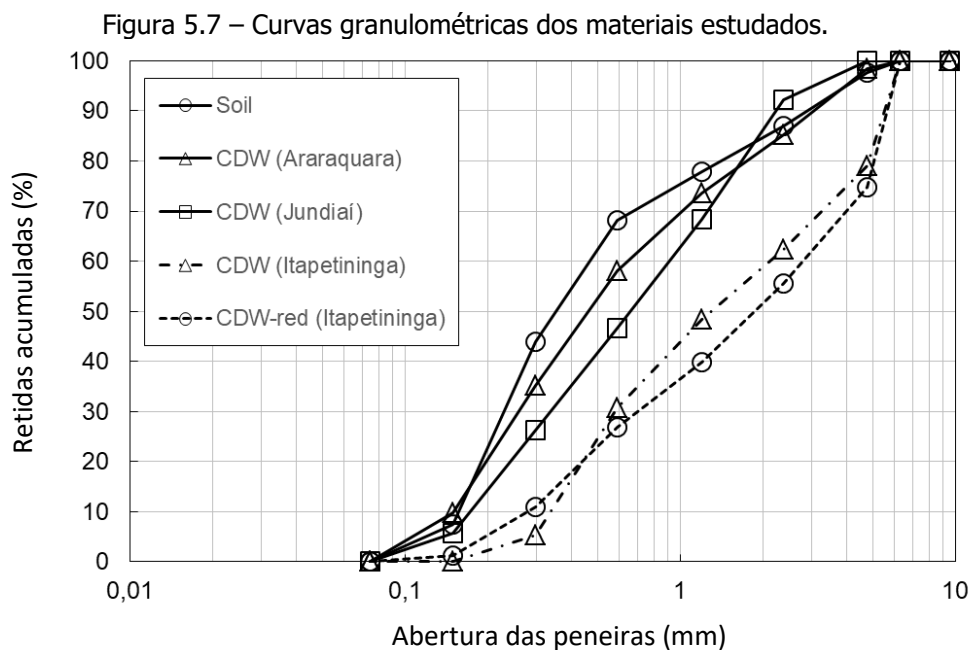
Resumo da análise granulométrica do RCD Itapetininga vermelho									
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas <= 4 %	Média das massas retidas (%)	Massa retida acumulada (%)	Faixas em relação às % retidas acumuladas			
	Ensaio nº 1	Ensaio nº 2				Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,76	25,0%	25,4%	0,4%	25,2%	25,2%	0	0	5	10
2,36	19,8%	18,7%	1,1%	19,3%	44,4%	0	10	20	25
1,19	16,2%	15,4%	0,8%	15,8%	60,2%	5	20	30	50
0,59	11,8%	14,0%	2,2%	12,9%	73,1%	15	35	55	70
0,297	14,0%	17,9%	3,9%	15,9%	89,0%	50	65	85	95
0,149	11,2%	8,2%	3,0%	9,7%	98,8%	85	90	95	100
0,0745	2,0%	0,4%	1,6%	Módulo de finura = 3,91		Dimensão máxima característica = 6,3			

O ensaio granulométrico do RCD vermelho de Itapetininga mostra uma grande parcela de material retido na peneira de # 4,76mm indicando ser um material não muito bem processado na usina. Apresenta em seguida uma graduação uniforme e isso o caracteriza como um material de granulação aberta. Mostra também que o módulo de finura foi igual a 3,91 e a dimensão máxima característica indicada no ensaio foi 6,3mm. A amostra não apresentou partículas finas que passaram pela peneira de # 0,0745mm.

Figura 5.6 – Curva granulométrica do RCD vermelho de Itapetininga.



A curva de granulometria do RCD vermelho de Itapetininga está bem acima do limite superior da zona utilizável com relação à peneira de # 4,76mm que é de 10% de material retido, também com relação à peneira de # 2,36mm que é de 25% de material retido e com relação à peneira de # 1,19mm que é de 50%. A partir da peneira de # 0,59mm a curva representativa do material retido passa para uma configuração entre as zonas utilizável e ótima em seus limites superiores. A figura 5.7 apresenta em um único gráfico as curvas granulométricas dos materiais estudados: solo laterítico, RCD de Araraquara, RCD de Jundiá e RCD cinza e vermelho de Itapetininga.



Nota-se que o material colhido na usina de Itapetininga é o que demonstra um formato de curva mais divergente com relação à curva granulométrica do solo natural e isso indica a importância que deve ser dada ao controle de qualidade na triagem e separação dos resíduos de construção e demolição.

Em sentido contrário, os materiais colhidos nas usinas de Araraquara e Jundiá apresentam um desenho da curva de granulometria que mais se assemelha à do solo natural comprovando se tratar de um RCD que deve ter passado por melhor processo de triagem garantindo menor variabilidade de resíduos em seu conteúdo e conseqüentemente melhorando sua qualidade.

5.6 Densidade Seca Máxima e Umidade Ótima

5.6.1 Solo Laterítico

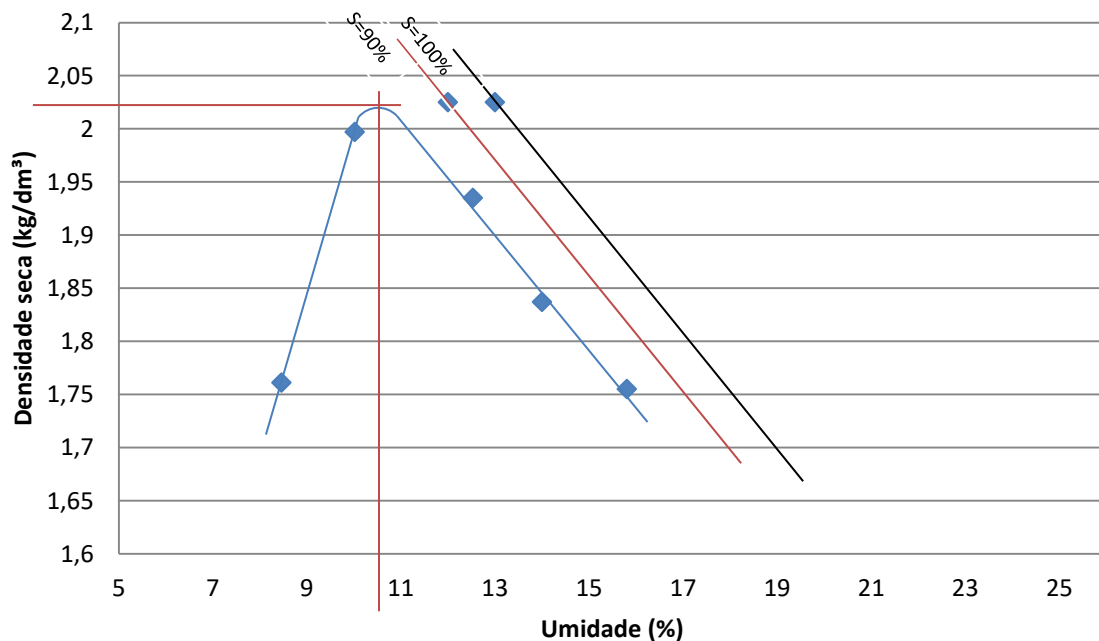
A tabela 5.19 mostra os teores de umidade crescentes e os valores das densidades secas do solo laterítico durante o ensaio de compactação.

Tabela 5.19 - Valores dos teores de umidade e das densidades secas do solo laterítico.

Ensaio n°	1	2	3	4	5
Massa da amostra úmida (g)	44,76	57,85	43,45	44,34	42,00
Massa da amostra seca (g)	41,72	53,24	39,27	39,62	37,07
Massa da cápsula (g)	5,80	7,21	5,90	5,91	5,89
Umidade do solo compactado (%)	8,46	10,02	12,53	14,00	15,81
Massa do corpo de prova (kg)	1,86	2,14	2,12	2,04	1,98
Densidade do corpo de prova (kg/dm ³)	1,910	2,197	2,177	2,094	2,033
Densidade seca (kg/dm ³)	1,761	1,997	1,935	1,837	1,755

Fonte: O Autor.

Figura 5.8 - Gráfico do ensaio de compactação do solo laterítico.



Densidade seca máxima = 2,03 kg/dm³

Umidade ótima = 10,5 %

A curva obtida com os valores do ensaio de compactação do solo sem adição de resíduos apresenta valores para a densidade seca máxima e umidade ótima que indicam tratar-se de solo arenoso laterítico com poucos finos.

O aspecto da curva de compactação do solo com o ramo ascendente (ramo seco) íngreme indica tratar-se de solo laterítico, pois esse tipo de solo possui, de forma bastante evidente essa particularidade, de acordo com Pinto (2006).

Deve ser salientado que os solos lateríticos apresentam o ramo ascendente da curva nitidamente mais íngreme do que os solos residuais e os solos transportados não laterizados. Tal peculiaridade, inclusive, é empregada na identificação dos solos lateríticos (PINTO, 2006).

No gráfico do ensaio, foram traçadas as curvas de saturação para $S = 0,9$ e $S = 1$ utilizando as equações (13) e (14) indicadas no capítulo quatro, que demonstraram o lugar geométrico dos valores de umidade e densidade seca, com o solo saturado.

5.6.2 *Solo misturado com RCD de Araraquara*

A tabela 5.20 mostra os teores de umidade crescentes e os valores das densidades secas da amostra de solo misturada com 25% de RCD de Araraquara.

Tabela 5.20 - Valores dos teores de umidade e das densidades secas do solo misturado com 25% de RCD de Araraquara.

Ensaio n°	1	2	3	4	5
Massa da amostra úmida (g)	69,43	73,81	71,04	73,78	93,04
Massa da amostra seca (g)	64,87	67,55	63,98	65,38	81,16
Massa da cápsula (g)	7,20	7,26	7,29	7,24	7,05
Umidade do solo compactado (%)	7,91	10,38	12,45	14,45	16,03
Massa do corpo de prova (kg)	1,70	1,90	2,14	2,11	2,03
Densidade do corpo de prova (kg/dm ³)	1,745	1,951	2,197	2,166	2,084
Densidade seca (kg/dm ³)	1,617	1,768	1,954	1,893	1,780

Fonte: O Autor.

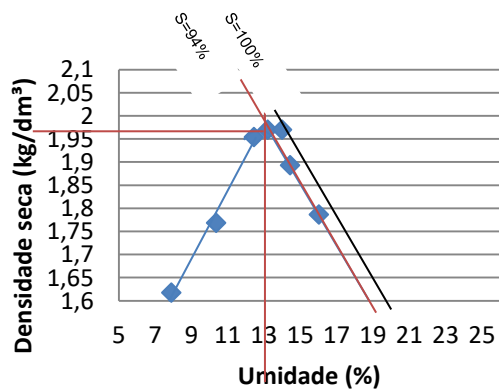
A tabela 5.21 mostra os teores de umidade crescentes e os valores das densidades secas da amostra de solo misturado com 50% de RCD de Araraquara.

Tabela 5.21 - Valores dos teores de umidade e das densidades secas do solo misturado com 50% de RCD de Araraquara.

Ensaio n°	1	2	3	4	5
Massa da amostra úmida (g)	70,34	71,78	70,10	84,50	90,72
Massa da amostra seca (g)	65,51	65,71	63,24	74,96	79,13
Massa da cápsula (g)	7,23	7,06	7,37	7,16	7,28
Umidade do solo compactado (%)	8,29	10,35	12,28	14,07	16,13
Massa do corpo de prova (kg)	1,71	1,85	2,14	2,09	1,96
Densidade do corpo de prova (kg/dm ³)	1,756	1,899	2,197	2,146	2,012
Densidade seca (kg/dm ³)	1,622	1,721	1,957	1,881	1,733

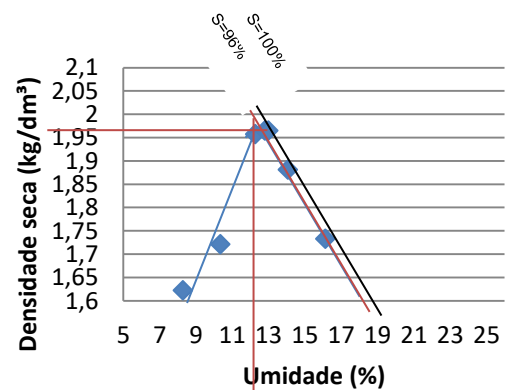
Fonte: O Autor.

Figura 5.9 – Gráficos de compactação de solo laterítico com (a) 25% e (b) 50% de RCD obtidos na Usina de Araraquara.



Densidade seca máxima = 1,97kg/dm³
Umidade ótima = 13,2 %

(a)



Densidade seca máxima = 1,97kg/dm³
Umidade ótima = 12,8 %

(b)

A mistura de 25% de RCD colhidos na usina de Araraquara com o solo sem resíduo, não causa alteração significativa na densidade seca máxima atingida após a compactação, uma vez que diminui de 2,03 kg/dm³ para 1,97 kg/dm³. A umidade ótima por outro lado aumentou de 10,5% para 13,2%. Além disso, o aspecto da curva de compactação demonstra que ela

continua com um ramo ascendente íngreme, típico de solos lateríticos, cuja estrutura está sujeita ao efeito da sucção que é decorrente das forças de capilaridade e adsorção.

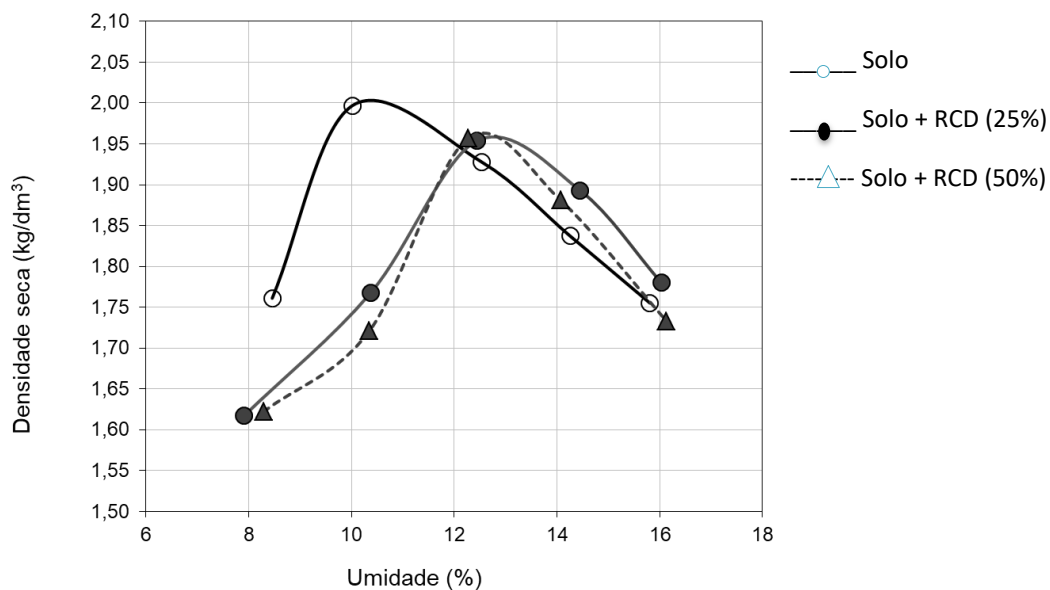
Quando se aumenta a quantidade de RCD colhidos na usina de Araraquara na mistura com o solo laterítico, passando de 25% para 50% nota-se que praticamente não há alteração nos resultados em relação à mistura com 25% porque a densidade seca máxima continua a mesma, 1,97 kg/dm³ sendo que o teor de umidade diminui de 13,2% para 12,8%. Além disso, o aspecto da curva resultante do ensaio de compactação demonstra que ela continua com um ramo ascendente íngreme, típico dos solos lateríticos.

Tabela 5.22 - Valores de densidade seca e umidade dos ensaios de compactação.

Usina	Material	Parâmetros	Pontos dos ensaios de compactação				
			1	2	3	4	5
Araraquara	Solo	w (%)	8,5	10,0	12,5	14,0	15,8
		ρ_d (g/cm ³)	1,76	1,99	1,93	1,84	1,75
	Solo-RCD (25%)	w (%)	7,9	10,4	12,4	14,4	16,0
		ρ_d (g/cm ³)	1,62	1,77	1,95	1,89	1,78
	Solo-RCD (50%)	w (%)	8,3	10,3	12,3	14,1	16,1
		ρ_d (g/cm ³)	1,62	1,72	1,96	1,88	1,73

Fonte: O Autor.

Figura 5.10 - Curvas de compactação do solo e da mistura solo-RCD da Usina de Araraquara.



Os ramos úmidos das curvas de compactação (ramos descendentes) das misturas de solo com RCD situaram-se próximos ao ramo úmido da curva de compactação do solo natural sem mistura com resíduos. Por outro lado, os ramos secos das curvas (ramos ascendentes) das misturas situaram-se distantes do ramo seco da curva do solo natural.

5.6.3 Solo misturado com RCD de Jundiaí

A tabela 5.23 mostra os teores de umidade crescentes e os valores das densidades secas da amostra de solo misturado com 25% de RCD de Jundiaí.

Tabela 5.23 - Valores dos teores de umidade e das densidades secas do solo misturado com 25% de RCD de Jundiaí.

Ensaio nº	1	2	3	4	5
Massa da amostra úmida (g)	64,96	63,21	61,67	76,11	63,97
Massa da amostra seca (g)	60,47	58,09	56,02	67,88	55,78
Massa da cápsula (g)	7,19	7,23	7,20	7,29	5,87
Umidade do solo compactado (%)	8,43	10,07	11,57	13,58	16,41
Massa do corpo de prova (kg)	1,75	1,86	2,14	2,12	2,00
Densidade do corpo de prova (kg/dm ³)	1,797	1,910	2,197	2,177	2,053
Densidade seca (kg/dm ³)	1,657	1,735	1,969	1,917	1,764

Fonte: O Autor.

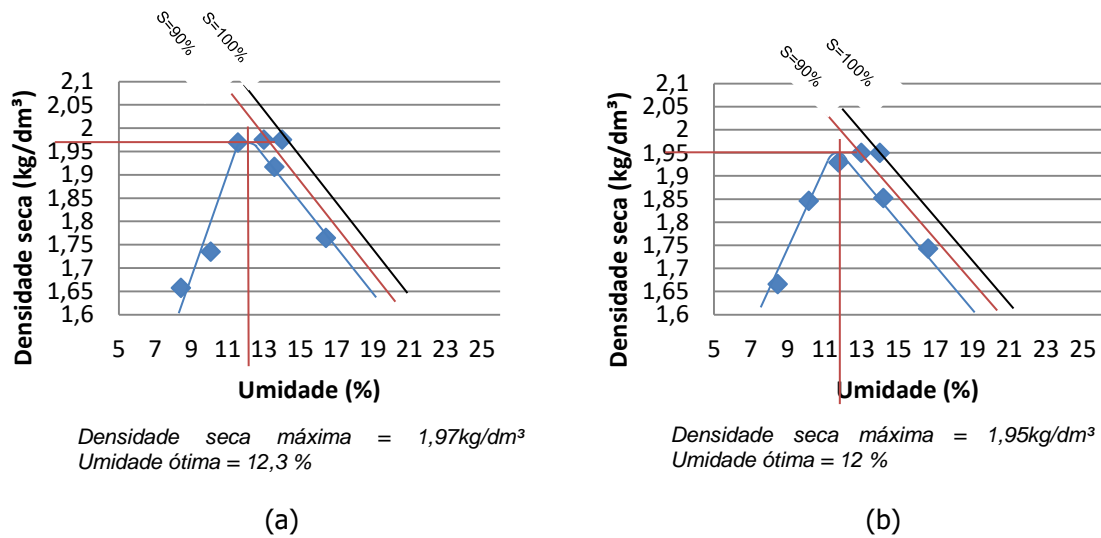
A tabela 5.24 mostra os teores de umidade crescentes e os valores das densidades secas da amostra de solo misturada com 50% de RCD de Jundiaí.

Tabela 5.24 - Valores de umidade e densidade seca do solo misturado com 50% de RCD de Jundiaí.

Ensaio nº	1	2	3	4	5
Massa da amostra úmida (g)	64,60	56,26	60,37	79,43	87,08
Massa da amostra seca (g)	60,16	51,79	54,78	70,46	75,71
Massa da cápsula (g)	7,75	7,75	7,24	7,25	7,30
Umidade do solo compactado (%)	8,47	10,15	11,76	14,19	16,62
Massa do corpo de prova (kg)	1,76	1,98	2,10	2,06	1,98
Densidade do corpo de prova (kg/dm ³)	1,807	2,033	2,156	2,115	2,033
Densidade seca (kg/dm ³)	1,666	1,846	1,929	1,852	1,743

Fonte: O Autor.

Figura 5.11 - Gráficos de compactação de solo laterítico com (a) 25% e (b) 50% de RCD obtido na Usina de Jundiaí.



Como no caso anterior a mistura de 25% de RCD colhidos na usina de Jundiaí com o solo laterítico, não causaram alteração significativa nos resultados obtidos para a máxima densidade seca atingida após a compactação, a qual diminuiu de 2,03 kg/dm³ para 1,97 kg/dm³, sendo que aumentou o teor de umidade, passando de 10,5% para 12,3%. Além disso, o aspecto da curva resultante do ensaio de compactação também demonstra que continua com um ramo ascendente íngreme, típico dos solos lateríticos.

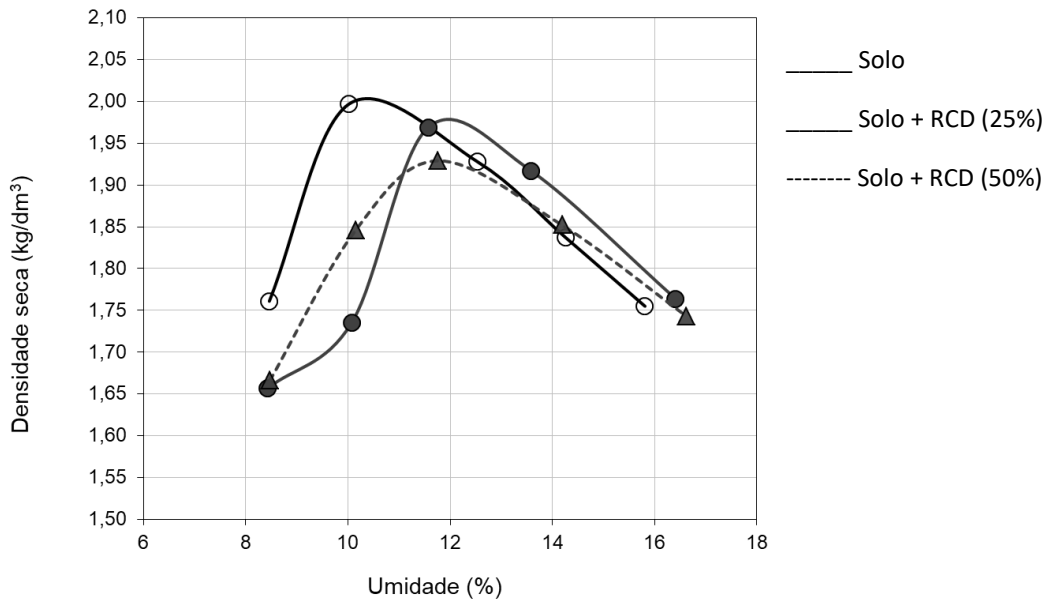
Quando se aumenta a quantidade de RCD colhidos na usina de Jundiaí na mistura com o solo laterítico, passando de 25% para 50% nota-se pouca alteração nos valores que correspondem à densidade seca máxima que diminuiu de 1,97 kg/dm³ para 1,95 kg/dm³ sendo que o teor de umidade ideal sofreu uma pequena alteração, diminuindo de 12,3% para 12%. Além disso, o aspecto da curva de compactação demonstra que continua com um ramo ascendente íngreme, típico dos solos lateríticos.

Tabela 5.25 - Valores de densidade seca e umidade dos ensaios de compactação.

Usina	Material	Parâmetros	Pontos dos ensaios de compactação				
			1	2	3	4	5
Jundiaí	Solo	w (%)	8,5	10,0	12,5	14,0	15,8
		ρ_d (g/cm ³)	1,76	1,99	1,93	1,84	1,75
	Solo-RCD (25%)	w (%)	8,4	10,1	11,6	13,6	16,4
		ρ_d (g/cm ³)	1,66	1,73	1,97	1,92	1,76
	Solo-RCD (50%)	w (%)	8,5	10,1	11,8	14,2	16,6
		ρ_d (g/cm ³)	1,67	1,85	1,93	1,85	1,74

Fonte: O Autor.

Figura 5.12 - Curvas de compactação do solo e da mistura solo-RCD da Usina de Jundiaí.



Os ramos ascendentes e descendentes (secos e úmidos, respectivamente) das curvas referentes às misturas de solo com RCD em relação à curva de solo sem mistura mantiveram o mesmo padrão de comportamento apresentado anteriormente, isto é, ramos úmidos das curvas de compactação das misturas de solo com RCD próximos ao ramo úmido da curva de compactação do solo natural e ramos secos distantes.

O material colhido na usina de Jundiaí se destacou quando comparado aos outros materiais das outras usinas de reciclagem e foi o que apresentou os melhores resultados, uma vez que a curva de compactação da mistura RCD e solo foi a que mais se assemelhou à curva

do solo laterítico natural. Essa usina dispõe de maior infraestrutura, utilizando esteiras rolantes e equipe técnica especializada na seção de triagem e separação do material antes de serem triturados.

5.6.4 *Solo misturado com RCD cinza de Itapetininga*

A tabela 5.26 mostra os teores de umidade crescentes e os valores das densidades secas da amostra de solo misturado com 25% do RCD cinza de Itapetininga.

Tabela 5.26 - Valores dos teores de umidade e das densidades secas do solo misturado com 25% de RCD cinza de Itapetininga.

Ensaio nº	1	2	3	4	5
Massa da amostra úmida (g)	68,85	69,61	72,91	79,04	90,43
Massa da amostra seca (g)	64,29	63,81	65,81	70,27	79,05
Massa da cápsula (g)	7,31	7,26	7,32	7,23	7,00
Umidade do solo compactado (%)	8,00	10,26	12,14	13,91	15,80
Massa do corpo de prova (kg)	1,72	1,86	2,14	2,14	2,06
Densidade do corpo de prova (kg/dm ³)	1,766	1,910	2,197	2,197	2,115
Densidade seca (kg/dm ³)	1,635	1,732	1,959	1,929	1,826

Fonte: O Autor.

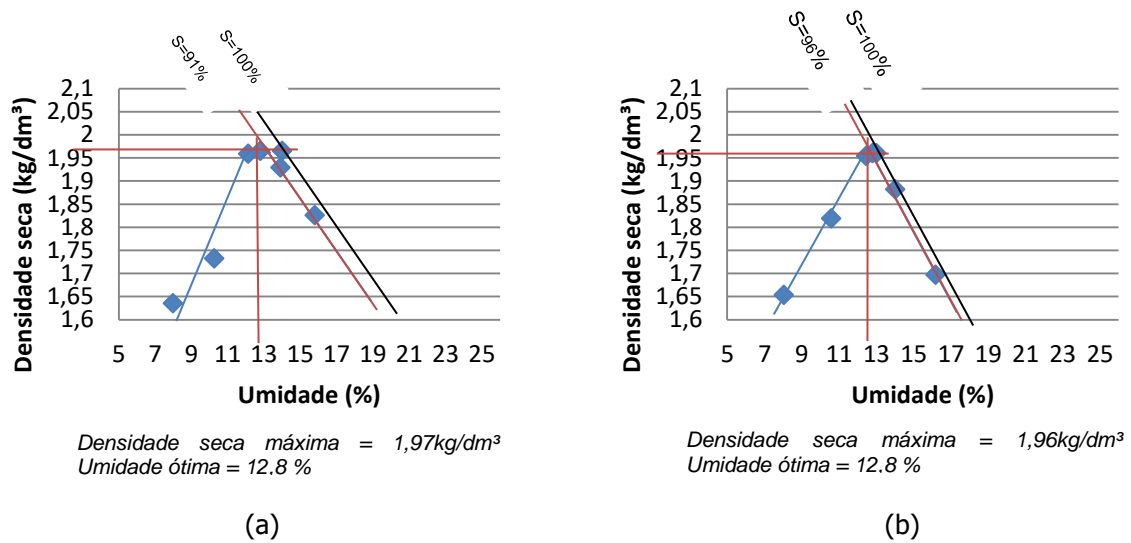
A tabela 5.27 mostra os teores de umidade crescentes e os valores das densidades secas da amostra de solo misturado com 50% de RCD cinza de Itapetininga.

Tabela 5.27 - Valores dos teores de umidade e das densidades secas do solo misturado com 50% de RCD cinza de Itapetininga.

Ensaio nº	1	2	3	4	5
Massa da amostra úmida (g)	73,59	73,87	66,82	91,97	104,15
Massa da amostra seca (g)	68,65	67,49	60,24	81,54	90,66
Massa da cápsula (g)	7,23	7,22	7,37	7,14	7,29
Umidade do solo compactado (%)	8,04	10,59	12,45	14,02	16,18
Massa do corpo de prova (kg)	1,74	1,96	2,14	2,09	1,92
Densidade do corpo de prova (kg/dm ³)	1,786	2,012	2,197	2,146	1,971
Densidade seca (kg/dm ³)	1,653	1,819	1,954	1,882	1,697

Fonte: O Autor.

Figura 5.13 - Gráficos de compactação de solo laterítico com (a) 25% e (b) 50% de RCD cinza obtido na Usina de Itapetininga.



Na mistura de 25% da amostra de resíduos de construção e demolição (cinza) colhidos na usina de Itapetininga com o solo laterítico, houve uma pequena alteração nos valores referentes à máxima densidade seca atingida após a compactação, a qual diminuiu de 2,03 kg/dm³ para 1,97 kg/dm³, com o aumento do teor de umidade da mesma, passando de 10,5% para 12,8%. Além disso, o aspecto da curva que resultou dos valores obtidos no ensaio de compactação também demonstra que continua com um ramo ascendente íngreme, típico dos solos lateríticos.

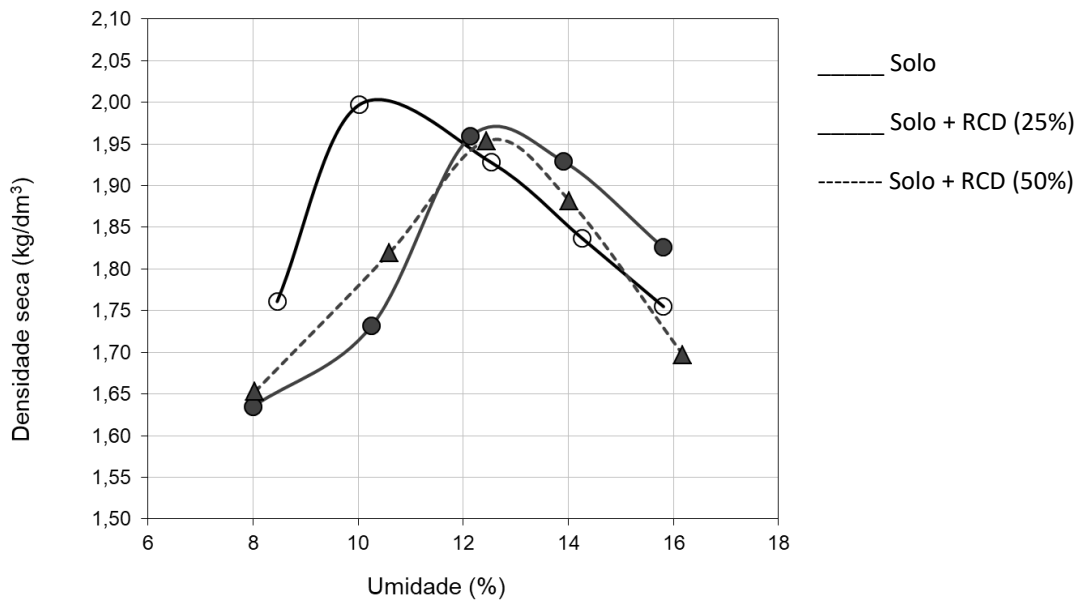
Quando se aumenta a quantidade de RCD (cinza) colhidos na usina de Itapetininga na mistura com o solo laterítico, passando de 25% para 50% nota-se pouca alteração nos valores referentes à sua densidade seca máxima que diminuiu de 1,97 kg/dm³ para 1,96 kg/dm³ sendo que o teor de umidade ideal não sofreu alteração, permanecendo 12,8%. Além disso, o aspecto da curva do ensaio de compactação demonstra que continua com um ramo ascendente íngreme, típico dos solos lateríticos.

Tabela 5.28 - Valores de densidade seca e umidade dos ensaios de compactação.

Usina	Material	Parâmetros	Pontos dos ensaios de compactação				
			1	2	3	4	5
Itapetininga	Solo	w (%)	8,5	10,0	12,5	14,0	15,8
		ρ_d (g/cm ³)	1,76	1,99	1,93	1,84	1,75
	Solo-RCD (25%)	w (%)	8,0	10,3	12,1	13,9	15,8
		ρ_d (g/cm ³)	1,63	1,73	1,96	1,93	1,83
	Solo-RCD (50%)	w (%)	8,0	10,6	12,4	14,0	16,2
		ρ_d (g/cm ³)	1,65	1,82	1,95	1,88	1,69

Fonte: O Autor.

Figura 5.14 - Curvas de compactação do solo e da mistura solo-RCD da Usina de Itapetininga.



Os ramos ascendentes e descendentes (secos e úmidos, respectivamente) das curvas referentes às misturas de solo com RCD em relação à curva de solo sem mistura mantiveram o mesmo padrão de comportamento apresentado anteriormente, isto é, ramos úmidos das curvas de compactação das misturas de solo com RCD próximos ao ramo úmido da curva de compactação do solo natural e ramos secos distantes.

5.6.5 Solo misturado com RCD vermelho de Itapetininga

A tabela 5.29 mostra os teores de umidade crescentes e os valores das densidades secas da amostra de solo misturado com 25% de RCD vermelho de Itapetininga.

Tabela 5.29 - Valores dos teores de umidade e das densidades secas do solo misturado com 25% de RCD vermelho de Itapetininga.

Ensaio n°	1	2	3	4	5
Massa da amostra úmida (g)	55,95	39,51	58,58	65,69	63,34
Massa da amostra seca (g)	52,16	36,36	52,99	58,48	55,44
Massa da cápsula (g)	7,18	5,89	7,16	7,25	5,84
Umidade do solo compactado (%)	8,43	10,34	12,20	14,07	15,93
Massa do corpo de prova (kg)	1,81	1,97	2,15	2,12	2,04
Densidade do corpo de prova (kg/dm ³)	1,858	2,023	2,207	2,177	2,094
Densidade seca (kg/dm ³)	1,714	1,833	1,967	1,908	1,806

Fonte: O Autor.

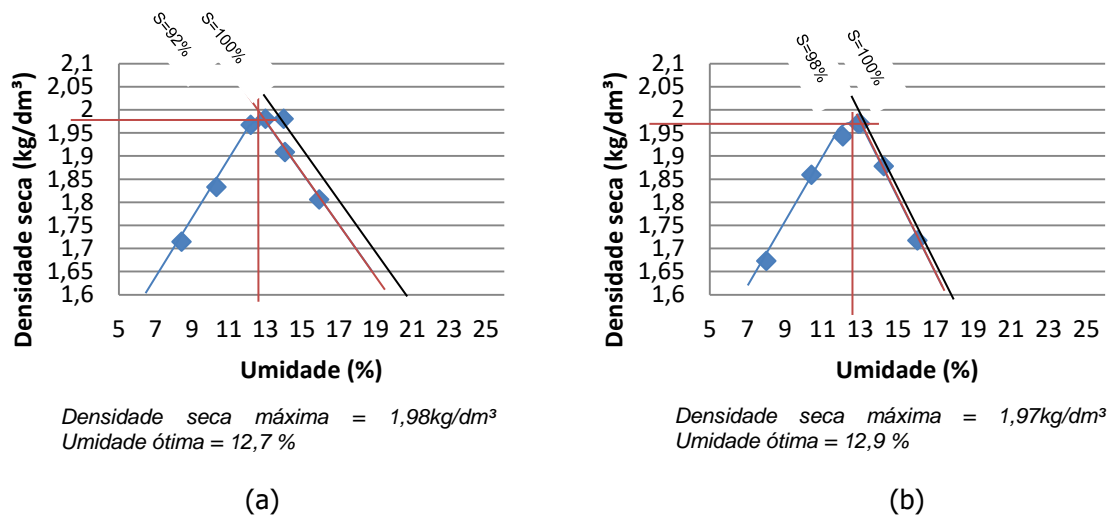
A tabela 5.30 mostra os teores de umidade crescentes e o cálculo das densidades secas da amostra de solo misturado com 50% de RCD vermelho de Itapetininga.

Tabela 5.30 - Valores dos teores de umidade e das densidades secas do solo misturado com 50% de RCD vermelho de Itapetininga.

Ensaio n°	1	2	3	4	5
Massa da amostra úmida (g)	43,33	44,41	45,21	66,89	76,32
Massa da amostra seca (g)	40,55	40,77	40,97	59,28	66,76
Massa da cápsula (g)	5,87	5,84	5,89	5,90	7,17
Umidade do solo compactado (%)	8,02	10,42	12,09	14,26	16,04
Massa do corpo de prova (kg)	1,76	2,00	2,12	2,09	1,94
Densidade do corpo de prova (kg/dm ³)	1,807	2,053	2,177	2,146	1,992
Densidade seca (kg/dm ³)	1,673	1,859	1,942	1,878	1,717

Fonte: O Autor.

Figura 5.15 - Gráficos de compactação de solo laterítico com (a) 25% e (b) 50% de RCD vermelho obtido na Usina de Itapetininga.



Na mistura de 25% da amostra de resíduos de construção e demolição (vermelho) colhidos na usina de Itapetininga com o solo laterítico, houve uma pequena alteração nos valores obtidos para a máxima densidade seca atingida após a compactação, a qual diminuiu de 2,03 kg/dm³ para 1,98 kg/dm³, com o aumento do teor de umidade da mesma, passando de 10,5% para 12,7%. Além disso, o aspecto da curva obtida com os valores do ensaio de compactação também demonstra que ela continua com um ramo ascendente íngreme, típico dos solos lateríticos.

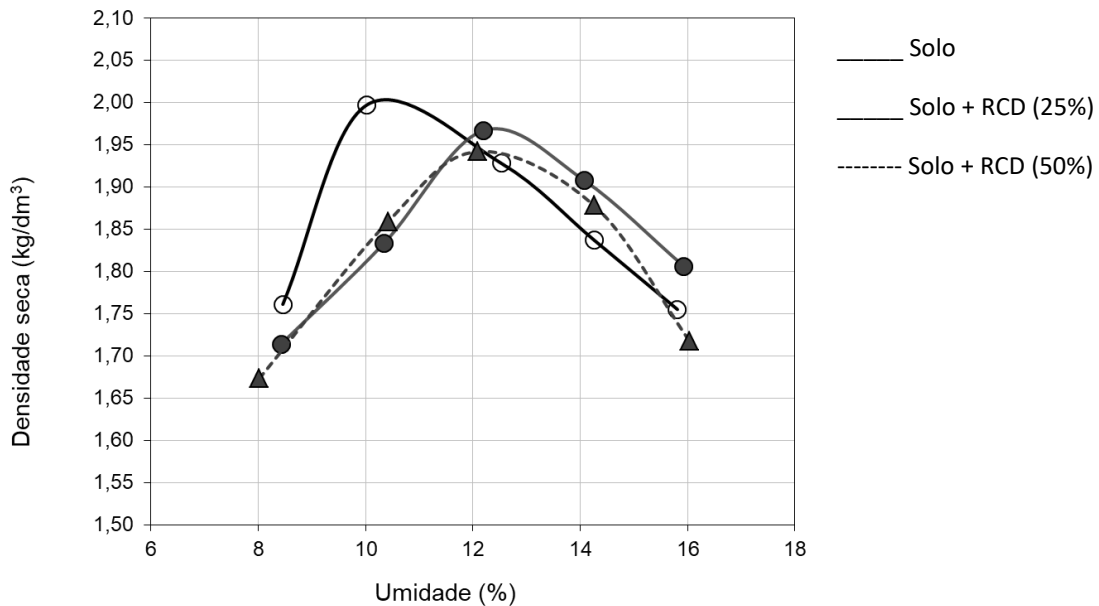
Quando se aumenta a quantidade de RCD (vermelho) colhidos na usina de Itapetininga na mistura com o solo laterítico, passando de 25% para 50% os valores referentes à densidade seca máxima praticamente não sofre alteração, tendo passado de 1,98 kg/dm³ para 1,97 kg/dm³ sendo que a umidade considerada ótima sofreu uma leve alteração se comparada à mistura anterior, passando de 12,7% para 12,9%. Além disso, o aspecto da curva de compactação demonstra que ela continua com um ramo ascendente íngreme, típico dos solos lateríticos.

Tabela 5.31 - Valores de densidade seca e umidade dos ensaios de compactação.

Usina	Material	Parâmetros	Pontos dos ensaios de compactação				
			1	2	3	4	5
Itapetininga	Solo	w (%)	8,5	10,0	12,5	14,0	15,8
		ρ_d (g/cm ³)	1,76	1,99	1,93	1,84	1,75
	Solo-RCD verm. (25%)	w (%)	8,4	10,3	12,2	14,1	15,9
		ρ_d (g/cm ³)	1,71	1,83	1,97	1,91	1,81
	Solo-RCD verm. (50%)	w (%)	8,0	10,4	12,1	14,3	16,0
		ρ_d (g/cm ³)	1,67	1,86	1,94	1,88	1,72

Fonte: O Autor.

Figura 5.16 - Curvas de compactação do solo e da mistura solo-RCD vermelho da Usina de Itapetininga.



Os resultados da densidade seca máxima e umidade ótima das misturas solo com RCD vermelho proveniente da usina de Itapetininga (resíduos com predominância de materiais cerâmicos) são semelhantes aos resultados das misturas solo com RCD da mesma usina (resíduos com predominância de materiais cimentícios) e isso demonstra que, sob o efeito da compactação, não há grandes diferenças nos parâmetros ótimos entre os dois tipos de resíduos.

5.6.6 Comparação - RCD cinza e vermelho de Itapetininga

Quando comparamos em um mesmo gráfico, os resultados das misturas de solo natural com RCD cinza e RCD vermelho, ambos provenientes da mesma usina (Itapetininga), nas proporções de 25% e de 50%, pode-se notar a pouca diferença nos valores obtidos para as densidades secas máximas e as umidades ótimas mostradas nas semelhanças das curvas de compactação dessas misturas.

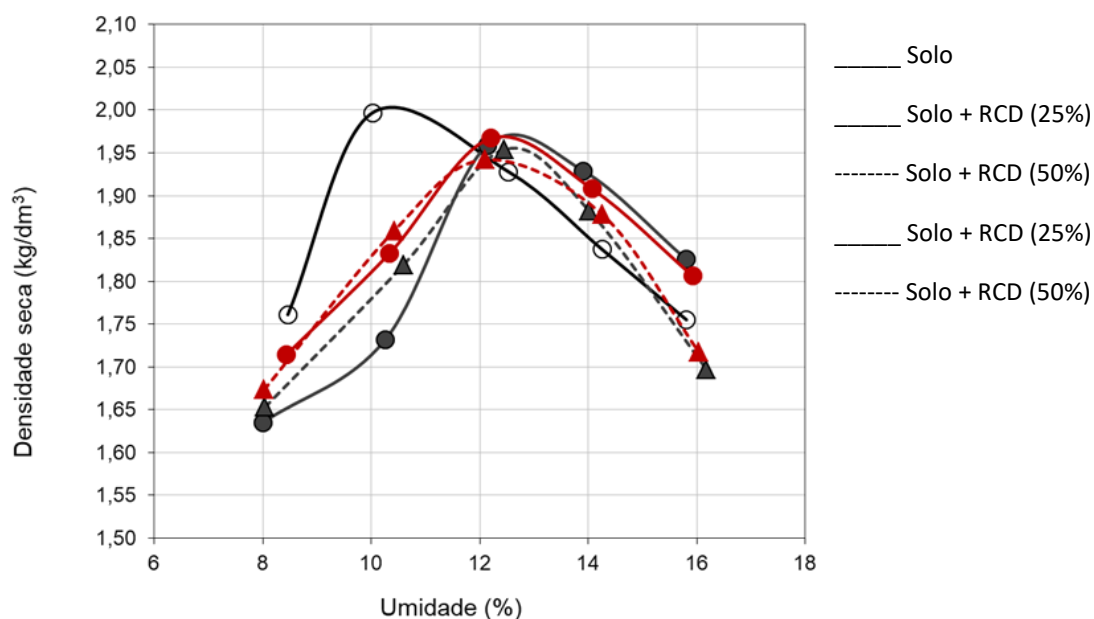
As misturas de solo com RCD vermelho (resíduos que contém cerâmica vermelha) apresentaram valores iguais ou até um pouco melhores do que as misturas de solo com RCD cinza (resíduos que contém materiais cimentícios) conforme se vê na tabela de valores e no gráfico da curva de compactação, o que mostra que a separação desses dois tipos de resíduos não exerce influência nos resultados da compactação de solos para aterro misturado com RCD nas proporções estudadas.

Tabela 5.32 - Valores de densidade seca e umidade dos ensaios de compactação. (Material de Itapetininga)

Usina	Material	Parâmetros	Pontos dos ensaios de compactação				
			1	2	3	4	5
Itapetininga	Solo	w (%)	8,5	10,0	12,5	14,0	15,8
		ρ_d (g/cm ³)	1,76	1,99	1,93	1,84	1,75
	Solo-RCD (25%)	w (%)	8,0	10,3	12,1	13,9	15,8
		ρ_d (g/cm ³)	1,63	1,73	1,96	1,93	1,83
	Solo-RCD (50%)	w (%)	8,0	10,6	12,4	14,00	16,2
		ρ_d (g/cm ³)	1,65	1,82	1,95	1,88	1,69
	Solo-RCD verm. (25%)	w (%)	8,4	10,3	12,2	14,1	15,9
		ρ_d (g/cm ³)	1,71	1,83	1,97	1,91	1,81
	Solo-RCD verm. (50%)	w (%)	8,0	10,4	12,1	14,3	16,0
		ρ_d (g/cm ³)	1,67	1,86	1,94	1,88	1,72

Fonte: O Autor.

Figura 5.17 - Curvas de compactação do solo e das misturas solo-RCD da Usina de Itapetininga.



Os gráficos das curvas de compactação mostraram, em todos os casos estudados, uma inclinação menos íngreme do ramo seco (ascendente) das curvas de compactação das misturas de solo natural com 25% e com 50% de RCD em relação à curva do solo sem as misturas. Num aspecto geral, as curvas de compactação estudadas apresentaram formatos semelhantes aos de solos de comportamento laterítico, conforme resultados apresentados por Lee e Suedkamp (1972), que estudaram 35 amostras de solos distintos que possuem curvas de compactação em formato de sino com pico único.

As amostras de RCD retiradas das usinas apontaram que elas possuem maiores teores de umidade e menores massas específicas que o solo laterítico, na condição de secos ao ar livre. Os ensaios de granulometria nos forneceu uma faixa referente ao tamanho das partículas, tanto do solo como dos RCD, que caracteriza um agregado miúdo arenoso. Os resultados obtidos nos ensaios com as amostras de solo confirmaram se tratar de um solo arenoso laterítico fino, como indica a comparação entre as curvas características de compactação.

Os ensaios e os estudos realizados mostram que os resíduos de construção e demolição após a reciclagem podem ser adicionados ao solo de comportamento laterítico para uso em sub-bases na construção de estradas e de modo geral em obras de terra que deverão ser compactadas.

As quantidades de RCD nas proporções de 25% e 50% foram propositais visando seu uso generalizado nas obras já que se torna fácil para o pessoal que nelas trabalha já acostumados com misturas envolvendo metades e quartas partes. Sugere-se o uso de betoneiras para pequenos serviços de terra como aterros de valetas feitas para instalações hidráulicas e elétricas ou mesmo alguns aterros. Para obras com maior porte pode-se fazer a mistura a granel utilizando-se caminhões basculantes com capacidade de 6m³ e o uso de pás e enxadas. De qualquer maneira o controle do teor de umidade da mistura será de extrema importância.

5.7 Índices Físicos referentes ao ponto ótimo das misturas

Com a densidade seca máxima (ρ_{dmax}), umidade ótima (w_{ot}) e a densidade dos sólidos (ρ_s), foram determinados os demais índices físicos no ponto ótimo, densidade (ρ); índice de vazios (e); porosidade (n) e grau de saturação (S_r).

A Tabela 5.33 apresenta os índices físicos no ponto ótimo tanto do solo natural quanto do das misturas solo-RCD e solo-RCD-verm.

Tabela 5.33 – Índices físicos dos materiais estudados.

Usina	Material	ρ_{dmax} (g/cm)	w_{ot} (%)	ρ (g/cm ³)	ρ_s (g/cm)	e	n (%)	S_r (%)
	Solo	2,03	10,5	2,24	2,79	0,374	27,2	78,3
Araraquara	Solo-RCD (25%)	1,97	13,2	2,23	2,72	0,381	27,6	94,2
	Solo-RCD (50%)	1,97	12,8	2,22	2,66	0,350	25,9	97,3
Jundiaí	Solo-RCD (25%)	1,97	12,3	2,21	2,74	0,391	28,1	86,2
	Solo-RCD (50%)	1,95	12,0	2,18	2,69	0,379	27,5	85,2
Itapetininga	Solo-RCD (25%)	1,97	12,8	2,22	2,73	0,386	27,8	90,5
	Solo-RCD (50%)	1,96	12,8	2,21	2,66	0,357	26,3	95,4
	Solo-RCD _{ver} (25%)	1,98	12,7	2,23	2,73	0,379	27,5	91,5
	Solo-RCD _{ver} (50%)	1,97	12,9	2,22	2,67	0,355	26,2	97,0

Fonte: O Autor.

Nota-se, observando os valores da tabela, que as misturas de RCD com solo laterítico apresentaram uma pequena redução da densidade seca máxima e um aumento da umidade ótima em relação ao solo sem resíduos. Essas variações, porém, causaram pouca alteração nas densidades das misturas ($\rho = 2,18$ a $2,23 \text{ g/cm}^3$) em relação à densidade do solo sem resíduos ($\rho = 2,24 \text{ g/cm}^3$).

Os valores referentes às densidades secas máximas das misturas apresentaram uma pequena redução em relação ao solo natural, assim como, também houve uma pequena redução nos valores das densidades das partículas sólidas com o aumento da quantidade de RCD nas misturas. Os valores de índice de vazios ($e = 0,355$ a $0,391$) e consequentemente os de porosidade ($n = 25,9$ a $28,1\%$) apresentaram valores muito próximos aos valores obtidos para o solo sem resíduo porque o índice de vazios e a porosidade são índices físicos interdependentes, pois $n = e/(1+e)$ e, como o cálculo do índice de vazios é dado por: $e = (\rho_s/\rho_d) - 1$, logo, se ρ_s e ρ_d diminuem em proporções parecidas, então os valores de índice de vazios e porosidade não deverão apresentar grandes variações entre si, como aconteceu nesse estudo.

Os valores de umidade ótima aumentaram nas misturas em relação ao solo normal causando acréscimo nos valores de grau de saturação (S_r) do ponto ótimo que aumentou de $78,3\%$ no solo sem resíduo para ($85,2$ a $97,3\%$) no solo com resíduos. Esta constatação implica na necessidade de utilização de maior quantidade de água para compactar as misturas solo-RCD.

Supondo compactar em condições ótimas um metro cúbico da mistura de solo com resíduos da usina de Jundiaí, por exemplo, a quantidade de água adicional necessária seria cerca de 10% em relação à compactação do solo natural sem resíduos e, se usássemos os RCD das demais usinas estudadas, teríamos aproximadamente 20% de acréscimo de água.

Destaca-se o material colhido na usina de Jundiaí cuja mistura com solo natural apresentou graus de saturação de $85,2\%$ e $86,2\%$ no ponto ótimo das curvas. É importante destacar que este material forneceu a maior diferença entre os valores das densidades secas máximas quando se aumentou a porcentagem da mistura de 25% para 50% , porém, mesmo assim, a variação foi pouco significativa. Além disso, também foi o material que forneceu o menor aumento da umidade ótima entre as amostras, demonstrando que um melhor controle de qualidade na usina reduz a variabilidade do resíduo e melhora sua qualidade.

Comparando-se os resultados obtidos das misturas com os valores característicos dos solos lateríticos essas pequenas variações demonstram que a mistura de solo com RCD, nestas

condições, não representa nenhuma restrição acerca de sua aplicação, portanto não inviabiliza a utilização desses resíduos em solos lateríticos para a construção de aterros.

5.8 Análise preliminar das vantagens econômicas do uso de RCD em aterros

Nesta análise de custos foi comparado apenas o custo do material para a execução de um aterro na construção civil, item que faz parte dos custos diretos no preço final do referido serviço. Também não estão sendo consideradas as questões referentes ao enorme ganho ambiental causado por uma menor exploração de recursos minerais naturais, além de incentivar maior demanda do material reciclado saído das usinas de RCD.

O custo total de um serviço é a soma de seus custos diretos e indiretos e está relacionado ao prazo de execução do mesmo. De acordo com Polito (2015), a duração normal de uma obra ou serviço representa o menor custo direto e a duração acelerada o menor tempo possível de execução, porém o maior custo direto. Nesse sentido, explica o autor, o menor tempo possível é aquele em que não adiantaria alocar mais recursos para reduzir ainda mais seu prazo de execução porque seria tecnicamente inviável.

São considerados custos indiretos aqueles que não sofrem variação, independentemente de suas quantidades, por isso são proporcionais aos prazos de execução dos serviços, por exemplo: água, energia elétrica, mobilização de equipamentos, etc. Já os custos diretos são aqueles envolvidos diretamente na execução dos serviços, por exemplo: material e mão de obra que variam em função das quantidades produzidas. Os custos diretos tendem a aumentar na medida em que os prazos são reduzidos (POLITO, 2015).

Na construção civil, é extremamente comum a necessidade de aterrar terrenos, normalmente para seu nivelamento com terrenos já existentes. Lotes de 250m² e de 300m² costumam ser o padrão na maioria dos loteamentos e sempre há um grande número deles que apresentam declividade excessiva e necessitam de aterramento. Como exemplo, pode-se simular que para fazer um platô nivelado em um terreno com 300m² que possui declive aproximado de 2m seria necessário uma quantidade de solo correspondente a aproximadamente 60 caminhões com capacidade para 6m³ cada um, totalizando uma quantidade de 360m³ de terra. Lembrando que sempre que há cortes em um terreno, haverá um empolamento (afofamento do solo), o que faz com que seu volume aumente em torno de

20%. Ao contrário, nos aterros há um adensamento causado pela compactação que faz seu volume reduzir na mesma medida.

A tabela 5.34 apresenta valores dos materiais usados para o nivelamento do terreno proposto acima, calculados com base em preços médios praticados no estado de São Paulo referentes ao custo das horas das máquinas necessárias, ao custo do m³ de solo e dos resíduos que serão misturados ao solo. O preço colocado na obra refere-se ao custo do material na usina acrescido do valor do transporte desse material até a obra.

É preciso destacar que os custos adicionais referentes à mão-de-obra usada para misturar solo com RCD bem como os referentes à maior compactação necessária quando se aterra com a referida mistura, não estão sendo considerados nessa comparação de custos.

Tabela 5.34 – Valores que representam a economia do custo referente a materiais quando se mistura solo com RCD.

Valores	solo laterítico	RCD	solo + 25% RCD	solo + 50% RCD
Preço médio material (R\$/m ³)	20,00	12,00		
Preço/viagem caminhão com 6m ³ (R\$)	80,00	80,00		
Preço colocado obra (R\$/m ³)	33,33	25,33		
Preço para 360m ³	11.998,80		11.278,80	10.558,80
Economia no custo (%)			6%	12%

Fonte: Fórum da Terraplanagem (2020).

Ressalte-se o relato dos responsáveis por algumas usinas com relação à dificuldade em comercializar seus produtos de que, quando estão com muito material no pátio esperando para serem vendidos, os oferecem sem custo porque precisam de espaço para que a empresa continue em operação.

Há grande variação de valores quando se trata de aterro porque depende da localização da obra e da disponibilidade do material necessário no momento em que o serviço precisa ser executado. Conseguem-se valores melhores se houver disponibilidade de terra próxima ao local da obra porque praticamente vai se pagar apenas o custo do serviço executado pelas máquinas (retroescavadeira e caminhão basculante), em especial quando uma obra precisa do solo para o aterro e a outra, próxima, precisa retirar o solo resultante do corte, porém na maioria das vezes, não há obras próximas necessitando realizar cortes no momento em que se precisam executar aterros e isso obriga o proprietário a pagar pelo solo que será usado.

Nota-se que conseguir uma redução no custo do material dos aterros da ordem de 6,0% utilizando uma quarta parte de RCD misturada com solo e de 12,0% fazendo o mesmo, porém com metade RCD e metade solo, representa muito no orçamento final de uma obra. Isso faz com que a utilização de resíduos se torne bastante atrativa e promissora, caso não interfira na qualidade do aterro (como já sugerido nos itens anteriores), já que se mostra uma vantagem financeira bem significativa.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos realizados em laboratório através de ensaios normais de compactação usando solo laterítico misturado a resíduos de construção e demolição nas proporções de 25% e 50% visando à utilização dessa mistura solo-resíduo como material de aterro de baixo custo e sustentável mostraram que as misturas testadas mudaram pouco o resultado da densidade seca máxima em relação ao solo sem resíduo e que os valores de umidade ótima aumentaram em torno de 2% em relação à umidade ótima de compactação desse mesmo solo. Portanto, baseando-se nesses dados é possível recomendar a utilização de todos os RCDs estudados, misturados nas proporções de 25% e 50% (RCD/solo), para a construção de aterros, por se mostrar satisfatório o resultado alcançado nos ensaios laboratoriais quando o mesmo é comparado aos valores apresentados para a construção do gráfico de curvas de compactação, por solos de comportamento laterítico, que constam da Figura 3.10 extraída de Pinto (2006).

Essa constatação pressupõe a necessidade de utilização de maior quantidade de água para compactar as misturas em condições ótimas de umidade, sendo que esse incremento deverá ser em torno de 10% quando se está trabalhando com RCD da usina de reciclagem de Jundiaí e de 20% quando os RCD que serão utilizados são os das demais usinas, demonstrando a importância da qualidade dos resíduos no desempenho da compactação.

Verificou-se que praticamente não há distinção entre os agregados reciclados vermelhos e cinzas, retirados de Itapetininga, pois os valores finais das misturas com solo se mantêm, e esse fato pode influenciar na separação dos materiais ainda nas caçambas já que, nesse caso, podem vir misturados materiais cimentícios com tijolos, telhas e cerâmicas vermelhas.

Os resultados apresentados demonstram também que o aumento de 25% para 50% de RCD não causou mudanças significativas nos valores de densidades secas máximas de uma

maneira geral em todas as amostras e, deste modo, torna-se viável seu uso nessas proporções para esse fim.

Para validar a aplicação dos resultados ora obtidos em laboratório, justificam-se novas investigações visando comprovar sua eficácia, que deve ser confirmada em aterros experimentais prévios. Estes podendo ser realizados no próprio local do aterro definitivo, desde que as premissas básicas relacionadas ao controle de compactação sejam obedecidas.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil- execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil- utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6.457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6.458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm. Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6.508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7.181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7.182: Solo – Ensaio de compactação – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7.211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM-ISO 2.395: Peneiras de ensaio e ensaio de peneiramento – Vocabulário. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. Acesso em 02/01/2020. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/>>.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/>, 2019>.

AFSHAR, T.; DISFANI, M. M.; ARULRAJAH, A.; NARSILIO, G. A.; EMAM, S. (2017). Impact of particle shape on breakage of recycled construction and demolition aggregates. *Powder Technology* 308: 1-12.

INVESTSP - Agência Paulista de Promoção de Investimentos e Competitividade. Acesso em 06/01/2020. Disponível em: <<https://www.investe.sp.gov.br/por-que-sp/economia-diversificada/pib/>>.

ANGULO, S. C. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

AWOYERA, P. O.; AKINMUSURU, J. O.; DAWSON, A. R.; NDAMBUKI, J. M.; THOM, N. H. (2018). Microstructural characteristics, porosity and strength development in ceramic-laterized concrete. *Cement and Concrete Composites* 86: 224-237.

BENATTI, J. C. B.; MIGUEL, M. G. (2013). A proposal of structural models for colluvial and lateritic soil profile from southwestern Brazil on the basis of their collapsible behavior. *Engineering Geology* 153: 1-11.

BRAJA, M. D.; KHALED S. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Tradução da 8ª edição norte-americana. São Paulo, Cengage Learning, 2014.

BRASIL ENGENHARIA - Brasil recicla cerca de 20% dos resíduos de construção. Acesso em 06/01/2020. Disponível em: <<http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/noticias-da-engenharia/14151-brasil-recicla-cerca-de-20-dos-residuos-de-construcao>>.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações – fundamentos. 6º edição: Rio de Janeiro, Editora LTC, 2011.

CARPENTER, A. C.; GARDNER, K. H.; FOPIANO, J.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. (2007). Life cycle based risk assessment of recycle materials in roadway construction. *Waste Manage* 27(10): 1458-1464.

CLEMENTE, C. A.; ABRAHÃO, I. O.; MARCONI, A.; LORANDI, R. Latossolos da bacia do ribeirão do lobo (Brotas-Itirapina/SP). Departamento de solos, geologia e fertilizantes – ESALQ / USP. Piracicaba, 1986.

COCHRAN, K.; TOWNSEND, T.; REINHART, D.; HECK, H. (2007). Estimation of regional building-related C&D Debris generation and composition: case study for Florida, US. *Journal of Waste Management* 27(7): 921-931.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307 de 05 de julho de 2002. Ministério das Cidades - Secretaria Nacional da Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/02.

Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 448, de dezoito de janeiro de 2012. Publicada no DOU nº 14, de 19 de janeiro de 2012. Acesso em 27 de janeiro de 2020. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672>>.

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S. R.; LUCAS, M. C.; LIMA, L. C. N.; CARDOSO, D. S. L.; DA SILVA, G. A. C.; GREGÓRIO, G. C.; DE SOUZA, A. E.; DOS SANTOS A. (2016). Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). *Construction and Building Materials* 123: 594-600.

CRISTELO N.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A.; VIEIRA C.; MIRANDA T.; PALOMO A. (2018). Stabilization of construction and demolition waste with a high fines content using alkali activated fly ash. *Construction and Building Materials* 170: 26-39.

DECRETO nº 7217 de 21 de junho de 2010. Regulamenta a Lei 11.445/07. Acesso em: 29/01/2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm>.

DUAN, H.; LI, J.; (2016). Construction and demolition waste management: China's lessons. *Waste Management & Research* 34(5): 397-398.

ESA, M. R.; HALOG, A.; RIGAMONTI, L. (2017). Strategies for minimizing construction and demolition wastes in Malaysia. *Resources, Conservation and Recycling* 120: 219-229.

FÓRUM DA TERRAPLANAGEM. Acesso em: 24/08/2020. Disponível em: <<http://www.terraplenagem.net/forum/viewtopic.php?f=5&p=1109#p1109>>.

GAMBATESE, J. A.; RAJENDRAN, S. (2005). Sustainable roadway construction: energy consumption and material waste generation of roadways. Proc., Construction Research Congress, I. D. Tommelein, ed., ASCE, Reston, VA, 1-13.

GOMES, M. H. S. C.; OLIVEIRA, E. C.; BRESCIANI, L. P.; PEREIRA, R. S. (2014). Política Nacional de Resíduos Sólidos: perspectivas de cumprimento da Lei 12.305/2010 nos municípios brasileiros, municípios paulistas e municípios da região do ABC. *Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria*, vol. 7, novembro, 2014, pp. 93-109.

GU, X.; HU, C.; ZHANG, J.; XU, K. (2019). Laboratory Tests on Compaction and Crushing Behaviors of Construction Waste Slag-Clay Mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(11): 04019256.

HERRADOR, R.; PÉREZ, P.; GARACH, L.; ORDÓÑEZ, J. (2012). Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing. *J. Transp. Eng.*, 138(2): 182-190.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasil - Cidades e Estados. Acesso em 08/01/2020. Disponível em: <ibge.gov.br/cidades-estados/sp.html>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de Contas Nacionais. Elaboração: Banco de Dados-CBIC. Acesso em 06/01/2020. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasil - Cidades e Estados. Acesso em 10/01/2020. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>>.

IEA – Instituto de Economia Agrícola. Acesso em 10/01/2020. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/mapa.html>>.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2000.

KILBERT, C. J. (2002). Policy instruments for a sustainable built environment. *J. Land Use Environ. Law*, 17(2): 379-394.

LEE, P. Y.; SUEDEKAMP, R. J. Characteristics of Irregularly Shaped Compaction Curves of Soils. Highway Research Record. USA, 1972.

LEI FEDERAL DO SANEAMENTO BÁSICO. Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007. Acesso em: 29/01/2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>.

LEITE, F. C. Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2007.

MAH, C. M.; FUJIWARA, T.; HO, C. S. (2016). Construction and demolition waste generation rates for high-rise buildings in Malaysia. *Waste Management & Research*, Vol. 34(12): 1224-1230.

MARQUES FILHO, L. C. Capitalismo e colapso ambiental. 2º edição: Campinas, Editora da Unicamp, 2016.

MASSAD, F. Mecânica dos solos experimental. São Paulo, Oficina de Textos, 2016.

MENEGAKI, M.; DAMIGOS, D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current opinion in green and sustainable chemistry*, vol. 13: 8-15.

MOURA, J. M. B. M.; PINHEIRO, I. G.; CARMO, J. L. (2018). Gravimetric composition of the rejects coming from the segregation process of the municipal recyclable wastes. *Waste Management* 74: 98-109.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F.; CINCERRE, J. R.; SERRA, P. R. M.; NETO, A. Z. Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas – bases alternativas com solos lateríticos. São Paulo, Arte e Ciência Editora, 2007, pág. 12-17.

- NOORANY, I. (1990). Variability in compaction control. *J. Geotech. Eng.*, 116(7): 1132-1136.
- NUNES, J. M.; LONGO, O. C.; ALCOFORADO, L. F.; PINTO, G. O. (2020). The Civil Construction sector in Brazil and the current economic crisis. *Research, Society and Development*, v. 9, n° 9, e393997274, 2020.
- NUNES, K. R. A.; MAHLER, C. F. (2020). Comparison of construction and demolition waste management between Brazil, European Union and USA. *Waste Management & Research*, Vol. 38(4): 415-422.
- PAZ, D. H. F.; LAFAYETTE, K. P. V. (2016). Forecasting of construction and demolition waste in Brazil. *Waste Management & Research*, Vol. 34(8): 708-716.
- PENTEADO, C. S. G.; ROSADO, L. P. (2016). Comparison of scenarios for the integrated management of construction and demolition waste by life cycle assessment: A case study in Brazil. *Waste Management & Research*. Vol. 34(10): 1026-1035.
- PEREIRA, M. S.; TSUHA, C. H. C.; VILAR, O. M.; SCHIAVON, J. A.; TIBANA, S.; SABOYA Jr, F.; DIAS, D. (2019). Performance evaluation of a collapsible soil reinforced with compacted lateritic soil columns. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 145(9): 04019055.
- PERFIL DOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS – aspectos gerais da gestão da política de saneamento básico. IBGE, 2017. Acesso em 27/01/2020. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101610.pdf>>.
- PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. 3° edição: São Paulo, Oficina de Textos, 2006.
- PINTO, T. P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. 1999. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1999.
- POLÍTICA MUNICIPAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. JUNDIAÍ / SP. Lei Municipal n° 8574 de 28 de dezembro de 2015. Acesso em: 29/01/2020. Disponível em: <http://sapl.jundiai.sp.leg.br/consultas/norma_juridica/norma_juridica_mostrar_proc?cod_norma=16169>.
- POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Lei n° 12.305 de 02 de agosto de 2010. Acesso em: 27/01/2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2010/lei/l12305.htm>.
- POLITO, G. Gerenciamento de Obras: boas práticas para a melhoria da qualidade e da produtividade. Editora Pini. São Paulo, 2015.
- POULOS, S. J. (1988). Compaction control and the index unit weight. *Geotech. Testing J.*, 11(2): 100-108.
- REZENDE, L.; MARQUES, M. O.; OLIVEIRA J. C.; DE CARVALHO, J. C. (2016). Field Investigation of Mechanic Properties of Recycled CDW for Asphalt Pavement Layers. *J. Mater. Civ. Eng.* 28(3): 05015003.

SILVEIRA, I. A.; RODRIGUES, R. A. (2020). Collapsible Behavior of Lateritic Soil Due to Compacting Conditions. *International Journal of Civil Engineering*. 18: 1157-1166.

SELUR - SINDICATO DAS EMPRESAS DE LIMPEZA URBANA NO ESTADO DE SÃO PAULO. Índice de sustentabilidade da limpeza urbana. Acesso em 20/08/2020. Disponível em: <<https://selur.org.br/publicacoes/islu-indice-de-sustentabilidade-da-limpeza-urbana-4a-edicao-2019/>>.

SOLEIMANBEIGI, A.; EDIL, T. (2015). Compressibility of Recycled Materials for use as Highway Embankment Fill. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 141(5): 04015011.

SORIA, M. H. A.; SILVEIRA, A. Reflexões lógicas sobre classificação de solos (1985). Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A. C. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. *Ambiente Construído – artigo acadêmico*. Porto Alegre, 2004.

TAM, V.; LU, W. (2016). Construction waste management profiles, practices, and performance: a cross-jurisdictional analysis in four countries. *Sustainability*, 8: 1-16.

TOWNSEND, T. G.; JANG, Y.; THUM, L. G. (1999). Simulation of construction and demolition waste leachate. *J. Environ. Eng.*, 125(11): 1071-1081.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977.

VERSOLATO B. Dispersão urbana e apropriação do relevo na bacia do ribeirão do Jerivá, Boituva – São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba, 2019.

YUAN, H.; SHEN, L. (2011). Trend of the research on construction and demolition waste management. *Waste Management* 31: 670-679.

WEI-HONG, X.; FRAAIJ, A.; PIETERSEN, H.; REM, P.; VAN DIJK, K. (2004). The quality improvement of story construction and demolition waste (CDW). *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci.*, 19(3): 78-80.

ZUQUETTE, L. V. *Geotecnia Ambiental*. 1º edição: Rio de Janeiro, Editora Elsevier, 2015.

APÊNDICE A – Análise granulométrica do solo laterítico

A Tabela 1 apresenta a análise granulométrica da 1ª amostra de solo laterítico, e a Tabela 2 apresenta a análise da 2ª amostra:

Tabela 1 - Análise granulométrica da primeira amostra do solo laterítico.

Data: 26/06/19		GRANULOMETRIA DO SOLO LATERÍTICO - NBR NM 248:2003									
Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca = 1.000,9 g				(Vr)	(Mrm)	(Mra)	Faixas em relação às % retidas acumuladas			
	b) massa inicial seca = 1.000,3 g				Massa retida	Massa retida	Massa retida	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Variações ± 4 %	Média (%)	Acumulada (%)	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b							
9,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,76	21,9	23,2	2,2%	2,3%	0,1%	2,3%	2,3%	0	0	5	10
2,36	98,8	117,2	10,1%	11,9%	1,8%	11,0%	13,3%	0	10	20	25
1,19	87,6	94,6	8,9%	9,6%	0,6%	9,3%	22,5%	5	20	30	50
0,59	97,5	96,4	9,9%	9,8%	0,2%	9,8%	32,3%	15	35	55	70
0,297	234,4	249,8	23,9%	25,3%	1,4%	24,6%	56,9%	50	65	85	95
0,149	379,0	348,4	38,6%	35,3%	3,3%	36,9%	93,9%	85	90	95	100
0,0745	62,5	58,5	6,4%	5,9%	0,4%	6,1%	100,0%	100	100	100	100
Mt) ·	981,7	987,9	Módulo de Finura =				2,21	Diâmetro máximo = 4,76 mm			
Mt = (· de Mrg) Mr% = (Mrg / Mt) *100 Vr = [(Mr% (a) - Mr% (b))] Mrm = (Mr% ensaio a + Mr% ensaio b)/2 Mra = (· Mrm Massa retida média)											
Módulo finura = · % retidas acumuladas, nas peneiras da série normal/100 D. máx. = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada ≤5%											

Tabela 2 – Análise granulométrica da segunda amostra do solo laterítico.

Data: OUT/2020		GRANULOMETRIA DO SOLO LATERÍTICO - NBR NM 248:2003									
Abertura das malhas das peneiras (mm)	a) massa inicial seca = 1.000,0 g				(Vr) Massa retida Variações $\pm 4\%$	(Mrm) Massa retida Média (%)	(Mra) Massa retida Acumulada (%)	Faixas em relação às % retidas acumuladas			
	b) massa inicial seca = 1.000,0 g							Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Massa retida (g)		Massa retida (%)					Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b							
9,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,75	61,9	47,6	6,3%	4,8%	1,5%	5,6%	5,6%	0	0	5	10
2,36	53,5	52,1	5,4%	5,3%	0,1%	5,4%	10,9%	0	10	20	25
1,18	46,9	50,7	4,8%	5,1%	0,4%	5,0%	15,9%	5	20	30	50
0,6	121,8	131,3	12,4%	13,3%	0,9%	12,9%	28,7%	15	35	55	70
0,3	422,0	433,6	42,9%	44,0%	1,1%	43,5%	72,2%	50	65	85	95
0,15	229,6	214,6	23,3%	21,8%	1,6%	22,6%	94,8%	85	90	95	100
0,0745	47,9	54,7	4,9%	5,6%	0,7%	5,2%	100,0%	100	100	100	100
Mt) Total	983,5	984,5	Módulo de Finura =				2,28	Diâmetro máximo = 6,3 mm			
Mt = (∑ de Mrg) Mr% = (Mrg / Mt) *100 Vr = (Mr% ensaio a - Mr% ensaio b) Mrm = (Mr% ensaio a + Mr% ensaio b)/2 Mra = (∑ Mrm Massa retida media)											
Módulo finura = ∑ % retidas acumuladas, nas peneiras da serie normal / 100 D. máximo = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada $\leq 5\%$											

APÊNDICE B – Granulometria do RCD de Araraquara e Jundiá

A Tabela 3 apresenta a análise granulométrica da amostra de Araraquara, enquanto que a Tabela 4 apresenta a análise da amostra de Jundiá:

Tabela 3 - Análise granulométrica do RCD de Araraquara.

Data: 25/07/19		GRANULOMETRIA DO RCD ARARAQUARA - NBR NM 248:2003												
Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca=1000,16 g				(Vr) Massa retida	(Mrm) Massa retida	(Mra) Massa retida	Faixas em relação às % retidas acumuladas						
	b) massa inicial seca=1000,08 g							Variações + 4 %	Média (%)	Acumulada (%)	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Massa retida (g)		Massa retida (%)								Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b										
9,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0			
6,3	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7			
4,76	14,2	17,8	1,4%	1,8%	0,4%	1,6%	1,6%	0	0	5	10			
2,36	119,7	143,8	12,0%	14,4%	2,4%	13,2%	14,8%	0	10	20	25			
1,19	103,6	128,5	10,4%	12,9%	2,5%	11,6%	26,4%	5	20	30	50			
0,59	148,9	159,8	14,9%	16,0%	1,1%	15,5%	41,9%	15	35	55	70			
0,297	245,1	215,5	24,6%	21,6%	3,0%	23,1%	64,9%	50	65	85	95			
0,149	268,8	237,2	26,9%	23,7%	3,2%	25,3%	90,3%	85	90	95	100			
0,0745	97,8	96,9	9,8%	9,7%	0,1%	9,7%	100,0%	100	100	100	100			
Mt) □	998,1	999,4	Módulo de Finura = 2,40				Diâmetro máximo = 4,76 mm							
Mt = (∙ de Mrg) Mr% = (Mrg / Mt) *100 Vr = [(Mr% (a) - Mr% (b)] Mrm = (Mr% ensaio a + Mr% ensaio b)/2 Mra = (∙ Mrm Massa retida media)														
Módulo finura = ∙ % retidas acumuladas, nas peneiras da serie normal /100 D. máx. = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada ≤ 5%														

Tabela 4 - Análise granulométrica do RCD de Jundiá.

Data: 27/06/19		GRANULOMETRIA DO RCD DE JUNDIAÍ - NBR NM 248:2003									
Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca = 1006,94 g				Vr Massa retida Variações ± 4 %	Mrm Massa retida média (%)	Mra Massa retida acumulada (%)	Faixas em relação às % retidas acumuladas			
	b) massa inicial seca = 1003,56 g							Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Massa retida (g)		Massa retida (%)					Zona	Zona	Zona	Zona
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b				Utilizável	Ótima	Ótima	Utilizável
9,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,76	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	5	10
2,36	72,3	81,3	7,2%	8,1%	0,9%	7,7%	7,7%	0	10	20	25
1,19	232,4	247,9	23,1%	24,8%	1,7%	23,9%	31,6%	5	20	30	50
0,59	220,1	216,7	21,9%	21,6%	0,2%	21,8%	53,3%	15	35	55	70
0,297	200,7	209,4	20,0%	20,9%	1,0%	20,4%	73,8%	50	65	85	95
0,149	221,8	190,5	22,1%	19,0%	3,0%	20,5%	94,3%	85	90	95	100
0,0745	58,7	55,8	5,8%	5,6%	0,3%	5,7%	100,0%	100	100	100	100
Mt) □	1.005,9	1.001,6	Módulo de Finura =				2,61	Diâmetro máximo = 4,76 mm			
Mt = (∙ de Mrg) Mr% = (Mrg / Mt) *100 Vr = [(Mr% (a) - Mr% (b)] Mrm = (Mr% ensaio a + Mr% ensaio b)/2 Mra = (∙ Mrm Massa retida média)											
Módulo finura = ∙ % retidas acumuladas nas peneiras da série normal /100 D. máx. = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada ≤ 5%											

APÊNDICE C – Análise granulométrica do RCD de Itapetininga

A Tabela 5 apresenta a análise granulométrica da amostra cinza de Itapetininga, enquanto que a Tabela 6 apresenta a análise da amostra vermelha:

Tabela 5 - Análise granulométrica do RCD cinza de Itapetininga.

Data: 27/06/19		GRANULOMETRIA DO RCD ITAPETININGA CINZA - NBR NM 248:2003									
Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca = 1000,61 g				Vr Massa retida Variações + 4 %	(Mrm) Massa retida média (%)	(Mra) Massa retida acumulada (%)	Faixas em relação às % retidas acumuladas			
	b) massa inicial seca = 1000,20 g							Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Massa retida (g)		Massa retida (%)					Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b							
9,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,76	203,7	216,7	20,4%	21,7%	1,3%	21,0%	21,0%	0	0	5	10
2,36	166,4	166,8	16,7%	16,7%	0,0%	16,7%	37,7%	0	10	20	25
1,19	137,9	138,6	13,8%	13,9%	0,0%	13,8%	51,6%	5	20	30	50
0,59	178,7	175,1	17,9%	17,5%	0,4%	17,7%	69,3%	15	35	55	70
0,297	259,9	247,5	26,0%	24,8%	1,3%	25,4%	94,7%	50	65	85	95
0,149	49,7	53,2	5,0%	5,3%	0,3%	5,2%	99,9%	85	90	95	100
0,0745	1,7	1,2	0,2%	0,1%	0,0%	0,1%	100,0%	100	100	100	100
Mt) □	998,0	999,1	Módulo de Finura =				3,74	Diâmetro máximo = 6,3 mm			
Mt = (∙ de Mrg) Mr% = (Mrg / Mt) *100 Vr = [(Mr% (a) - Mr% (b))] Mrm = (Mr% ensaio a + Mr% ensaio b)/2 Mra = (∙ Mrm Massa retida média)											
Módulo finura = ∙ % retidas acumuladas, nas peneiras da série normal /100 D. máx. = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada ≤ 5%											

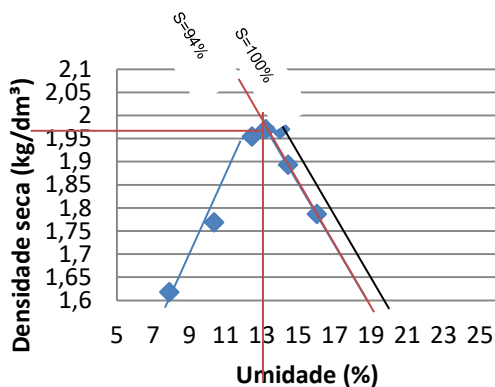
Tabela 6 - Análise granulométrica do RCD vermelho de Itapetininga.

Data: 27/06/19		GRANULOMETRIA DO RCD ITAPETININGA VERMELHO - NBR NM 248:2003									
Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca = 1000,19 g				Vr Massa retida Variações + 4 %	(Mrm) Massa retida média (%)	(Mra) Massa retida acumulada (%)	Faixas em relação às % retidas acumuladas			
	b) massa inicial seca = 1000,80 g							Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Massa retida (g)		Massa retida (%)					Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b							
9,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,76	249,1	253,8	25,0%	25,4%	0,4%	25,2%	25,2%	0	0	5	10
2,36	197,7	187,1	19,8%	18,7%	1,1%	19,3%	44,4%	0	10	20	25
1,19	161,6	153,9	16,2%	15,4%	0,8%	15,8%	60,2%	5	20	30	50
0,59	117,6	139,5	11,8%	14,0%	2,2%	12,9%	73,1%	15	35	55	70
0,297	139,6	178,7	14,0%	17,9%	3,9%	15,9%	89,0%	50	65	85	95
0,149	112,2	82,1	11,2%	8,2%	3,0%	9,7%	98,8%	85	90	95	100
0,0745	20,4	4,3	2,0%	0,4%	1,6%	1,2%	100,0%	100	100	100	100
Mt) □	998,3	999,4	Módulo de Finura =				3,91	Diâmetro máximo = 6,3 mm			
Mt = (∙ de Mrg) Mr% = (Mrg / Mt) *100 Vr = [(Mr% (a) - Mr% (b))] Mrm = (Mr% ensaio a + Mr% ensaio b)/2 Mra = (∙ Mrm Massa retida média)											
Módulo finura = ∙ % retidas acumuladas, nas peneiras da série normal /100 D. máx. = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada ≤ 5%											

APÊNDICE D – Curvas de compactação das misturas de solo com RCD

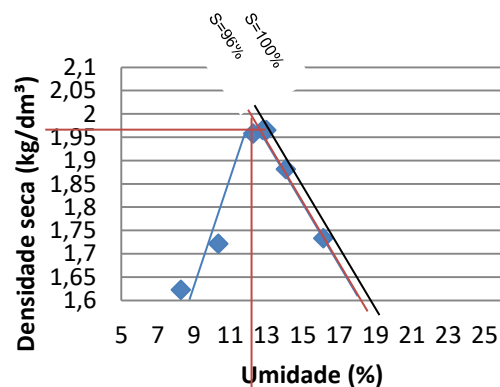
A Figura 1 apresenta os gráficos das curvas de compactação da amostra de solo com RCD de Araraquara, enquanto que a Figura 2 apresenta os gráficos da amostra de Jundiá:

Figura 1 – Gráficos de compactação de solo laterítico com (a) 25% e (b) 50% de RCD obtido na Usina de Araraquara:



Densidade seca máxima = 1,97kg/dm³
Umidade ótima = 13,2 %

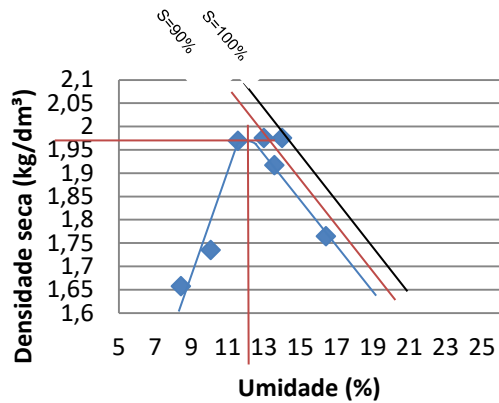
(a)



Densidade seca máxima = 1,97kg/dm³
Umidade ótima = 12,8 %

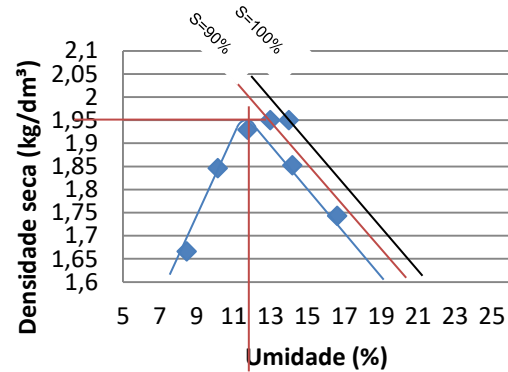
(b)

Figura 2 - Gráficos de compactação de solo laterítico com (a) 25% e (b) 50% de RCD obtido na Usina de Jundiá:



Densidade seca máxima = 1,97kg/dm³
Umidade ótima = 12,3 %

(a)

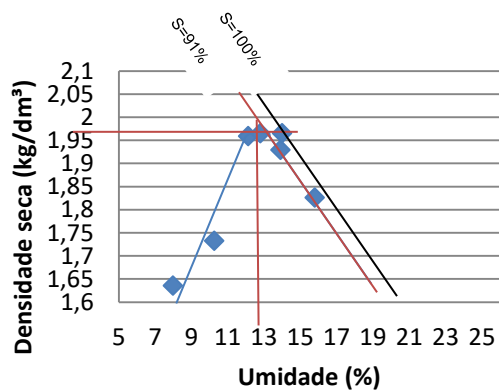


Densidade seca máxima = 1,95kg/dm³
Umidade ótima = 12 %

(b)

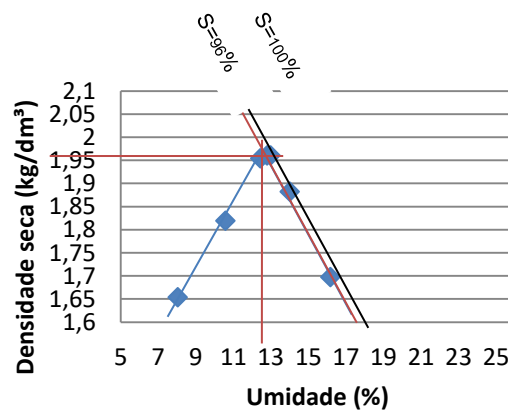
A Figura 3 apresenta os gráficos de compactação da amostra cinza de Itapetininga, enquanto que a Figura 4 apresenta os gráficos da amostra vermelha:

Figura 3 - Gráficos de compactação de solo laterítico com (a) 25% e (b) 50% de RCD cinza obtido na Usina de Itapetininga.



Densidade seca máxima = 1,97kg/dm³
Umidade ótima = 12,8 %

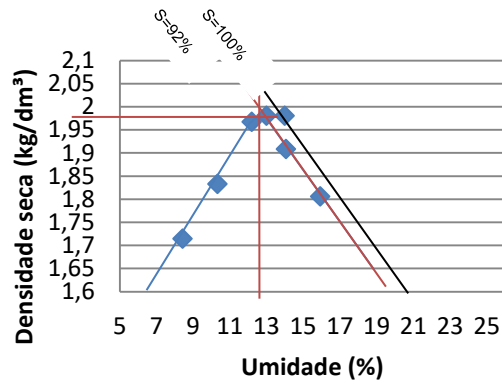
(a)



Densidade seca máxima = 1,96kg/dm³
Umidade ótima = 12,8 %

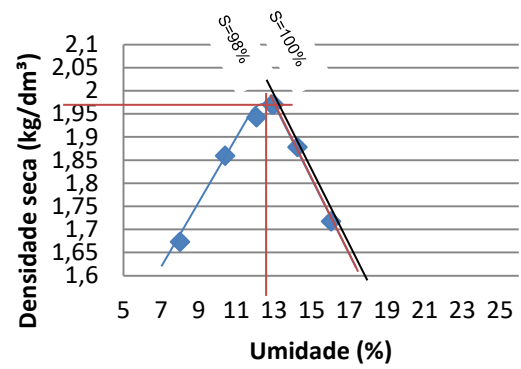
(b)

Figura 4 - Gráficos de compactação de solo laterítico com (a) 25% e (b) 50% de RCD vermelho obtido na Usina de Itapetininga.



Densidade seca máxima = 1,98kg/dm³
Umidade ótima = 12,7 %

(a)



Densidade seca máxima = 1,97kg/dm³
Umidade ótima = 12,9 %

(b)

APÊNDICE E – Valores de máxima densidade e umidade ótima das misturas de solo com RCD

A Tabela 7 apresenta os resultados de umidade e densidade seca nas cinco determinações do Ensaio Proctor Normal para o solo laterítico e para as misturas deste solo com RCD nas proporções estudadas de 25 e 50%:

Tabela 7 - Valores de densidade seca máxima e umidade ótima dos ensaios de compactação.

Usina	Material	Parâmetros	Pontos dos ensaios de compactação				
			1	2	3	4	5
	Solo	w (%)	8,5	10,0	12,5	14,0	15,8
		ρ_d (g/cm ³)	1,76	1,99	1,93	1,84	1,75
Araraquara	Solo-RCD (25%)	w (%)	7,9	10,4	12,4	14,4	16,0
		ρ_d (g/cm ³)	1,62	1,77	1,95	1,89	1,78
	Solo-RCD (50%)	w (%)	8,3	10,3	12,3	14,1	16,1
		ρ_d (g/cm ³)	1,62	1,72	1,96	1,88	1,73
Jundiaí	Solo-RCD (25%)	w (%)	8,4	10,1	11,6	13,6	16,4
		ρ_d (g/cm ³)	1,66	1,73	1,97	1,92	1,76
	Solo-RCD (50%)	w (%)	8,5	10,1	11,8	14,2	16,6
		ρ_d (g/cm ³)	1,67	1,85	1,93	1,85	1,74
Itapetininga	Solo-RCD (25%)	w (%)	8,0	10,3	12,1	13,9	15,8
		ρ_d (g/cm ³)	1,63	1,73	1,96	1,93	1,83
	Solo-RCD (50%)	w (%)	8,0	10,6	12,4	14,00	16,2
		ρ_d (g/cm ³)	1,65	1,82	1,95	1,88	1,69
	Solo-RCD verm. (25%)	w (%)	8,4	10,3	12,2	14,1	15,9
		ρ_d (g/cm ³)	1,71	1,83	1,97	1,91	1,81
Solo-RCD verm. (50%)	w (%)	8,0	10,4	12,1	14,3	16,0	
	ρ_d (g/cm ³)	1,67	1,86	1,94	1,88	1,72	

Fonte: O Autor.