

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LETICIA DE ARAÚJO TORQUATO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS DE MATERIAIS  
CERÂMICOS NAS CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO EM SÃO LUÍS - MA**

SÃO LUÍS – MA

2018

LETICIA DE ARAÚJO TORQUATO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS DE MATERIAIS  
CERÂMICOS NAS CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO EM SÃO LUÍS - MA**

Monografia apresentada à Universidade Estadual  
do Maranhão – UEMA para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana

SÃO LUÍS – MA

2018

Torquato, Letícia de Araújo.

Estudo da utilização dos agregados reciclados de materiais cerâmicos nas camadas de pavimentação em São Luís - MA / Letícia de Araújo Torquato. – São Luís, 2018.

118 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana.

1. RCD. 2. RCV. 3. Reciclagem. 4. Agregado reciclado.  
5. Pavimentação. I. Título.

CDU 625.8

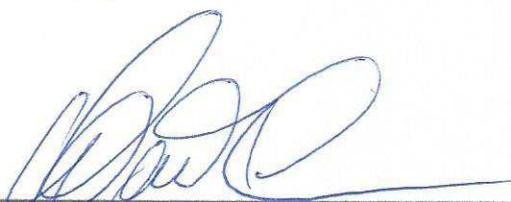
LETICIA DE ARAÚJO TORQUATO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS DE MATERIAIS  
CERÂMICOS NAS CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO EM SÃO LUÍS - MA**

Monografia apresentada à Universidade Estadual  
do Maranhão – UEMA para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Civil.

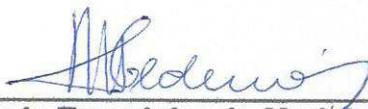
Data de aprovação: 28/06/18

BANCA EXAMINADORA



---

**Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana**  
Doutor em Engenharia de Transportes  
Universidade Estadual do Maranhão



---

**Prof.ª Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho**  
Doutora em Urbanismo  
Universidade Estadual do Maranhão



---

**Prof. Me. Marivaldo Costa Duarte**  
Universidade Estadual do Maranhão

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado, me concedendo saúde, sabedoria, paz, motivação para enfrentar as batalhas da vida e que, em virtude de sua infinita bondade, proporcionou mais esta conquista em minha vida, pois, sem Ele, isto não seria possível.

Ao meus pais, Irisvaldo Torquato e Lindemana Bomfim, que são minhas referências de vida, por todo amor, carinho, por sempre acreditarem no meu potencial, pelos ensinamentos que determinaram tudo o que sou hoje, por todo suporte dado sempre que precisei, pela luta diária para que isto aqui pudesse se tornar realidade.

Aos meus irmãos, Hugo Torquato e Beatriz Torquato, pelo apoio dado cotidianamente.

Ao meu namorado, Igor Vinicius, meu companheiro e melhor amigo, por todo carinho, amor, atenção, incentivo e ajuda no decorrer deste trabalho.

Ao professor Dr. Walter Canales, por todo apoio, paciência, confiança na minha capacidade e orientação ao longo deste trabalho, que foram essenciais para a conclusão do mesmo.

A professora Dr.<sup>a</sup> Maria Teresinha, pelo auxílio, sempre que precisava tirar dúvidas em relação aos ensaios de laboratório e pelas valiosas sugestões dadas.

Aos amigos que fiz no decorrer do curso, principalmente, Elisandra Lobato, Ádila Kalyne e Victor Carvalho, parceiros de trabalhos, por todos os momentos e estudos compartilhados e pela convivência diária, que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos de longa data, em especial, Nathália Castro, Aléxya Bewerlyn, Beatriz Ferreira, Ana Paula Braga, Fabrício Rabelo, Larissa Dias, Mayanna Campos, Mayara Campos, Rodolfo Bastos, Rafael Hundrao por sempre acreditarem em mim.

A Universidade Estadual do Maranhão, pelo fornecimento do Laboratório de Solos e Pavimentação proporcionando um espaço físico e equipamentos necessários para a realização dos ensaios.

E por fim, todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

*“A persistência é o caminho do êxito. ”*

Charles Chaplin

## RESUMO

O setor da construção civil, possui uma grande participação no desenvolvimento econômico do país, entretanto, comporta-se como um grande causador de impactos ambientais, que vão desde a extração dos recursos naturais a serem utilizados até os resíduos gerados durante as fases de construção, reforma e demolição, que decorrem, principalmente, do emprego de técnicas arcaicas, apesar do desenvolvimento tecnológico que tem ocorrido desde a Revolução Industrial. Dentre os resíduos de construção e demolição (RCD) gerados, destacam-se aqui, os resíduos cerâmicos vermelhos (RCV), que podem ser obtidos, além dos canteiros de obra, nas próprias indústrias onde são fabricados, devido a quebras durante este processo ou por não atingir às especificações que determinam seu uso. O maior obstáculo enfrentado pelos produtores destes materiais é dar-lhes uma destinação adequada, sem afetar o meio ambiente, uma vez que, grande maioria, são depositados irregularmente em áreas verdes ou nas proximidades de vias urbanas. Diante desse cenário, a reciclagem dos RCV, para sua posterior utilização, em camadas estruturais do pavimento, surge como uma solução para amenizar os problemas ambientais decorrentes de seu despejo, que tem sido realizado de maneira incorreta. O presente estudo possui, portanto, o objetivo de analisar a viabilidade de aplicação dos agregados reciclados de cerâmicas vermelhas na pavimentação. O desenvolvimento desta pesquisa, ocorreu através de ensaios laboratoriais com amostras de solo, RCV reciclado e da mistura entre estes, para verificação das características físicas e propriedades mecânicas dos mesmos. Os resultados obtidos, ao serem comparados com os requisitos exigidos na NBR 15115 (ABNT, 2004), constataram a viabilidade de utilização das misturas em camadas de base e sub-base, visto que os valores se encontravam dentro dos limites fixados.

Palavras-chave: RCD. RCV. Reciclagem. Agregado reciclado. Pavimentação.

## **ABSTRACT**

The construction sector has a large participation in the country's economic development, however, behaves as a major cause of environmental impacts, ranging from the extraction of natural resources to be used to the waste generated during the construction, reform and demolition, which stem mainly from the use of archaic techniques, despite the technological development that has occurred since the Industrial Revolution. Among the construction and demolition residues (RCD) generated, we can highlight the red ceramic residues (RCV), which can be obtained, in addition to the construction sites, in the very industries where they are manufactured, due to breaks during this process or for not meeting the specifications that determine its use. The biggest obstacle faced by producers of these materials is to give them an adequate destination, without affecting the environment, since the vast majority are deposited irregularly in green areas or in the vicinity of urban roads. In view of this scenario, the recycling of RCVs, for their later use, in the structural layers of the pavement, appears as a solution to soften the environmental problems arising from their dumping, which has been carried out incorrectly. The present study therefore has the objective of analyzing the feasibility of applying the recycled aggregates of red ceramics to the pavement. The development of this research was carried out through laboratory tests with soil samples, RCV recycled and the mixture between them, to verify the physical characteristics and mechanical properties of the same. The results obtained, when compared with the requirements of NBR 15115 (ABNT, 2004), verified the feasibility of using the mixtures in base and sub-base layers, since the values were within the limits set.

Keywords: RCD. RCV. Recycling. Recycled aggregate. Paving.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do ciclo de vida das edificações.....	28
Figura 2 - Ecopontos na cidade de São Luís – MA. ....	31
Figura 3 - Deposição inadequada dos resíduos de construção civil.....	33
Figura 4 - Processo básico de uma usina de reciclagem de RCD. ....	38
Figura 5 - Seção transversal típica de pavimentos flexíveis.....	48
Figura 6 - Estrutura de pavimentos semirrígidos.....	49
Figura 7 - Seção transversal típica de pavimentos rígidos.....	49
Figura 8 - Esquema ilustrativo de seção transversal do pavimento. ....	50
Figura 9 - Local de coleta dos resíduos.....	54
Figura 10 - Dimensões dos resíduos coletados. ....	54
Figura 11 - Fragmentação do material cerâmico.....	55
Figura 12 - Local de extração do solo. ....	56
Figura 13 - Perfil do solo coletado.....	56
Figura 14 - Secagem dos materiais.....	57
Figura 15 - Preparo dos agregados.....	58
Figura 16 - Sequência de peneiras para o ensaio de granulometria. ....	59
Figura 17 – Separação do material para realização do ensaio. ....	62
Figura 18 - Medição dos agregados com um paquímetro digital.....	62
Figura 19 - Máquina "Los Angeles". ....	63
Figura 20 - Agregado graduado para o ensaio.....	64
Figura 21 - Aparelho de Casagrande. ....	65
Figura 22 - Execução do ensaio de limite de liquidez. ....	66
Figura 23 - Classificação TRB do solo. ....	67
Figura 24 - Materiais utilizados para realização do ensaio.....	68
Figura 25 - Retirada das bolhas de ar da proveta. ....	69
Figura 26 - Agregado imerso em água durante 24 horas.....	71
Figura 27 - Limpeza superficial dos agregados com um pano absorvente.....	71
Figura 28 - Determinação do volume deslocado pelos agregados.....	72
Figura 29 - Cilindros utilizados no ensaio.....	74
Figura 30 - Homogeneização do material a ser compactado. ....	75
Figura 31 - Compactação do corpo de prova. ....	75

Figura 32 - Extensômetro acoplado ao cilindro. ....	77
Figura 33 - Corpos de prova submetidos à imersão no tanque.....	78
Figura 34 - Escoamento da água dos corpos de prova. ....	78
Figura 35 - Corpo de prova submetido à penetração. ....	79
Figura 36 - Ilustração das proporções estudadas. ....	84
Figura 37 - Agregados submetidos ao ensaio. ....	88

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Representatividade da indústria cerâmica na produção nacional, em %.	42
Gráfico 2 - Curva granulométrica do solo. ....	81
Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado reciclado. ....	83
Gráfico 4 - Curva granulométrica da mistura R85S15. ....	85
Gráfico 5 - Curva granulométrica da mistura R70S30. ....	85
Gráfico 6 - Curva granulométrica da mistura R55S45. ....	86
Gráfico 7 - Determinação do limite de liquidez. ....	89
Gráfico 8 - Curva de compactação do solo no estado natural. ....	93
Gráfico 9 - Curva de compactação da mistura R85S15. ....	94
Gráfico 10 - Curva de compactação da mistura R70S30. ....	95
Gráfico 11 - Curva de compactação da mistura R55S45. ....	96
Gráfico 12 - Variação da curva granulométrica da mistura R85S15. ....	98
Gráfico 13 - Variação da curva granulométrica da mistura R70S30. ....	98
Gráfico 14 - Variação da curva granulométrica da mistura R55S45. ....	99
Gráfico 15 – Curva de CBR para o solo no estado natural. ....	102
Gráfico 16 - Curva de CBR para a mistura R85S15. ....	103
Gráfico 17 - Curva de CBR para a mistura R70S30. ....	104
Gráfico 18 - Curva de CBR para a mistura R55S45. ....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade total de RCD coletado pelos municípios no Brasil. ....	23
Tabela 2 - Dados da indústria cerâmica no Brasil. ....	43
Tabela 3 - Especificações dos agregados reciclados para aplicação em camadas de pavimentação. ....	46
Tabela 4 - Classificação da forma dos grãos (ABNT NBR 6954/1989). ....	63
Tabela 5 - Classificação granulométrica do solo. ....	80
Tabela 6 - Resultado do peneiramento do solo. ....	81
Tabela 7 - Resultado da granulometria do agregado reciclado. ....	82
Tabela 8 - Comparação dos resultados com as especificações da norma. ....	83
Tabela 9 - Proporções estudadas para as misturas. ....	84
Tabela 10 - Comparação dos resultados das 03 misturas com a norma. ....	86
Tabela 11 - Média das dimensões dos grãos. ....	87
Tabela 12 - Resultado do ensaio de resistência à abrasão Los Angeles. ....	88
Tabela 13 - Comparação dos resultados com outras pesquisas. ....	89
Tabela 14 - Parâmetros utilizados para classificação do solo. ....	90
Tabela 15 - Resultado do equivalente de areia. ....	91
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de densidade aparente e absorção. ....	91
Tabela 17 - Comparação do resultado com valores encontrados na bibliografia. ....	92
Tabela 18 - Resultado do ensaio de compactação para o solo no estado natural. ...	92
Tabela 19 - Resultado do ensaio de compactação para a mistura R85S15. ....	93
Tabela 20 - Resultado do ensaio de compactação para a mistura R70S30. ....	94
Tabela 21 - Resultado do ensaio de compactação para a mistura R55S45. ....	95
Tabela 22 - Comparação dos resultados do ensaio de compactação das diferentes amostras. ....	96
Tabela 23 - Resultado do índice de degradação para as três misturas. ....	100
Tabela 24 - Análise das características granulométricas da mistura após a compactação. ....	101
Tabela 25 - Resultado do ensaio de CBR para o solo natural. ....	102
Tabela 26 - Resultado do ensaio de CBR para a mistura R85S15. ....	103
Tabela 27 - Resultado do ensaio de CBR para a mistura R70S30. ....	104
Tabela 28 - Resultado do ensaio de CBR para a mistura R55S45. ....	105

Tabela 29 - Comparação dos resultados do ensaio de CBR entre as amostras estudadas.....	106
Tabela 30 - Comparação dos valores encontrados para o ensaio de CBR.....	107
Tabela 31 - Resultado Índice de Forma. ....	116

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANICER	Associação Nacional da Indústria da Cerâmica
Art.	Artigo
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CBR	California Bearing Ratio
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EA	Equivalente de Areia
FIBRA	Federação das Indústrias do Distrito Federal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LSP	Laboratório de Solos e Pavimentação
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
NP	Não plástico
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development

PGRCC	Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PIB	Produto Interno Bruto
PMGRCC	Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RCD-R	Resíduos de Construção e Demolição Reciclados
RCS	Resistência à Compressão Simples
RCV	Resíduos Cerâmicos Vermelhos
RCV-R	Resíduos Cerâmicos Vermelhos Reciclados
RTCD	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SEMOSP	Secretaria Municipal de Obras e Serviços Públicos
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SINDUSCON	Sindicato da Indústria da Construção Civil
SULIP	Superintendência de Limpeza Pública
TRB	Transportation Research Board
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
URRCC	Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil
WPPPC	Working Party Pollution Prevention and Control of the Environment Policy Committee

## LISTA DE SÍMBOLOS

U\$	Dólar
°C	Graus Celsius
#	Malha da Peneira
≥	Maior ou igual
≤	Menor ou igual
%	Porcentagem
a	Absorção
An	Abrasão “Los Angeles”
cm	Centímetro
cm <sup>2</sup>	Centímetro quadrado
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
Cu	Coeficiente de Uniformidade
d <sub>ap</sub>	Densidade aparente
g	Gramas
h	Umidade
hab	Habitantes
Kg	Quilogramas
Kgf	Quilogramas força
Km	Quilômetro
kN	Quilonewtons
mm	Milímetro
N <sup>º</sup>	Número
N	Número de solicitações equivalentes às de um eixo rodoviário padrão de 80 kN
rpm	Rotações por minuto
ton	Tonelada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1 Título</b> .....	<b>19</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>19</b>
1.2.1 Objetivo Geral .....	19
1.2.2 Objetivos Específicos .....	19
<b>1.3 Justificativa</b> .....	<b>19</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)</b> .....	<b>21</b>
2.1.1 Histórico .....	21
2.1.2 Geração de RCD.....	23
2.1.3 Classificação e gerenciamento.....	25
2.1.4 Gerenciamento dos RCD em São Luís – MA.....	30
2.1.5 Composição .....	31
2.1.6 Impactos ambientais.....	32
<b>2.2 Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R)</b> .....	<b>34</b>
2.2.1 Reciclagem.....	34
2.2.2 Usinas de Reciclagem.....	37
2.2.3 Legislação .....	40
2.2.4 Aplicações dos agregados reciclados .....	40
<b>2.3 Materiais cerâmicos vermelhos</b> .....	<b>41</b>
2.3.1 Resíduos cerâmicos vermelhos (RCV).....	43
2.3.2 Utilização dos RCV-R.....	44
<b>2.4 Aplicação dos RCV-R na pavimentação</b> .....	<b>45</b>
2.4.1 Classificação dos pavimentos .....	47
2.4.2 Estrutura dos pavimentos.....	50
2.4.3 Materiais de base, sub-base e reforço do subleito .....	52

<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1 Materiais utilizados .....</b>	<b>53</b>
3.1.1 Agregados reciclados .....	53
3.1.2 Solo .....	55
<b>3.2 Preparação do material.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3 Ensaios laboratoriais .....</b>	<b>58</b>
3.3.1 Ensaios de caracterização física .....	58
3.3.2 Ensaio de compactação .....	73
3.3.3 Ensaio de caracterização mecânica .....	76
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>80</b>
<b>4.1 Ensaios de caracterização física.....</b>	<b>80</b>
4.1.1 Análise granulométrica.....	80
4.1.2 Índice de forma.....	87
4.1.3 Abrasão Los Angeles .....	87
4.1.4 Limites de Atterberg .....	89
4.1.5 Equivalente de areia.....	90
4.1.6 Absorção e densidade aparente.....	91
<b>4.2 Ensaio de compactação.....</b>	<b>92</b>
4.2.1 Resultado do ensaio no solo natural .....	92
4.2.2 Resultado do ensaio nas misturas.....	93
4.2.3 Índice de Degradação de Ruiz .....	97
<b>4.3 Ensaio de caracterização mecânica .....</b>	<b>101</b>
4.3.1 Índice de Suporte Califórnia .....	101
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>108</b>
<b>5.1 Recomendações para pesquisas futuras.....</b>	<b>109</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE A – ÍNDICE DE FORMA .....</b>	<b>116</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, a qual vem aumentando sua participação dentro do cenário da economia nacional. Segundo dados publicados pela Federação das Indústrias do Distrito Federal (FIBRA), em 2017, cerca de 6,2% do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro corresponde ao setor da construção civil. Entretanto, este ramo comporta-se, ainda, como grande gerador de impactos ambientais, quer seja pelo consumo de recursos naturais, pela modificação da paisagem ou pela geração de resíduos, os quais são denominados resíduos de construção e demolição (RCD), conforme BRASILEIRO (2013).

A Resolução nº 307, publicada em 17 de julho de 2002, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), define que os resíduos da construção civil são materiais “provenientes de construções, reforma, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos [...]”.

Devido ao expressivo volume gerado, diariamente, cerca de 123.619 toneladas nos municípios brasileiros, segundo pesquisa levantada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2016), estes resíduos vêm recebendo atenção crescente por parte dos construtores e pesquisadores ao redor do mundo todo, visto que estão se tornando um dos principais propulsores da poluição ambiental (NAGALLI, 2014).

A deposição irregular dos RCD na malha urbana, em cidades que não possuem uma política de gerenciamento dos mesmos, gera altos custos socioeconômicos, assoreamento de rios, entupimento de poços de visita, degradação de logradouros públicos, entre outros. Em contrapartida, a remoção destes materiais, também custa aos municípios uma quantidade significativa de recursos, os quais poderiam estar sendo direcionados à criação de melhor infraestrutura para a população em geral (PINTO, 1999).

A Resolução nº 307/2002 do CONAMA, foi publicada com o intuito de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais, conforme disposto no artigo 1º. A mesma, atribui aos geradores a responsabilidade sobre estes materiais, os quais devem ter como objetivo principal, a não geração, e

caso não seja atingido, considera-se a redução, reutilização, reciclagem, o tratamento e por fim, uma disposição final adequada dos rejeitos, em locais denominados aterros de resíduos da construção civil, onde são armazenados de forma a garantir sua utilização ou reciclagem futura (MOTTA, 2005).

Mediante o panorama atual, com a elevada geração de resíduos, fica claro a urgência de procedimentos que viabilizem a utilização destes em outros segmentos, comumente, da engenharia civil. Após o processo de reciclagem, realizado, na maioria das vezes, em usinas, os materiais são denominados: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil. Os RCD reciclados, de modo geral, por apresentarem, boa resistência e baixa expansão, praticamente nula, são adequados para emprego na pavimentação (LEITE, 2007), sendo este uso, bastante comum, uma vez que necessita de grandes volumes de materiais (SILVA, 2014).

A aplicação dos resíduos reciclados na pavimentação, resulta em benefícios: ambientais, pois substitui os materiais naturais, não – renováveis e reduz a exploração das jazidas minerais; sociais, uma vez que o aumento do número de vias pavimentadas promove a integração das pessoas e maior acessibilidade; econômicos, visto que estes têm sido vendidos a preços mais baixos que os materiais granulares usualmente utilizados (MOTTA, 2005).

A NBR 15115 que possui o seguinte título “*Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – procedimentos*”, foi elaborada em 2004, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, com o intuito de regulamentar os padrões exigidos para os materiais, bem como o controle tecnológico necessário para aplicação e recebimento destes, e as técnicas de execução das camadas.

Entretanto, o emprego de agregados reciclados obtidos, exclusivamente, de resíduos cerâmicos vermelhos, os quais são objetos de estudo da presente pesquisa, em camadas estruturais do pavimento, ainda é pouco difundido (DIAS, 2004). Apesar disto, os mesmos se mostraram viáveis, quando misturados com solo, para esta utilização, atendendo aos requisitos definidos em norma.

## **1.1 Título**

Estudo da utilização dos agregados reciclados de materiais cerâmicos nas camadas de pavimentação em São Luís – MA.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Analisar o desempenho das misturas de solo e agregados reciclados, obtidos de resíduos cerâmicos, para camadas de pavimentação.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Obter as características físicas e mecânicas dos agregados reciclados de materiais cerâmicos, por meio de ensaios laboratoriais;
- Analisar algumas propriedades mecânicas da mistura de solo com o agregado reciclado;
- Avaliar a viabilidade técnica de utilização dos resíduos cerâmicos reciclados para camadas de pavimentação.

## **1.3 Justificativa**

Segundo SANTOS (2007), mesmo com o avanço tecnológico na indústria da construção civil, nos últimos tempos, esse setor ainda continua executando seus serviços de forma precária e com baixo controle tecnológico. Esta condição faz com que a produção de resíduos durante a fase de construção, manutenção e demolição resulte na geração de uma elevada quantidade de resíduos no canteiro de obras, e, acarrete um grande problema ambiental a ser resolvido, devendo existir, portanto, uma destinação final, onde os agregados sejam reciclados e posteriormente, reutilizados.

Dentre os resíduos da construção civil, optou-se, neste trabalho, pelo estudo dos resíduos cerâmicos, como telhas e tijolos, por maior facilidade no seu manuseio e processo de quebra, realizado manualmente, devido a inexistência,

atualmente, de uma usina recicladora, em São Luís - MA, que efetuasse a britagem dos mesmos, para que pudessem atingir tamanhos adequados para sua utilização.

Os resíduos provenientes de materiais cerâmicos vermelhos, podem ser gerados, também, nas indústrias onde são fabricados, conhecidas como olarias, devido à quebra destes materiais durante o processo de produção, podendo chegar a um desperdício de até 15% a cada remessa de fabricação, segundo dados levantados por DIAS (2004). Diante de tal cenário, é indiscutível a necessidade de criar metodologias no sentido de viabilizar o reaproveitamento destes resíduos, que seriam descartados, e minimizar os impactos relacionados à sua disposição.

Propõe-se, assim, a aplicação dos resíduos cerâmicos reciclados em mistura com solo, nas camadas estruturais do pavimento, visto que, de acordo com pesquisas realizadas pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), em 2017, apenas 12,3% de toda a extensão rodoviária brasileira, encontra-se pavimentada, o que é pouco quando comparado a países de dimensão territorial semelhante.

A utilização de agregados reciclados da indústria cerâmica pode assim, contribuir para um aumento da quantidade de vias pavimentadas do país, devido ao menor custo deste material, e reduz, também, os impactos ambientais visto que se promove um destino adequado aos resíduos.

Almeja-se por fim, que os resultados encontrados contribuam para inserir os agregados reciclados de RCV como insumo alternativo aos materiais tradicionalmente utilizados na pavimentação.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o intuito de agregar maior conhecimento ao trabalho, foram realizadas diversas pesquisas bibliográficas, as quais mostram desde a geração dos resíduos nas obras de construção civil, o gerenciamento destes, até sua posterior reciclagem para uma determinada destinação, de acordo com a especificação adequada.

### 2.1 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

Os resíduos de construção e demolição (RCD), popularmente denominados de entulho, são materiais oriundos de novas construções, reformas, manutenções e demolições. Gerados no canteiro de obra, são as sobras do processo construtivo, que envolvem desde a tomada de decisão até sua ocupação (BLUMENSCHHEIN, 2007).

O entulho se apresenta na forma sólida, podendo ter dimensões e geometrias semelhantes à dos materiais de construção (como a areia e brita) ou formatos e dimensões irregulares: pedaços de madeira, argamassas, concretos, plásticos, metais etc. Por esta razão, estes resíduos podem ser os mais heterogêneos dentre todos os industriais (ZORDAN, 1998 apud SILVA, 2007).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na resolução n.º 307, de 05 de julho de 2002, que tem como objetivo estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos na construção civil, para uma efetiva redução dos impactos ambientais, define-os da seguinte forma:

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

#### 2.1.1 Histórico

Sabe-se que a atividade da construção civil é uma das mais antigas na história da humanidade, sendo executada, inicialmente, de forma artesanal, sem técnicas construtivas, gerando uma enorme quantidade de resíduos e consumindo de

forma excessiva os recursos naturais oriundos de fontes não-renováveis (BRASILEIRO, 2013).

A primeira aplicação significativa de entulho foi registrada após a segunda guerra mundial, por volta de 1946, na reconstrução de diversas cidades europeias, as quais tiveram seus edifícios demolidos, no qual os escombros resultantes foram britados para produção de agregados, visando atender à demanda da época (LEITE, 2007). Nestes locais de pós-guerra, a reciclagem dos escombros não possuía um viés ambiental, foi motivado pela falta de dinheiro, devido à quebra da economia e pelo elevado volume de entulho gerado.

Os impactos ecológicos não eram considerados nas sociedades primitivas, visto que a produção de resíduos era pequena e a assimilação ambiental era grande. Somente após a revolução industrial, que provocou tanto um aumento populacional nas cidades, pois as pessoas saíam do campo, abandonando os trabalhos rurais para ingressarem nas indústrias, como um desenvolvimento tecnológico no mundo, começam a surgir as primeiras preocupações com os problemas que vinham afetando o meio ambiente, como: a destruição da camada de ozônio, a poluição do ar, o consumo desenfreado de matérias primas não-renováveis, a geração de resíduos, dentre outros (CHEN e CHAMBERS, 1999 apud BRASILEIRO, 2013).

Diante do cenário que se encontrava na época, onde havia uma grande necessidade de materiais para o setor da construção e as cidades, ao mesmo tempo, estavam destruídas devido o pós-guerra, surge a ideia de reaproveitamento destes resíduos, após a adoção de alguns processos para viabilização, tornando-os agregados reciclados de RCD. O reuso trouxe como consequência, tanto uma economia na compra dos materiais como a limpeza das cidades. As primeiras obras executadas utilizando estes agregados, datam da época do Império Romano, visto que estes já empregavam telhas, tijolos, e louça cerâmica moída como pozolanas (SANTOS, 1975 apud FERREIRA, 2010).

Nas décadas de 70 e 80, o custo para deposição destes resíduos em aterros era muito elevado, atingindo valores em torno de U\$100,00 por tonelada na Europa e nos Estados Unidos. Portanto, a busca por alternativas, como reciclagem e em seguida o reaproveitamento, atraíram o setor público. (VON STEIN, 2000 apud LEITE, 2007).

O setor da construção civil é uma peça fundamental para a economia nacional, gerando inúmeros empregos e renda. Em contrapartida, mesmo com o

avanço tecnológico ocorrido desde a revolução industrial, a produção de resíduos ainda é bem elevada, seja por falta de planejamento adequado que possa otimizar a utilização dos materiais e maximizar sua reutilização, ou seja por falta de técnicas que tornem a construção menos poluente, reduzindo os impactos causados ao meio ambiente.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2016), como mostra a tabela 1, os municípios brasileiros coletaram diariamente 123.619 toneladas de RCD no ano de 2016, totalizando 45,1 milhões durante o ano, 0,08% a menos que 2015. Vale ressaltar que a quantidade produzida é bem maior, visto que os municípios, via de regra, recolhem apenas os resíduos lançados em locais públicos, pois a responsabilidade de uma destinação adequada é de seu gerador, assim o valor de rejeitos coletados por empresas privadas não está sendo contabilizado.

Tabela 1 - Quantidade total de RCD coletado pelos municípios no Brasil.

Região	2015		2016	
	RCD Coletado (ton/dia)	Índice (kg/hab/dia)	RCD Coletado (ton/dia)	Índice (kg/hab/dia)
Norte	4736	0,271	4720	0,266
Nordeste	24310	0,430	24387	0,428
Centro-oeste	13916	0,901	13813	0,882
Sudeste	64097	0,748	63981	0,741
Sul	16662	0,570	16718	0,568
<b>TOTAL BRASIL</b>	<b>123721</b>	<b>0,605</b>	<b>123619</b>	<b>0,600</b>

Fonte: ABRELPE (2016)

Com base na pesquisa acerca do alto índice de entulho gerado diariamente, fato que ocorre desde as primeiras construções da história, é indiscutível a necessidade de existir um sistema eficaz de coleta, onde os resíduos possam ser reciclados e posteriormente reutilizados seja na própria construção ou para outros fins.

### 2.1.2 Geração de RCD

A geração de RCD ocorre antes do início de qualquer obra ou serviço, visto que para a produção dos insumos utilizados na construção civil, além do consumo de

recursos naturais, também há formação de rejeitos que necessitam de gerenciamento (JOHN, 2001 apud BRASILEIRO, 2013). Como por exemplo: antes dos tijolos chegarem à obra, eles já passaram por um processo de seleção dentre outros que sofreram quebras durante o processo de fabricação nas indústrias, o que gerou resíduos nas próprias fábricas.

A indústria da construção civil apresenta-se como a maior produtora de resíduos da economia, sendo esta quantidade diretamente proporcional ao desenvolvimento das cidades. Com o aumento do processo de urbanização que vêm ocorrendo de forma exponencial e inversa à capacidade das cidades, a quantidade de RCD gerado é cada vez maior, seja pelas demolições que ocorrem devido uma renovação urbana, ou por novas edificações. Sendo assim, conforme SCHNEIDER (2003 apud SILVA, 2007), os problemas ambientais devido a esta produção, são mais intensos nas vinte e seis regiões metropolitanas do país, onde se concentram mais de 40% da população brasileira.

Os resíduos de construção e demolição podem resultar de obras viárias, demolição de edificações, construções, material de escavação, renovação de edifícios, limpeza de terrenos (SWANA, 1993 apud BRASILEIRO, 2013) e até mesmo de catástrofes naturais (tsunamis, tornados, terremotos, etc.) ou artificiais (incêndios, desabamentos, bombardeios, etc.) (LEVY E HELENE, 1997 apud BRASILEIRO, 2013).

Existem inúmeros motivos que podem causar desperdício de materiais durante o ciclo de uma obra: falha no planejamento, projeto incorreto, gerando necessidade de reparos, transporte e armazenamento inadequado de materiais, erros de execução devido à má qualificação da mão-de-obra ou técnicas arcaicas, correções de defeitos, imperfeições e descarte de componentes que tenham chegado ao final da vida útil, necessitando serem substituídos. Quanto a fase de demolição, a quantidade de resíduos gerados, seja em maior ou menor quantidade, é um produto do processo que sempre vai ocorrer, independente do procedimento ou tecnologia aplicados.

Os RCD são produzidos nos canteiros de obra, colocados em caçambas estacionárias, coletados por empresas especializadas em transportar entulhos ou por indivíduos em carroças, que os destinam para áreas pré-determinadas pelo poder público, geralmente aterros sanitários ou áreas que necessitam de aterramento. Entretanto, os custos envolvidos no processo do transporte, as longas distâncias entre

os centros urbanos e as áreas de deposição final, a não conscientização acerca dos impactos ambientais e a inexistência de uma fiscalização, aumentam a clandestinidade, degradando o meio urbano, afetando a saúde dos cidadãos e a drenagem urbana (BLUMENSCHHEIN, 2007).

Para se ter uma ideia acerca da dimensão do problema, no Reino Unido, o setor da construção produz, aproximadamente, 109 milhões de toneladas por ano, o que equivale a 66% dos 165 milhões de toneladas de agregados naturais que são consumidos anualmente, de acordo com CABRAL (2007 apud BRASILEIRO, 2013), ou seja, mais da metade do que é utilizado, está sendo desperdiçado.

Os geradores devem ter, segundo o CONAMA, como objetivo principal a não geração de resíduos, caso isto não seja possível, deve-se considerar a redução, reciclagem, reutilização, o tratamento destes, bem como sua disposição final, não podendo ser dispostos em aterros urbanos, encostas, corpos d'água, lotes vagos e áreas protegidas por Lei.

Para que ocorra uma diminuição da geração de resíduos, é necessário que todas as etapas da obra (planejamento e análise de viabilidade do empreendimento, elaboração do projeto, construção, utilização, incluindo manutenções, reformas e por fim, a demolição) estejam integradas, ou seja, não basta reduzir apenas em uma fase. Para que a redução no processo executivo exista, inicialmente já foi previsto no planejamento, por exemplo.

### 2.1.3 Classificação e gerenciamento

Para um melhor gerenciamento dos RCD, o CONAMA, no artigo 3º, da resolução n.º 307, determina as classes em que os resíduos de construção são classificados:

- I – Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
  - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
  - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
  - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- II – Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;

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

IV – Classe D – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Esta classificação auxilia no processo de separação dos resíduos, possibilitando ao gerador, seja o poder público ou empresas privadas, realizar uma destinação adequada de acordo com a classe em que se encontra o material.

O artigo 2º, ainda desta resolução do CONAMA, define o gerenciamento de resíduos, como:

É o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos.

Para BERNARDES (et al. 2008 apud SOUZA, 2017), o primeiro passo a ser tomado para que se desenvolvam ações que almejem um gerenciamento adequado do RCD, é realizar um levantamento do diagnóstico do canteiro da obra, identificando e enumerando as características dos materiais: origem, índice e motivo da geração, agente responsável por isto, bem como sua coleta e destinação final.

Os altos índices da geração de RCD levaram alguns segmentos da sociedade à procura de novas alternativas para a gestão dos resíduos e sua reciclagem tornou-se fundamental para efetivar um modelo de desenvolvimento sustentável, no qual as necessidades atuais da população sejam satisfeitas, mas sem comprometer a capacidade de sobrevivência das gerações futuras (JOHN, 2000 apud SILVA, 2007).

Programas de redução de perdas e gestão da qualidade são importantes para diminuir a geração do entulho, além de que permitem um gerenciamento adequado no canteiro, entretanto, é necessária uma ação prática: a implantação de tecnologias que visem a reciclagem e reutilização deste material, conforme CARNEIRO (et al. 2011 apud SILVA, 2007) pois não basta fazer apenas ações corretivas, mas sim preventivas, que sejam capazes de controlar antes mesmo de ser gerado.

Existe um documento técnico, que identifica o volume gerado de cada tipo de resíduo, denominado Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC), a ser elaborado pelos grandes geradores, mas devendo ser analisado e aprovado pelo Poder Municipal, responsável por estabelecer os procedimentos necessários para o manejo e destinação final ambientalmente adequada dos RCD. Sabe-se que esta deposição é feita, na maioria das vezes, de forma irregular, nos logradouros públicos, poluindo o meio ambiente e gerando custos de limpeza pública aos municípios.

Há também, o Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil (PMGRCC), a ser elaborado pelos municípios e pelo Distrito Federal, em consonância com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, responsável por determinar diretrizes técnicas e procedimentos relacionados ao exercício das responsabilidades dos pequenos geradores em conformidade com os critérios técnicos do sistema de limpeza urbana local, conforme CONAMA, resolução 307.

O PGRCC envolve diversas etapas: primeiramente os materiais são identificados e quantificados, passando então por uma triagem, feita pelo gerador na origem ou na área de destinação licenciada. Os produtores devem assegurar que estes serão confinados até o transporte, mantendo suas condições de reutilização e reciclagem. O transporte será realizado até o destino, o qual é determinado de acordo com a classe dos resíduos, segundo o artigo 10, da resolução 307 do CONAMA:

- I – Classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros;
- II – Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
- III – Classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas;
- IV – Classe D: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

O processo de gestão dos RCD, segundo o Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (SINDUSCON – SP, 2015), antecede o início da obra, pois está atrelado às decisões tomadas nas fases de concepção, planejamento e projeto. Devido às escolhas da construção a ser realizada, dos processos que serão utilizados e dos materiais especificados, inicia-se a geração e a necessidade de implantar práticas de controle dos resíduos, orientados pelo PGRCC.

Após a execução da obra, os materiais continuam sendo produzidos durante a ocupação dos edifícios, em reformas, manutenções e este ciclo, demonstrado na figura 1, é finalizado pela demolição, a qual também requer um gerenciamento, visto que seus resíduos podem ser reutilizados.

Figura 1 - Etapas do ciclo de vida das edificações.



Fonte: SINDUSCON – SP (2015)

Existem algumas dificuldades que impedem a implantação dos planos de gerenciamento dos resíduos de construção e demolição, dentre elas, destacam-se: a falta de recursos financeiros e a inexistência de um corpo técnico qualificado nos quadros profissionais dos órgãos públicos que seja capaz de diagnosticar as fontes geradoras e implementar ações, como a fiscalização (MARQUES, 2009 apud BRASILEIRO, 2013).

Para BLUMENSCHEIN (2007), os desafios do gerenciamento dos resíduos sólidos gerados nos canteiros de obras, são:

- O alto índice produzido, justificando todo o esforço para a sua redução;
- O número de participantes no processo construtivo, tornando o fluxo de informação falho;
- A quantidade de agentes do setor produtivo, público e terceiro setor que compartilham a responsabilidade de gerenciá-los. Portanto, quando a parte pública não cumpre com sua obrigação, enfraquece as ações dos outros setores;

- Os recursos raros para financiamento de projeto de pesquisa de novos materiais produzidos pela sua reciclagem;
- O desperdício do potencial de reaproveitamento dos resíduos sólidos, dentre os quais, aproximadamente 80% são reutilizáveis.

Diante do problema exposto, fica claro a necessidade de um reaproveitamento ou reciclagem destes resíduos, visto que estes são produzidos de forma descontrolada diariamente, enquanto que sua reutilização é inversamente proporcional a esse crescimento. Segundo LEITE (2007), para serem utilizados como materiais de construção, devem ser do tipo Classe A da resolução CONAMA nº 307, e passar por um processo de reciclagem que dará origem a um novo produto: o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil.

Maior parte das ferramentas utilizadas no processo de minimização do RCD podem ser implantadas em um ou mais estágios do ciclo da obra: construção, projeto, demolição e manejo dos resíduos. Uma pesquisa realizada em 1999 pelo WPPPC - Working Party Pollution Prevention and Control of the Environment Policy Committee da Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD, traz exemplos das melhores políticas vigentes em vários países, que incentivam essa diminuição, como mostra MURAKAMI (et al. 2002 apud SCHNEIDER, 2004):

- Incentivo a materiais de construção que tenham maior durabilidade, ou seja, uma maior duração do desempenho físico das partes estruturais;
- Cobrança de preços altos para a deposição de RCD em aterros: esta ideia é altamente difundida em países como Dinamarca, Itália, França, Inglaterra e República Checa pois estimula a reciclagem dos materiais;
- Taxação de matérias primas oriundas da mineração: na Inglaterra, por exemplo, são taxadas a areia, cascalho e pedras;
- Demolição controlada: em alguns países europeus, faz-se necessário a apresentação às autoridades de uma documentação, antes de demolir, relatando como os RCD serão tratados;
- Recursos financeiros para unidades de tratamento de resíduos.

#### 2.1.4 Gerenciamento dos RCD em São Luís – MA

Em 21 de agosto de 2006, foi sancionada pelo prefeito de São Luís, a Lei nº 4653, a qual elabora o sistema de gestão sustentável de resíduos da construção civil e resíduos volumosos, e o plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção civil na capital do estado do Maranhão. Nesta lei encontram-se as áreas destinadas a deposição dos materiais, visando sua triagem, reutilização, reciclagem, reservação ou destinação mais adequada, segundo legislação federal específica.

É sabido que a responsabilidade pela fiscalização da gestão dos RCD por parte dos geradores e transportadores é do poder público municipal, mas apesar das leis existentes, as quais exigem que haja um destino adequado, o que se percebe atualmente em São Luís é um descumprimento dessas obrigatoriedades, inclusive por parte das obras públicas (MENDES, 2014).

A deposição controlada dos resíduos de construção é feita, atualmente, somente no Aterro da Ribeira, através de empresas cadastradas na Superintendência de Limpeza Pública (SULIP) e da limpeza pública que recolhe os RCD depositados de forma irregular nos logradouros públicos. Segundo a SULIP, este aterro, em 2011, recebia diariamente 34% dos resíduos de classe A, que tinham como destino final a Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil de Ilha Grande (URRCC – Ilha Grande), que se localizava no Parque Vitória (MENDES, 2014).

Entretanto, a usina não se encontra mais em operação, com isso os resíduos dos geradores cadastrados na Secretaria Municipal de Obras e Serviços Públicos (SEMOSP), são levados ao Aterro da Ribeira que, quando possível, aproveitam os materiais nas suas imediações, seguindo determinações estabelecidas no Art. 2º, parágrafo 2º, da Lei Municipal 4.653/2006.

Existe em São Luís, conforme orienta no artigo 4º desta mesma Lei, uma rede de pontos de entrega para pequenos volumes de resíduos da construção civil e resíduos volumosos, denominados Ecopontos (Figura 2), os quais estão distribuídos pela cidade e recolhem materiais que não são levados na coleta convencional. Depois de recebidos, são selecionados, separados e armazenados para uma destinação adequada.

Figura 2 - Ecopontos na cidade de São Luís – MA.



Fonte: Prefeitura de São Luís (2017)

### 2.1.5 Composição

A composição dos resíduos provenientes da construção civil, encontra-se diretamente interligada com as diversas características de sua fonte geradora e do momento de coleta da amostra. Portanto, existem uma série de fatores que influem na quantidade, característica e composição deste resíduo. Dentre eles, destacam-se (CARNEIRO et al., 2011 apud SILVA, 2012):

- O nível de desenvolvimento da indústria da construção local;
  - I. Qualidade e treinamento da mão-de-obra disponível;
  - II. As técnicas tanto de construção como de demolição que foram utilizadas;
  - III. Adoção de programas de qualidade e de redução de perdas;
  - IV. Aplicação de processos de reciclagem e reutilização no canteiro;
- A variedade de materiais que são predominantes ou estão disponíveis nas proximidades;
- O desenvolvimento de obras especiais na região como: metrô, esgotamento sanitário, restauração de centros históricos, entre outros;
- O progresso econômico do local;
- A procura por novas construções.

Para uma correta caracterização física dos resíduos, é imprescindível que seja determinada sua composição. A natureza dos materiais os quais são compostos, pode influenciar nas propriedades do agregado reciclado, como: resistência mecânica,

densidade específica e índice de absorção. Dependendo do processo gerador, a granulometria do material também pode variar.

Quando derivados de obras de construção, a constituição depende do estágio da obra, visto que na fase de concretagem da estrutura, há predominância de fragmentos de concreto, aço, fôrmas de madeira, dentre outros, enquanto no acabamento, há maior quantidade de sobras de argamassas, tijolos, telhas, cerâmicas (POON et al., 2001 apud CABRAL, 2007). Dessa forma, percebe-se que estes materiais possuem uma composição bem heterogênea e que decorrem de uma gama de condições.

PINTO (1999 apud SOUSA, 2015) concluiu, através de uma pesquisa realizada em diversas obras brasileiras, que há uma predominância de resíduos decorrentes de construções em relação aos de demolições, devido ao crescente desenvolvimento que vêm ocorrendo nas áreas urbanas. Entretanto, nos países desenvolvidos, ocorre o contrário, sendo frequentes os materiais provenientes de demolições, pois as atividades de renovação de edificações, infraestrutura e espaços urbanos acontecem com mais frequência.

#### 2.1.6 Impactos ambientais

O CONAMA, na resolução n.º 01, de 23 de janeiro de 1986, que dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental, o define como:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:  
I – a saúde, a segurança e o bem-estar da população;  
II – as atividades sociais e econômicas;  
III – a biota;  
IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;  
V – a qualidade dos recursos ambientais.

Os impactos ambientais oriundos da construção civil existem em diversas fases, primeiramente na extração de recursos naturais, sendo a mineração responsável por vários problemas causados ao meio ambiente: erosão do solo, poluição do ar e da água. Para SANTOS (2015 apud MORAND 2016), a retirada de matéria prima pode resultar, além disso, em extinção e escassez de fontes e jazidas, alterações na fauna e flora dos locais vizinhos ao de exploração, rapidez no processo

erosivo, modificações de cursos d'água, reconfiguração das superfícies topográficas, aumento de ruídos e propagação de vibrações no solo.

A etapa de produção dos insumos a serem utilizados em obra, como a indústria de materiais de construção também causa impactos negativos, por exemplo, a fábrica de cimento é responsável pela emissão de, aproximadamente, 6% do total de gás carbônico produzido no país (JOHN, 2000 apud SCHNEIDER, 2003).

Após a geração dos resíduos, sua deposição de forma inadequada em locais públicos, como mostra a figura 3, leva a diversos problemas: primeiramente, ocorre uma saturação de espaços disponíveis na cidade para o descarte destes materiais, fazendo com que este lugar seja cada vez mais distante do centro, aumentando, portanto, os custos de transporte. Segundamente, este rejeito pode ter um alto potencial reciclador que está sendo desperdiçado devido a sua destinação incorreta, no qual seu reaproveitamento seria uma alternativa econômica vantajosa, por introduzir no mercado, segundo MORAND (2016), um material com grande potencialidade de uso para diferentes fins. E por fim, o maior problema são os impactos causados ao meio ambiente e conseqüentemente aos seres humanos: o comprometimento da paisagem, devido a poluição visual, obstrução dos sistemas de drenagem, focos e proliferação de vetores causadores de doenças, assoreamento dos cursos d'água, dentre outros.

Figura 3 - Deposição inadequada dos resíduos de construção civil.



Fonte: Autora (2018)

## 2.2 Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R)

Os resíduos reciclados de construção e demolição são obtidos a partir do processo de reciclagem dos resíduos sólidos provenientes da construção civil. A Lei 4653/2006, define-os no artigo 3º, como:

É o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos da Construção Civil de natureza mineral (concreto, argamassas, produtos cerâmicos e outros), designados como Classe A, que apresenta características técnicas adequadas para aplicação em obras de edificação ou infraestrutura conforme especificações da norma brasileira NBR 15.114/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) têm como objetivo principal substituir parcialmente ou totalmente o material natural. De acordo com a UTS (1999 apud MOTTA, 2005) as diferenças físicas entre eles são basicamente: a forma dos grãos, que são mais irregulares nos reciclados; a textura superficial; a densidade, sendo menor nos reciclados, devido sua alta porosidade e a taxa de absorção, que também é elevada.

Vale ressaltar, que a qualidade destes materiais depende diretamente da qualidade dos que passaram pelo processo de reciclagem (HENDRIKS, 2000 apud BLUMENSCHNEIN, 2007). Portanto, a fase de seleção é imprescindível, visto que quanto mais rígida for, melhor será o agregado resultante. Os RCD não devem ser misturados a resíduos orgânicos, gesso ou outras substâncias que influenciem nas suas propriedades e comprometam seu desempenho.

### 2.2.1 Reciclagem

Os impactos ambientais e urbanos decorrentes das altas taxas de geração dos RCD são tão relevantes que a melhor alternativa é submetê-los a operações que possam transformá-los em matéria-prima ou produto, um processo denominado beneficiamento, o qual se dar de duas maneiras: reutilização e reciclagem. Na reutilização os resíduos são reaplicados, sem que sejam submetidos a um processo de transformação, enquanto na reciclagem, eles passam por modificação (FERNANDES, 2018).

A reciclagem possui como base o princípio da sustentabilidade, o qual requer que as necessidades atuais da população sejam satisfeitas, de tal modo que não comprometa a capacidade das gerações futuras de também satisfazer suas próprias necessidades, o que implica, conforme descrito em CASTRO (2012), na redução do uso de recursos naturais e na manutenção da matéria-prima no processo de produção o maior tempo possível.

A prática de reciclar já era realizada no império romano, com a utilização de pedras ou tijolos britados, cacos de telha, em uma mistura com cal, água e areia, para realização de suas construções (LIMA, 1999 apud SANTOS, 2007). Entretanto, sua aplicação de forma sistemática ocorreu apenas após a Segunda Guerra Mundial, pois com as catástrofes, houve a necessidade de reconstrução das cidades, entretanto a quantidade de material era limitada. No final de 1956, segundo LEVY (2002 apud SANTOS 2007), aproximadamente 85% do entulho encontrado no período pós-guerra havia sido removido e, por volta de 1960, todo ele foi reciclado na Alemanha.

A partir de então, o interesse pela reciclagem dos resíduos de construção e demolição atingiu países da Europa, como: Holanda, Dinamarca, Bélgica e regiões da França, os quais possuem baixa oferta de materiais granulares (ITEC, 1995 apud PINTO, 1999). O Japão também possui política de reaproveitamento, devido à carência de espaço físico para alojamento dos resíduos e da sua densidade demográfica, sendo reutilizados, aproximadamente, 2/3 do total produzido (KAWANO, 2000 apud CABRAL, 2007).

O setor da construção civil vivencia diariamente uma ambiguidade: ao mesmo tempo que requer altas quantidades de matéria-prima, a geração de resíduos vem crescendo de forma desproporcional à sua reciclagem que, ainda hoje, é pequena quando comparada a totalidade de material produzido. Então, por que não intensificar o processo de reciclagem, visto que este ramo seria fortemente beneficiado?

Este processo, no Brasil, comparado a países desenvolvidos, ainda é bem atrasado, devido a diversos fatores, dentre eles destaca-se que a questão ambiental no país ainda é vista como um problema, exclusivamente, de preservação da natureza, focado apenas nas florestas e animais em extinção, deposição de materiais em aterros controlados e controle da poluição do ar. Outras barreiras que impedem o

aumento da prática de reciclar, são, segundo o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI, 2005):

- Dificuldade de introdução de novas tecnologias na construção civil;
- Falsa concepção que um material produzido com a utilização de resíduos reciclados possui qualidade inferior a outro confeccionado com matérias primas virgens;
- Sensação de risco de baixo desempenho com relação ao uso de outras tecnologias;
- Falta de cultura para segregação dos materiais.

A viabilização da reciclagem dos RCD em um meio urbano depende de uma gama de fatores, dentre eles, o que mais se destaca, é sua vantagem econômica quando comparado ao preço dos agregados naturais (JOHN, 2000 apud SILVA 2007). Para que ocorra essa substituição, é necessário que este insumo alternativo atenda aos desempenhos que sua destinação final exigirá e tenha um menor custo, visto que se estiverem no mesmo patamar de preço, prevalecerá o material de melhor qualidade. Portanto, os agregados reciclados serão mais competitivos em regiões onde houver escassez de materiais naturais e áreas para aterro (TAM e TAM, 2006 apud CABRAL, 2007).

A porcentagem de construtoras que tem essa preocupação com o meio ambiente, de desenvolver mecanismos visando a reciclagem dos materiais de construção, ou a redução dos desperdícios, ainda é baixa, uma vez que o foco principal é construir mais em menos tempo, independente da geração de materiais. Entretanto, um correto gerenciamento destes resíduos gerados pode aumentar a produtividade na obra, enquanto que a deposição requer tempo e recurso (BEGUN et al., 2006 apud CABRAL, 2007).

Diversas são as vantagens ambientais, sociais e econômicas do processo de reciclagem dos resíduos de construção, como retrata NETO (2005 apud FERNANDES, 2018):

- Economia na aquisição de matéria-prima;
- Redução da poluição decorrente do entulho;
- Preservação das reservas minerais não-renováveis;
- Preservação e diminuição de áreas de aterro de inertes;

- Atenuação do consumo de energia e geração de gás carbônico na atmosfera;
- Geração de empregos.

Um dos principais desafios do processo de reciclagem, é a necessidade de gerar produtos homogêneos e características que atendam às especificações do serviço, a partir de resíduos heterogêneos e de formação variada (SILVA, 2007).

### 2.2.2 Usinas de Reciclagem

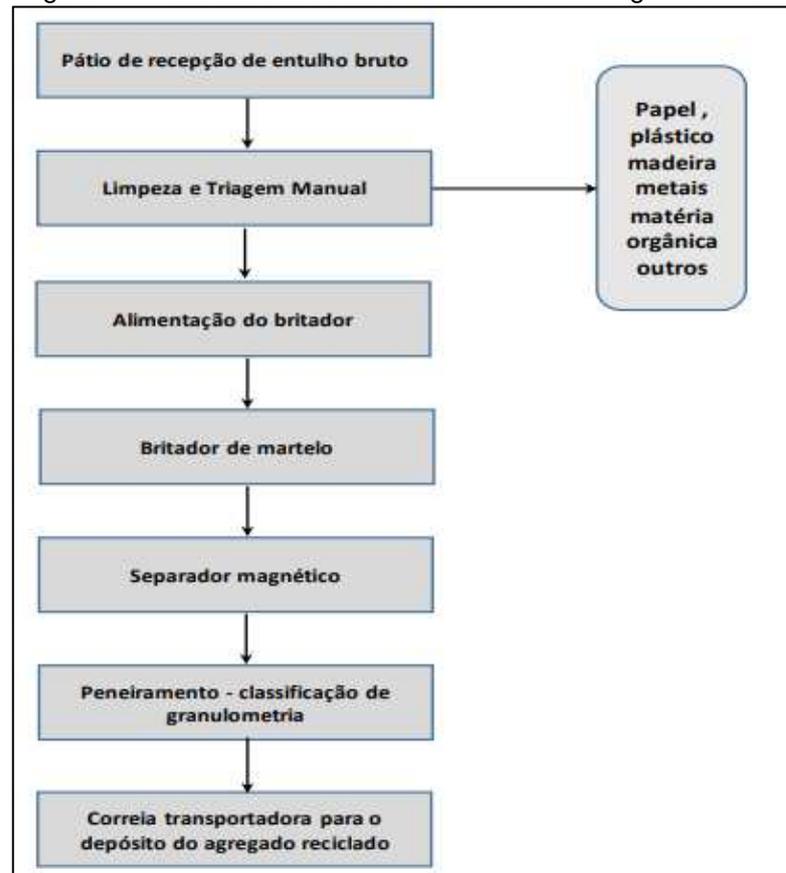
As usinas recicladoras são responsáveis por transformar os RCD em agregados reciclados, através, basicamente, da diminuição do tamanho dos grãos de resíduos pré-selecionados. Apresentam uma planta semelhante a uma usina de britagem convencional, utilizando os mesmos equipamentos empregados na produção de agregados naturais, entretanto, diferenciam-se devido a existência de etapas para limpeza e seleção (BODI et al., 1995 apud LEITE, 2013).

Os resíduos são separados antes da britagem, originando produtos de composições diferentes (ÂNGULO et al., 2003 apud LEITE, 2013):

- Agregado reciclado de concreto: também conhecido por cinza ou branco. São formados principalmente por materiais cimentícios, como concretos e argamassas;
- Agregado reciclado vermelho: predominam os materiais cerâmicos, como tijolos, telhas e pisos cerâmicos;
- Agregado reciclado misto: quando menos de 90% dos fragmentos são à base de cimento Portland.

São utilizados equipamentos como: pá-carregadeira, alimentador vibrador, britador, podendo ser de mandíbula ou de impacto, eletroímã para separação das ferragens, peneiras, mecanismos transportadores e sistemas para eliminação de contaminantes, seguindo o ciclo mostrado na figura 4. Deve-se dispor de uma área grande, onde possam ser estocados os entulhos recebidos e os agregados reciclados obtidos (SILVA, 2007).

Figura 4 - Processo básico de uma usina de reciclagem de RCD.



Fonte: LEITE (2007)

No Brasil, a primeira usina de reciclagem foi instalada em Itatinga, na zona sul do estado de São Paulo, no ano de 1991, com o intuito de produzir agregados reciclados para sub-base de pavimentos (CARNEIRO et al., 2001 apud LEITE, 2007). Devido a falhas no planejamento, esta usina, bem como a de Londrina, no Paraná, não surtiram o efeito esperado, tornando-se ociosas em vários momentos.

A partir de 2002, com a publicação da resolução 307 do CONAMA, ocorreu um aumento na quantidade de usinas instaladas no país, pois desde então, os geradores começaram a ser responsáveis pelos resíduos produzidos. Com isso, tornou-se viável a criação de empresas que fossem especializadas na reciclagem destes, chegando a surgir 9 usinas por ano, as quais tinham um crescimento máximo de 3, anualmente.

Segundo uma pesquisa setorial da Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) realizada entre junho de 2014 e setembro de 2015, o número de usinas existentes no país é de pelo menos 310 unidades, encontrando-se um maior percentual no estado de São

Paulo, seja pela maior atividade de construção civil que gera maior volume de RCD, ou por motivos como: agregados naturais mais caros e uma fiscalização mais intensa na destinação final dos resíduos.

Na capital de Belo Horizonte, os materiais que chegam nas estações de reciclagem passam por uma avaliação, na qual são verificados a composição e o grau de contaminação e, se aceitos, são dirigidos para a fase de seleção. A parcela que não foi aceita é encaminhada aos aterros sanitários. A parte selecionada é agrupada, pela Secretaria de Limpeza Urbana, em duas classes distintas, conforme OLIVEIRA (2007):

- Classe 1: Resíduo composto de materiais à base de concreto e argamassa, sem a presença de impurezas como solo, metais, papel, gesso, vidro, dentre outros. São destinados à produção de argamassas e concreto sem função estrutural;
- Classe 2: Resíduo de composição à base de produtos cerâmicos, em que se admite a presença de pequenas porções de solo, concreto e argamassa, sem a presença de impurezas. São geralmente utilizados nas camadas de pavimentação e camadas drenantes.

Para que as operações de reciclagem de RCD nas usinas obtenham êxito, existem algumas condições, segundo KARTAM (et al., 2004 apud CABRAL, 2007):

- Suprimento abundante e constante de material reciclável;
- Cobrança de taxas altas para a deposição desse material em aterros;
- Separação adequada dos componentes recicláveis dos não-recicláveis;
- Facilidade no acesso para o transporte dos agregados reciclados e RCD;
- Disposição de uma área grande para instalação da usina e se possível, próxima aos aterros;
- Altos custos para aquisição de agregados naturais;
- Existência de um mercado que incorpore os agregados reciclados.

### 2.2.3 Legislação

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), publicou em 2004, cinco normas que abrangem os resíduos sólidos da construção civil, resíduos volumosos e resíduos inertes, incluindo as diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas de triagem, reciclagem e aterros, assim como estabelecem os requisitos a serem atendidos pelos agregados reciclados de acordo com sua aplicação, seja em obras de pavimentação ou em preparo de concreto sem função estrutural. Estas normas são:

- NBR 15112 – Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15113 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

### 2.2.4 Aplicações dos agregados reciclados

Para a escolha de um possível emprego do resíduo reciclado, levando em consideração os aspectos tecnológicos, é importante que sejam conhecidas a sua composição e sua caracterização, tanto física, como química e mecânica, identificando as propriedades que limitam seu uso, visto que podem interferir na qualidade e durabilidade das aplicações (DIAS, 2007).

A utilização dos RCD-R pode ser feita reinserindo-o no próprio canteiro de obra, em atividades como: assentamento de blocos cerâmicos, batentes, contra-marcos; preenchimento de degraus de escada e de rasgos na parede devido a tubulações hidráulicas e elétricas; chumbamento de caixas elétricas, além de

contrapisos internos de unidades habitacionais e casas de máquinas ou áreas comuns de tráfego leve (MARQUES NETO, 2005 apud SILVA, 2007).

Nos países desenvolvidos, o uso desses agregados vem sendo consolidado como material de enchimento para a preparação de terrenos, sub-base de vias e estradas, e como agregado na produção de argamassa e concreto, porém esta última ocorre em menor volume, pois de acordo com KHALAF e DEVENNY (2004 apud CABRAL, 2007) a grande variabilidade na composição dos reciclados e a possível contaminação por agentes prejudiciais incorporados ao novo concreto, poderão comprometer seu desempenho mecânico e até mesmo, seu tempo de vida útil.

Podem ser aproveitados em diversos serviços de engenharia, como camadas drenantes, devido à presença de pouca quantidade de finos, lastro para assentamento de tubos ou guias, envelopamento de galerias e até mesmo, para estabilização de solos expansíveis ou com baixa capacidade de suporte, devido à expansão nula dos resíduos reciclados (BRITO FILHO, 1999 apud MOTTA, 2005).

A aplicação dos RCD-R como base na pavimentação é uma alternativa tecnologicamente consolidada. Entretanto dados nacionais demonstram que este ramo não consegue consumir integralmente a quantidade de resíduos produzida (PINTO, 1999 apud SANTOS, 2007). Além deste setor, o bom desempenho deste material em argamassas e o resultado positivo da presença significativa de produtos cerâmicos em sua composição, são comprovados por LEVY (1997).

É de grande valia que os estudos acerca das aplicações destes resíduos, quando reciclados, estejam focados na sua diversificação, ou seja, numa gama maior de possibilidades de utilização, bem como na sua qualidade e garantia de segurança, visto que constituem um importante apoio à diminuição dos graves problemas gerados pela deposição inadequada dos RCD nos logradouros públicos.

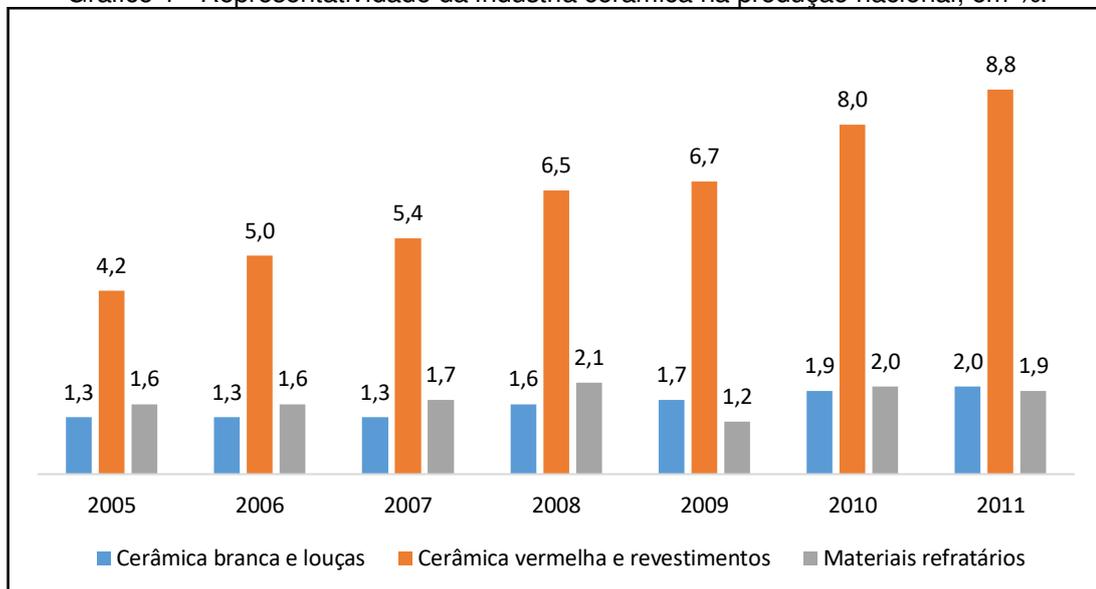
### **2.3 Materiais cerâmicos vermelhos**

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM (2016), a cerâmica vermelha envolve todos os materiais empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, lajes, elementos vazados, tubos cerâmicos e argilas expandidas), assim como utensílios de uso doméstico, como filtros e painéis de barro. Possui a

nomenclatura “vermelha” devido à presença de compostos ferrosos que lhe confere uma coloração avermelhada.

Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, numa pesquisa realizada em 2011, a produção de material cerâmico vermelho obteve um crescimento, quase constante, em relação ao total nacional, como retrata o gráfico 1, devido ao aumento da construção civil no país. Com isso, sabe-se que a geração destes também tende a ser maior. Dados coletados pelo IBGE (2008) revelam que o setor cerâmico equivale a 1,0% do PIB brasileiro, sendo a cerâmica vermelha responsável por 40% deste valor.

Gráfico 1 - Representatividade da indústria cerâmica na produção nacional, em %.



Fonte: Adaptado de IBGE – Pesquisa Anual Industrial (2011)

Os produtos de cerâmica vermelha envolvem os materiais para alvenaria (tijolos e blocos), tanto de vedação como estrutural, para coberturas (telhas) e canalizações (tubos ou manilhas). Existem também as lajotas, usadas em lajes nervuradas e algumas cerâmicas para revestimento de piso e parede (BAUER, 2008).

A indústria cerâmica representa 4,8% da indústria da construção civil e 90% das coberturas e alvenarias utilizadas no país, segundo o IBGE (2008). A produção destas, em média, foi publicada pela Associação Nacional da Indústria da Cerâmica (ANICER), no ano de 2018, como demonstrado na tabela 2. Apesar desta expressiva fabricação, a tecnologia ainda é antiga, a qual vem sendo desenvolvida há mais de 50 anos (ZANDONADI, 1996 apud REDIVO, 2011).

Tabela 2 - Dados da indústria cerâmica no Brasil.

<b>Produto cerâmico</b>	<b>Total de empresas</b>	<b>Produção de peças mensal</b>	<b>Consumo argila (ton/mês)</b>
Tijolos	4346	4.000.000.000	7.800.000
Telhas	2547	1.300.000.000	2.500.000
Tubos	10	325,5 km	-

Fonte: ANICER (2018)

### 2.3.1 Resíduos cerâmicos vermelhos (RCV)

Dentre os resíduos que são gerados diariamente pelo setor da construção civil, destacam-se aqui os resíduos cerâmicos vermelhos, produzidos principalmente nas fases de assentamento e execução das instalações hidráulicas, sanitárias e elétricas, na qual, na maioria dos casos, decorre de falhas no planejamento ou até mesmo, devido a utilização de técnicas precárias, com baixo nível tecnológico no processo construtivo, sendo, por exemplo, necessário quebrar a alvenaria, para a passagem de tubos e eletrodutos. Estes produtos são obtidos não apenas durante o ciclo das obras, mas também no processo de confecção do material, nas olarias.

Devido à grande quantidade de indústrias deste setor e sua produção cada vez maior, conforme retrata a tabela 2, a geração de resíduos também tem aumentado. Denominam-se de resíduos, assim como os pedaços pequenos decorrentes da quebra destes materiais que ocorre no transporte, no manuseio e na colocação em locais inadequados, as peças inteiras de tijolos e telhas, que, conforme REDIVO (2011), após a etapa de queima no forno, não atingiram às especificações técnicas exigidas para sua comercialização, sendo assim descartados. Durante o ciclo de produção, COSTA et al. (2003 apud BALDO, 2004), afirma que a perda média gira em torno de 3 a 5%, podendo gerar, anualmente, 1,6 a 2,7 milhões de toneladas de resíduos.

Os materiais cerâmicos vermelhos possuem porosidade interna e afinidade com água, o que resulta num alto índice de absorção quando comparados com as rochas naturais que dão origem, por exemplo, aos agregados britados. Podem ter, também, algum potencial pozolânico, característica que em determinadas situações, serve para melhorar o desempenho (DIAS, 2011).

A NBR 12653 – Materiais Pozolânicos (ABNT, 1992), que determina as condições exigidas para estes materiais quando utilizados como aditivos, onde são desejadas ações aglomerantes, define-os como:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

BARONIO E BINDA (1996 apud SILVA, 2014) verificaram a ocorrência de reatividade pozolânica em RCV quando são triturados, sendo utilizados, portanto, para substituir parcialmente os teores de cimento e cal em concretos e argamassas, respectivamente, devido sua capacidade de formar compostos cimentantes.

### 2.3.2 Utilização dos RCV-R

A aplicação dos resíduos de cerâmica vermelha, no seu estado primário, é quase impraticável, pois estes são encontrados, em sua grande maioria, na forma de blocos e não em dimensões pequenas, que permitiriam sua aplicação de forma direta (DIAS, 2004). Surge-se então a necessidade da reciclagem, seja por meio de britadores, ou até mesmo de rolos compactadores, transformando-os em resíduos de cerâmica vermelha reciclados.

Do ponto de vista tecnológico, os RCV-R podem ser utilizados em diversos segmentos, como agregado para concreto, argamassa, material para as camadas que a pavimentação apresenta, cobertura para quadra de tênis e, podem ser reinseridos, também, no seu próprio processo de produção (DIAS, 2004). Entretanto, para que sejam destinados corretamente, faz-se necessário sua adequada caracterização, verificando as especificações exigidas de acordo com a aplicação desejada.

MARTINS et al. (2004) analisou a substituição tanto do agregado graúdo (brita), como miúdo (areia) por agregados de tamanhos parecidos, provenientes de rejeitos cerâmicos, na produção de concreto, analisando a consequência nas suas propriedades mecânicas. O concreto de cimento Portland avaliado apresentou um consumo de 150 a 250 kg de cimento a cada metro cúbico, tornando-se inviável para obras de grande porte. Concluiu-se, portanto, que o concreto resultante é adequado para fins não estruturais, como construção de calçadas, muros, guias, dentre outros,

apresentando como vantagem a não utilização de areia e brita e reduzindo os impactos ambientais provenientes da extração destas.

BASTOS e CERRI (2004), por sua vez, analisaram a influência da substituição do agregado natural por reciclados, os quais são obtidos a partir da moagem de resíduos cerâmicos, em argamassas de revestimento e assentamento. Mostraram-se viáveis, quando utilizados na substituição de 25% do agregado natural, apresentando como resultado um aumento da resistência à compressão axial, em torno de 108,49% em relação à argamassa de referência. Quando os agregados naturais foram totalmente substituídos, observou-se uma melhora de 133,33% na resistência à compressão diametral.

Verifica-se que existem uma gama de possibilidades de aplicação dos RCV, entretanto, neste trabalho, optou-se por estudar seu emprego em camadas de pavimentação.

## **2.4 Aplicação dos RCV-R na pavimentação**

A utilização de RCD-R em pavimentação é bastante difundida no país, entretanto, a opção de utilizar somente resíduos cerâmicos vermelhos, provenientes, principalmente, de tijolos e telhas, em camadas estruturais de pavimentos ainda é pouco explorada (REDIVO, 2011). Entretanto, é uma alternativa extremamente interessante, visto que a geração destes tem aumentado constantemente e o consumo dos agregados naturais, não-renováveis, seja durante a construção ou manutenção das rodovias, é altamente elevado.

No Brasil, a utilização de agregados reciclados em camadas de pavimentação pela primeira vez, foi em 1984, em uma via urbana na zona oeste do município de São Paulo (SP), sendo a aplicação resultante de uma parceria entre o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT e a Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) (BODI et al., 1995 apud SILVA, 2014).

Tem-se como objeto de estudo a aplicação dos resíduos cerâmicos vermelhos reciclados, misturados com solo, em diferentes proporções, para que seja encontrada a porcentagem ideal, nas obras de pavimentação, baseando-se na NBR 15115 (ABNT, 2004), a qual estabelece os requisitos a serem atendidos, descritos na tabela 3, pelos materiais que serão utilizados nas camadas de reforço do subleito, sub-base, base de pavimentos bem como critérios para execução destas, sendo o

ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR) o principal critério de avaliação para emprego dos agregados.

Tabela 3 - Especificações dos agregados reciclados para aplicação em camadas de pavimentação.

<b>Requisitos</b>	<b>Especificação ABNT</b>
Coeficiente de uniformidade (Cu)	≥ 10
Porcentagem passante na peneira N° 40 (0,42 mm)	10% a 40%
Reforço do Subleito:	
CBR	≥ 12%
Expansão	≤ 1,0%
Sub-base:	
CBR	≥ 20%
Expansão	≤ 1,0%
Base:	
CBR	≥ 60%
Expansão	≤ 0,5%
Porcentagem máxima de grãos lamelares	30%
Dimensão característica máxima dos grãos	63,5 mm

Fonte: ABNT, NBR 15115:2004

Vale ressaltar que mesmo se o agregado reciclado misturado com o solo atingir as especificações necessárias para camada de base, seu uso restringe-se somente a vias de tráfego com  $N \leq 10^6$  repetições do eixo-padrão de 80 kN no período de projeto. Caso estas exigências quanto ao índice de suporte e expansão, não sejam atendidas pelos materiais, os mesmos podem ser estabilizados granulometricamente, ou quimicamente, por meio da adição de cal hidratada e/ou cimento, devendo, este último, apresentar resistência à compressão simples de, no mínimo, 2,1 MPa, após 7 dias de cura, conforme recomendado na NBR 15115 (ABNT, 2004), moldados na energia de compactação indicada de acordo com a camada: para base e sub-base utiliza-se energia de compactação intermediária, enquanto no reforço de subleito, energia de compactação normal.

A proposta de utilização, no presente trabalho, da mistura entre solos e RCV, traz uma alternativa duplamente vantajosa, visto que os solos, tradicionalmente utilizados em rodovias, são abundantes, de baixo custo e os agregados podem ser encontrados e reciclados facilmente. REDIVO (2011), estudou a viabilidade desta mistura na construção de camadas de pavimentos com baixo volume de tráfegos, constatando que o CBR aumentou à medida que crescia a porcentagem de material cerâmico em sua composição e reduziu o valor da expansão.

A criação de normas e especificações técnicas auxilia na difusão e consolidação do uso dos agregados reciclados em camadas de pavimentos. Com base na bibliografia encontrada, verifica-se que os estudos acerca desta utilização vêm sendo realizados ao redor de todo o mundo, com o intuito de estabelecer orientações para a reciclagem dos resíduos, diminuindo, assim, os impactos gerados por estes. Com base nos resultados, verifica-se um grande potencial para emprego em pavimentação, gerando uma gama de benefícios ambientais, econômicos e sociais (LEITE, 2007).

#### 2.4.1 Classificação dos pavimentos

Segundo BERNUCCI et al. (2006), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Estas camadas são constituídas de materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, devendo atender às solicitações de maneira durável e com menor custo possível (BALBO, 2007, p.35).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) classifica o pavimento em três tipos: flexíveis, os quais são alvo do presente estudo, semirrígidos e rígidos.

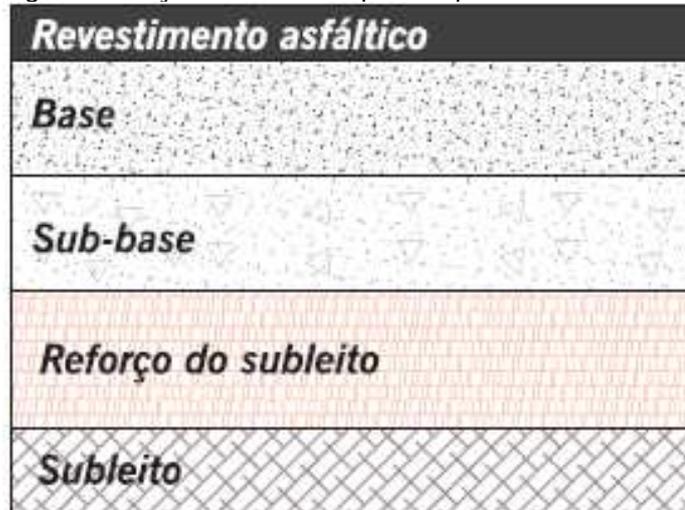
##### 2.4.1.1 Flexíveis

Para BALBO (1997) o pavimento flexível é aquele em que a absorção de esforços se dá de forma dividida entre as camadas existentes, encontrando-se as tensões verticais nas camadas inferiores em regiões próximas da área de aplicação

da carga. Isto acontece, devido ao fato de que a rigidez do revestimento asfáltico não é tão elevada quando comparada as demais camadas granulares, diferentemente do revestimento de concreto de cimento Portland.

São constituídos de uma camada superficial asfáltica, apoiada em camadas de base, sub-base e reforço do subleito, compostas por materiais granulares, solos ou a mistura destes desde que não envolva adição de agentes cimentantes (BERNUCCI et al., 2006). A capacidade de suporte do pavimento é devido a esta distribuição de cargas, através de camadas superpostas, na qual as que possuem uma qualidade melhor, encontram-se próximas da carga aplicada, ocasionando um campo de tensões logo abaixo deste ponto de aplicação.

Figura 5 - Seção transversal típica de pavimentos flexíveis.

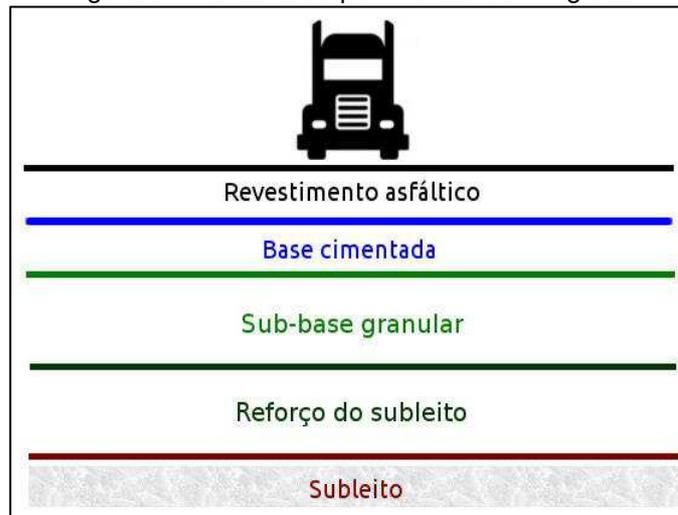


Fonte: BERNUCCI et al. (2006)

#### 2.4.1.2 Semirrígidos

São pavimentos que tem como principal característica a existência de uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias (DNIT, 2006), com o intuito de alcançar uma camada com rigidez suficiente para resistir às cargas de projeto (PAIXÃO, 2017). Assim como os flexíveis, também possuem revestimento asfáltico.

Figura 6 - Estrutura de pavimentos semirrígidos.

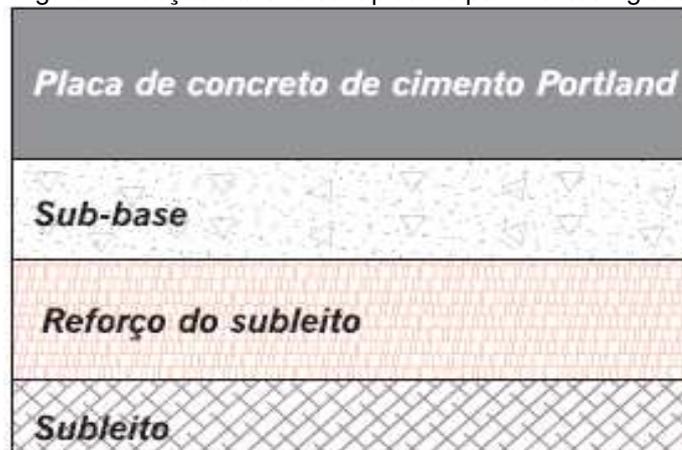


Fonte: E-Civil (2018)

### 2.4.1.3 Rígidos

Este tipo de pavimento, ilustrado na figura 7, é composto por uma camada superficial de concreto de cimento Portland, podendo ser armadas, ou não, apoiada sobre uma sub-base de material granular ou estabilizado com cimento, assentada no subleito ou reforço do subleito, quando se fizer necessário. Devido à alta rigidez do revestimento em relação às camadas inferiores, as cargas devido ao contato pneu-pavimento são distribuídas por uma grande área, amenizando as tensões que serão transmitidas às demais camadas (BERNUCCI et al., 2006).

Figura 7 - Seção transversal típica de pavimentos rígidos.



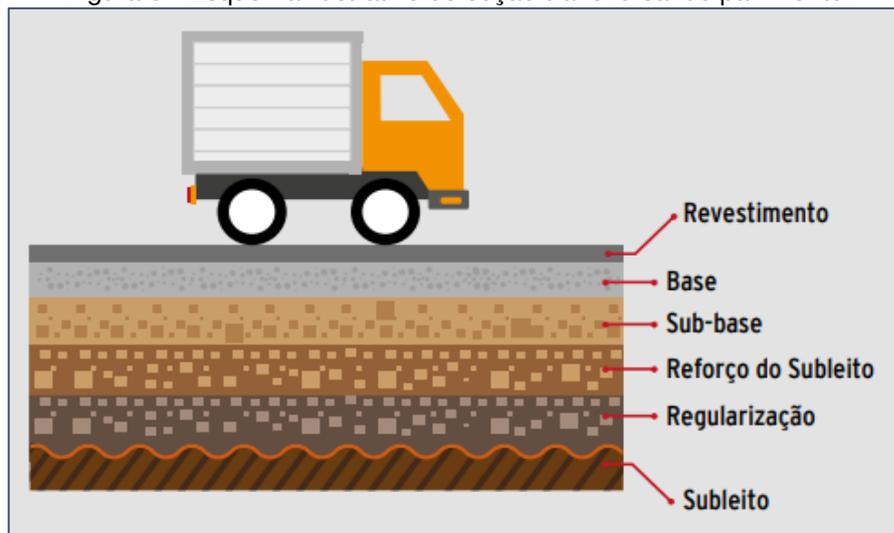
Fonte: BERNUCCI et al. (2006)

## 2.4.2 Estrutura dos pavimentos

A figura 8, ilustra uma seção transversal da estrutura do pavimento com suas camadas, cujo objetivo é atender à solicitação de esforços provenientes do tráfego, transmitindo para as camadas inferiores de forma amenizada, visto que a resistência destas é menor.

Dependendo do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez e da espessura das camadas, e condições ambientais, uma ou mais camadas podem ser suprimidas (BERNUCCI et al., 2006). Nos pavimentos rígidos, por exemplo, devido à elevada rigidez da camada superficial, a base pode ser desconsiderada, como mostrado na figura 7.

Figura 8 - Esquema ilustrativo de seção transversal do pavimento.



Fonte: CNT (2017)

As camadas que compõem um pavimento e suas respectivas funções, descritas mais adiante, são determinadas pela Confederação Nacional dos Transportes – CNT (2017), como: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e por fim, o revestimento, podendo ser de concreto ou asfáltico.

### 2.4.2.1 Subleito

Denomina-se subleito, o terreno de fundação no qual o pavimento se apoia (MARQUES, 2018). É responsável por absorver, definitivamente, os esforços verticais

causados pelo tráfego. Logo acima deste, encontra-se uma faixa de regularização, com o intuito de corrigir eventuais falhas que existam na superfície.

#### *2.4.2.2 Reforço do Subleito*

O reforço do subleito complementa a sub-base e, assim como as outras camadas, resiste e transmite os esforços verticais provenientes da ação do tráfego. Sendo executado, mediante à deficiência de suporte do subleito ou trânsito de cargas pesadas (MARQUES, 2018).

Os materiais a serem utilizados devem atender às especificações mínimas de qualidade, devendo possuir características técnicas superiores à camada inferior e menores que a superior (DNIT, 2006).

#### *2.4.2.3 Sub-base*

A execução da sub-base, se faz necessária, quando após o dimensionamento da base, a espessura for alta, dividindo-a em duas camadas, seja por questões técnicas ou econômicas. É a camada corretiva do subleito ou complementar a base, desde que não seja recomendável construir o pavimento diretamente sobre o leito resultante do processo de terraplenagem (DNIT, 2006).

#### *2.4.2.4 Base*

Esta camada, por sua vez, é a mais importante do pavimento, visto que, por estar localizada logo abaixo do revestimento, é responsável por reduzir a intensidade da carga oriunda do tráfego (MARQUES, 2018), exigindo, portanto, uma qualidade elevada dos materiais.

#### *2.4.2.5 Revestimento*

O revestimento é a camada, tanto quanto possível, permeável, que recebe diretamente a ação do tráfego. Seu objetivo é ao mesmo tempo que melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, resistir ao desgaste, de forma que aumente a vida útil da estrutura (SENÇO, 2007).

### 2.4.3 Materiais de base, sub-base e reforço do subleito

Para um correto dimensionamento, onde a estrutura possa atender às especificações de projeto, as propriedades dos materiais que serão utilizados, devem ser analisadas, como: resistência à ruptura, permeabilidade e deformabilidade, mediante à repetição de carga e ao efeito do clima (BERNUCCI et al., 2006).

Quanto aos materiais aplicados nas camadas de base, sub-base e reforço do subleito, estes podem ser classificados, segundo BERNUCCI (et al., 2006), levando em consideração seu esforço em três tipos: materiais granulares, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados e materiais asfálticos.

Os materiais granulares não são resistentes à tração, trabalhando somente à compressão, além de não possuírem coesão. Podem ser utilizados em misturas com solo. São eles: brita graduada simples (BGS), macadame hidráulico, macadame a seco, misturas estabilizadas granulometricamente, solo-agregado. Dentre eles, destacam-se os materiais provenientes da reciclagem, como: mistura asfáltica fresada, escória de alto-forno e o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil (BERNUCCI et al., 2006).

Por sua vez, os materiais cimentados, como: brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo-cimento, solo-cal, solo-cal-cimento, são materiais granulares ou solos, que misturados com cimento, cal ou outro aditivo, têm um aumento da sua resistência à tração, compressão e da rigidez do material.

E por fim, os materiais asfálticos: solo-asfalto, solo-emulsão e macadame betuminoso, que são utilizados como base e possuem uma resistência à tração devido a ligação entre agregados dada pelo ligante asfáltico.

### **3 METODOLOGIA**

Com o intuito de obter maior conhecimento teórico acerca do tema proposto, realizou-se, primeiramente, uma série de levantamentos bibliográficos. Para isso, foram utilizados livros, artigos, dissertações, artigos científicos e algumas normas que regulamentam a utilização dos materiais em questão na estrutura do pavimento. O fruto deste trabalho foi apresentado no item 2 – Revisão Bibliográfica.

Em seguida, coletou-se a quantidade aproximada dos materiais, que seria utilizada para os ensaios laboratoriais. Iniciou-se então, a parte prática da pesquisa no Laboratório de Solos e Pavimentação da UEMA (LSP). Nesta fase, tanto os agregados reciclados, como o solo e a mistura destes, foram submetidos a ensaios de caracterização física, de compactação e caracterização mecânica.

Por fim, analisaram-se os resultados dos materiais ensaiados, tendo como base as especificações encontradas na NBR 15115 (ABNT, 2004), para concluir acerca da viabilidade de uso destes materiais nas camadas de pavimentação.

#### **3.1 Materiais utilizados**

##### **3.1.1 Agregados reciclados**

Os agregados provenientes de resíduos cerâmicos vermelhos foram coletados em locais de descarte no bairro do Cohatrac IV, no município de São Luís – MA (Figura 9). Foi coletado um total de aproximadamente 500 kg do material, para realização dos ensaios, que passou por uma devida triagem, descartando os materiais indesejáveis, como determinam as alíneas h e i do item 4, da NBR 15115 (ABNT, 2004), sendo eles: madeiras, vidros, forros, tubulações, fiações elétricas, gessos, plásticos, dentre outros.

Figura 9 - Local de coleta dos resíduos.



Fonte: Autora (2018)

As dimensões dos resíduos coletados, eram bastante variáveis, como mostra a figura 10, visto que foram obtidos, na sua maioria, como rejeitos de obras de demolição, os quais são maiores que os provenientes da construção.

Figura 10 - Dimensões dos resíduos coletados.



Fonte: Autora (2018)

É sabido que esse tamanho encontrado é inviável para sua utilização, com isso, passaram por uma reciclagem, para que se pudesse obter medidas que permitissem a aplicação deste material na composição das misturas para as camadas de pavimentação.

Devido à ausência de uma usina de reciclagem destes resíduos na cidade de São Luís, este processo de diminuição das dimensões dos resíduos cerâmicos, ocorreu com o auxílio de um soquete de aproximadamente 5 kg (Figura 11), até a

obtenção de tamanhos que fossem visivelmente adequados para serem trabalhados. Caso a amostra tivesse maior quantidade, esta etapa poderia ser feita utilizando rolos compactadores, do tipo liso ou pé-de-carneiro, sendo este último mais aconselhado, por proporcionar, segundo REDIVO (2011), uma maior fragmentação do material cerâmico.

Figura 11 - Fragmentação do material cerâmico.



Fonte: Autora (2018)

### 3.1.2 Solo

O solo utilizado nas misturas foi obtido na Via Expressa (Figura 12), no município de São Luís – MA, situada a uma latitude de 2°30'50" sul e a uma longitude de 44°16'12" oeste, em uma altitude de aproximadamente 16 metros.

Figura 12 - Local de extração do solo.



Fonte: Google Earth (2018)

Para uma coleta adequada, estimou-se inicialmente uma quantidade de aproximadamente 200 kg para dar início a avaliação prática destes.

Figura 13 - Perfil do solo coletado.



Fonte: Autora (2018)

### 3.2 Preparação do material

Depois de coletados, o solo e os agregados foram postos para uma secagem ao ar, durante um período de sete dias, no corredor ao lado do LSP – UEMA (Figura 14), até atingir a umidade higroscópica, conforme recomenda a NBR 6457 (ABNT, 1986), a qual pode ser encontrada através da seguinte expressão:

$$h = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$h$  = teor de umidade, em %;

$M_1$  = massa do solo úmido mais a massa da cápsula, em g;

$M_2$  = massa do solo seco mais a massa da cápsula, em g, após um intervalo de 16 a 24 horas numa estufa, cuja temperatura esteja entre 105°C e 110°C;

$M_3$  = massa da cápsula.

Figura 14 - Secagem dos materiais.



a) Agregado Reciclado

b) Solo

Fonte: Autora (2018)

Após o período de secagem ao ar, os materiais foram homogeneizados e por meio do quarteamento, ambos processos mostrados na figura 15, separaram-se amostras representativas, porém, menores, em sacos de aproximadamente 20 kg, com o intuito de facilitar o armazenamento e manuseio durante a execução dos ensaios, além de evitar sua contaminação, tomando-se cuidado para que não houvesse perda de partículas finas.

Figura 15 - Preparo dos agregados.



Fonte: Autora (2018)

### 3.3 Ensaio laboratoriais

Para uma avaliação da viabilidade de utilização dos materiais, foram realizados ensaios laboratoriais, de natureza tanto física quanto mecânica. Estes, encontram-se baseados em especificações e procedimentos descritos por órgãos brasileiros como: Associação Brasileira de Normas Técnicas e o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), o qual foi substituído, em 2001, pelo DNIT.

#### 3.3.1 Ensaio de caracterização física

As propriedades de um material, determinadas pelos ensaios de caracterização física, estão diretamente relacionadas com seu desempenho mecânico, segundo LEITE (2007), quando este for submetido à ação do tráfego sendo, portanto, imprescindíveis para o estudo. Analisaram-se estas características, através dos seguintes ensaios: análise granulométrica, índice de forma, absorção de água, massa específica, limites de Atterberg, equivalente de areia e por fim, abrasão Los Angeles.

### 3.3.1.1 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica foi realizada tanto nos agregados reciclados (RCV-R), como no solo e na mistura destes, antes e após a compactação, através do peneiramento a seco, feito manualmente, segundo especificações encontradas na NBR 7181 (ABNT, 1984).

Para a execução do ensaio, utilizaram-se amostras de agregados e misturas, com 8 kg cada e 1,5 kg para o solo. O material que ficou retido na peneira de 2,0mm (Nº 10), foi previamente lavado para a remoção de partículas finas aderidas aos grãos e, em seguida, levado à estufa para secagem até constância de massa, a uma temperatura entre 105°C e 110°C. O material obtido foi utilizado no peneiramento grosso. Com relação ao material que passou, este também é lavado, entretanto na peneira de 0,075mm (Nº 200) e seco em estufa, para um posterior peneiramento fino.

A distribuição granulométrica foi encontrada utilizando-se a seguinte sequência de peneiras (Figura 16), as quais estão dispostas de maneira decrescente, da maior para a menor, conforme abertura da malha em milímetros: 37,5; 25; 19; 12,5; 9,5; 4,75; 2,36; 2,00; 1,18; 0,80; 0,60; 0,425; 0,30; 0,18; 0,15; 0,075, totalizando 16 peneiras. A quantidade de material retido em cada peneira é determinada e comparada com a massa total da amostra.

Figura 16 - Sequência de peneiras para o ensaio de granulometria.



a) Peneiramento grosso

b) Peneiramento fino

Fonte: Autora (2018)

O resultado do ensaio é mostrado através de curvas granulométricas, nas quais no eixo das abscissas, em escala logarítmica, estão as aberturas das peneiras, dadas em milímetros e no eixo das ordenadas, estão as porcentagens acumuladas que passam nas peneiras analisadas. De acordo com a forma da curva encontrada, o material é classificado, conforme sua graduação em: bem-graduado, aberto, uniforme e descontínuo (BERNUCCI et al., 2006), a qual assegura estabilidade aos pavimentos em decorrência do maior atrito interno obtido por entrosamento das partículas, da mais graúda à mais fina (DNER, 1996 apud MOTTA, 2005).

Um dos parâmetros que foram obtidos a partir da curva granulométrica foi o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ), que representa a falta de uniformidade do material, visto que seu valor diminui à medida que há uma homogeneidade da granulometria deste. Quanto menor este valor, a quantidade de vazios é maior, assim como, a quebra do material durante o processo de compactação (LEITE, 2007).

O coeficiente de uniformidade, obtido a partir da curva granulométrica, quando menor que 5, segundo CAPUTO (1996), indica um material muito uniforme, entre 5 e 15, possui uniformidade média e desuniforme, quando for maior que 15, sendo calculado pela expressão 2:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2)$$

Onde:

$C_u$  = coeficiente de uniformidade;

$d_{10}$  = diâmetro correspondente a 10% da porcentagem passante, em mm;

$d_{60}$  = diâmetro correspondente a 60% da porcentagem passante, em mm.

### 3.3.1.2 Índice de forma

A forma dos agregados reciclados provenientes de demolições ou obras de construção é bastante diversificada, variando de acordo com o tipo de resíduo e o equipamento utilizado no processo de reciclagem, podendo ser lamelar e possuir uma textura mais áspera que agregados convencionais (LIMA, 1999 apud LEITE, 2007).

Segundo o DNER (1996 apud MOTTA, 2005), a forma de um agregado se caracteriza pela sua aparência externa a qual está relacionada basicamente com suas dimensões, podendo ser alongada, cúbica, lamelar ou alongada-lamelar (Tabela 5) e com seus tipos de arestas e cantos, os quais são angulosos ou arredondados.

Na pavimentação, deve-se evitar a utilização de agregados que possuem formas lamelares, visto que estes são mais passíveis de fracionamento durante a aplicação de uma carga, podendo interferir no arranjo da estrutura de uma camada (MOTTA, 2005). Materiais que têm a forma mais irregular ou angular, tendem a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados, gerando, portanto, uma maior resistência (BERNUCCI et al., 2006).

Para a realização do ensaio, utilizou-se o procedimento descrito pela NBR 6954 (ABNT, 1989), na qual o índice de forma, ou seja, a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos dos agregados graúdos, é determinado com o auxílio de um paquímetro, digital ou manual. Primeiramente, realizou-se a granulometria da amostra e desprezou-se o material passante na peneira com abertura de malha de 9,5mm (3/8”) e aquelas, cujas porcentagens retidas individuais, em massa, sejam iguais ou menores que 5%.

Com base na porcentagem retida individual das malhas com dimensões superiores a 9,5mm, encontrou-se a quantidade de pedras a serem medidas, na qual a somatória deve totalizar 200 pedras, através da seguinte expressão:

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (3)$$

Em que:

$N_i$  = número de grãos a serem medidos na fração  $i$ ;

$F_i$  = porcentagem de massa retida individual da fração  $i$ .

Portanto, para as peneiras de 25, 19, 12,5 e 9,5mm, cujas porcentagens retidas individuais foram 17,10%, 24,43%, 37,91% e 6,58%, utilizaram-se as seguintes quantidades de pedras: 40, 57, 88 e 15 (Figura 17), respectivamente.

Figura 17 – Separação do material para realização do ensaio.



Fonte: Autora (2018)

Com um paquímetro digital mediram-se, para cada pedra, três dimensões: comprimento (a), largura (b) e espessura (c).

Figura 18 - Medição dos agregados com um paquímetro digital.



Fonte: Autora (2018)

A classificação desta, é baseada em dois parâmetros, que foram determinados após a medição dos agregados:  $b/a$  e  $c/b$ , conforme indica a tabela 4 abaixo:

Tabela 4 - Classificação da forma dos grãos (ABNT NBR 6954/1989).

<b>Média das Relações b/a e c/b</b>	<b>Classificação quanto à forma</b>
$b/a > 0,5$ e $c/b > 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b > 0,5$	Alongada
$b/a > 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada-lamelar

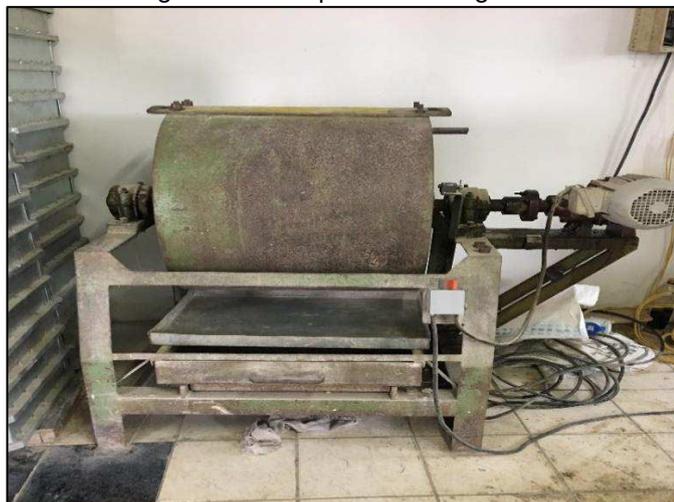
Fonte: BERNUCCI et al. (2006)

### 3.3.1.3 Abrasão Los Angeles

O valor da resistência ao desgaste, avaliado em laboratório pelo ensaio de abrasão Los Angeles, é um índice de qualidade que representa o desempenho do material quando este se encontra submetido à ação do tráfego, aos equipamentos de compactação (DIAS, 2004) ou ainda aos movimentos recíprocos das diversas partículas em uma estrutura de pavimento (DNER, 1996).

Este ensaio foi executado conforme métodos descritos na norma DNER-ME 035/98. O agregado reciclado foi inicialmente lavado e seco em estufa a uma temperatura entre 105°C e 110°C. Peneirou-se o material e separaram-se as diferentes porções das peneiras determinadas de acordo com a graduação A (n) escolhida inicialmente (Figura 20), que depois de misturadas obteve-se a massa total da amostra seca (Mn), a qual foi colocada juntamente da carga abrasiva (esferas de aço) na máquina "Los Angeles" (Figura 19) e o conjunto foi submetido a uma sequência de revoluções à velocidade de 30 a 33 rpm.

Figura 19 - Máquina "Los Angeles".



Fonte: Autora (2018)

Figura 20 - Agregado graduado para o ensaio.



Fonte: Autora (2018)

Após as rotações do tambor, retirou-se o material, fazendo-o passar pela peneira de 1,7mm (Nº 12), desprezando o que for passante. Por fim, lavou-se o agregado que ficou retido e após um período de, aproximadamente, 24 horas secando na estufa, obteve-se a massa da amostra lavada e seca ( $M'_n$ ).

O resultado do ensaio é encontrado conforme a equação 4:

$$A_n = \frac{M_n - M'_n}{M_n} \quad (4)$$

Sendo:

$A_n$  = abrasão “Los Angeles” da graduação  $n$ , dada em %;

$n$  = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

$M_n$  = massa total da amostra seca, colocada na máquina, em g;

$M'_n$  = massa total da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7mm), em g.

#### 3.3.1.4 Limites de Atterberg

Para analisar o comportamento do solo coletado, não basta apenas a sua distribuição granulométrica, visto que a fração fina contida neste possui características particulares, quando entram em contato com água (PINTO, 2000), que podem ser estudadas através da aplicação dos ensaios e índices, denominados Limites de Atterberg.

Os limites das mudanças de estado do solo, estudados por Atterberg, são definidos por um determinado teor de umidade e conhecidos como: Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP). A diferença destes indica a faixa de valores em que o solo se apresenta plástico, definida como Índice de Plasticidade (IP), sendo este responsável por indicar a estabilidade dos finos frente à umidade (DIAS, 2004).

O limite de liquidez representa a umidade em que o solo passa do estado líquido para o plástico, perdendo sua capacidade de fluir. Para sua determinação, a NBR 6459 (ABNT, 1984) descreve o procedimento a ser seguido durante o ensaio. O material foi preparado passando-se na peneira N<sup>o</sup> 40 (0,42 mm), coletando-se cerca de 200 g do que passou, conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986) e colocando-o, inicialmente, numa cápsula de porcelana, adicionando água destilada até que fosse obtido uma amostra homogênea, com consistência tal que fossem necessários cerca de 35 golpes para fechar a ranhura. Transferiu-se parte da mistura para a concha do aparelho de Casagrande (Figura 21), moldando-a de forma que na parte central a espessura atingisse cerca de 10mm. Dividiu-se a massa de solo em duas partes iguais (Figura 22), com o auxílio de um cinzel, recolocou-se a concha no aparelho e golpeou-se contra a base, deixando-a cair em queda livre, girando a manivela numa frequência de duas voltas por segundo. Por fim, anotou-se o número de golpes que foram necessários para fechar as bordas inferiores da ranhura e determinou-se a umidade. A operação foi repetida 5 vezes. O limite de liquidez é determinado através do teor de umidade que corresponde a 25 golpes.

Figura 21 - Aparelho de Casagrande.



Fonte: Autora (2018)

Figura 22 - Execução do ensaio de limite de liquidez.



Fonte: Autora (2018)

Por sua vez, a metodologia para execução do ensaio do limite de plasticidade é prescrita pela NBR 7180 (ABNT, 1984), sendo este um teor de umidade no qual começam a surgir fissuras no solo. A preparação do material, bem como sua homogeneização, ocorre de maneira idêntica ao ensaio do limite de liquidez. Utilizou-se cerca de 10 g do solo para formar uma bola, amassando-a para lhe dar a forma de cilindro, até que fosse fragmentado quando atingisse um diâmetro de 3 mm e comprimento, por volta de 100mm.

O índice de plasticidade do material é obtido através da equação 5:

$$IP = LL - LP \quad (5)$$

Sendo:

IP = índice de plasticidade, expresso em %;

LL = limite de liquidez, dado em %;

LP = limite de plasticidade, dado em %.

Caso não seja possível determinar uns dos limites, seja de liquidez ou plasticidade, diz-se que o índice de plasticidade é não plástico (NP).

### 3.3.1.4.1 Classificação do solo

Para classificação do solo, utilizou-se o sistema Transportation Research Board (TRB) adotado pela AASHTO e calculou-se primeiramente o Índice de Grupo (IG) através da seguinte expressão:

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad (6)$$

Onde:

a = % do material que passa na peneira de Nº 200 (p), menos 35. Se o valor de “p” for maior que 75, adota-se a = 75; caso “p” seja menor que 35, utiliza-se a = 0;

b = % do material que passa na peneira de Nº 200 (p), menos 15. Se “p” for maior que 55, adota-se b = 40; caso “p” seja menor que 15, adota-se b = 0;

c = valor do LL, menos 40. Se LL for maior que 60%, c = 20; caso seja menor que 40%, c = 0;

d = valor de IP, menos 15. Se IP for maior que 30, d = 20; caso seja menor, d = 0.

Esta classificação, leva em consideração a granulometria, os limites de consistência e índice de grupo (DNIT, 2006), conforme demonstrado na Figura 23.

Figura 23 - Classificação TRB do solo.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT (2006)

Para determinação do grupo e sub-grupo no qual o solo estudado se encaixa, faz-se um processo de eliminação da esquerda para a direita de acordo com os dados encontrados, até que estejam dentro dos limites estabelecidos pelos mesmos.

### 3.3.1.5 Equivalente de Areia

Este ensaio possui como objetivo avaliar a proporção relativa de materiais pulverulentos em amostras de agregados miúdos, sendo estas, provenientes da mistura RCV-R com o solo. Segundo definição da norma DNER-ME 054/97 (p.2), a qual possui os requisitos para realização do ensaio, equivalente de areia “é a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta”.

A amostra da mistura utilizada no ensaio, foi obtida a partir do material que passou na peneira Nº 4, cuja abertura é de 4,75mm, com umidade natural, sendo dividido, posteriormente, em duas cápsulas metálicas, sem comprimir, deixando a superfície nivelada. O garrafão com a solução diluída e um sifão no topo (24.b), foi colocado a 1,0 m acima do nível onde se encontravam os materiais. Sifonou-se esta solução para o interior das provetas (24.a) até atingir uma marca de 10 cm acima da base, sendo preenchida em seguida pelo material através de um funil, batendo-se no fundo das provetas, para expulsar as bolhas de ar existentes e umidificar completamente a amostra (Figura 25).

Figura 24 - Materiais utilizados para realização do ensaio.



a) Provetas

b) Solução diluída

Fonte: Autora (2018)

Figura 25 - Retirada das bolhas de ar da proveta.



Fonte: Autora (2018)

Após o repouso de 10 minutos do conjunto, vedaram-se as provetas com rolhas e agitaram-se, as mesmas, horizontalmente durante 30 segundos, executando 90 ciclos. Depois de retiradas as rolhas, lavaram-se as laterais internas dos tubos utilizados até atingir a marca de referência superior com o líquido. Então, após 20 minutos, leu-se o nível superior de argila em suspensão. Por fim, introduziu-se um pistão na proveta, até firmar-se totalmente na areia, girando-o até que um de seus parafusos estivesse visível para verificação da segunda leitura, que corresponde à altura da camada de areia sedimentada. O equivalente de areia (EA) é encontrado pela expressão 6 a seguir:

$$EA = \left( \frac{h_2}{h_1} \right) \times 100 \quad (7)$$

Onde:

EA = equivalente de areia, em %;

$h_1$  = altura da camada de argila em suspensão, em cm;

$h_2$  = altura da camada de areia sedimentada, em cm.

### 3.3.1.6 Absorção e densidade aparente

A norma DNER-ME 081/98 define a absorção como “o aumento da massa de agregado, devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, expresso como porcentagem de sua massa seca”. Destarte, pode ser definido, basicamente, como a quantidade de água que o material é capaz de absorver, sendo esta uma das principais diferenças, com relação as características físicas, encontradas entre o agregado natural e o reciclado (CARNEIRO et al., 2001 apud LEITE, 2007), principalmente quando estes são provenientes de materiais cerâmicos.

Os RCV-R, obtidos a partir de tijolos e telhas, possuem altos índices de absorção quando comparados às rochas naturais que originam, por exemplo, os agregados britados, em virtude de sua porosidade interna e afinidade com água (DIAS, 2004), influenciando, dessa forma, nas suas propriedades, particularmente, na sua resistência mecânica que pode diminuir devido ao enfraquecimento das ligações intergranulares (FRAZÃO, 2002).

A densidade aparente também possui sua definição descrita nesta norma, sendo, por sua vez “a razão entre o peso, ao ar, da unidade de volume de um agregado (porção impermeável), a uma dada temperatura, e o peso, ao ar da massa de igual volume de água destilada, livre de gases, à mesma temperatura”. Esta é determinada, considerando o material como um todo, inclusive os vazios que ele possui (BERNUCCI et al., 2006).

Para execução do ensaio, utilizou-se como referência a norma DNER-ME 081/98. A determinação da massa mínima da amostra para o estudo foi separada de acordo com a dimensão máxima característica do agregado. O material foi passado e lavado na peneira Nº 4 (4,75 mm), utilizando apenas o que ficou retido nesta, sendo colocado, em seguida, numa estufa à temperatura entre 105°C e 110°C, até constância de massa. Quando retirado, resfriou-se ao ar e emergiu-se o material em água (Figura 26), por um período de 24 horas, tendo-se o cuidado de agitar o recipiente para que as bolhas de ar fossem expulsas.

Figura 26 - Agregado imerso em água durante 24 horas.



Fonte: Autora (2018)

Após as 24 horas de imersão, retirou-se o material e com auxílio de um pano limpo e seco (Figura 27), absorveram-se as películas de água que estavam visíveis na superfície do agregado, determinando, em seguida, o seu peso na condição saturada superfície seca (Mh).

Figura 27 - Limpeza superficial dos agregados com um pano absorvente.



Fonte: Autora (2018)

Colocou-se o material na cesta e imergiu-os completamente em um recipiente com água, que se encontrava numa balança inicialmente zerada com a cesta vazia e imersa. Procedeu-se então a leitura do agregado submerso (L), como demonstrado na figura 28.b.

Figura 28 - Determinação do volume deslocado pelos agregados.



a) Cesta com agregados

b) Leitura do volume deslocado

Fonte: Autora (2018)

E por fim, a amostra é levada à estufa novamente, com temperatura entre 105°C e 110°C, e resfriada ao ar num período suficiente para que sua manipulação fosse viável, determinando, em seguida, a massa do agregado seco ( $M_s$ ).

A absorção do RCV-R pode ser encontrada utilizando a expressão 7 abaixo:

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

a = absorção do agregado, em %;

$M_h$  = massa do agregado na condição saturada seca, ao ar, dado em g;

$M_s$  = massa do agregado seco em estufa, ao ar, dado em g.

Para cálculo da densidade dos agregados, aplica-se a expressão 8:

$$d_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \quad (9)$$

Sendo:

$d_{ap}$  = densidade aparente, em g/cm<sup>3</sup>;

L = leitura feita na balança, após imersão completa do agregado, em g.

### 3.3.2 Ensaio de compactação

Conforme definição do DNIT (2006, p.41), compactação “é a operação da qual resulta um aumento da massa específica aparente de um solo [...], pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, o que faz com que as partículas constitutivas do material entrem em contato mais íntimo, pela expulsão de ar [...]”. Sendo, portanto, um método utilizado para diminuir o volume de vazios de um material, com o intuito de aumentar, também, a resistência e estabilidade (DNER, 1996 apud MOTTA, 2005).

Com o ensaio de compactação, determina-se o teor de umidade ótimo da amostra, o qual corresponde ao ponto de massa específica aparente seca máxima, através da correlação entre o peso específico aparente seco e as umidades encontradas. O procedimento adotado no decorrer do ensaio, foi baseado na norma NBR 7182 (ABNT, 1986).

Primeiramente, admitiu-se que seria utilizada uma amostra não-trabalhada, ou seja, que não haveria reuso de material, evitando que este fosse compactado novamente, devido à quebra que ocorre neste processo, alterando, desta forma, sua granulometria. A preparação das amostras do solo e das misturas utilizadas no ensaio foram realizadas conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 1986).

A quantidade a ser tomada, levando em consideração que o material passou, em grande parte, na peneira de 19 mm (3/4”), foi de 35 kg, dividindo-se em 5 porções, iguais, de 7 kg. Vale ressaltar que, devido percentual do material retido na peneira de 19mm ter sido maior que 10%, substitui-se essa quantidade por uma amostra que passou na peneira de 19 mm e ficou retida na de 4,75 mm, segundo exigência encontrada na NBR 6457 (ABNT, 1986).

Existem três tipos diferentes de energias que podem ser: normal, intermediária e modificada, as quais variam entre as quantidades de golpes. A energia é inversamente proporcional ao teor de umidade ótima e diretamente ao valor do peso específico aparente seco máximo. A energia utilizada para o ensaio foi intermediária, em consoante com as recomendações da NBR 15115 (ABNT, 2004), para materiais empregados em camadas de base e sub-base, sendo necessário 26 golpes, nas 5 camadas dispostas no cilindro grande (Figura 29).

Figura 29 - Cilindros utilizados no ensaio.



Fonte: Autora (2018)

Com o auxílio de uma proveta, adicionou-se água gradativamente, de forma que a primeira umidade encontrada estivesse em torno de 5% abaixo da umidade ótima presumível, e revolveu-se continuamente o material (Figura 30.b), que se encontrava numa bandeja metálica (Figura 30.a), até que se obteve uma amostra homogênea.

Figura 30 - Homogeneização do material a ser compactado.



a) Material a ser ensaiado

b) Homogeneização do material

Fonte: Autora (2018)

Colocou-se o material, num molde cilíndrico, de 15,2 cm de diâmetro e 17,8 cm de altura, em média, onde as camadas eram golpeadas com o auxílio de um soquete padrão de 4,5 kg (Figura 31). Após a compactação da última camada, retiraram-se o cilindro complementar e o excesso de material, sendo este último, removido com uma régua biselada. Por fim, pesou-se o conjunto.

Repetiu-se a operação, incrementando um teor de umidade de, aproximadamente, 2% até que fossem encontrados cinco pontos distintos. Como resultado, tem-se uma curva de compactação, na qual as abscissas são os teores de umidade, encontrado em %, e as ordenadas, as massas específicas aparentes secas, dadas em  $\text{g/cm}^3$ .

Figura 31 - Compactação do corpo de prova.



Fonte: Autor (2018)

### 3.3.2.1 Índice de Degradação de Ruiz (ID)

Os RCV-R são agregados suscetíveis à quebra durante o processo de compactação, com isso, para esta análise, utilizou-se o Índice de degradação de Ruiz, o qual é obtido a partir do somatório dos deslocamentos  $\Delta_i$  da curva granulométrica referente a cada peneira, dividido pelo número de peneiras usadas para realização do ensaio (BUZATTI, 1987 apud BEZERRA, 2014).

O índice é obtido através da equação 9:

$$ID = \frac{\sum \Delta_i}{np} \quad (10)$$

Onde:

ID = Índice de Degradação de Ruiz, em %;

$\Delta_i$  = deslocamento da curva granulométrica;

np = número de peneiras utilizadas no ensaio.

### 3.3.3 Ensaio de caracterização mecânica

Com o intuito de analisar o comportamento dos materiais quando estes estiverem submetidos às cargas, seja de compactação ou tráfego, realizam-se ensaios de avaliação das propriedades mecânicas, que simulam as condições reais de solicitação no campo, sendo eles: Índice de Suporte Califórnia (ISC), Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) e Módulo de Resiliência (MR) segundo MEDINA (1997 apud MOTTA, 2005), entretanto, no âmbito desta pesquisa realizou-se apenas o ensaio de CBR, verificando a viabilidade de utilização da mistura do solo com os resíduos cerâmicos vermelhos reciclados nas camadas de pavimentação, conforme requisitos exigidos na NBR 15115 (ABNT, 2004).

Para este estudo, realizou-se o ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC), com o solo natural e as misturas em suas diferentes proporções, para efeito comparativo e buscando encontrar o teor de melhor desempenho dos materiais.

### 3.3.3.1 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O Índice de Suporte Califórnia é o principal parâmetro adotado pela NBR 15115 (ABNT, 2004) para determinação da possibilidade de uso do material estudado: o agregado reciclado de resíduos cerâmicos vermelhos misturado com solo, em camadas estruturais do pavimento, seja como: base, sub-base ou reforço do subleito, dependendo do resultado obtido.

Este ensaio, também denominado de CBR, tem seu método de ensaio preconizado pela norma DNIT-ME 172/2016 e possui como objetivo definir a capacidade de suporte, ou seja, da resistência dos solos e materiais granulares empregados na pavimentação.

Após a execução do ensaio de compactação, acoplaram-se os extensômetros, também conhecido como relógio comparador, na parte superior do cilindro (Figura 32), anotou-se a leitura inicial, colocaram-se os pratos perfurados com a haste de expansão e uma sobrecarga de dois discos anelares com massa total de, aproximadamente, 4,5 kg e imergiram-se todos os corpos de prova (CP) no tanque (Figura 33), por 96 horas. Todos os corpos de prova encontrados foram submetidos a imersão, para uma avaliação do CBR nas outras umidades, além da ótima.

Figura 32 - Extensômetro acoplado ao cilindro.



Fonte: Autora (2018)

Vale ressaltar que as leituras no extensômetro foram efetuadas de 24 em 24 horas, totalizando 4 medidas.

Figura 33 - Corpos de prova submetidos à imersão no tanque.



Fonte: Autora (2018)

Após o período de 96 horas, retiraram-se os corpos de prova do tanque e deixou-se a água escoar por cerca de 15 minutos (Figura 34).

Figura 34 - Escoamento da água dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2018)

Realizou-se então a penetração nos corpos de prova, através de uma prensa automática (Figura 35), anotando-se as leituras encontradas. Por fim, encontra-se a curva do ensaio de ISC, onde no eixo das abscissas estão os valores

da penetração, em polegadas e no eixo das ordenadas, a pressão correspondente, em  $\text{kgf/cm}^2$ . O valor adotado para o CBR, em %, é o maior entre as pressões correspondentes às penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas, devidamente corrigidas pela constante do anel e comparado à pressão padrão, estabelecida na norma trabalhada, necessária para penetrar o mesmo comprimento, porém em um material granular utilizado como referência (DNIT, 2006).

Figura 35 - Corpo de prova submetido à penetração.



Fonte: Autora (2018)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos pelos ensaios laboratoriais realizados nas amostras de agregados reciclados, solos e nas misturas entre eles, para análise da caracterização física, da compactação e do comportamento mecânico dos mesmos. Os resultados são comparados tanto aos requisitos exigidos na NBR 15115 (ABNT, 2004) como a outros trabalhos utilizados como referência.

### 4.1 Ensaio de caracterização física

A metodologia dos ensaios realizados para estudo das características físicas encontra-se descritos no item 3.3.1 e os resultados são mostrados a seguir.

#### 4.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada, primeiramente, com amostras do solo coletado, em seguida com os RCV-R e por fim, analisou-se a mistura destes.

##### 4.1.1.1 Solo

A classificação dos solos quanto sua granulometria, encontrada na NBR 6502 (ABNT, 1995), é dada em função do diâmetro das partículas, como mostrado na tabela 5 abaixo:

Tabela 5 - Classificação granulométrica do solo.

<b>Descrição</b>	<b>Diâmetro das partículas</b>
Argila	< 0,002 mm
Silte	0,002 a 0,06 mm
Areia fina	0,06 a 0,20 mm
Areia média	0,20 a 0,60 mm
Areia grossa	0,60 a 2,0 mm
Pedregulho	> 2,0 mm

Fonte: NBR 6502 (ABNT, 1995)

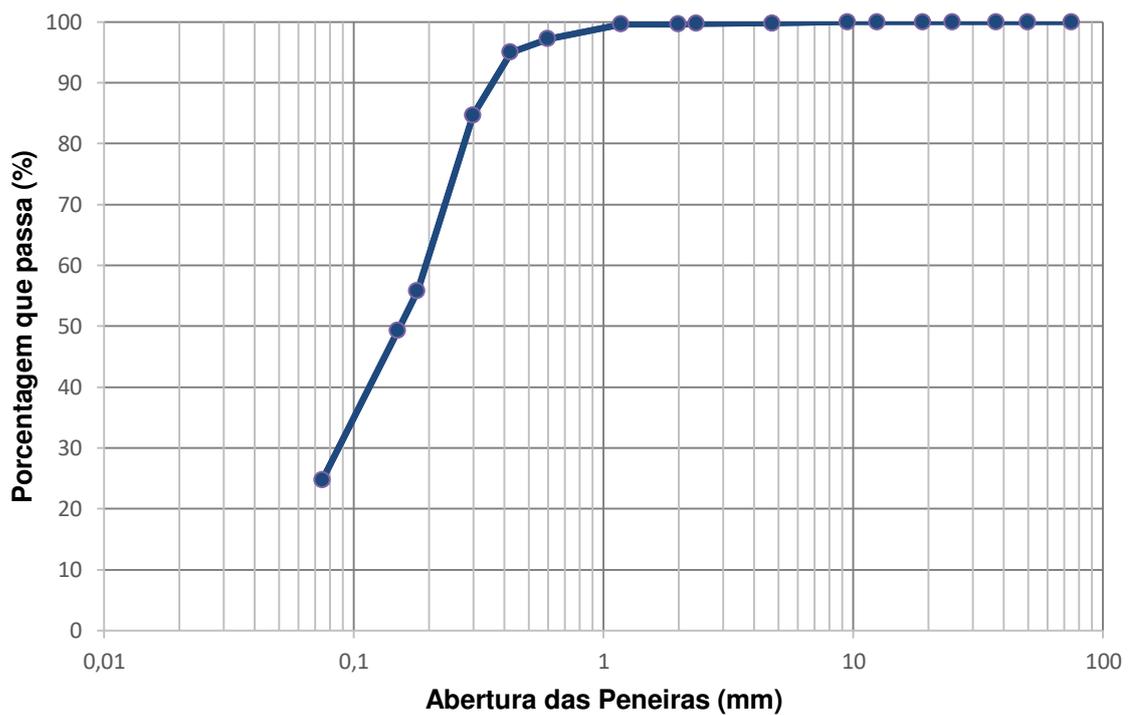
Conforme o resultado da curva granulométrica, mostrada no gráfico 2, encontrada através do peneiramento, conclui-se que se trata de um solo com 55,81% de suas partículas com dimensões entre areia fina, silte e argila (Tabela 6).

Tabela 6 - Resultado do peneiramento do solo.

<b>Descrição</b>	<b>Percentual em relação ao total</b>
Pedregulho	0,37%
Areia grossa	2,42%
Areia média	41,40%
Areia fina, silte e argila	55,81%

Fonte: Autora (2018)

Gráfico 2 - Curva granulométrica do solo.



Fonte: Autora (2018)

#### 4.1.1.2 Resíduo cerâmico vermelho reciclado

Os RCV-R após os processos de quebra e homogeneização foram submetidos ao ensaio de granulometria, obtendo-se os seguintes resultados (Tabela 7):

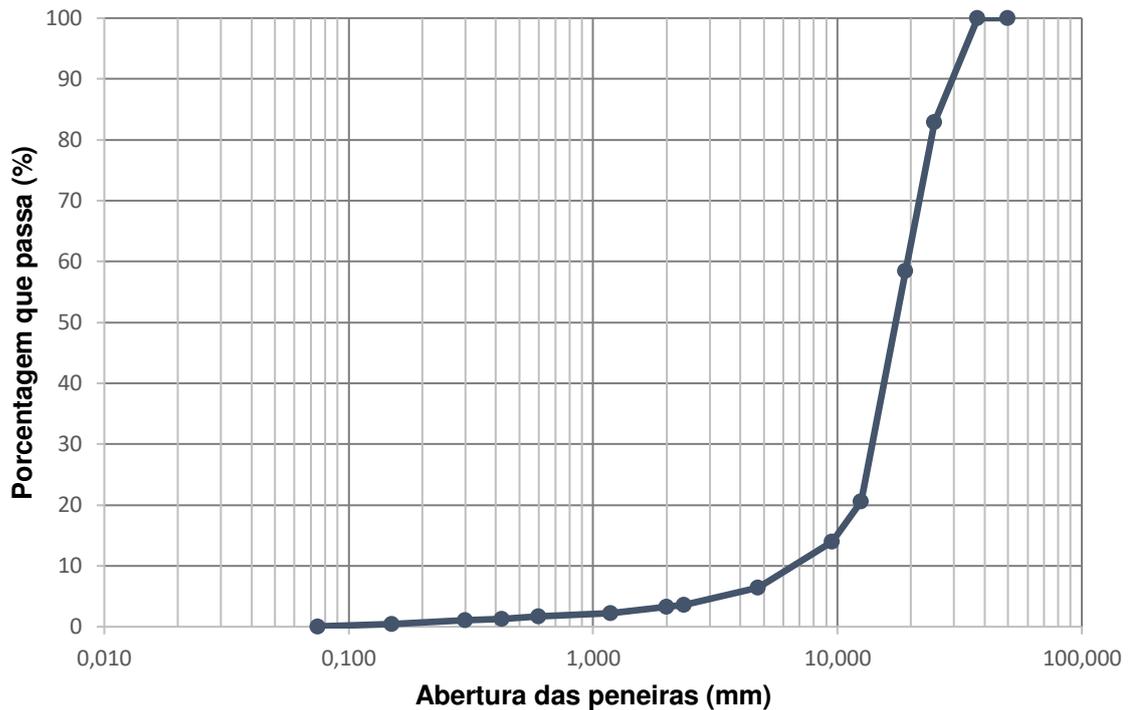
Tabela 7 - Resultado da granulometria do agregado reciclado.

<b>#</b>	<b>Peneira mm</b>	<b>Peso seco retido (g)</b>		<b>% que passa da amostra total</b>
		<b>Parcial</b>	<b>Acumulado</b>	
<b>1.1/2"</b>	<b>37,500</b>	0,00	0,00	100,00%
<b>1"</b>	<b>25,000</b>	1397,00	1397,00	82,90%
<b>3/4"</b>	<b>19,000</b>	1996,35	3393,35	58,47%
<b>1/2"</b>	<b>12,500</b>	3097,95	6491,30	20,56%
<b>3/8"</b>	<b>9,500</b>	537,35	537,35	13,98%
<b>Nº 4</b>	<b>4,750</b>	614,95	1152,30	6,45%
<b>Nº 8</b>	<b>2,360</b>	7880,50	9032,80	3,56%
<b>Nº 10</b>	<b>2,000</b>	23,70	9056,50	3,27%
<b>Nº 16</b>	<b>1,180</b>	83,55	83,55	2,24%
<b>Nº 20</b>	<b>0,800</b>	12,10	95,65	2,09%
<b>Nº 30</b>	<b>0,600</b>	34,30	129,95	1,67%
<b>Nº 40</b>	<b>0,425</b>	28,55	158,50	1,33%
<b>Nº 50</b>	<b>0,300</b>	23,70	23,70	1,04%
<b>Nº 80</b>	<b>0,180</b>	19,90	43,60	0,79%
<b>Nº 100</b>	<b>0,150</b>	24,00	67,60	0,50%
<b>Nº 200</b>	<b>0,075</b>	36,20	103,80	0,06%

Fonte: Autora (2018)

Com os valores da abertura da malha da peneira, em mm, e a porcentagem que passa individualmente com relação ao total, encontra-se a curva granulométrica (Gráfico 3):

Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado reciclado.



Fonte: Autora (2018)

A partir da curva, comparam-se os parâmetros obtidos desta com as especificações determinadas na NBR 15115 (ABNT, 2004).

Tabela 8 - Comparação dos resultados com as especificações da norma.

<b>Características</b>	<b>NBR 15115 (ABNT, 2004)</b>	<b>Ensaio agregado (Autora, 2018)</b>
Forma da curva	Densa (bem- graduada)	Aberta
Porcentagem passante na # 40	10% a 40%	1,33%
Cu	≥10	2,86
	Desuniforme	Muito uniforme

Fonte: Autora (2018)

Observa-se, portanto, que o RCV-R não satisfaz às condições, relacionadas à granulometria, impostas pela norma. É notório que este material possui uma baixa quantidade de finos, como mostra o gráfico 3.

Para um melhor desempenho dos agregados reciclados de resíduos cerâmicos vermelhos e como forma de atender às especificações, relacionadas à granulometria, encontradas na NBR 15115 (ABNT, 2004), optou-se pela mistura deste com solo, em três proporções diferentes, como demonstra a tabela 9, com o intuito de analisar qual destas satisfaz os requisitos exigidos para a camada em que será utilizada.

Tabela 9 - Proporções estudadas para as misturas.

<b>Composições das Misturas</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>RCV-R</b>	<b>Solo</b>
<b>M01</b>	<b>R85S15</b>	85%	15%
<b>M02</b>	<b>R70S30</b>	70%	30%
<b>M03</b>	<b>R55S45</b>	55%	45%

Fonte: Autora (2018)

Figura 36 - Ilustração das proporções estudadas.

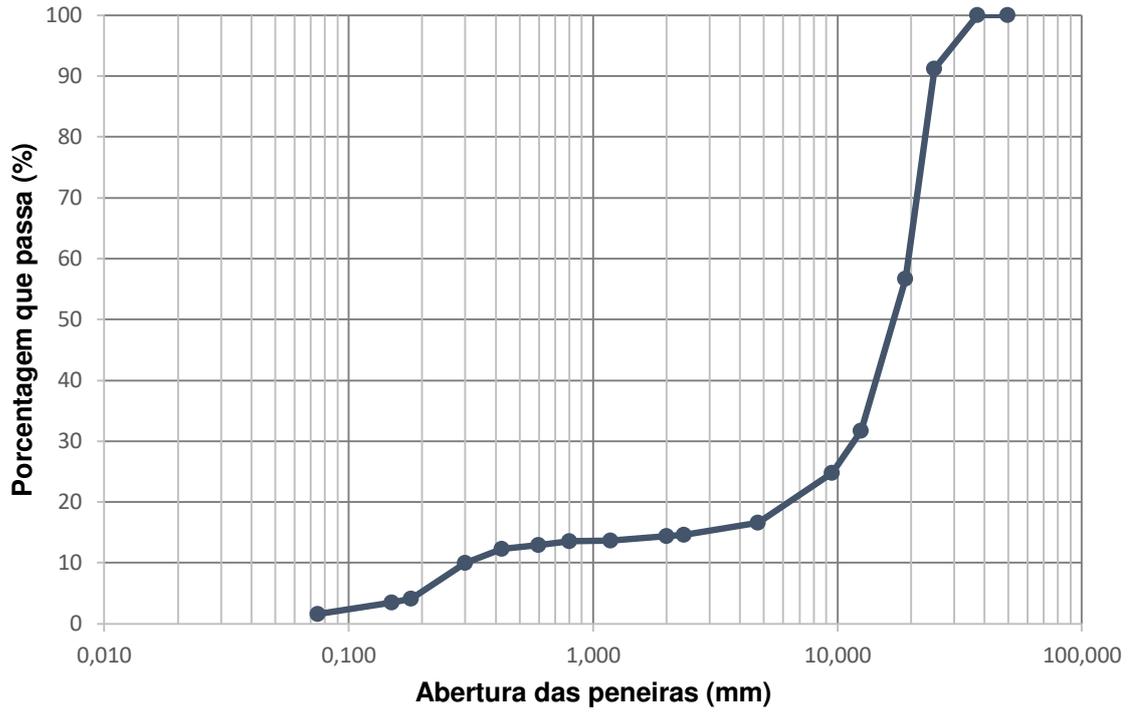


Fonte: Autora (2018)

#### 4.1.1.3 Mistura dos agregados reciclados com o solo

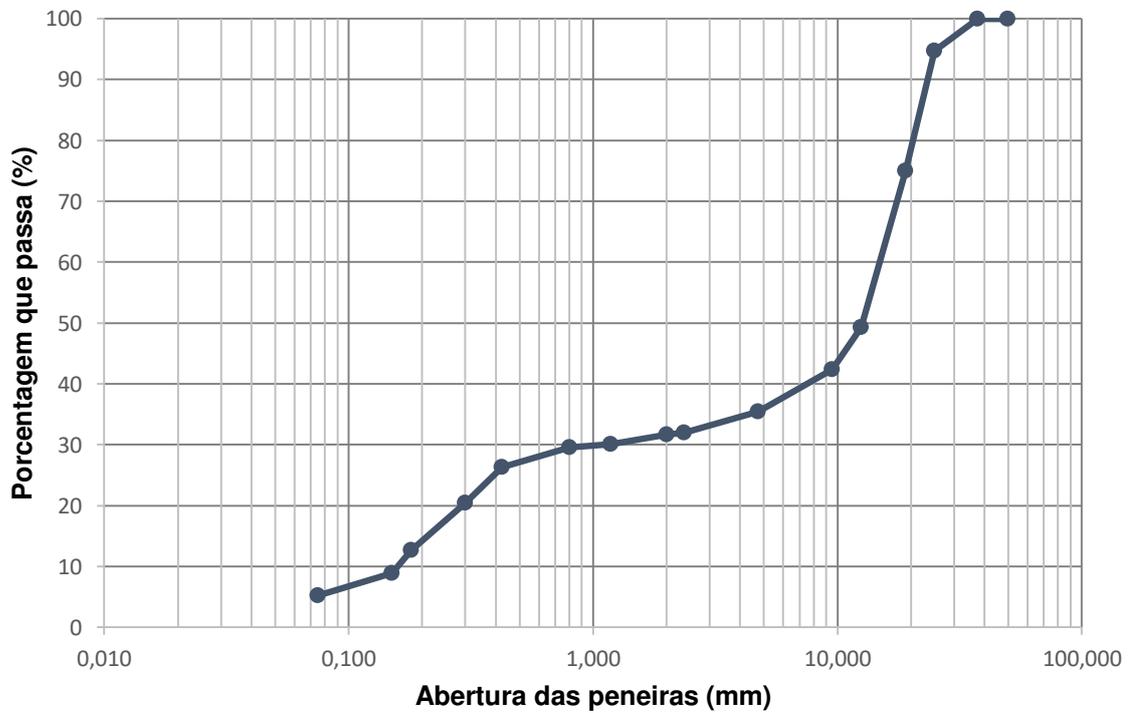
As curvas granulométricas das misturas realizadas entre os RCV-R com o solo, nomeadas como R8515, R70S30, R55S45, encontram-se dispostas abaixo, nos gráficos 4 a 6, respectivamente:

Gráfico 4 - Curva granulométrica da mistura R85S15.



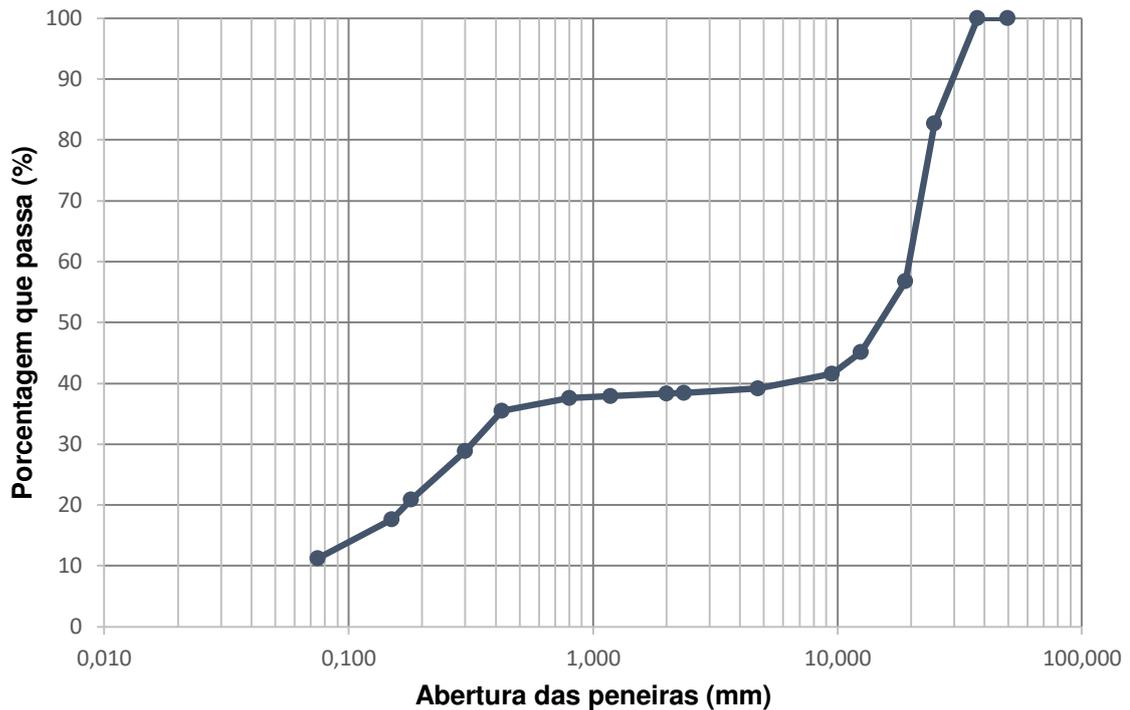
Fonte: Autora (2018)

Gráfico 5 - Curva granulométrica da mistura R70S30.



Fonte: Autora (2018)

Gráfico 6 - Curva granulométrica da mistura R55S45.



Fonte: Autor (2018)

A partir das curvas granulométricas, das diferentes proporções entre agregados e solo estudadas, têm-se os seguintes resultados (Tabela 10):

Tabela 10 - Comparação dos resultados das 03 misturas com a norma.

<b>Características</b>	<b>NBR 15115 (ABNT, 2004)</b>	<b>Mistura R85S15 (Autora, 2018)</b>	<b>Mistura R70S30 (Autora, 2018)</b>	<b>Mistura R55S45 (Autora, 2018)</b>
Forma da curva	Densa (bem- graduada)	Aberta	Densa	Descontínua
Porcentagem passante na #40	10% a 40%	12,3%	26,4%	35,5%
Cu	≥10	66,67	83,33	266,67
	Desuniforme	Desuniforme	Desuniforme	Desuniforme

Fonte: Autora (2018)

Conforme analisado na Tabela 10, as misturas R85S15 e R55S45 atendem apenas dois requisitos da norma: porcentagem passante na peneira Nº 40 (0,425 mm)

e o coeficiente de uniformidade, enquanto que a mistura R70S30, satisfaz, também, a característica relacionada à forma da curva.

#### 4.1.2 Índice de forma

O índice de forma foi realizado com os RCV-R que ficaram retidos na peneira cuja abertura de malha é 9,5 mm (3/8”) e retrata o quão cúbico é o agregado, portanto, quanto mais próximo de 1, maior a cubicidade.

Observou-se na sua forma, que estes não possuem arestas e os cantos são, na maior parte, arredondados. Quanto à dimensão, são classificados como cúbicos, conforme a Tabela 05, visto que as médias das relações (b/a) e (c/b) são maiores que 0,5, como demonstra a Tabela 11 abaixo:

Tabela 11 - Média das dimensões dos grãos.

<b>Média das Relações</b>	<b>Resultado</b>
b/a	0,79
c/b	0,73

Fonte: Autor (2018)

Dentre as 200 pedras medidas, apenas 13 apresentaram características lamelares, o que equivale a 6,5% da quantidade total, se enquadrando ainda, dentro da porcentagem máxima admissível de 30%, pela NBR 15115 (ABNT, 2004), para grãos de forma lamelar.

Os resultados das medições para cada agregado encontram-se no Apêndice A. Observou-se que, dentre eles, somente alguns apresentaram uma de suas dimensões maior que 63,5 mm, não sendo, portanto, uma característica de todo o material.

#### 4.1.3 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão, realizado nos agregados graúdos, com diâmetros acima de 9,5 mm (3/8”), obteve os seguintes resultados demonstrados na tabela 12:

Tabela 12 - Resultado do ensaio de resistência à abrasão Los Angeles.

Descrição	Resultado
Graduação	A
Mn (g)	4985,3
M'n (g)	2711,8
An (%)	46%

Fonte: Autora (2018)

Como pode-se observar, a amostra submetida ao ensaio foi bastante reduzida (Figura 37), demonstrando o alto desgaste sofrido pelos agregados, que foi 45,60% (Tabela 12), chegando a 46% devido a aproximação de 1% recomendada pela norma DNER-ME 035/98.

Figura 37 - Agregados submetidos ao ensaio.



a) Antes do ensaio.

b) Após o ensaio.

Fonte: Autora (2018)

A norma que especifica os requisitos para aplicação destes agregados em camadas de pavimentação, NBR 15115 (ABNT, 2004), não estabelece um valor ou faixa de valores limites para o percentual do índice de abrasão “Los Angeles”. Entretanto, existem outras normas que prescrevem as características necessárias para aplicação de agregados em camadas de base, como por exemplo, a norma DNIT-ES 141/2010 que especifica sobre base estabilizada granulometricamente e nesta, o índice de abrasão para os materiais, não pode ser maior que 55%. Portanto, este material apresenta resultado satisfatório para emprego nas camadas do pavimento.

O percentual encontrado para o índice de abrasão desta pesquisa, encontra-se próximo dos valores determinados nos trabalhos utilizados como

referência, os quais também utilizaram resíduos cerâmicos, como mostrado na tabela 13:

Tabela 13 - Comparação dos resultados com outras pesquisas.

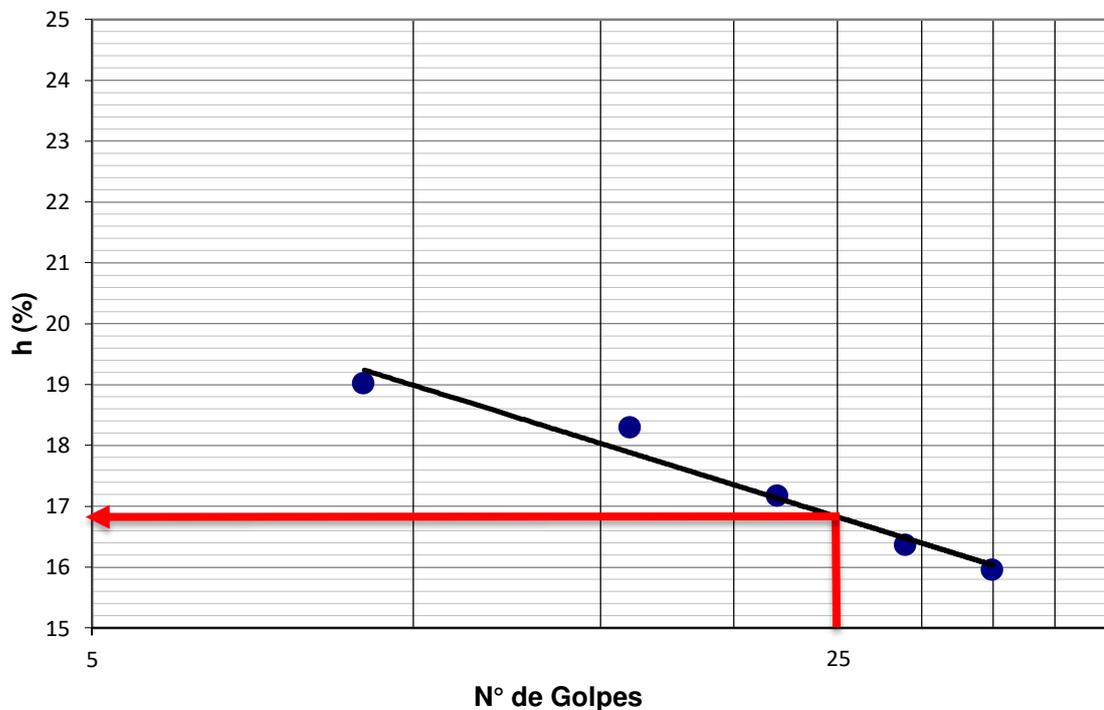
<b>Autor</b>	<b>Procedência do agregado</b>	<b>Los Angeles (%)</b>
DIAS (2004)	Monte Carmelo - MG	41
AMORIM (2013)	Cuiabá - MT	49
Esta pesquisa (2018)	São Luís - MA	46

Fonte: Adaptado de DIAS (2004), AMORIM (2013)

#### 4.1.4 Limites de Atterberg

Os ensaios de limite de Atterberg foram realizados com o solo. No ensaio de limite de liquidez, ao se traçar uma linha de tendência entre os 5 golpes encontrados, determinou que o valor correspondente a 25 golpes, equivale a um LL de 16,8%.

Gráfico 7 - Determinação do limite de liquidez.



Fonte: Autor (2018)

Quanto ao limite de plasticidade, por se tratar se um solo não coesivo, não foi possível moldar os cilindros, logo, o ensaio não foi realizado por completo. Dessa forma, o índice de plasticidade é considerado como não plástico ( $IP = 0$ ).

A NBR 15115 (ABNT, 2004) não faz referência a este ensaio, portanto, não há restrição quanto aos limites de Atterberg para utilização do solo na mistura.

#### 4.1.4.1 Classificação do solo

Após os ensaios de granulometria e limites de Atterberg, encontraram-se os seguintes parâmetros (Tabela 14):

Tabela 14 - Parâmetros utilizados para classificação do solo.

<b>Características</b>	<b>Resultado</b>
<b>% que passa (Nº 10)</b>	99,63
<b>% que passa (Nº 40)</b>	95,03
<b>% que passa (Nº 200)</b>	24,78
<b>LL (%)</b>	16,8
<b>LP (%)</b>	0
<b>IP</b>	0
<b>IG</b>	0

Fonte: Autora (2018)

Portanto, conforme terminologia da TRB (Figura 23), o solo classifica-se como A-2-4, um grupo no qual predominam-se pedregulhos ou areias siltosas ou argilosas e seu comportamento como material constituinte do subleito é qualificado de excelente a bom.

#### 4.1.5 Equivalente de areia

De acordo com o procedimento prescrito na norma DNER-ME 054/97, a determinação do equivalente de areia baseou-se na média das duas amostras realizadas, cujo resultados encontram-se na tabela 15:

Tabela 15 - Resultado do equivalente de areia.

<b>Proveta</b>	<b>EA (%)</b>	<b>EA médio (%)</b>
1	7,73	8,26
2	8,78	

Fonte: Autora (2018)

A NBR 15115 (ABNT, 2004) não apresenta exigências quanto ao equivalente de areia.

#### 4.1.6 Absorção e densidade aparente

A absorção e a densidade aparente, determinadas com base no ensaio cuja metodologia encontra-se indicada na norma DNER-ME 081/98, conforme descrito no item 3.3.1.6, resultaram nos seguintes valores:

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de densidade aparente e absorção.

<b>Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção (%)</b>
1,68	10,87

Fonte: Autora (2018)

Como era esperado, a absorção dos resíduos cerâmicos vermelhos reciclados possui um valor elevado, visto que estes materiais possuem porosidade interna e afinidade com água, resultando, dessa forma, em densidades menores. A NBR 15115 (2004) não apresenta especificação para a taxa de absorção dos agregados.

A absorção determinada do RCV, está dentro da faixa de valores encontrada na bibliografia apresentada (Tabela 17):

Tabela 17 - Comparação do resultado com valores encontrados na bibliografia.

<b>Autor</b>	<b>Procedência do agregado</b>	<b>Absorção (%)</b>
DIAS (2004)	Monte Carmelo - MG	14,50
REDIVO (2011)	Morro da Fumaça - SC	16,50
AMORIM (2013)	Cuiabá - MT	13,61
SILVA (2014)	Barueri - SP	13,30
Esta pesquisa (2018)	São Luís - MA	10,87

Fonte: Adaptado de DIAS (2004); REDIVO (2011); AMORIM (2013); SILVA (2014)

## 4.2 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado nos solos naturais e nas misturas dos agregados reciclados, conforme proporções determinadas na tabela 9.

### 4.2.1 Resultado do ensaio no solo natural

Para o solo no estado natural, foram determinadas as seguintes umidades, pesos específicos aparentes e pesos específicos aparentes secos, para os 5 pontos analisados (Tabela 18):

Tabela 18 - Resultado do ensaio de compactação para o solo no estado natural.

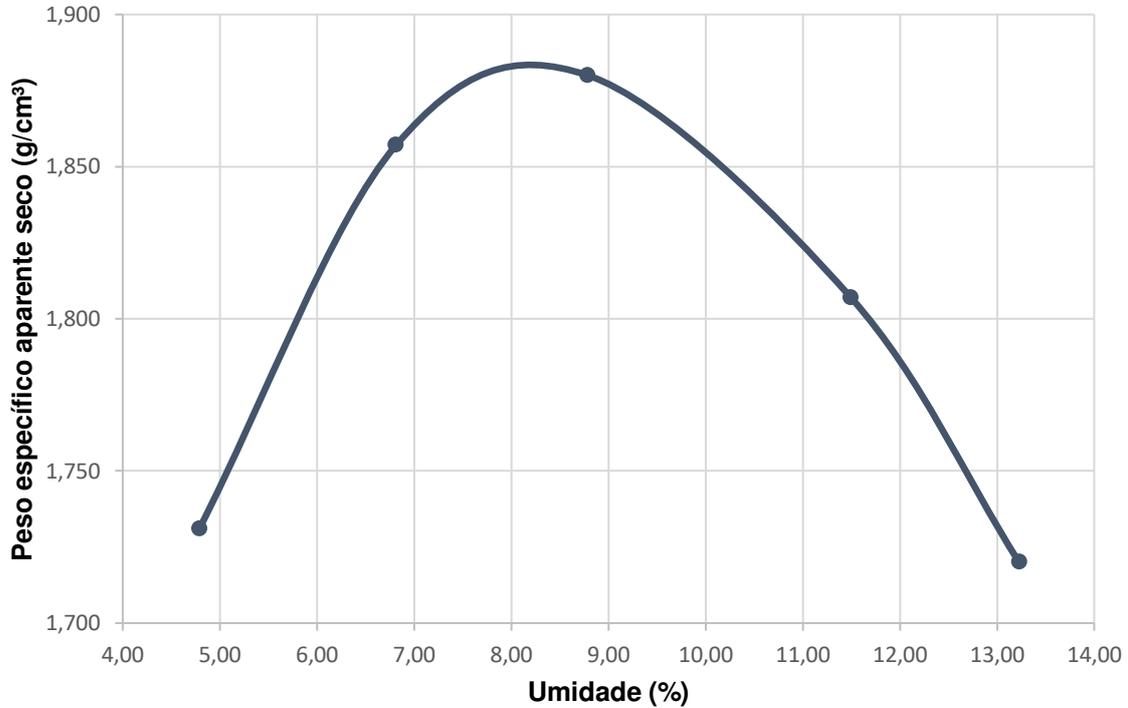
<b>Ponto de compactação</b>	<b>Peso específico aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Peso específico aparente seco (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1	1,81	4,8	1,73
2	1,98	6,8	1,86
3	2,05	8,8	1,88
4	2,02	11,5	1,81
5	1,95	13,2	1,72

Fonte: Autora (2018)

A partir dos dados encontrados na tabela 18, traçou-se a curva de compactação abaixo (Gráfico 8), e verificando o ponto mais alto da curva, determinou-

se o valor da umidade ótica, sendo este 8,3% e o peso específico aparente seco máximo correspondente, de 1,88 g/cm<sup>3</sup>.

Gráfico 8 - Curva de compactação do solo no estado natural.



Fonte: Autora (2018)

#### 4.2.2 Resultado do ensaio nas misturas

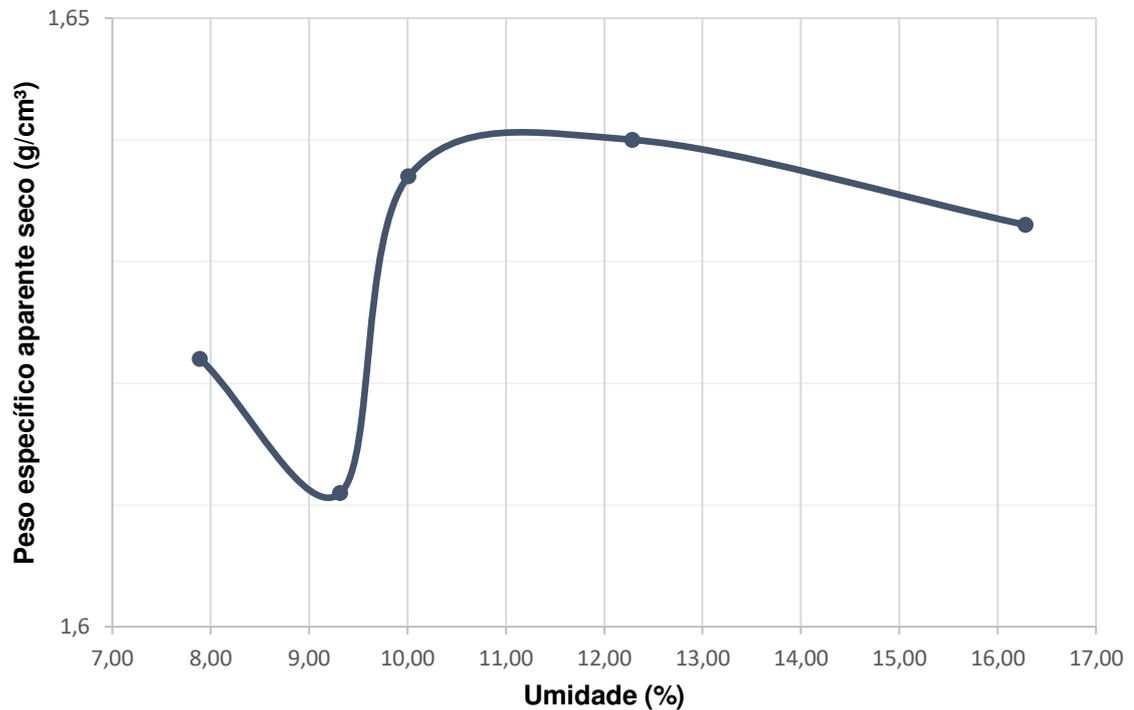
Os resultados do ensaio de compactação para as misturas R85S15, R70S30, R55S45, encontram-se nas Tabelas 19 a 21 e suas curvas, nos gráficos 9 a 11, respectivamente:

Tabela 19 - Resultado do ensaio de compactação para a mistura R85S15.

Ponto de compactação	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm <sup>3</sup> )
1	1,75	7,9	1,62
2	1,76	9,3	1,61
3	1,80	10,1	1,63
4	1,84	12,3	1,64
5	1,90	16,3	1,63

Fonte: Autora (2018)

Gráfico 9 - Curva de compactação da mistura R85S15.



Fonte: Autora (2018)

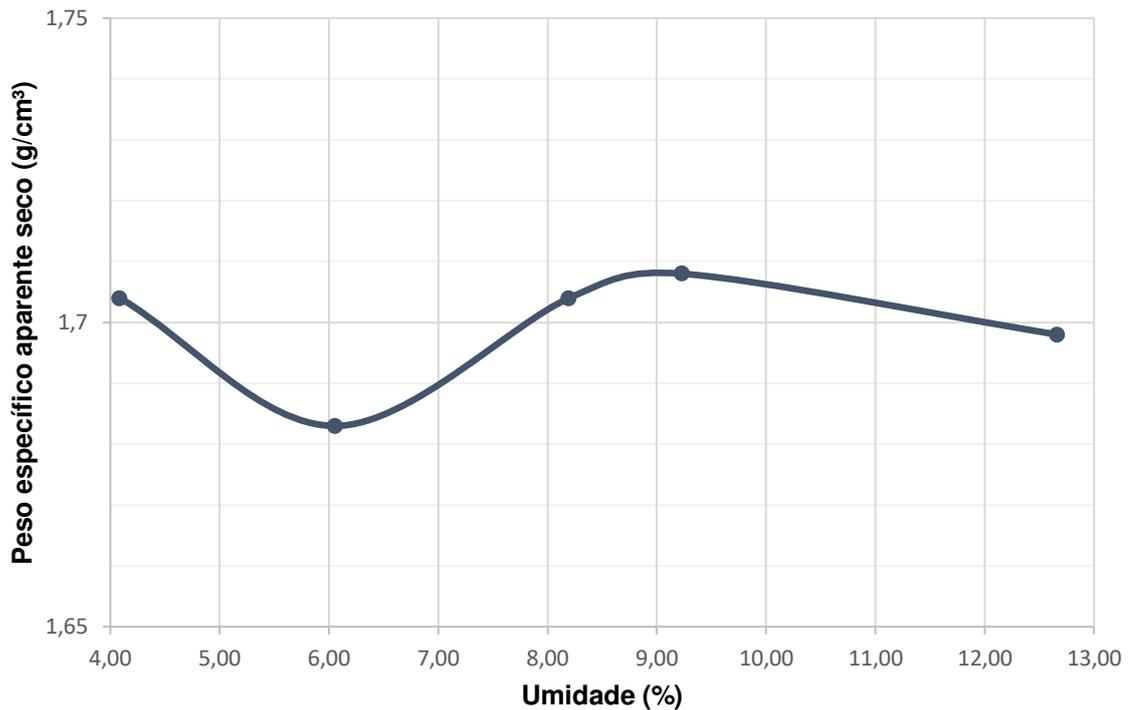
Para a mistura R85S15, na qual há uma predominância de agregado reciclado em relação ao solo, determinou-se uma umidade ótima de 11,1% e o peso específico aparente seco máximo de 1,64 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 20 - Resultado do ensaio de compactação para a mistura R70S30.

Ponto de compactação	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm <sup>3</sup> )
1	1,78	4,1	1,70
2	1,79	6,1	1,68
3	1,84	8,2	1,70
4	1,87	9,2	1,71
5	1,91	12,7	1,69

Fonte: Autora (2018)

Gráfico 10 - Curva de compactação da mistura R70S30.



Fonte: Autora (2018)

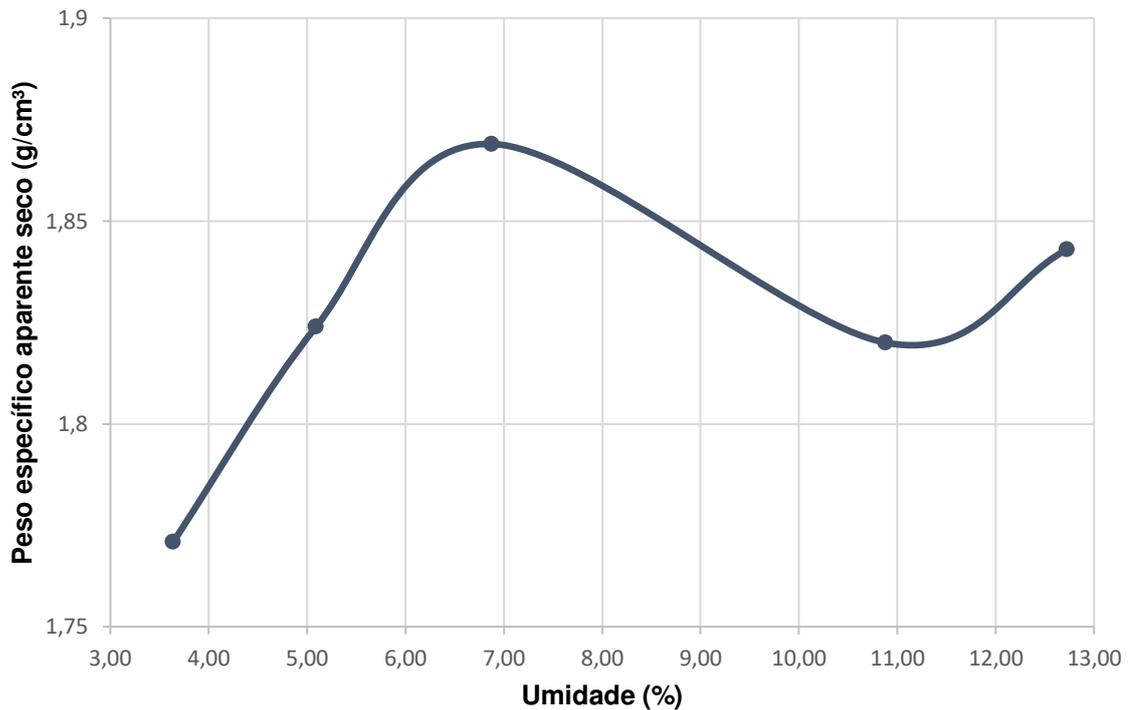
A mistura R70S30, por sua vez, apresenta uma umidade ótima de 9,1% e um peso específico aparente seco máximo de 1,71 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 21 - Resultado do ensaio de compactação para a mistura R55S45.

Ponto de compactação	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm <sup>3</sup> )
1	1,84	3,6	1,77
2	1,92	5,1	1,82
3	1,99	6,9	1,87
4	2,02	10,9	1,82
5	2,08	12,7	1,84

Fonte: Autora (2018)

Gráfico 11 - Curva de compactação da mistura R55S45.



Fonte: Autora (2018)

Para a mistura R55S45, cuja percentagem de agregado é de 55%, a menor dentre elas, encontrou-se uma umidade ótima de 6,8% e um peso específico aparente seco máximo de 1,87 g/cm³.

Para efeito de comparação, tem-se a tabela 22 abaixo:

Tabela 22 - Comparação dos resultados do ensaio de compactação das diferentes amostras.

<b>Amostra</b>	<b>Umidade ótima (%)</b>	<b>Peso específico aparente seco máximo (g/cm³)</b>
Solo	8,3	1,88
R85S15	11,1	1,64
R70S30	9,1	1,71
R55S45	6,8	1,87

Fonte: Autora (2018)

Conforme observa-se na tabela 22, à medida que se incrementa a quantidade de agregados reciclados na mistura, a umidade ótima aumenta e o peso específico aparente seco máximo, diminui. Isto ocorre devido a principal característica do RCV-R: a porosidade interna, que acarreta em alta absorção de água, embora, os agregados tenham sofrido umedecimento prévio para realização do presente ensaio.

Outro fator que pode ser analisado, devido a esta peculiaridade do material reciclado, é o peso específico aparente, o qual, ocorre de forma crescente, diferentemente do solo que em um certo ponto, ocorre a saturação e os valores começam a diminuir (Tabela 18).

Com relação aos gráficos 9 a 11 mostrados, é notório que as curvas de compactação das misturas apresentaram um comportamento atípico, em virtude da particularidade do agregado reciclado: sua porosidade interna, que gera elevadas taxas de absorção. Após a ruptura do agregado, devido aos golpes aplicados, a quantidade de partículas finas aumenta, assim como a superfície exposta, fazendo com que o material necessite de mais água para dar continuidade ao processo de compactação, segundo LEITE (2007).

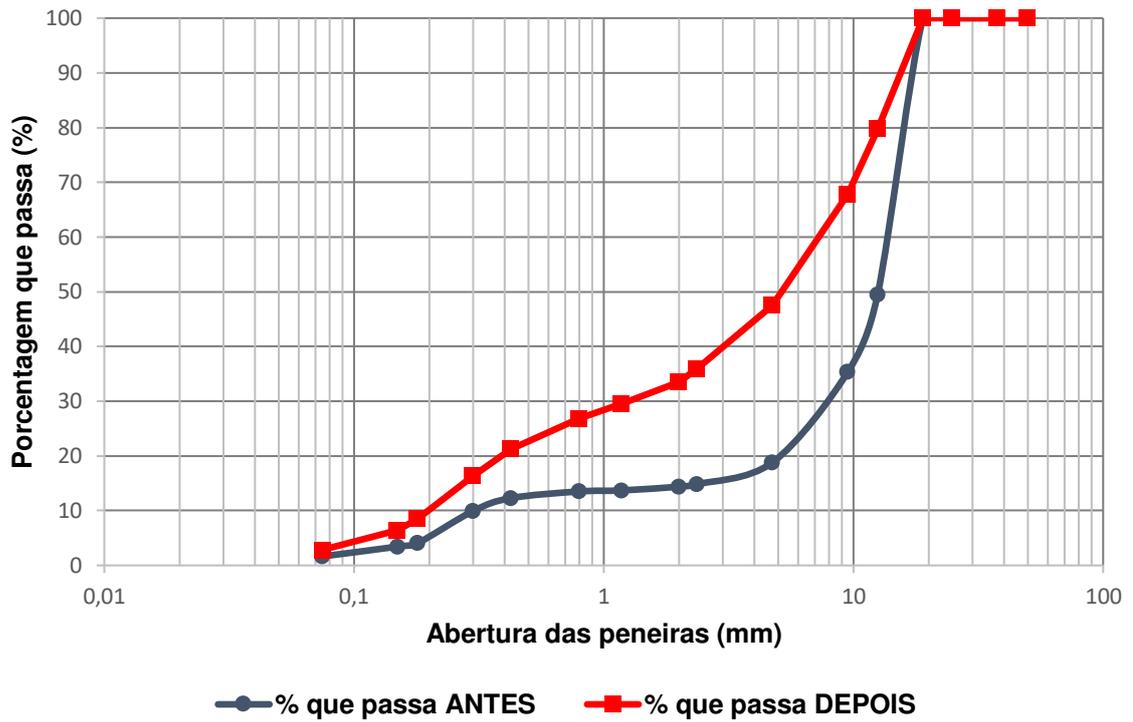
De acordo com a literatura analisada, é muito difícil determinar a umidade ótima de agregados reciclados, os resultados são, em geral, dispersos o que dificulta o traçado de uma curva de compactação convencional (O'MAHONY e MILLIGAN, 1991 apud LEITE, 2007).

Dentre as curvas demonstradas, a que mais se assemelhou à do solo, foi aquela que teve 45% de solo, o maior percentual entre as misturas (Gráfico 11).

#### 4.2.3 Índice de Degradação de Ruiz

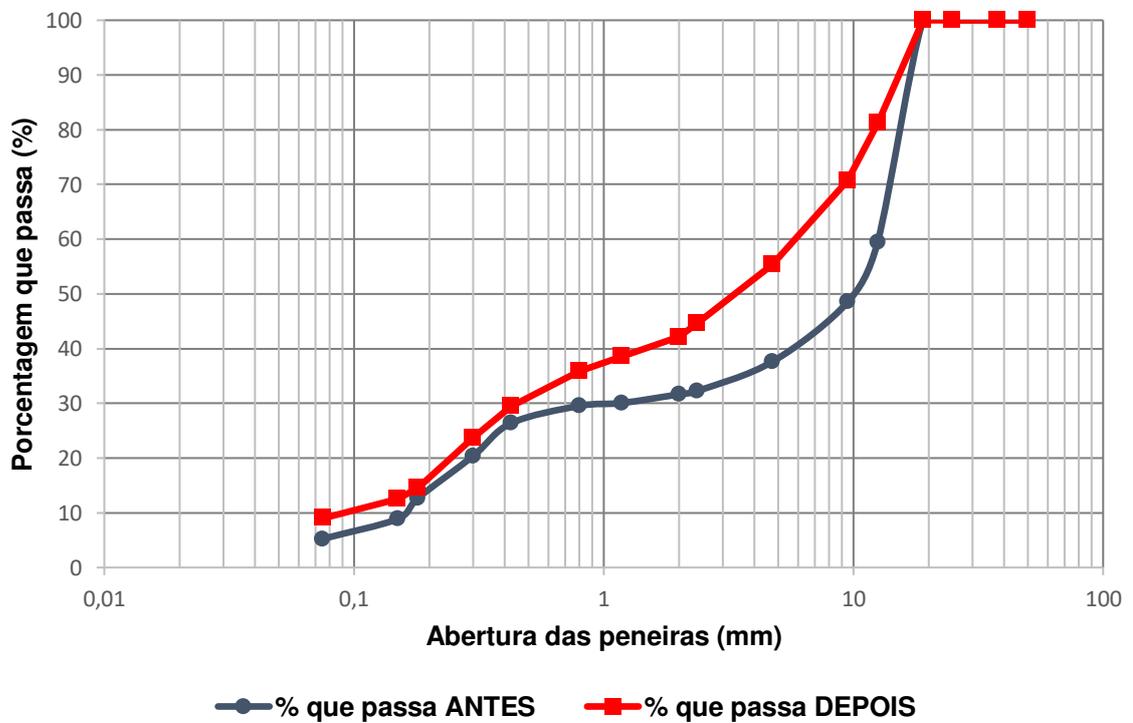
A granulometria usada na compactação foi redefinida, conforme metodologia descrita no item 3.3.2, visto que foram utilizados apenas os materiais passantes na peneira de 19 mm (3/4"), totalizando para este ensaio, uma quantidade de 12 peneiras (np). Os gráficos 12 a 14 mostram a curva granulométrica antes e após o ensaio de compactação, das misturas analisadas:

Gráfico 12 - Variação da curva granulométrica da mistura R85S15.



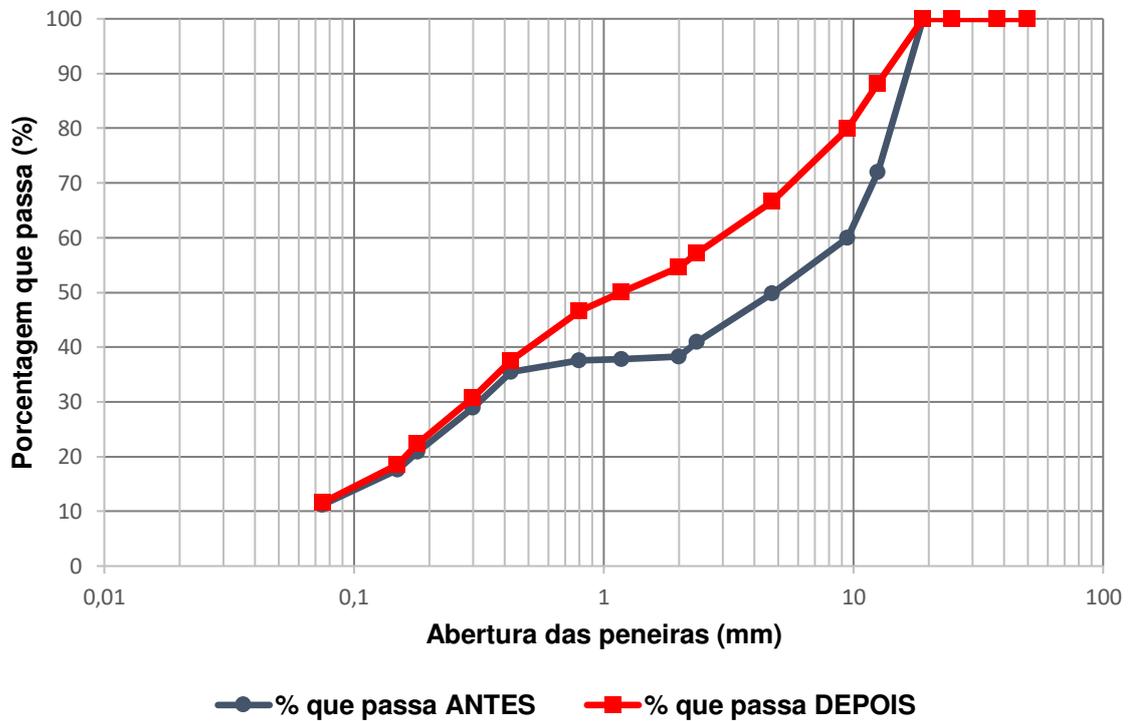
Fonte: Autora (2018)

Gráfico 13 - Variação da curva granulométrica da mistura R70S30.



Fonte: Autora (2018)

Gráfico 14 - Variação da curva granulométrica da mistura R55S45.



Fonte: Autora (2018)

Quanto mais próximo de zero, o valor de ID, trata-se de um agregado resistente a degradação. E ao atingir seu valor máximo, 100, o material estudado possui uma qualidade baixa (BUZATTI, 1987 apud LEITE, 2007).

A partir das curvas granulométricas, retiram-se as diferenças percentuais passantes em cada peneira e obtém-se os índices de degradação para as três misturas (Tabela 23):

Tabela 23 - Resultado do índice de degradação para as três misturas.

Abertura (mm)	Diferença (%)		
	Mistura R85S15	Mistura R70S30	Mistura R55S45
12,500	30,26	21,81	16,22
9,500	32,48	22,23	19,90
4,750	28,64	17,69	16,81
2,360	21,11	12,42	16,20
2,000	19,17	10,54	16,37
1,180	15,89	8,53	12,23
0,800	13,39	6,32	8,99
0,425	9,00	3,13	2,07
0,300	6,39	3,37	1,94
0,180	4,40	1,89	1,55
0,150	3,02	3,64	0,94
0,075	1,21	3,75	0,40
$\Sigma$	184,96	115,32	113,62
<b>ID (%)</b>	<b>15,41</b>	<b>9,61</b>	<b>9,47</b>

Fonte: Autora (2018)

De acordo com a tabela 23, os resultados dos índices, para as três proporções estudadas, demonstraram que os resíduos cerâmicos reciclados são bem suscetíveis à quebra, o que já fora apresentado no resultado do ensaio de abrasão Los Angeles, portanto, quanto maior a porcentagem de agregado, maior a degradação, como demonstrado na mistura com 85% deste e 15% de solo, na qual obteve-se um índice de 15,41%.

Entretanto, apesar da quebra após a compactação, o material continuou dentro das especificações granulométricas da norma NBR 15115 (ABNT, 2004): a porcentagem de material passante deve estar entre 10% e 40% e o coeficiente de uniformidade maior que 10. A tabela 24 retrata o valor dos parâmetros, relacionados à granulometria, exigidos por esta norma, antes e depois da compactação.

Tabela 24 - Análise das características granulométricas da mistura após a compactação.

AMOSTRA	Porcentagem que passa na #40		Cu	
	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS
<b>Mistura R85S15</b>	12,3%	21,3%	50,00	35,00
<b>Mistura R70S30</b>	26,4%	29,5%	81,25	75,00
<b>Mistura R55S45</b>	35,5%	37,6%	142,86	42,87

Fonte: Autora (2018)

### 4.3 Ensaio de caracterização mecânica

Todos os corpos de prova obtidos da compactação, para os quais aplicou-se a energia de Proctor Intermediário, após 96 horas no tanque, foram submetidos à prensa automática, para determinação do CBR.

#### 4.3.1 Índice de Suporte Califórnia

Para estudo da melhor mistura a ser utilizada nas camadas do pavimento, realizou-se o ensaio com as três amostras e com o solo, para efeito comparativo.

##### 4.3.1.1 Resultado do CBR para o solo no estado natural

A partir do rompimento dos corpos de prova referente ao solo natural, obtiveram-se os seguintes resultados (Tabela 25):

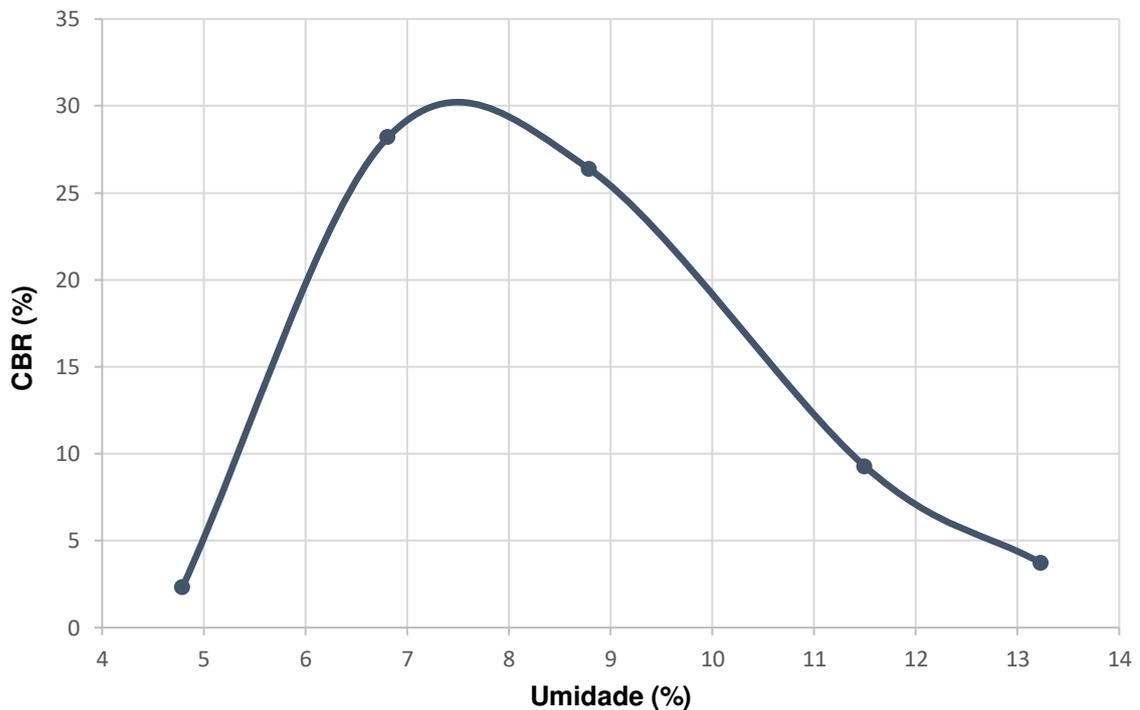
Tabela 25 - Resultado do ensaio de CBR para o solo natural.

Ponto de compactação	Umidade (%)	Expansão (%)	CBR (%)
1	4,8	0,209	2
2	6,8	0,182	28
3	8,8	0,076	26
4	11,5	0,052	9
5	13,2	0,017	3

Fonte: Autora (2018)

Com base nos valores de umidade (%) e CBR (%) encontrados, traçou-se a seguinte curva:

Gráfico 15 – Curva de CBR para o solo no estado natural.



Fonte: Autora (2018)

Encontrando-se no gráfico 15, o CBR correspondente a umidade ótima de 8,3%, sendo este 28%. Percebe-se que o valor encontrado para o solo no estado natural, é satisfatório para utilização em sub-base do pavimento, visto que, para isso,

é necessário que o CBR seja maior ou igual a 20% e expansão menor ou igual a 1%, conforme recomendações do DNIT (2006), a qual obteve um resultado de 0,105%.

#### 4.3.1.2 Resultado do CBR para as misturas

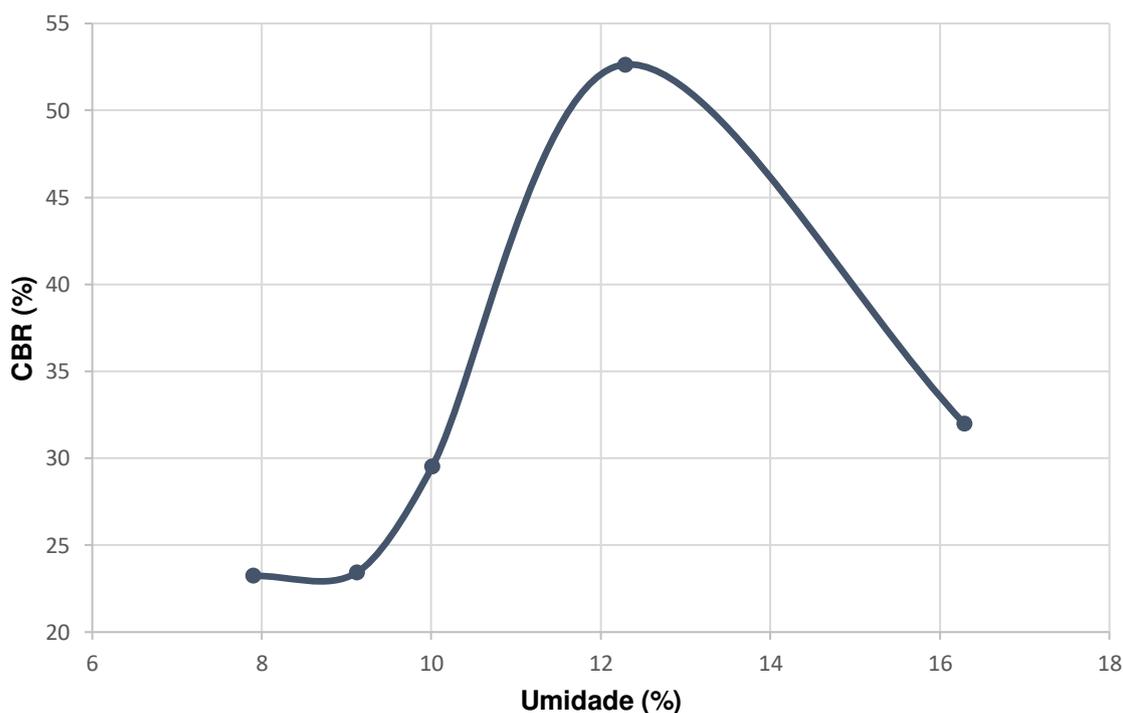
Para a mistura R85S15, encontraram-se os seguintes valores de CBR (Tabela 26) e sua respectiva curva de compactação (Gráfico 16):

Tabela 26 - Resultado do ensaio de CBR para a mistura R85S15.

Ponto de compactação	Umidade (%)	Expansão (%)	CBR (%)
1	7,9	0,00	23
2	9,1	0,00	24
3	10,1	0,00	29
4	12,3	0,00	53
5	16,3	0,00	32

Fonte: Autora (2018)

Gráfico 16 - Curva de CBR para a mistura R85S15.



Fonte: Autora (2018)

A partir do Gráfico 16, encontra-se o CBR referente à umidade ótima da mistura (11,1%), igual a 44% e expansão nula, conforme Tabela 26.

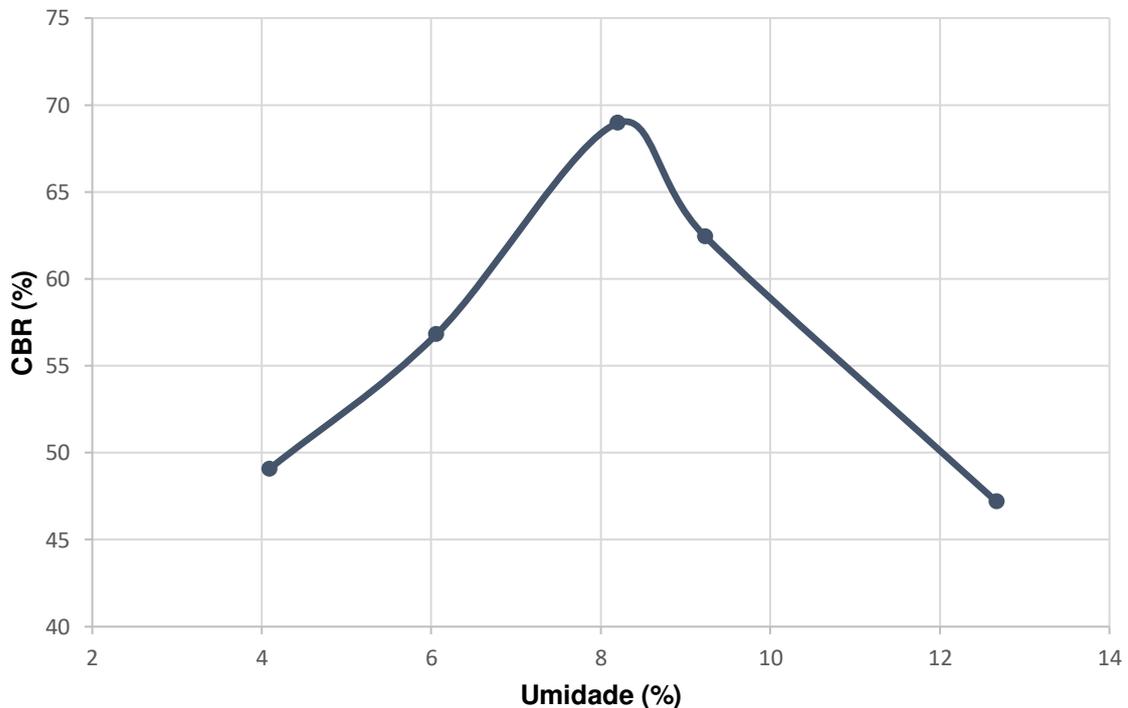
A mistura R70S30, por sua vez, apresentou os resultados descritos abaixo:

Tabela 27 - Resultado do ensaio de CBR para a mistura R70S30.

Ponto de compactação	Umidade (%)	Expansão (%)	CBR (%)
1	4,1	0,026	49
2	6,1	0,017	57
3	8,2	0,013	69
4	9,2	0,009	62
5	12,7	0,000	47

Fonte: Autora (2018)

Gráfico 17 - Curva de CBR para a mistura R70S30.



Fonte: Autora (2018)

A expansão e o CBR encontrados para a umidade ótima (9,1%) são, respectivamente, 0,008% e 64%.

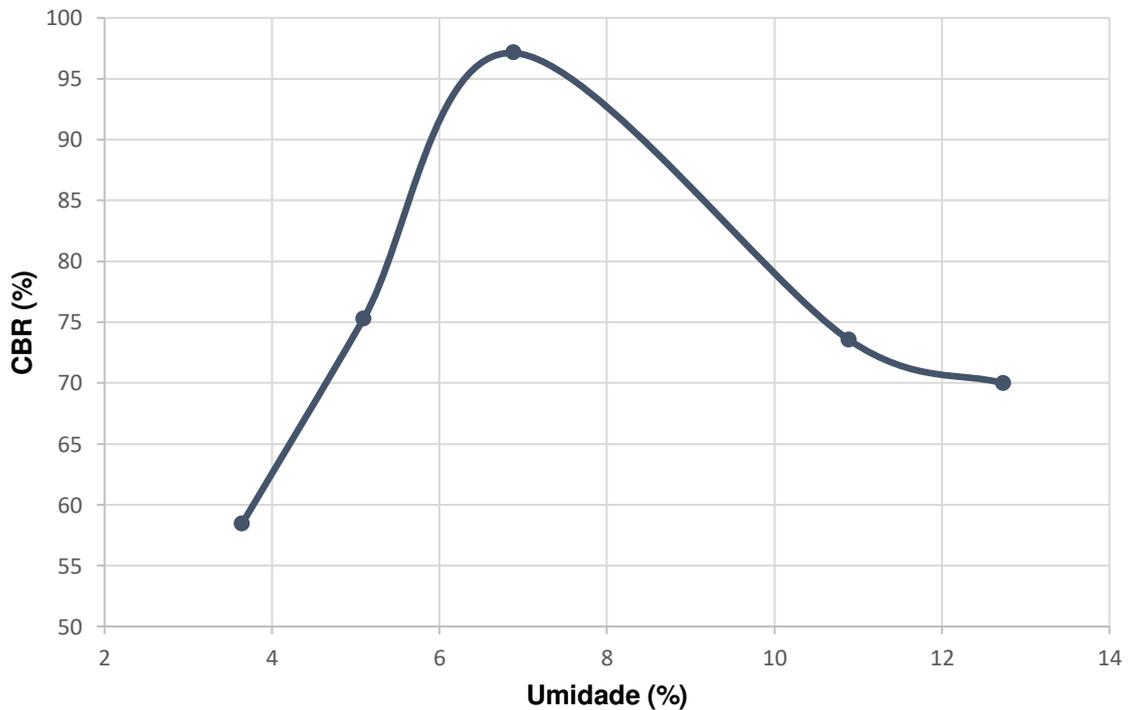
E, por fim, os valores apresentados pela mistura R55S45, estão relatados na Tabela 28 e Gráfico 18:

Tabela 28 - Resultado do ensaio de CBR para a mistura R55S45.

Ponto de compactação	Umidade (%)	Expansão (%)	CBR (%)
1	3,6	0,035	58,
2	5,1	0,034	75
3	6,9	0,017	97
4	10,9	0,009	74
5	12,7	0,000	70

Fonte: Autora (2018)

Gráfico 18 - Curva de CBR para a mistura R55S45.



Fonte: Autora (2018)

A umidade ótima para esta mistura é de 6,8%, logo o CBR equivalente a este valor, é de 97% e a expansão 0,017%.

Para uma melhor análise, a Tabela 29 retrata uma comparação entre os resultados obtidos pelo ensaio de CBR para as quatro amostras analisadas:

Tabela 29 - Comparação dos resultados do ensaio de CBR entre as amostras estudadas.

<b>Amostra</b>	<b>Expansão (%)</b>	<b>CBR (%)</b>
Solo	0,105	28
Mistura R85S15	0,000	44
Mistura R70S30	0,008	64
Mistura R55S45	0,017	97

Fonte: Autora (2018)

O solo apresentou uma expansão de 0,105%, entretanto, este valor diminuiu na presença do agregado reciclado associado ao solo natural. Assim, conforme verificado na tabela 29, quanto maior o percentual de RCV-R na mistura, menor a expansão desta, visto que a expansibilidade destes materiais é nula, como comprovado por TRICHÊS e KRYCKYKJ (1999), através de um estudo desenvolvido em Florianópolis.

Outra característica a ser analisada, é o aumento de CBR ocorrido nas diferentes proporções adotadas. A mistura com melhor desempenho mecânico foi a R55S45, cujo percentual de RCV-R é 55% e 45% de solo, a qual obteve um CBR de 97%, o que pode ser explicado pela maior massa específica aparente seca em relação às demais (1,87 g/cm<sup>3</sup>), garantindo o melhor preenchimento de vazios dos agregados reciclados sem impedir a participação destes no aumento da capacidade de suporte da mistura.

Para execução de camadas de sub-base e base, utilizando a energia de compactação intermediária, a NBR 15115 (ABNT, 2004) recomenda que os materiais a serem empregados possuam CBR  $\geq 20\%$ , expansão  $\leq 1,0\%$  e CBR  $\geq 60\%$ , expansão  $\leq 0,5\%$ , respectivamente. Portanto, os resultados para o CBR e expansão encontrados (Tabela 29), demonstraram-se consideravelmente satisfatórios, podendo utilizar a mistura R85S15 em camadas de sub-base e as misturas R70S30, R55S45, em base.

Realizou-se uma comparação dos valores encontrados nesta pesquisa para a melhor mistura com os determinados por REDIVO (2011) para uma proporção semelhante e com a utilização dos RCV-R sem a incorporação de solo (Tabela 30):

Tabela 30 - Comparação dos valores encontrados para o ensaio de CBR.

<b>Autor</b>	<b>Amostra</b>	<b>CBR (%)</b>
<b>REDIVO (2011)</b>	Solo	7
	Mistura R50S50	32
<b>Esta pesquisa (2018)</b>	Solo	28
	Mistura R55S45	97
<b>RIBEIRO et al. (2002)</b>	RCV-R	42

Fonte: Adaptado de REDIVO (2011), RIBEIRO et al. (2002)

O valor de CBR encontrado, por REDIVO (2011), para o solo é bem inferior ao determinado nesta pesquisa, o que influenciou no resultado do índice de suporte da mistura, na qual o mesmo utilizou os agregados reciclados provenientes apenas de telhas. RIBEIRO et al. (2002), por sua vez, analisou os RCV-R em geral e obteve um CBR de 42%. Observa-se, portanto, que em relação ao limite do CBR fixado pela norma, há possibilidade de aplicação do RCV-R como material constituinte na camada de sub-base.

## 5 CONCLUSÃO

A pesquisa em questão, teve como intuito, analisar a viabilidade de utilização dos agregados reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas em mistura com solo, como materiais alternativos às camadas estruturais da pavimentação, sendo estas: base, sub-base ou reforço do subleito. Para isto, as verificações das propriedades destes materiais foram embasadas nas especificações determinadas pela NBR 15115 (ABNT, 2004).

A partir do estudo desenvolvido, puderam-se chegar às seguintes conclusões:

- Visto que o agregado reciclado por si só não atende as especificações em termos de granulometria, foi misturado com solo nas proporções de 15%, 30% e 45%. Deste modo, foram atendidas além das exigências de coeficiente de uniformidade, a forma da curva granulométrica e os percentuais passantes na peneira N<sup>o</sup> 40. Pode-se afirmar que a mistura R85S15 apresentou uma curva aberta e a mistura R55S45 uma curva descontínua, ao invés de bem graduada, únicos pontos fora do que a norma preceitua;
- Observou-se que, mesmo após a quebra dos agregados durante o processo de compactação, as especificações granulométricas determinadas na NBR 15115 (ABNT, 2004) continuaram sendo atendidas. A degradação do material cerâmico, como comprovado, é diretamente proporcional à quantidade de agregado reciclado presente na mistura;
- No que diz respeito aos valores encontrados para os parâmetros de CBR e expansão, cuja energia de compactação adotada foi intermediária, de acordo com a norma NBR 15115 (ABNT, 2004), habilitam a mistura R85S15 para utilização na execução de sub-base e as misturas R70S30 e R55S45, na base, ambas considerando vias de tráfego com  $N \leq 10^6$ , devido a exigência disposta em norma;
- Dentre as proporções analisadas, a que obteve uma melhor capacidade de suporte foi a R55S45, na qual a porcentagem de solo (45%), praticamente se equipara à de agregado (55%), refletindo em um maior ajuste dos grãos e, por conseguinte, uma melhor compactação;

- A mistura R55S45 poderia ser utilizada em camadas de base para vias de tráfego pesado, cujo  $N \geq 5 \times 10^6$ , visto que o CBR obtido foi 97%, portanto  $CBR \geq 80\%$ , conforme recomendado pelo DNIT (2006) para pavimentos flexíveis, entretanto, a norma que regulamenta o emprego dos agregados reciclados para fins de pavimentação, permite o uso destes apenas em vias de tráfego leve.

De forma geral, os resultados deste trabalho demonstraram a viabilidade de utilização dos materiais estudados em camadas estruturais do pavimento para a realidade de São Luís - MA.

### **5.1 Recomendações para pesquisas futuras**

De acordo com os resultados analisados e com objetivo de buscar melhorias para uma ampliação da utilização destes agregados reciclados, são feitas algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Análise da viabilidade econômica para emprego destes agregados, considerando todo o processo: desde a implantação das usinas de reciclagem até a aplicação do material nas camadas de pavimentação e por fim, realizar uma comparação em relação ao uso de agregados convencionais;
- Executar um trecho experimental utilizando as misturas estudadas, no qual seja possível realizar o monitoramento e análise do comportamento deste pavimento no decorrer do tempo;
- Utilizar outros ensaios mais modernos e adequados encontrados nos trabalhos de vários pesquisadores, como: Módulo de Resiliência, Resistência à Compressão Simples e Resistência à Tração por Compressão Diametral.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, Enio Fernandes. **Viabilidade técnica econômica de misturas de Solo-RCD em camadas de base de pavimentos urbanos. Estudo de caso: município de Campo Verde – MT.** 2013. 151f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Informações Técnicas – Definições e classificação.** 2016. Disponível em: <<https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>>. Acesso em: 07 abr. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil.** 2016. Disponível em: <[http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_apresentacao.cfm](http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm)>. Acesso em: 02 abr. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459:** Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 6954:** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180:** Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 15112:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterro – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015 – A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil.** 2015. Disponível em: <[http://abrecon.org.br/pesquisa\\_setorial/](http://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/)>. Acesso em: 03 abr. 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. **Dados do setor de Indústria Cerâmica.** 2008. Disponível em: <<http://anicer.com.br/setor/>>. Acesso em: 01 abr. 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica:** materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BALDO, João Baptista; COSTA, Juzélia Santos da; MARTINS, Celso Aparecido. Concretos não estruturais utilizando agregados obtidos na indústria de Cerâmica Vermelha. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA**, Curitiba, 2004. 48º CBC. São Paulo: ABC, 2004. 10f.

BASTOS, Gustavo David Almeida; CERRI, José Alberto. Avaliação do desempenho de argamassa de assentamento e revestimento produzidas com resíduos de construção. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA**, Curitiba, 2004. 48º CBC. São Paulo: ABC, 2004.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão (Coordenador). **Materiais de Construção 2.** 5ª. Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2008. 538f.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro. PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BEZERRA, Jonas; LAFAYETTE, Kalinny; MACEDO, Thaísa. Comportamento de agregados reciclados para fins geotécnicos. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 2014, Maceió. XV Encontro.

BLUMENSCHHEIN, Raquel Nunes. **Manual técnico: Gestão de resíduos sólidos em canteiros de obras.** Brasília: SEBRAE/DF, 2007. 48f. Disponível em: <<http://www.biblioteca.sebrae.com.br/>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº. 01, de 23 de janeiro de 1986. Brasília. **Diário Oficial da União**, de 23 de janeiro de 1986, seção I, p. 2548-2549.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº. 307, de 05 de julho de 2002. Brasília. **Diário Oficial da União**, de 30 de agosto de 2002, seção I, p. 95-96.

BRASILEIRO, Luzana Leite. **Utilização de agregados reciclados provenientes de RCD em substituição ao agregado natural do concreto asfáltico**. 2013. 118f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2013.

CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 280f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CASTRO, Cristina Xavier de. **Gestão de resíduos na construção civil**. 2012. 54f. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 6ª edição, 1996.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília, 2017. 160p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial**. Brasília, 2017. 403p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006a.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 054/97**: Equivalente de Areia. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 035/98**: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 081/98**: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ES 141/2010**: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ME 172/2016**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

DIAS, João Fernando. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. 2004. 268f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

E-CIVIL. Pavimentos semirrígido. Disponível em: <<http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-pavimento-semi-rigido.html>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO DISTRITO FEDERAL. **Construção civil representa 6,2% do PIB Brasil**, 2017. Disponível em: <<https://www.sistemafibra.org.br/fibra/sala-de-imprensa/noticias/1315-construcao-civil-representa-6-2-do-pib-brasil>>. Acesso em: 28 nov. 2017.

FERNANDES, Graziella Quint. **Resíduos de construção e demolição: uma abordagem do assunto e a situação do município de Florianópolis**. 2018. 25f. Artigo (Especialização em MBA em Gestão de Obras e Projetos) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

FERREIRA, Thiago Coelho. **Aproveitamento de resíduos sólidos da construção civil na pavimentação em São Luís – MA**. 2010. 74f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2010.

FRAZÃO, Ely Borges. **Tecnologia de rochas na construção civil**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Anual Industrial**. 2011. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/industria/9044-pesquisa-industrial-anual-produto.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 07 abr. 2018.

LEITE, Fabiana da Conceição. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-Base de pavimentos**. 2007. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2007.

LEVY, Salomon Mony. **Reciclagem do entulho de construção civil para utilização como agregado de argamassas e concretos**. 1997. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Notas de aula da disciplina de Pavimentação**. Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2018.

MENDES, Claudiceia Silva. **Diagnóstico do aproveitamento dos resíduos da construção civil em São Luís, MA**. 2014. 109f. Dissertação (Mestrado em Energia e Ambiente) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2014.

MORAND, Fernanda Guerra. **Estudo das principais aplicações dos resíduos de obra como materiais de construção**. 2016. 104f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MOTTA, Rosângela dos Santos. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NAGALLI, André. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

OLIVEIRA, João Carlos de. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis**. 2007. 167f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

PAIXÃO, Monique Paixão. Pavimentos semirrígidos: prevenção e tratamento da reflexão de trincas. **Seminário estudantil de produção acadêmica (SEPA)**, Salvador; v.16, p. 139-140, 2017.

PINTO, Carlos de Souza. Curso **Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247p.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PREFEITURA DE SÃO LUÍS. Ecopontos criados pela Prefeitura de São Luís fomentam cadeia produtiva de resíduos. Disponível em: <<http://www.agenciasaoluis.com.br/noticia/18652/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

REDIVO, Israel Maccari. **Utilização de resíduo de cerâmica vermelha em misturas como solo para construção de camadas de pavimento com baixo volume de tráfego**. 2011. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RIBEIRO, F.; SERRA, N.G. da S.; REZENDE, L. R. de R.; GUIMARÃES, R. C. Utilização de entulho da construção civil em pavimentos flexíveis. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 11., Porto Alegre, 2002. **Anais**. Rio de Janeiro: ABPv, 2002.

SANTOS, Eder Carlos Guedes dos Santos. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 168f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SCHNEIDER, Dan Moche. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. 2003. 131f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SCHNEIDER, Dan Moche, Philippi Jr, A. (2004). **Gestão pública de resíduos da construção civil no município de São Paulo**. Revista Ambiente Construído, 4, 21-32.

SENAI. **Gestão de resíduos na construção civil: Redução, Reutilização e Reciclagem**. Departamentos Regionais do SENAI da Bahia, Ceará, Pernambuco e Sergipe, 2005.

SENÇO, Wlastermiller de. 1929. **Manual de técnicas de pavimentação**: volume 1 /Wlastermiller de Senço. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, Alex Fabiane Fares da. **Gerenciamento de resíduos da construção civil de acordo com a resolução Conama nº 307/02 – estudo de caso para um conjunto de obras de pequeno porte**. 2007. 117f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2007.

SILVA, Patrícia Barboza da. **Estabilização de misturas de resíduos sólidos de demolição e da indústria cerâmica para uso em camadas de pavimentos viários**. 2014. 172f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SILVA, V. C. **Estudo da aplicação de resíduos da construção e demolição da Universidade Federal de Campina Grande em pavimentos**. 2012. 104f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2012.

SINDUSCON – SP. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil**. São Paulo, 2015. 149 f.

SOUZA, Amanda Oliveira de. **Aproveitamento de agregados reciclados da construção civil de São Luís – MA em camadas de pavimentação**. 2015. 96f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2015.

SOUZA, Ioneide Nunes Carvalho. Impactos causados pelos resíduos procedentes da construção civil e demolição: uma análise conceitual dos procedimentos para minimizá-los. **Revista Científica Semana Acadêmica**, Fortaleza, v.01, n.108, f. 1-13, 2017.

TRICHÊS, G.; KRYCKYJ, P. R. Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., São José dos Campos, 1999. **Anais**. São Paulo: ABMS, 1999, f.259-265.

## APÊNDICE A – ÍNDICE DE FORMA

Tabela 31 - Resultado Índice de Forma.

Nº	a	b	c	b/a	c/b	Nº	a	b	c	b/a	c/b
1	70,52	43,57	32,38	0,618	0,743	42	46,12	39,59	24,03	0,858	0,607
2	47,88	40,56	25,76	0,847	0,635	43	56,53	40,38	23,67	0,714	0,586
3	55,49	49,66	23,27	0,895	0,469	44	51,44	36,32	23,35	0,706	0,643
4	62,25	43,64	30,61	0,701	0,701	45	50,29	37,44	34,22	0,744	0,914
5	62,20	52,36	21,75	0,842	0,415	46	44,29	41,37	23,25	0,934	0,562
6	57,85	41,21	22,57	0,712	0,548	47	40,61	35,76	31,53	0,881	0,882
7	65,90	59,22	22,97	0,899	0,388	48	55,48	36,64	23,61	0,660	0,644
8	57,70	53,51	23,05	0,927	0,431	49	64,62	44,80	21,12	0,693	0,471
9	59,07	42,58	38,74	0,721	0,910	50	57,97	29,12	22,25	0,502	0,764
10	44,57	42,22	34,86	0,947	0,826	51	60,84	45,13	35,31	0,742	0,782
11	63,19	40,73	21,24	0,645	0,521	52	50,55	43,11	22,19	0,853	0,515
12	68,41	46,49	23,51	0,680	0,506	53	46,79	30,07	21,62	0,643	0,719
13	42,28	38,74	27,31	0,916	0,705	54	41,39	36,72	27,46	0,887	0,748
14	66,26	49,75	23,76	0,751	0,478	55	54,66	42,56	22,47	0,779	0,528
15	53,73	43,62	24,35	0,812	0,558	56	58,68	33,66	30,35	0,574	0,902
16	49,58	40,60	33,16	0,819	0,817	57	52,89	43,86	22,52	0,829	0,513
17	51,25	47,47	29,45	0,926	0,620	58	43,74	37,02	24,26	0,846	0,655
18	53,56	43,14	26,77	0,805	0,621	59	55,10	38,54	27,50	0,699	0,714
19	47,45	46,53	25,76	0,981	0,554	60	50,23	41,95	26,61	0,835	0,634
20	44,68	44,34	26,81	0,992	0,605	61	48,07	36,97	35,41	0,769	0,958
21	65,85	43,90	33,27	0,667	0,758	62	49,75	41,37	23,02	0,832	0,556
22	51,48	44,74	31,59	0,869	0,706	63	51,89	24,47	23,49	0,472	0,960
23	51,91	46,83	40,17	0,902	0,858	64	48,61	32,53	26,23	0,669	0,806
24	60,72	42,37	34,69	0,698	0,819	65	52,66	36,11	27,24	0,686	0,754
25	53,61	42,62	23,08	0,795	0,542	66	53,79	39,04	23,58	0,726	0,604
26	60,40	41,89	34,75	0,694	0,830	67	47,10	42,41	23,74	0,900	0,560
27	49,17	46,29	24,19	0,941	0,523	68	42,29	31,55	26,14	0,746	0,829
28	47,52	39,87	33,26	0,839	0,834	69	49,53	30,34	27,97	0,613	0,922
29	53,38	49,54	37,76	0,928	0,762	70	42,45	36,42	30,87	0,858	0,848
30	59,03	41,03	30,85	0,695	0,752	71	50,26	36,70	25,38	0,730	0,692
31	59,36	42,76	24,41	0,720	0,571	72	45,91	37,95	31,87	0,827	0,840
32	64,20	56,48	22,80	0,880	0,404	73	57,26	43,08	20,75	0,752	0,482
33	49,07	37,10	28,64	0,756	0,772	74	41,23	34,62	23,83	0,840	0,688
34	57,30	50,88	27,35	0,888	0,538	75	57,05	36,79	22,12	0,645	0,601
35	45,65	35,89	23,29	0,786	0,649	76	40,55	39,38	27,74	0,971	0,704
36	67,49	48,38	31,15	0,717	0,644	77	51,75	45,92	23,76	0,887	0,517
37	58,36	51,65	23,39	0,885	0,453	78	64,67	35,26	26,74	0,545	0,758
38	49,78	47,31	34,73	0,950	0,734	79	49,10	37,82	28,33	0,770	0,749
39	49,59	49,21	23,24	0,992	0,472	80	42,53	37,90	25,31	0,891	0,668
40	60,11	53,61	22,57	0,892	0,421	81	53,73	44,78	21,72	0,833	0,485
41	58,28	41,02	23,38	0,704	0,570	82	48,21	36,33	31,12	0,754	0,857

Tabela 28 - Resultado Índice de Forma

<b>Nº</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>b/a</b>	<b>c/b</b>	<b>Nº</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>b/a</b>	<b>c/b</b>
<b>83</b>	48,25	38,47	29,46	0,797	0,766	<b>125</b>	41,74	37,48	21,45	0,898	0,572
<b>84</b>	46,98	39,80	24,32	0,847	0,611	<b>126</b>	45,54	29,13	23,84	0,640	0,818
<b>85</b>	52,55	39,89	24,33	0,759	0,610	<b>127</b>	47,85	33,81	30,84	0,707	0,912
<b>86</b>	60,31	43,64	26,29	0,724	0,602	<b>128</b>	46,71	24,95	24,14	0,534	0,968
<b>87</b>	43,72	39,48	26,42	0,903	0,669	<b>129</b>	42,76	30,53	25,78	0,714	0,844
<b>88</b>	44,74	38,93	25,91	0,870	0,666	<b>130</b>	36,27	32,71	26,07	0,902	0,797
<b>89</b>	45,98	35,06	24,29	0,763	0,693	<b>131</b>	42,84	28,11	22,56	0,656	0,803
<b>90</b>	42,14	38,83	24,51	0,921	0,631	<b>132</b>	39,89	35,52	23,11	0,890	0,651
<b>91</b>	43,37	38,85	25,14	0,896	0,647	<b>133</b>	42,49	31,78	23,86	0,748	0,751
<b>92</b>	39,65	37,51	23,51	0,946	0,627	<b>134</b>	43,11	26,97	22,38	0,626	0,830
<b>93</b>	42,06	34,01	27,23	0,809	0,801	<b>135</b>	38,49	26,28	25,20	0,683	0,959
<b>94</b>	47,87	37,01	24,00	0,773	0,648	<b>136</b>	40,80	26,99	24,88	0,662	0,922
<b>95</b>	42,74	38,79	22,56	0,908	0,582	<b>137</b>	38,68	32,45	24,02	0,839	0,740
<b>96</b>	49,44	32,46	31,74	0,657	0,978	<b>138</b>	32,91	31,27	24,44	0,950	0,782
<b>97</b>	42,72	37,25	23,37	0,872	0,627	<b>139</b>	37,82	32,83	30,67	0,868	0,934
<b>98</b>	46,76	29,08	23,39	0,622	0,804	<b>140</b>	36,71	33,46	26,39	0,911	0,789
<b>99</b>	57,89	34,08	23,79	0,589	0,698	<b>141</b>	53,87	25,29	24,82	0,469	0,981
<b>100</b>	41,68	40,08	25,21	0,962	0,629	<b>142</b>	36,79	33,19	25,44	0,902	0,766
<b>101</b>	46,36	29,73	23,06	0,641	0,776	<b>143</b>	47,95	37,42	21,25	0,780	0,568
<b>102</b>	47,75	41,07	22,88	0,860	0,557	<b>144</b>	37,06	31,04	28,65	0,838	0,923
<b>103</b>	38,68	31,78	22,83	0,822	0,718	<b>145</b>	41,63	40,95	24,74	0,984	0,604
<b>104</b>	42,69	42,08	29,87	0,986	0,710	<b>146</b>	38,73	31,88	25,09	0,823	0,787
<b>105</b>	47,84	32,32	20,33	0,676	0,629	<b>147</b>	47,44	28,44	20,76	0,599	0,730
<b>106</b>	39,30	37,36	25,44	0,951	0,681	<b>148</b>	38,04	27,51	23,28	0,723	0,846
<b>107</b>	44,22	31,69	25,27	0,717	0,797	<b>149</b>	38,75	31,77	23,81	0,820	0,749
<b>108</b>	39,41	30,64	23,10	0,777	0,754	<b>150</b>	31,01	30,07	26,09	0,970	0,868
<b>109</b>	43,32	26,54	24,99	0,613	0,942	<b>151</b>	44,37	27,36	26,36	0,617	0,963
<b>110</b>	47,75	31,02	22,16	0,650	0,714	<b>152</b>	39,06	30,35	28,51	0,777	0,939
<b>111</b>	51,34	26,61	22,71	0,518	0,853	<b>153</b>	41,72	32,87	30,26	0,788	0,921
<b>112</b>	42,90	33,03	20,51	0,770	0,621	<b>154</b>	39,77	35,70	22,98	0,898	0,644
<b>113</b>	66,38	36,44	24,35	0,549	0,668	<b>155</b>	31,54	26,89	24,76	0,853	0,921
<b>114</b>	46,51	42,68	23,68	0,918	0,555	<b>156</b>	36,82	24,48	23,88	0,665	0,975
<b>115</b>	47,32	28,87	23,87	0,610	0,827	<b>157</b>	35,95	31,74	22,88	0,883	0,721
<b>116</b>	52,81	28,05	23,96	0,531	0,854	<b>158</b>	37,58	34,04	23,92	0,906	0,703
<b>117</b>	44,11	37,65	22,85	0,854	0,607	<b>159</b>	47,68	44,13	22,59	0,926	0,512
<b>118</b>	44,25	32,92	27,19	0,744	0,826	<b>160</b>	41,00	36,51	25,92	0,890	0,710
<b>119</b>	46,92	27,19	25,19	0,579	0,926	<b>161</b>	33,73	33,61	21,57	0,996	0,642
<b>120</b>	35,30	33,90	22,31	0,960	0,658	<b>162</b>	33,26	30,75	22,08	0,925	0,718
<b>121</b>	37,71	28,60	22,73	0,758	0,795	<b>163</b>	34,91	26,93	24,53	0,771	0,911
<b>122</b>	45,57	25,57	23,91	0,561	0,935	<b>164</b>	37,22	30,70	22,97	0,825	0,748
<b>123</b>	60,70	41,61	20,77	0,686	0,499	<b>165</b>	49,38	28,74	23,61	0,582	0,822
<b>124</b>	38,71	31,15	24,90	0,805	0,799	<b>166</b>	41,92	30,63	23,27	0,731	0,760

Tabela 28 - Resultado Índice de Forma

Nº	a	b	c	b/a	c/b	Nº	a	b	c	b/a	c/b
167	43,02	33,74	21,53	0,784	0,638	184	39,19	26,73	26,04	0,682	0,974
168	33,98	29,18	25,19	0,859	0,863	185	33,24	31,98	22,29	0,962	0,697
169	41,47	38,51	21,73	0,929	0,564	186	40,22	24,34	23,67	0,605	0,972
170	39,66	33,50	30,87	0,845	0,921	187	39,37	28,01	26,93	0,711	0,961
171	33,88	30,74	23,75	0,907	0,773	188	32,44	26,21	21,07	0,808	0,804
172	37,00	26,06	25,06	0,704	0,962	189	34,04	31,66	22,77	0,930	0,719
173	38,72	34,37	23,90	0,888	0,695	190	40,30	24,95	23,92	0,619	0,959
174	38,28	25,74	22,59	0,672	0,878	191	41,24	26,61	19,18	0,645	0,721
175	39,43	38,86	34,21	0,986	0,880	192	38,76	28,70	21,26	0,740	0,741
176	39,90	31,34	28,21	0,785	0,900	193	36,27	26,48	18,97	0,730	0,716
177	39,27	28,50	23,18	0,726	0,813	194	32,25	25,99	25,40	0,806	0,977
178	39,41	30,62	21,12	0,777	0,690	195	37,45	25,97	21,02	0,693	0,809
179	46,32	37,02	22,01	0,799	0,595	196	35,29	28,44	21,25	0,806	0,747
180	44,59	35,05	25,49	0,786	0,727	197	34,41	28,34	20,05	0,824	0,707
181	35,95	33,92	22,46	0,944	0,662	198	33,87	29,17	22,57	0,861	0,774
182	29,69	28,97	22,58	0,976	0,779	199	34,27	28,39	22,82	0,828	0,804
183	34,42	31,00	27,09	0,901	0,874	200	28,84	27,02	26,22	0,937	0,970

**Média b/a = 0,79**

**Média c/b = 0,73**

Fonte: Autora (2018)