

**JULIANA YURI TAMURA**

**Análise de misturas solo-agregado reciclados de resíduos sólidos da construção civil, para fins de pavimentação de vias urbanas de baixo volume de tráfego**

**Juliana Yuri Tamura**

**Análise de misturas solo-agregado reciclados de resíduos sólidos da construção civil,  
para fins de pavimentação de vias urbanas de baixo volume de tráfego**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: José Bento Ferreira

T159a	<p>Tamura, Juliana Yuri</p> <p>Análise de misturas solo-agregado reciclados de resíduos sólidos da construção civil, para fins de pavimentação de vias urbanas de baixo volume de tráfego / Juliana Yuri Tamura – Guaratinguetá, 2015. 74 f. : il.</p> <p>Bibliografia : f. 70-74</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. José Bento Ferreira</p> <p>1. Pavimentos 2. Solos – Agregação 3. Resíduos sólidos I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 625.8</p>
-------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Juliana Yuri Tamura**


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

  
Prof. GEORGE DE PAULA BERNARDES  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. JOSÉ BENTO FERREIRA  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. PAULO VALLADARES SOARES  
UNESP-FEG

  
Eng.ª LETÍCIA ZANON CARVALHO  
Membro Externo

Agosto de 2015

Dedico este trabalho à todos os meus familiares, amigos e colegas de trabalho que me apoiaram e acreditaram que eu chegaria tão longe.

“Para realizar grandes conquistas, devemos não apenas agir, mas também sonhar, não apenas planejar, mas também acreditar.”

Anatole France

TAMURA, J. Y. **Análise de misturas solo-agregado reciclados de resíduos sólidos da construção civil, para fins de pavimentação de vias urbanas de baixo volume de tráfego.** 2015. 74 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

## **RESUMO**

Neste trabalho aborda-se a continuação da pesquisa de Iniciação Científica iniciada por Tamura (2012), onde se elabora uma análise de mistura solo-agregado RCD (Resíduos Sólidos da Construção e Demolição de Obras Civas) para pavimentação de estradas de baixo volume de tráfego utilizando-se de materiais locais da região do Vale do Paraíba. As principais etapas do processo foram a caracterização do solo e do agregado reciclado, os ensaios de granulometria e de Índice de Suporte Califórnia (CBR) aplicados no solo, no agregado reciclado e na mistura solo-agregado reciclado; visando o seu uso como base e sub-base na pavimentação de vias urbanas. Discute-se seus resultados, dando ênfase no seu comportamento mecânico. Compara-se os resultados atuais com os resultados da pesquisa de IC de Tamura (2012), tomando-se decisões ao longo deste trabalho para o melhor resultado do produto final. Para um maior entendimento do trabalho em geral foram descritas a pavimentação, sua estrutura, seus componentes e seu comportamento físico. Tem-se como objetivo ressaltar a importância da mistura solo-agregado reciclado visando atender as exigências de qualidade e o atendimento às especificações das normas técnicas vigentes, num contexto de durabilidade, economia de materiais naturais, diminuição do volume em aterros sanitários e redução de custo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mistura solo-agregado. RCD. Base e sub-base. Pavimentação.

**TAMURA, J. Y. Soil-aggregate mixtures analysis of recycled construction solid waste for urban Road paving purposes of low traffic volume.** 2015. 74 f. Graduate Work (Graduation in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

### **ABSTRACT**

This work deals with the continuation of Scientific Initiation research initiated by Tamura (2012), which draws up a mixture of soil and recycled aggregate analysis for paving of low traffic volume roads using local materials from the Vale do Paraíba region. The main steps of the process were the soil and recycled aggregate characterization, along with grading tests and California Bearing Ratio (CBR) applied to the soil, the recycled aggregate and the mixture of soil and recycled aggregate; aiming their use as base and sub-base in paving urban roads. The results are discussed, emphasizing the mechanical behavior. The current results are compared with the results of IC Tamura research, taking decisions over this job to the final product best result. For a greater understanding of the work in general were described paving, its structure, its components and its physical behavior. It has been intended to emphasize the importance of the mixture of soil and recycled aggregate to meet the quality requirements and compliance with the specifications of current technical standards, in the context of durability, natural materials economy, decreases volume in landfills and cost reduction.

**KEYWORDS:** Mixture of soil and recycled aggregate. Base and sub-base. Paving.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transferência de carga através da estrutura de pavimento.....	16
Figura 2 - Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e tensões solicitantes.....	16
Figura 3 – Classificação MCT.....	25
Figura 4 – Ilustração da análise do peneiramento.....	27
Figura 5 – Molde cilíndrico montado para CBR.....	29
Figura 6 – Corpo-de-prova em imersão na água. Data.....	29
Figura 7 – Ensaio de penetração de CBR.....	30
Figura 8. Localização da região do Vale do Paraíba, SP.....	31
Figura 9 – Posições geográficas das principais serras da região sudeste do Brasil.....	32
Figura 10 - Imagem ilustrativa de Graben e Horst.....	33
Figura 11 – Mapa de solos simplificado do Vale do Paraíba do Sul.....	34
Figura 12 - Local de coleta da amostra 1.....	38
Figura 13 - Local de coleta da amostra 2.....	38
Figura 14 - Local de coleta da amostra 3 (bairro Santa Luzia.....	39
Figura 15 - Local de coleta da amostra 4 (bairro São Manoel).....	39
Figura 16 - Local de coleta da amostra 5 (bairro Novo Horizonte).....	40
Figura 17 - Local de coleta da amostra 6 (bairro Brisas do Campo).....	40
Figura 18. Local de coleta da amostra 7 (FEG/UNESP).....	40
Figura 19. Material indesejado, separado dos resíduos sólidos de construção.....	41
Figura 20 - Vista geral do equipamento.....	42
Figura 21 - Detalhe do setor primário da máquina.....	42
Figura 22 - Detalhe do setor secundário do equipamento.....	42
Figura 23 - Detalhe geral do setor secundário do equipamento e os depósitos de materiais produzidos.....	43
Figura 24 – Caçamba de lixo separado dos resíduos da construção civil.....	44
Figura 25 – Setor primário de peneiramento e trituração da usina RCC.....	44
Figura 26 – Setor secundário de peneiramento e trituração da usina RCC.....	45
Figura 27 – Depósito de britas recicladas da usina RCC.....	45
Figura 28 – Depósito de areia reciclada da usina RCC.....	45
Figura 29 - Plasticidade das amostras.....	47
Figura 30 - Classificação MCT-M das amostras de solo.....	48
Figura 31 - Composição física da brita nº 1 coletada na usina PMG.....	52

Figura 32 - Composição física da brita nº 2 coletada na usina RCC.....	53
Figura 33 – Material fino da brita nº 1 reciclada .....	53
Figura 34 - Material cerâmico da brita nº 1 reciclada.....	53
Figura 35 – Concreto e argamassa da brita nº 1 reciclada.....	54
Figura 36 - Revestimentos da brita nº 1 reciclada.....	54
Figura 37 – Materiais asfálticos da brita nº 1 reciclada.....	54
Figura 38 - Britas da brita nº 1 reciclada.....	54
Figura 39 - Seixos rolados da brita nº 1 reciclada.....	54
Figura 40 – Material fino da brita nº 2 reciclada.....	55
Figura 41 – Concreto e argamassa da brita nº 2 reciclada.....	55
Figura 42 – Gesso, brita, cerâmica, material asfáltico e revestimento da brita nº 2 reciclada.....	55
Figura 43 - Curva granulométrica dos agregados RCD (brita 1 e brita 2), coletados nas usinas PMG e RCC, respectivamente.....	56
Figura 44 - Faixas granulométricas I, II, III, IV e V da Especificação DER ET-DE-P00/006, e curva granulométrica do agregado RCD.....	57
Figura 45 - Comparativo granulométrico antes e após compactação nas energias intermediária e modificada para a brita nº 1.....	57
Figura 46 - Comparativo granulométrico antes e após compactação nas energias intermediária e modificada para a brita nº 2.....	58
Figura 47 - Curvas de distribuição granulométrica das amostras de solos.....	60
Figura 48 - Curvas de distribuição granulométrica das Misturas A e B e limites da faixa II da Especificação DER ET-DE-P00/006.....	61
Figura 49 - Curvas de distribuição granulométrica da Mistura C e limites da faixa II da Especificação DER ET-DE-P00/006.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de Rochas comumente usados como fonte de agregados para pavimentação no país.....	19
Tabela 2 – Classificação de Rochas quanto ao teor de sílica presente.....	20
Tabela 3 – Emprego recomendado de solos tropicais em obras viárias.....	26
Tabela 4 – Dimensões Nominais das Peneiras.....	28
Tabela 5. Locais de coleta das amostras de solo.....	37
Tabela 6. Resultados da caracterização geotécnica básica.....	46
Tabela 7 - Parâmetros classificatórios MCT e classificações MCT-M das amostras.....	48
Tabela 8 – Resultados de ensaios de compactação, massa específica real das partículas sólidas e equivalente de areia.....	49
Tabela 9 – Resultados da verificação do atendimento às condições estabelecidas pelas inequações constantes na Condição A, da Especificação Técnica (ET-DE-P00/006).....	49
Tabela 10. Resultados de ensaios de compactação e capacidade de suporte CBR.....	51
Tabela 11 - Valores obtidos e limites fixados pela NBR 15115 (2004) com relação à graduação.....	56
Tabela 12. Valores obtidos e limites fixados pela NBR-15115 (2004) com relação à graduação.....	58
Tabela 13 - Índice de degradação de Ruiz.....	59
Tabela 14 - Resultados de ensaios de compactação das misturas A, B e C.....	62
Tabela 15 - Variação das massas dos corpos de prova, durante o processo de cura.....	63
Tabela 16 - Resultados do ensaio do Índice de Suporte Califórnia.....	63
Tabela 17 - Expansões medidas nos ensaios de Índice de Suporte Califórnia.....	64
Tabela 18 - Resultados de ensaios de compactação e CBR, extraídos de Hotergal et al (2009) .....	66
Tabela 19 – Resultados de CBR e Expansão, extraídos de Santos e Matté (2014).....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBR	California Bearing Ratio
CH	Cambissolo Háplico
CX	Cambissolo Húmico
DER-SC	Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Método de Ensaio
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E	Espodossolo
EA	Equivalente de Areia
ET-DE	Especificação Técnica da Diretoria de Engenharia
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
GM	Gleissolo Melânico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Iniciação Científica
ID	Índice de Degradação Ruiz
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISC	Índice de Suporte de Califórnia
LV	Latossolo Vermelho
LVA	Latossolo Vermelho Amarelo
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MRS	Malha Regional Sudeste da Rede Ferroviária Federal
NBR	Norma Brasileira
NR	Não Recomendado
PI	Proctor Intermediário
PM	Proctor Modificado
PMG	Prefeitura Municipal de Guaratinguetá (Usina de Reciclagem)
PVA	Argissolo Vermelho Amarelo
RCC	Usina de Reciclagem RCC de São José dos Campos
RCD	Resíduos Sólidos da Construção e Demolição de Obras Civis
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”
USGS	United States Geological Survey

## LISTA DE SÍMBOLOS

#	número de peneira
$\Delta i$	deslocamento da curva granulométrica
A	areia
A'	arenoso
CL	argila pouco plástica arenosa
Cu	coeficiente de uniformidade
G'	argiloso
IP	índice de plasticidade
L	laterítico
LA	laterítico
LL	limite de liquidez
LP	limite de plasticidade
ML	silte-argiloso de baixa compressibilidade
N	não-laterítico
N	número de peneiras
S'	siltoso
$\omega_{\text{ót}}$	umidade ótima
X	porcentagem de material passante na peneira #40 (0,42mm)
$\Delta w$	variação da umidade
$\rho_d$	massa específica aparente máxima
$\rho_s$	massa específica real das partículas sólidas
$\Sigma$	somatória

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA</b> .....	15
2.1	INTRODUÇÃO.....	15
2.2	COMPONENTES DE BASE, SUB-BASE E REFORÇO DE SUBLEITO... 17	
<b>2.2.1</b>	<b>Agregados</b> .....	17
2.2.1.1	Natureza dos Agregados.....	18
2.2.1.2	Tamanho dos agregados.....	21
<b>2.2.2</b>	<b>Agregados de Resíduos Sólidos oriundos da Construção e Demolição de Obras Civis (RCD)</b> .....	22
2.2.2.1	Agregados de Concreto Reciclado e de Resíduos de Rejeitos Urbanos.....	23
2.3	PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE BASE, SUB-BASE E REFORÇO DE SUBLEITO.....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Métodos de Seleção dos Materiais</b> .....	25
<b>2.3.2</b>	<b>Distribuição Granulométrica</b> .....	26
<b>2.3.3</b>	<b>Propriedades Mecânicas dos Materiais de Base, Sub-base e Subleito</b> .....	28
<b>3</b>	<b>LOCALIZAÇÃO E ACESSO</b> .....	31
3.1	GEOMORFOLOGIA E GEOLOGIA DO VALE DO PARAÍBA.....	32
3.2	PEDOLOGIA DO VALE DO PARAÍBA.....	34
<b>4</b>	<b>LOCAIS DE COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLOS E DE AGREGADOS REICLADOS</b> .....	37
4.1	COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	37
4.2	COLETA DAS AMOSTRAS DE AGREGADOS REICLADOS.....	41
<b>4.2.1</b>	<b>Usina de Agregado Reciclado de Guaratinguetá (Usina PMG)</b> .....	41
<b>4.2.2</b>	<b>Usina de Reciclagem RCC Ambiental Dutrafrer, de São José dos Campos (Usina RCC)</b> .....	43
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	46
5.1	SOLOS.....	46
5.2	AGREGADOS RCD.....	52
5.3	SOLO-AGREGADO RCD.....	60
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÃO SOBRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS</b> .....	66
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	69
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	70

## 1 INTRODUÇÃO

Por causa da urbanização acelerada e desenfreada das cidades do Brasil, junto com a consequente ocupação populacional, o problema de descarte de lixo tem se tornado maior. A maioria das cidades brasileiras cresceu sem ter a infraestrutura necessária para dar suporte de todo o lixo gerado. Tal fato tem ocasionado destinação clandestina de resíduos sólidos da construção e demolição de obras civis (RCD), ocasionando problemas sérios para a cidade como o assoreamento de córregos e rios, a obstrução de redes de drenagem, a proliferação de vetores de doenças, a poluição estética da paisagem urbana e dentre outros problemas ambientais.

Nos últimos anos a região do Vale do Paraíba tem aumentado o seu número de polos industriais, acarretando o aumento de habitantes nos seus municípios. Por conta desse crescimento, as prefeituras locais tem se esforçado para aumentar e melhorar a infraestrutura local. Porém, o custo desse aperfeiçoamento é muito grande para os cofres públicos, tendo como alternativas pesquisas para reduzir os custos de pavimentação. Dentre tais alternativas, o uso de resíduos sólidos da construção e demolição de obras civis (RCD) para pavimentação de estradas é um ótimo conceito que acaba por reduzir o volume de lixo e entulhos de construções civis, redução de custos para as prefeituras com material depositado clandestinamente ao longo das vias públicas, terrenos baldios, cursos d'água e encostas, ter menor custo em sua utilização como fonte de matéria-prima para pavimentação de estradas, além de maior conscientização da população sobre matéria de sustentabilidade.

Dessa forma, o emprego de misturas solo-agregado RCD é apresentado como uma, dentre outras, alternativa para a construção de base e sub-base de pavimentos com baixo volume de tráfego. Porém, para a região do Vale, há falta de estudos que utilizem mistura solo-agregado com material local.

Será abordada, neste trabalho, uma continuação da pesquisa de Iniciação Científica (IC), iniciada por Tamura (2012), onde se elabora uma análise de mistura solo-agregado RCD para pavimentação de estradas de baixo volume de tráfego.

Pesquisa esta em que foram realizados diversos ensaios para a caracterização do solo coletado na região do Vale do Paraíba e determinação das propriedades mecânicas do agregado reciclado originado da usina de reciclagem da Prefeitura Municipal de Guaratinguetá (PMG), para que, ao final, a mistura de ambos os materiais resultassem em um material próprio para a utilização de camadas de base e sub-base da pavimentação. A pesquisa

teve como desfecho a utilização dessa mistura apenas para sub-base e reforço de subleito de pavimentação, não atingindo a condição necessária para seu uso como camada de base.

Assim, no presente trabalho, seguindo os ensaios da pesquisa de IC, determina-se uma nova mistura de solo-agregado RCD utilizando-se de solo coletado em Guaratinguetá e agregado reciclado provido da Usina RCC, de São José dos Campos, cujo objetivo é, ao utilizar material reciclado de outra localidade, conseguir satisfazer as especificações para seu uso como base e sub-base de pavimentação.

As composições físicas do agregado reciclado da Usina RCC foram determinados a partir dos ensaios de teor de materiais, distribuição granulométrica, abrasão Los Angeles e compactação Proctor. Já o solo foi caracterizado fisicamente a partir da distribuição granulométrica, caracterização geotécnica, massa específica real dos grãos, compactação Proctor e Índice de Suporte Califórnia. Para o estudo do comportamento mecânico da mistura solo-agregado reciclado também foi realizado o ensaio da distribuição granulométrica, compactação Proctor e Índice de Suporte Califórnia.

Os resultados desses ensaios foram comparados com as especificações estabelecidas por NBR 15115 (2004); Especificação Técnica (ET-DE-P00/006) do DER-SP e DNER-ME 049/94; que preconizam quais as condições para o uso do material na construção de camadas de pavimentos.

## 2 PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

### 2.1 Introdução

O pavimento é uma estrutura funcional de estradas que permite o maior conforto dos seus usuários para realizarem deslocamentos de curta ou longa distância. É uma estrutura de várias camadas, com diferentes espessuras, construída sobre a superfície final de terraplenagem. Diversas técnicas podem ser aplicadas para distintos usos da estrada.

Por existir tantas possibilidades de aplicação na pavimentação, é abundante o número de estudos que ainda estão sendo realizados sobre este tema. Este trabalho é um exemplo de um deles, em que será tratada sobre a pavimentação de base e sub-base, para estradas de baixo volume de tráfego, usando mistura de solo local com agregados RCD's originários da região do Vale do Paraíba.

As estruturas de pavimentação são classificadas em três tipos normalmente: rígidos, flexíveis e articulados. O primeiro geralmente tratado como pavimento de concreto de cimento Portland, o segundo como pavimento asfáltico e o terceiro como blocos de concreto pré-fabricados.

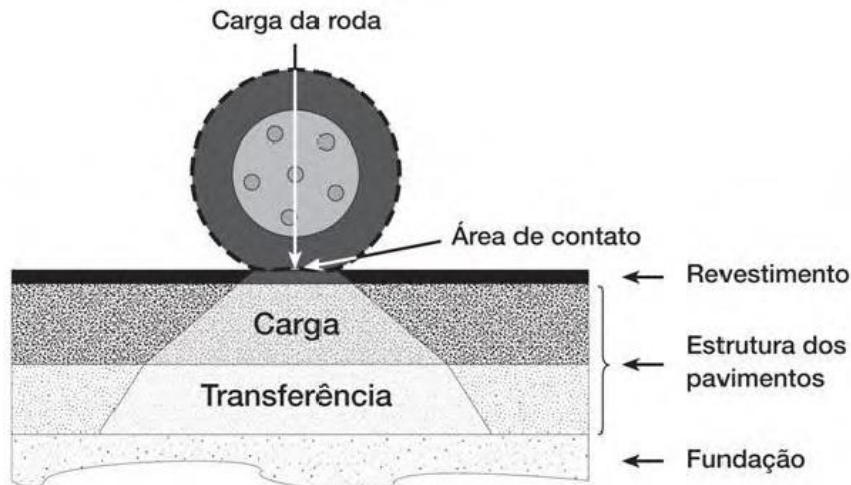
Para o presente trabalho, será dada ênfase no pavimento flexível por ser este o tipo de pavimentação que será analisada junto com o seu conjunto de camadas.

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. [...] Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter uma ausência de algumas camadas (BERNUCCI et al., 2006).

Em nível estrutural, os pavimentos devem garantir a degradação das cargas do tráfego, reduzindo as tensões verticais a um valor aceitável ao nível da fundação. Sob o ponto de vista funcional, os pavimentos devem garantir comodidade e segurança de circulação do tráfego. Os pavimentos também têm a função de proteger o solo de fundação da água da chuva, permitindo que este mantenha as suas características iniciais ao longo do tempo (SANTOS, 2009, p. 5).

A Figura 1 mostra como a transferência de cargas ocorre através do pavimento.

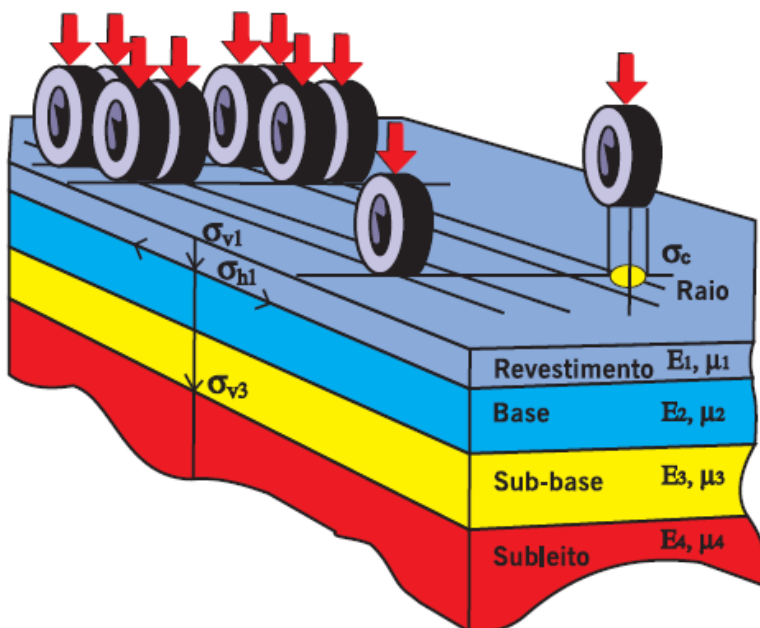
Figura 1 – Transferência de carga através da estrutura de pavimento



Fonte: (WIRTGEN, 2008).

A camada asfáltica sofre cargas de tensões e deformações pelo tráfego que resultam no trincamento por fadiga dessa camada. Outros agentes patológicos podem ser o envelhecimento do ligante asfáltico, ação climática, etc. O revestimento asfáltico também pode vir a causar deformação permanente e outros defeitos. Nos pavimentos asfálticos, as camadas de base, sub-base e reforço do sub-leito são de grande importância estrutural. O objetivo da mecânica dos pavimentos é limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento (Figura 2), por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes (MEDINA, 1997).

Figura 2 - Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e tensões solicitantes



Fonte: (ALBERNAZ, 1997).

## 2.2 Componentes de Base, Sub-base e Reforço de Subleito

Como foi dito anteriormente, as camadas que compõe a pavimentação possuem funcionalidades estruturais muito importantes. Para o presente trabalho, destaca-se as camadas de base, sub-base e reforço de subleito por serem estes os objetivos a serem alcançados com a mistura de solo-agregado reciclado.

Para um melhor entendimento dessa mistura, deve-se primeiramente analisar separadamente cada componente. Assim, serão tratados dentro deste item 2.2 os aspectos referentes aos agregados e aos solos e seus principais ensaios aplicados para a determinação de suas características físicas e propriedades mecânicas.

### 2.2.1 Agregados

O agregado é definido como o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a engenharia. Os agregados conjuntamente com os aglomerantes, especificamente o cimento, formam o principal material de construção, o concreto (PETRUCCI, 1970).

De acordo com a norma ABNT NBR 9935/2005 – agregados: terminologia, o termo agregado é definido como *material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto*.

Quando se tem conhecimento da propriedade do agregado e da sua interação com outras associações, como cimento e água, por exemplo, o engenheiro é capaz de fazer uma escolha apropriada para a sua seleção e seu uso no campo. Se bem escolhidas e executadas, será possível criar uma estrutura civil com uma boa durabilidade e desempenho.

O agregado é uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usada em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa etc. (WOODS, 1960).

Para compreender e prever qual será o seu desempenho é preciso realizar ensaios de desempenho. Qualquer agregado, assim como o solo, tem suas propriedades únicas e um histórico de formação de milhares de anos, por isso esses ensaios devem ser realizados sempre que a obra requerer desempenhos, materiais, localidades e execuções diferentes para realizar a pavimentação. Nesses ensaios, o material a ser adotado deve suportar tensões impostas na

superfície do pavimento e também no seu interior. O desempenho de suas partículas depende da maneira como são produzidas, mantidas unidas e condições sob as quais vai atuar.

Os agregados utilizados em pavimentação podem ser classificados em três grandes grupos, segundo sua natureza, seu tamanho e sua distribuição dos grãos.

### **2.2.1.1 Natureza dos Agregados**

Os agregados podem ser classificados como natural, artificial ou reciclado. Este último será visto com mais detalhes posteriormente, em 2.2.2 - Resíduos Sólidos da Construção Civil.

#### Agregados Naturais

Inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. São exemplos os pedregulhos, os seixos, as areias e etc. Os agregados naturais podem ser empregados em pavimentação na forma e tamanho como se encontram na natureza, ou podem ainda passar por processamentos como a britagem (BERNUCCI et al., 2006, p. 116).

Cada tipo de rocha tem sua característica a partir do processo de formação e de cristalização de seu material (NUNES; NÓBREGA JÚNIOR, 2009).

Seguem algumas definições sobre as rochas ígneas, sedimentares e metamórficas:

- As rochas ígneas são formadas a partir de rocha derretida esfriada e solidificada. Dentro das profundezas da Terra, elas derretem por causa da alta pressão e temperatura; a rocha derretida (ou magma) pode, então, fluir para cima ou até mesmo sair em erupção de um vulcão. Quando o magma esfria lentamente, em profundidades de milhares de metros abaixo da terra, os cristais crescem a partir do líquido derretido, e formam-se uma rocha de granulação grossa. Quando o magma se esfria rapidamente, perto da superfície terrestre, os cristais são extremamente pequenos, e, como resultado, formam rocha de granulação fina. Como exemplo existem a obsidiana (vidro vulcânico), granito, basalto e andesito pórfiro (USGS, 2014, tradução da autora).
- Rochas sedimentares são formadas na superfície da Terra. Eles são acumulações em camadas de sedimentos fragmentados de rochas, minerais, animais ou plantas. A

maioria das rochas sedimentares ficam coladas por minerais e produtos químicos ou são mantidos juntos por atração elétrica; alguns, no entanto, permanecem soltos e não consolidados. As rochas sedimentares estão se formando em torno de nós o tempo todo. Areia e cascalho de praias ou de barra de rios se parecem com arenito e conglomerado, em que irão se tornar. Lama compactada e seca se cristaliza em xisto (USGS, 2014, tradução da autora).

- Às vezes, rochas sedimentares e ígneas são submetidas a pressões tão intensas ou de calor tão altos que eles mudam completamente. Eles tornam-se rochas metamórficas, que são formadas enquanto estão profundamente dentro da crosta da Terra. O processo de metamorfismo não derrete as rochas, mas em vez disso as transforma em rochas mais densas e mais compactas. Novos minerais são criados tanto por rearranjo de componentes minerais ou por reações com fluidos que entram nas rochas. Alguns tipos de rochas metamórficas - gnaisse granito e xisto biotita são dois exemplos - estão fortemente em faixas ou *foliated*. (*Foliated* significa o arranjo paralelo de certos grãos minerais que dá a rocha um aspecto listrado.). Pressão ou temperatura podem até mesmo mudar rochas que já eram previamente metamórficas e transformá-las em novas rochas metamórficas (USGS, 2014, tradução da autora).

A Tabela 1 apresenta os principais tipos de rochas usados como agregados.

Tabela 1 – Tipos de Rochas comumente usados como fonte de agregados para pavimentação no país

Denominação Petrológica	Descrição
Andesito	Variedade de diorito vulcânico, de granulação fina
Basalto	Rocha básica de granulação fina, usualmente vulcânica
Conglomerado	Rocha constituída de blocos arredondados ligados por cimento natural
Diorito	Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com homblenda, augita ou biotita
Gabro	Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olivina
Gnaisse	Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa
Granito	Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo
Calcário	Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio
Quartzito	Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que completamente por grãos de quartzo
Riolito	Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica
Sienito	Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, homblenda, biotita ou augita
Traquito	Variedade de sienito de granulação fina, usualmente vulcânico

Fonte: (BERNUCCI et al., 2006, p. 118).

E na Tabela 2, temos a classificação das rochas quanto ao teor de sílica presente.

Tabela 2 – Classificação de Rochas quanto ao teor de sílica presente

<b>Classificação</b>	<b>% Sílica</b>	<b>Quartzo</b>	<b>Exemplo</b>
Ácida	> 65	Presente	Granito, riolito, quartzito
Neutra	52 a 65	Pouco ou inexistente	Sienito, diorito
Básica	45 a 52	Raríssimo	Basalto, gabro
Ultrabásica	< 45	Inexistente, feldspato escasso	Piroxenito

Fonte: (METSO MINERALS, 2005).

O sentido dos termos ácido e básico não são os mesmos utilizados em química, mas está relacionado à carga elétrica superficial das partículas do agregado. Os minerais nas partículas de agregados apresentam seus átomos dispostos em uma rede cristalina, onde os átomos da superfície exercem atração sobre átomos de gases, líquidos ou sólidos que com ela tenham contato, promovendo a adsorção química. Essa adsorção é o principal fator na adesividade entre o agregado e os ligantes asfálticos (BERNUCCI et al., 2006, p. 118).

A maioria dos agregados silicosos tais como arenito, quartzo e cascalho torna-se negativamente carregada na presença de água, enquanto materiais calcários conduzem carga positiva na presença de água. (BERNUCCI et al., 2006, p. 118).

Os agregados de rochas classificadas como ácidas costumam apresentar problemas de adesividade, enquanto os de rochas classificadas como básicas costumam apresentar melhor adesividade ao ligante asfáltico (BERNUCCI et al., 2006, p. 118).

Denomina-se, no meio rodoviário brasileiro, de laterita a um solo concrecionado enriquecido com óxidos hidratados de ferro ou alumínio, tendo a caulinita como argilo-mineral predominante, com coloração vermelha, amarela, marrom ou alaranjada (GUIMARÃES; MOTTA, 2000). As lateritas contêm também frequentemente a magnetita, a ilmenita, a hematita e, sobretudo, o quartzo; e ainda alertam para um dos problemas da laterita que é a grande variação de propriedades, o que dificulta a previsão de comportamento (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

### Agregados Artificiais

São resíduos de processos industriais, tais como as escórias de alto-forno e de aciaria, ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada e a argila expandida (CABRAL, 2005).

O tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado em pavimentação são os vários tipos de escórias, subprodutos da indústria do aço. Elas podem apresentar problemas de expansibilidade e heterogeneidade, requerendo tratamento adequado para utilização, porém podem apresentar alta resistência ao atrito (BERNUCCI et al., 2006).

Um agregado artificial que deve-se dar atenção são os agregados reciclados, providos de resíduos sólidos da construção e demolição de obras civis. Tal agregado será descrito mais detalhadamente no item 2.2.2 - Agregados de Resíduos Sólidos oriundos da Construção e Demolição de Obras Civis.

### 2.2.1.2 Tamanho dos Agregados

Usando as definições de DNIT 031/04 – ES: pavimentos flexíveis: concreto asfáltico, os agregados são classificados de acordo com o seu tamanho em:

- Graúdo: agregado  $> 2,0$  mm, retido na peneira nº 10. Exemplos: britas, cascalhos, seixos, etc.;
- Miúdo: agregado  $> 0,075$  mm e  $< 2,0$  mm, retido na peneira nº 200, mas passa na abertura nº 10. Exemplos: areias, areia reciclada, etc.;
- Material de enchimento (*Filler*): pelo menos 65% das partículas são menores que 0,075 mm, correspondente à peneira nº 200. Exemplos: cal hidratada, cimento Portland, etc.

O tamanho das partículas dos agregados, em especial, dos agregados miúdos, influenciam de forma efetiva na obtenção de uma determinada consistência do concreto (NEVILLE, 1997).

Os agregados têm um limite de tamanho máximo para seu melhor uso na pavimentação, que influenciam na trabalhabilidade e segregação das partículas. A norma ASTM C 125: *standard terminology relating to concrete and concrete aggregates*, define o tamanho máximo do agregado em uma de duas formas:

- Tamanho máximo – é a menor abertura de malha de peneira através da qual passam 100% das partículas da amostra de agregado.
- Tamanho nominal máximo – é a maior abertura de malha de peneira que retém alguma partícula de agregado, mas não mais de 10% em peso.

## 2.2.2 Agregados de Resíduos Sólidos oriundos da Construção e Demolição de Obras Cíveis (RCD)

### Agregados RCD

Temos como definição de desenvolvimento sustentável para Montibeller-Filho (2001, p. 54) um “processo contínuo de melhoria das condições de vida (de todos os povos), enquanto minimize o uso de recursos naturais, causando um mínimo de distúrbios ou desequilíbrios ao ecossistema”.

Os agregados reciclados são originados de reuso de diversos tipos de materiais. Segundo CONAMA (2002), os resíduos da construção e demolição (RCD) são aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos.

A reciclagem de revestimentos asfálticos existentes vem crescendo significativamente em importância e em alguns países já é a fonte principal de agregados. A possibilidade de utilização de agregados reciclados vem crescendo em interesse por restrições ambientais na exploração de agregados naturais e pelo desenvolvimento de técnicas de reciclagem que possibilitam a produção de materiais reciclados dentro de determinadas especificações existentes para utilização. Destaca-se também a utilização crescente de resíduo de construção civil em locais com ausência de agregados pétreos ou mesmo em áreas urbanas que possuam pedreiras, como forma de reduzir os problemas ambientais de disposição destes resíduos (FERNANDES, 2004).

A primeira abordagem à reciclagem de pavimentos surgiu após a 2ª Guerra Mundial, devido à necessidade de recuperar as estradas afetadas, aplicado no Reino Unido, um processo chamado “*Retread Process*” ou processo de recauchutagem (JOFRÉ, 2003).

Nos EUA a reciclagem de pavimentos rodoviários surge na década de 70, durante a crise petrolífera. O aumento significativo dos preços do petróleo bruto, tal como na atualidade, levou a que as administrações tivessem em conta os custos de fabrico, transporte e aplicação das misturas. Na última década, a reciclagem surge em massa, mas por razões ambientais, continuando a decisão de reciclar e como reciclar depende dos fatores econômicos (BAPTISTA, 2006).

No município de São Paulo, a utilização de agregados reciclados na pavimentação é obrigatória desde 2007, pelo Decreto nº 48.075, da Prefeitura de São Paulo. Porém, ainda não se aplica em todo o Estado de São Paulo, o que englobaria a cidade de Guaratinguetá.

Como algumas das vantagens da utilização de agregados reciclados na pavimentação temos: a redução de materiais a serem depositadas no lixo, e incluindo também os materiais depositados ilegalmente, ocasionando menos impacto ambiental e a redução de custos.

Em qualquer técnica de reciclagem é fundamental a realização de estudos preliminares, em que são contemplados aspectos como a geometria do pavimento, à natureza dos trabalhos de manutenção necessários durante o período de vida do pavimento, a caracterização dos materiais a reciclar, a espessura de intervenção e a formulação da mistura final dos materiais a aplicar no pavimento (MOREIRA, 2005).

Na resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente Nº 307 (CONAMA, 2002) classifica os resíduos da construção civil em quatro classes: A, B, C e D; com base no seu potencial de reciclagem ou reuso. Conforme descrito a seguir:

- Classe A: engloba os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: tijolos, blocos, telhas, argamassa e concreto;
- Classe B: incorpora os resíduos que são recicláveis, mas não para produção de agregados, como papel, plástico, metais, vidros, madeiras, entre outros;
- Classe C: abrange os resíduos para os quais ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem, como exemplo, os produtos oriundos do gesso;
- Classe D: representa resíduos perigosos, provenientes de processos construtivos. Os principais materiais desta categoria são: tintas, óleos, e aqueles originários de demolições e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais, e etc.

Nestes enquadramentos, os agregados reciclados coletados em usinas de reciclagem para este trabalho podem ser classificadas como classe A.

#### **2.2.2.1 Agregados de Concreto Reciclado e de Resíduos de Rejeitos Urbanos**

Dentre os resíduos sólidos de construções urbanas, há agregados com resquícios de cimento endurecido, gipsita e outros componentes, que compõem a fração de agregado miúdo. O que torna o seu uso inadequado para produzir concreto. Porém, sua fração de agregado graúdo, mesmo com sinais de cimento, tem sido utilizada com satisfação em vários estudos de laboratório e também de campo.

Uma revisão de vários estudos indicam que, comparado ao concreto com agregado natural, o concreto do agregado reciclado teria no mínimo dois terços da resistência à

compressão e do módulo de elasticidade, bem como trabalhabilidade e durabilidade satisfatórias. O principal obstáculo no uso do entulho de construção como agregado para concreto é o custo de britagem, graduação, controle de pó e separação dos constituintes indesejáveis. Concreto reciclado ou concreto de entulho britado pode ser uma fonte economicamente viável de agregados, em locais onde agregados de boa qualidade são escassos e quando o custo de disposição do entulho é incluído na análise econômica (MEHTA; MONTEIRO, 2000).

O maior trabalho, já realizado, de reciclagem de pavimento de concreto, “*Michigan State Department of Transportation*”, em 2011 de Michigan/USA, publicou que o agregado reciclado obtido pela britagem do pavimento existente teve menor custo do que usar, inteiramente material novo. Economizando um valor de 114 mil dólares numa obra de valor de 3 milhões de dólares, dando 3,8% de economia.

Entretanto, conforme afirma Bernucci et al. (2006), mesmo com separação feita em obras, quase sempre há presença de materiais indesejados no agregado reciclado, como vidro triturado, que dificulta a trabalhabilidade de um concreto; alto teor de álcalis, que afeta a sua resistência e durabilidade a longo prazo; alumínio e outros metais, que provocam expansão excessiva por reagirem com soluções alcalinas. Generalizando, os rejeitos urbanos, em termos de comportamento estrutural, não são melhores do que agregados naturais. Porém, deve-se enfatizar sobre os vários benefícios da reutilização desse material já apresentados e como o seu estudo é necessário para aprimorá-lo.

### **2.3 Propriedades e Características dos Materiais de Base, Sub-base e Reforço de Subleito**

Devem-se selecionar os materiais que irão constituir a base, sub-base e reforço do subleito. Seus atributos influenciam na sua resistência e permeabilidade, entre outros. Esses materiais componentes do pavimento são necessariamente resistentes, quase indeformáveis e com permeabilidade de acordo com sua função na estrutura.

Basicamente as camadas de pavimentação são constituídos por agregados, solos e aditivos, este ocasionalmente, como cimento, cal, emulsão asfáltica, etc.

### 2.3.1 Métodos de Seleção dos Materiais

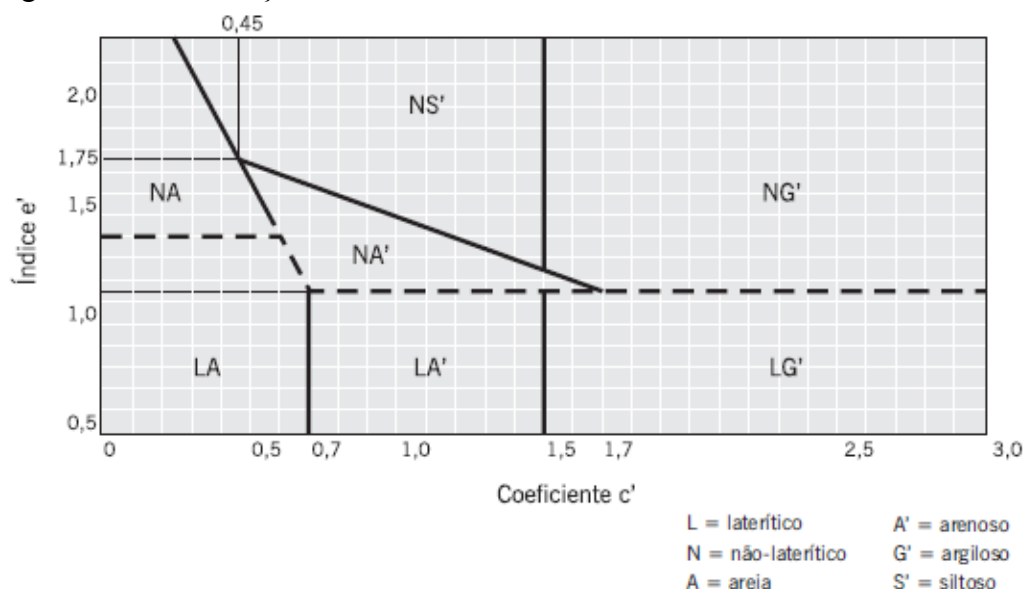
#### Classificação MCT

As técnicas tradicionais de classificação e hierarquização dos solos, da tradição rodoviária europeia e norte-americana, são ineficientes e inadequadas quando aplicadas em solos tropicais lateríticos e saprolíticos. Por isso Nogami e Vilibor, em 1981, publicaram uma classificação de solos aplicável a solos tropicais de obras viárias (BERNUCCI et al., 2006).

A classificação é conhecida como MCT (Miniatura Compactada Tropical) e foi concebida para solos que passam integralmente ou em grande porcentagem na peneira nº 10 (2,00mm) (NOGAMI; VILIBOR, 1981, 1995).

Na figura 3 abaixo, mostra a classificação de solos tropicais MCT e seus 7 grupos.

Figura 3 – Classificação MCT



Fonte: (NOGAMI; VILIBOR, 1981).

A classificação tem como finalidade principal separar solos de comportamento laterítico (representados pela letra L) daqueles de comportamento não-laterítico (representados pela letra N), uma vez que os lateríticos exibem propriedades peculiares como elevada resistência, baixa expansibilidade apesar de serem plásticos, e baixa deformidade. (BERNUCCI et al., 2006).

Adicionalmente, a tabela 3 a seguir apresenta as aplicações de cada tipo de grupo MCT na construção viária.

Tabela 3 – Emprego recomendado de solos tropicais em obras viárias

Comportamento	N = não-laterítico				L = laterítico		
	NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
<b>Recomendação de utilização em obras viárias</b>							
Base de pavimento de vias de baixo volume de tráfego	NR	4°	NR	NR	2°	1°	3°
Reforço do subleito	4°	5°	NR	NR	2°	1°	3°
Subleito compactado	4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°
Corpo de aterro compactado	4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°
Camada de proteção à erosão	NR	3°	NR	NR	NR	2°	1°
Revestimento primário	5°	3°	NR	NR	4°	1°	2°
Granulometrias típicas	Argilas		Siltes	Argilas			Argilas
	Siltes	Areias siltosas	Siltes arenosos	Argilas arenosas	Areias siltosas	Areias argilosas	Argilas arenosas
				Argilas siltosas			Argilas siltosas
				Siltes argilosos			Siltes argilosos
<b>Grupos prováveis das classificações tradicionais dos solos</b>							
Classificação Unificada de Solos	SP	MS	SM	MH	SP		MH
	SM	SC	CL	CH	SC	SC	ML
		ML	ML				CH
Classificação Rodoviária		A-	A-4	A-6		A-2	A-6
	A-2	A-4	A-5	A-7-5	A-2	A-4	A-7-5
		A-7	A-7-5	A-7-6			

NR: não recomendado

Fonte: (NOGAMI; VILIBOR, 1995, modificado).

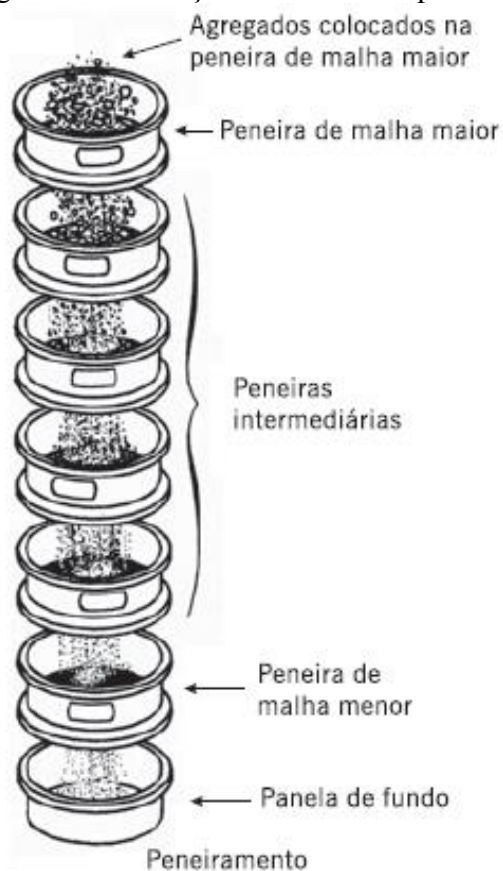
### 2.3.2 Distribuição Granulométrica

O comportamento dos revestimentos asfálticos depende principalmente da distribuição granulométrica dos agregados.

Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc. (BERNUCCI et al., 2006).

A distribuição granulométrica dos agregados é determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento. Nessa análise uma amostra seca de agregado é fracionada através de uma série de peneiras com aberturas de malha progressivamente menores, conforme ilustrado na Figura 4. Uma vez que a massa da fração de partículas retida em cada peneira é determinada e comparada com a massa total da amostra, a distribuição é expressa como porcentagem em massa em cada tamanho de malha de peneira (BERNUCCI et al., 2006).

Figura 4 – Ilustração da análise do peneiramento



Fonte: (BERNUCCI et al., 2006, p. 121).

De acordo com a norma DNER-ME 035/95: Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos, existem tamanhos de peneiras a serem usadas na análise granulométrica mostrados na Tabela 4. Porém, deve-se evidenciar que os tamanhos não seguem obrigatoriamente cada especificação, e que existe a peneira de abertura 12,5 mm muito usada nos projetos de misturas asfálticas, porém, que não é citada nessa norma.

A Tabela 4 apresenta-se a seguir:

Tabela 4 – Dimensões Nominais das Peneiras

Padrão	Designação da Peneira		Abertura da Peneira	
	Número	Milímetros	Polegadas	
		75,0 mm	75	3
		50,0 mm	50	2
		37,5 mm	37,5	1,5
		25,0 mm	25	1
		19,0 mm	19	0,75
		9,50 mm	9,5	0,375
	4	4,75 mm	4,75	0,187
	8	2,36 mm	2,36	0,0937
	10	2,00 mm	2	0,0789
	16	1,18 mm	1,18	0,0469
	30	600 µm	0,6	0,0234
	40	425 µm	0,425	0,0168
	50	300 µm	0,3	0,0117
	100	150 µm	0,15	0,0059
	200	75 µm	0,075	0,0029

Fonte: (DNER-ME 035/95).

### 2.3.3 Propriedades Mecânicas dos Materiais de Base, Sub-base e Subleito

#### Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio*)

O ensaio mais utilizado para a avaliação do potencial de resistência à penetração de camadas de pavimentação. A resistência do ensaio ISC harmoniza indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material. O índice é demonstrado em porcentagem, sendo definido como a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial (BERNUCCI et al., 2006, p. 342).

Segundo a norma DNER-ME 049/94, o procedimento para a execução do ensaio de CBR (ou ISC), consiste resumidamente nas seguintes etapas:

- Moldagem do corpo-de-prova: solo ou material passante na peneira  $\frac{3}{4}$ ", compactado na massa específica e umidade de projeto, em um molde cilíndrico de 150mm de diâmetro e 125mm de altura, provido de um anel complementar de extensão com 50mm de altura, como mostra na Figura 5.
- Imersão no corpo-de-prova: imerge-se o cilindro com a amostra compactada dentro, em um depósito cheio d'água, durante quatro dias. Durante todo o período de

imersão é empregada uma sobrecarga padrão de 10lbs sobre o corpo-de-prova, que corresponde a 2,5 polegadas de espessura de pavimento sobre o material. Fazem-se leituras por meio de um extensômetro, a cada 24 horas, calculando-se a expansão axial do material em relação à altura inicial do corpo-de-prova, como mostra a Figura 6.

- Penetração do corpo-de-prova: feita através do puncionamento na face superior da amostra por um pistão com aproximadamente 50mm de diâmetro; sob uma velocidade de penetração de 1,25mm/min (Figura 7). Anotam-se as pressões do pistão e os deslocamentos correspondentes, de forma a possibilitar a plotagem de uma curva pressão-penetração, na qual se definem os valores de pressão correspondentes a 2,54mm (P<sub>0,1</sub>"') e 5,08mm (P<sub>0,2</sub>"'). Estas curvas de pressão-penetração devem possuir um primeiro trecho praticamente retilíneo, característico de fase elástica, seguido de um trecho curvo, característico de fase plástica. Inflexão no início da curva tem significado de problemas técnicos de ensaio e essas curvas devem ser corrigidas.

Figura 5 – Molde cilíndrico montado para CBR



Fonte: Autora. Data de registro da imagem: 14/08/2015.

Figura 6 – Corpo-de-prova em imersão na água



Fonte: Autora. Data de registro da imagem: 14/08/2015.

Figura 7 – Ensaio de penetração de CBR



Fonte: Autora. Data de registro da imagem: 14/08/2015.

Anteriormente a este ensaio, podem ser realizados ensaios de compactação Proctor para a determinação da umidade ótima em que os corpos-de-prova devem ser compactados, que segue a ABNT 7182/1986.

### 3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

Localizada no leste do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 22°48'6,48" Sul e 45°11'18,24" Oeste, a região do Vale do Paraíba possui área de aproximadamente 16.000 km<sup>2</sup> e uma população aproximada de 2.305.758 habitantes (IBGE, 2012).

A região é acessada pela rodovia BR-116, conhecida como Rodovia Presidente Dutra, pela antiga estrada São Paulo - Rio de Janeiro que passa por São José do Barreiro e Bananal, e também pela estrada de ferro MRS - Logística. É um importante eixo de ligação entre os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro.

Alternativas de vias, essenciais do mesmo modo, que ligam o Vale do Paraíba são as vias transversais que conectam o Vale do Paraíba com cidades como Campinas, Campos do Jordão, Itajubá, Passa Quatro, Parati, Ubatuba, Caraguatatuba e outras, sendo interligadas por estradas de menor importância. As dificuldades naturais de acesso à região são ocasionadas por obstáculos constituídos pelos altos da serra da Mantiqueira ao norte, e pelas serras de Bocaina, Quebra Cangalha, Jambeiro e do Mar, ao sul. Através da Figura 8 ilustra-se a localização da região do Vale do Paraíba, SP.

Figura 8. Localização da região do Vale do Paraíba, SP



Fonte: (TAMURA, 2012).

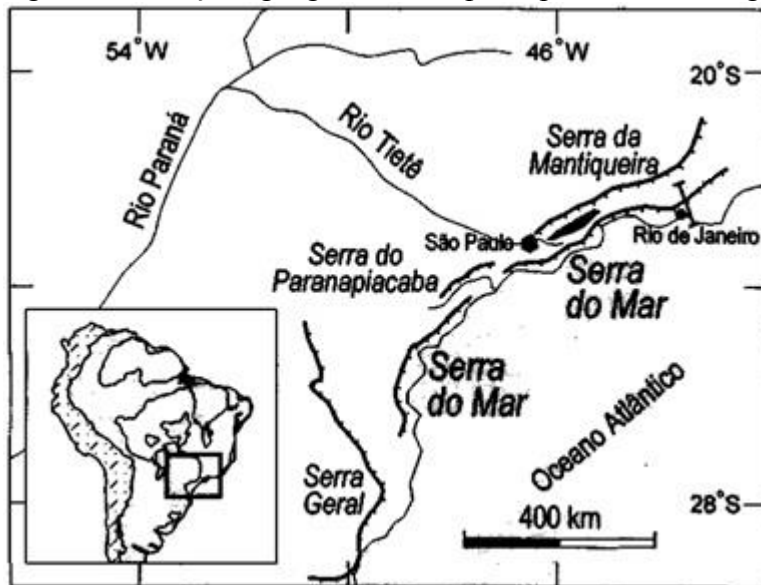
### 3.1 Geologia e Geomorfologia do Vale do Paraíba

A seguir descreve-se sobre a geologia e a geomorfologia da região do Vale do Paraíba para um melhor entendimento da origem e formação dos solos locais coletados para este trabalho.

O sudeste do Brasil constitui uma unidade a parte no bloco continental ou então da América do Sul onde antigas superfícies de aplainamento sugerem a existência de uma estrutura irregular, fraturada e falhada, constituída predominantemente de terrenos pré-cambrianos (AB'SABER; BERNARDES, 1956).

Como apresentado na Figura 9, a direção da Serra do Mar e da Mantiqueira possui orientação ENE no Escudo Atlântico.

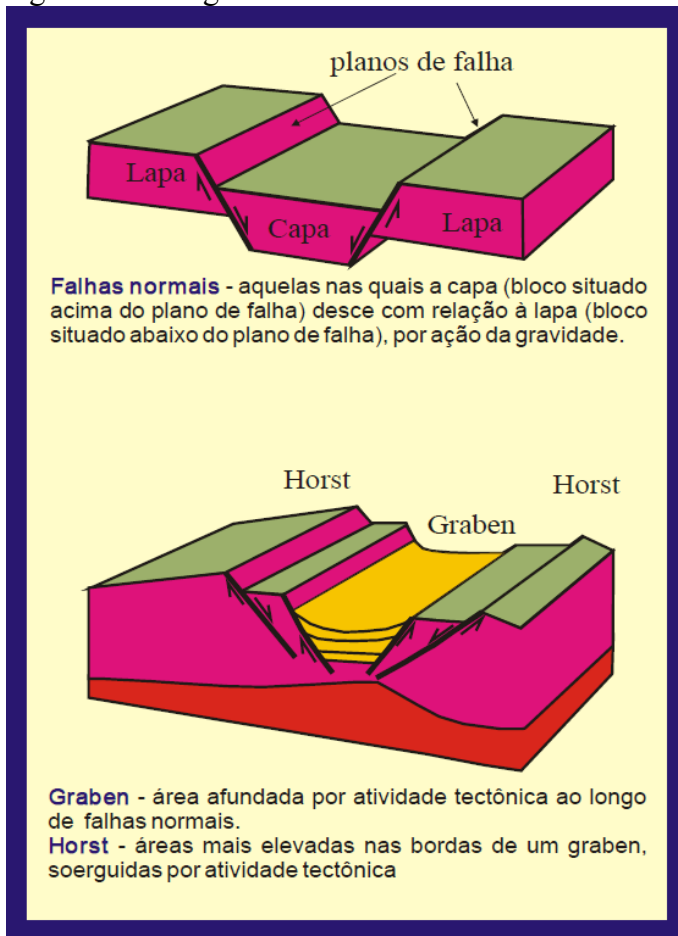
Figura 9 – Posições geográficas das principais serras da região sudeste do Brasil



Fonte: (ALMEIRA; CARNEIRO, 1998).

As características geológicas da região do Vale do Paraíba podem ser descritas, em resumo, como: as Serras do Mar e a Serra da Mantiqueira. Essas serras possuem um terreno muito antigo, datando do período Pré-Cambriano. Entre essas duas situa-se o Vale do Paraíba, gerado por uma falha (movimento tectônico, vide Figura 10) no período Quaternário.

Figura 10 - Imagem ilustrativa de Graben e Horst



Fonte: (DRM-RJ, 2007).

Como ilustrado na Figura 10, segundo trabalho do Serviço Geológico do Rio de Janeiro (DRM-RJ), houve o soergimento da borda do continente em todo o Sudeste do Brasil, desde o Estado do Paraná até a região de Vitória, no Espírito Santo, deu origem a Serra do Mar e da Mantiqueira. Com o aumento do soergimento de um lado, houve rompimento e conseqüente rebaixamento dos blocos adjacentes por falhas normais, gerando vales por afundamento tectônico e grabens, bordejados por horsts, que são as áreas altas. Nas áreas afundadas formaram-se pequenas bacias sedimentares com idades entre 65 e 35 milhões de anos, como as de São José de Itaboraí e do Macacu, no Graben a Guanabara, RJ, e as de Volta Redonda, Resende e Taubaté, no Graben do Paraíba do Sul.

Diante disso, temos dois compartimentos que dividem o médio do Vale do Paraíba: Vale Inferior e Superior. O Vale superior é caracterizado pela presença de uma faixa sedimentar alongada que acompanha o Rio Paraíba com morros recortados moldurando a bacia de Taubaté e de São Paulo, onde se sobressaem alguns alinhamentos como a Serra de

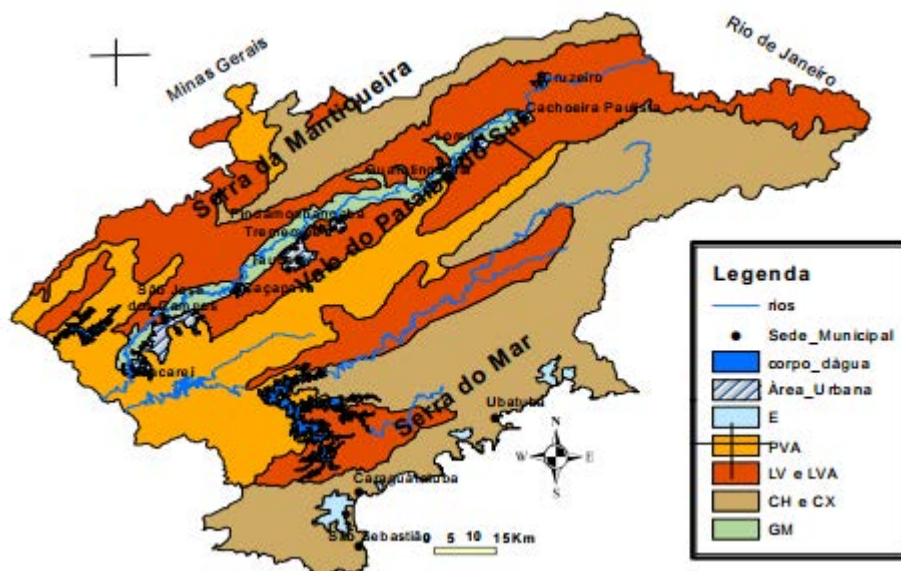
Quebra Cangalha. Enquanto o Vale Inferior comporta a parte mais desenvolvida da zona de morros, tendo influência estrutural mais observável nessa parte do vale (AB'SABER, 1966).

O Vale do Paraíba do Sul está inserido nas províncias do Planalto Atlântico e Província Costeira incluindo o planalto de Paraitinga, planalto da Bocaina, Médio Vale do Paraíba, Serra da Mantiqueira, Serra do Mar e Baixadas Litorâneas. A dutovia Campinas-Rio de Janeiro atravessa de São José dos Campos a Guaratinguetá preferencialmente planícies aluviais, relevos colinosos como tabuleiros e colinas amplas e colinas pequenas com espigões locais. Após o município de Guaratinguetá inicia-se um relevo de mares de morros, segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1981).

### 3.2 Pedologia do solo no Vale do Paraíba

Na região do Vale do Paraíba predominam os Latossolos Vermelhos-Amarelos, contudo, em trabalhos de levantamento de solos mais detalhados é possível verificar a variedade de solos com expressiva representação espacial: Argilossolos Vermelhos-Amarelos; Cambissolos Háplicos e Cambissolos Húmicos; Gleissolos Melânicos e Espodossolos. (Figura 11).

Figura 11 – Mapa de solos simplificado do Vale do Paraíba do Sul



Fonte: (Mapa Pedológico IAC, 1999)

Usando a classificação de solos da EMBRAPA (2006), temos várias unidades de solo na região do Vale do Paraíba, dentre as quais destacam-se:

- **Latossolos Vermelhos (LV) e Latossolos Vermelhos Amarelos (LVA):** São bem desenvolvidos, não tem minerais primários, tendo alta capacidade de drenagem, sendo encontrados na maioria do Vale do Paraíba, estando em regiões de relevo de baixa declividade (pouco ondulados), de altitudes de 500m a 1000m, possibilitam a infiltração e a percolação da água. São provenientes de rochas metamórficas como granitos e gnaisses e como tem horizontes bem definidos são menos erodíveis pela chuva.
- **Argissolos Vermelhos–Amarelos (PVA):** Possuem horizonte B textural, ricos em argila em profundidade, sendo encontrado em regiões de alta declividade (ondulados e fortemente ondulados) de altitudes de 750m a 1300m. São provenientes de granitos, gnaisses e xistos, tendo o solo descoberto, sendo que, conforme o índice de precipitação da área pode agravar processos erosivos. Encontrados principalmente nos municípios de Taubaté, Jambeiro e Redenção da Serra.
- **Cambissolos Háplicos (CH) e Cambissolos Húmicos (CX):** São solos constituídos por material mineral, com horizonte B. São solos fortemente, até imperfeitamente, drenados, rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelada e de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração coloidal. A estrutura do horizonte B pode ser em blocos, granular ou prismática. Esses tipos de solos compreendem boa parte das áreas da Zona Montana (Serras do Mar e da Mantiqueira, Serra do Quebra Cangalhas e Bocaina), em áreas de terrenos bastante acidentados que variam fortemente ondulado a escarpado, a níveis topográficos superiores a 1000 m. Estão associados a suítes graníticas e por serem pouco evoluídos apresentam significativos teores de minerais primários facilmente intemperizáveis (IAC, 1999). São solos muito erodíveis.

Os CX's especificamente estão localizados no Planalto de Campos de Jordão na Serra da Mantiqueira região que devido as altitudes que se aproximam de 2000 metros possui um clima com baixas temperaturas em boa parte do ano, permitindo a formação do horizonte húmico nesse solo.

- **Gleissolos Melânicos (GM):** São solos minerais, hidromórficos, desenvolvidos de sedimentos recentes não consolidados, de constituição argilosa, argilo-arenosa, do período do Holoceno. Compreende solos mal a muito mal drenados e que possuem características resultantes da influência do excesso de umidade permanente ou temporário, devido a presença do lençol freático próximo à superfície, durante um

determinado período do ano. Apresentam um horizonte subsuperficial de coloração acinzentada, cinzenta, com mosqueados amarelados ou avermelhados, oriundos da oxidação de ferro na matriz do solo. De acordo com o Mapa Pedológico do IAC as áreas da Bacia Sedimentar de Taubaté desde Jacareí até Cachoeira Paulista acompanhando o Vale recente do Paraíba do Sul foram classificadas como de Gleissolos (Húmicos e Hidromórficos Cinzentos) devido ao fato dessa área estar associada a áreas de aluviões (depósitos de calhas e terraços) com relevo de plano até suavemente ondulada, a níveis topográficos entre 400 e 500m.

- **Espodossolos (E):** Esta classe de solo é definida pela presença de horizonte diagnóstico B espódico em sequência a horizonte E (álbico ou não) ou horizonte A, segundo critérios estabelecidos pelo SiBCS (Embrapa, 2006). Pode ser identificada pela cor do horizonte espódico, que varia desde cinzenta, de tonalidade escura ou preta, até avermelhada ou amarelada, e pela nítida diferenciação de horizontes. Os espodossolos classificados pelo IAC, (1999) se localizam fundamentalmente no litoral Paulista, que coincide possivelmente com a antiga situação do Mar em bacias e estuários. São observadas três áreas de ocorrência uma delas encontra-se em São Sebastião.

#### 4 LOCAIS DE COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO E DE AGREGADOS RECICLADOS

A seguir serão descritas os locais de coleta das amostras de solo, que se dá na região do Vale do Paraíba, retiradas das cidades de Pindamonhangaba, Guaratinguetá e Lorena; e os locais de coleta das amostras de agregados reciclados, providos da Usina PMG, de Guaratinguetá, e da Usina RCC, de São José dos Campos.

##### 4.1 Coleta das Amostras de Solo

Em 2011, para uso na pesquisa de Iniciação Científica (TAMURA, 2012), coletou-se um total de seis amostras de solo, em três municípios da região do Vale, sendo: duas em Pindamonhangaba, duas em Guaratinguetá e duas em Lorena.

Nesta pesquisa, em continuidade à anterior, coletou-se outras amostras em locais diferentes de Guaratinguetá. Na Tabela 5 apresentam-se informações sobre os solos considerados e as respectivas coordenadas dos locais de amostragem.

Tabela 5. Locais de coleta das amostras de solo

AMOSTRA	LOCAL	LATITUDE	LONGITUDE	UNIDADE PEDOLÓGICA
1	Pindamonhangaba (Portal dos Eucaliptos) Avenida 9	22° 53,472' S	45° 23,202' W	Latossolo Amarelo LA6
2	Pindamonhangaba (Portal dos Eucaliptos) Avenida 6	22° 53,824' S	45° 23,020' W	Latossolo Amarelo LA6
3	Guaratinguetá (Sta Luzia)	22° 48,444' S	45° 14,209' W	Latossolo Amarelo LA6
4	Guaratinguetá (São Manoel)	22° 46,204' S	45° 12,845' W	Latossolo Amarelo LA6
5	Lorena (Novo Horizonte)	22° 44,991' S	45° 05,282' W	Latossolo Amarelo LA6
6	Lorena (Brisas do Campo)	22° 45,903' S	45° 08,179' W	Latossolo Amarelo LA6
7	Guaratinguetá (FEG/UNESP)	22° 48,138' S	45° 11,347' W	Latossolo Amarelo LA6

Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

As informações e fotos da coleta das amostras 1 ao 6 foram retiradas da pesquisa de Iniciação Científica (TAMURA, 2012, p.17), como se segue:

Inicialmente, as amostras 1 e 2 foram coletadas em Pindamonhangaba, no loteamento residencial, em fase de implantação, do Portal dos Eucaliptos. Situado às margens da rodovia SP 62 – antiga estrada velha São Paulo - Rio de Janeiro, no Distrito de Moreira César. Tal loteamento possui 230.332,60m<sup>2</sup> de área, com um amplo sistema viário. Através das figuras 12 e 13 ilustram-se os locais de coleta.

Figura 12 - Local de coleta da amostra 1



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 14/09/2011.

Figura 13 - Local de coleta da amostra 2



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 14/09/2011.

As amostras 3 e 4 foram coletadas em Guaratinguetá, em vias urbanas não pavimentadas dos bairros Santa Luzia e São Manoel, conforme ilustram as figuras 14 e 15.

Figura 14 - Local de coleta da amostra 3 (bairro Santa Luzia)



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 14/09/2011.

Figura 15 - Local de coleta da amostra 4 (bairro São Manoel)



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 14/09/2011.

As amostras 5 e 6 foram colhidas em Lorena, em ruas não pavimentadas dos bairros Novo Horizonte e Brisas do Campo. Seus locais de coleta se apresentam através das figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16 - Local de coleta da amostra 5 (bairro Novo Horizonte)



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 14/09/2011.

Figura 17 - Local de coleta da amostra 6 (bairro Brisas do Campo)



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 14/09/2011.

A amostra 7 foi coletada em 2015 dentro do Campus da FEG/UNESP, em Guaratinguetá, num terreno baldio ao lado do Bloco de Matemática e Física. Conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18. Local de coleta da amostra 7 (FEG/UNESP)



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 21/07/2015.

## 4.2 Coleta de Amostras de Agregados Reciclados

A coleta de amostras de agregados reciclados deu-se em duas usinas distintas, a Usina da Prefeitura Municipal de Guaratinguetá (PMG), e a Usina RCC Ambiental da Dutrafer (RCC). Adicionalmente será detalhado como funciona o processo de reciclagem de cada usina.

### 4.2.1 Usina de Agregado Reciclado de Guaratinguetá (Usina PMG)

Amostras de material reciclado, identificadas como brita nº 1, foram coletadas da usina de produção de agregados RCD's da Prefeitura Municipal de Guaratinguetá, SP, em 2011, onde foram usadas para a realização da pesquisa de Iniciação Científica (TAMURA, 2012).

A descrição e as fotos dos procedimentos operacionais dessa usina de reciclagem a seguir foram retiradas da pesquisa de Iniciação Científica de Tamura (2012, p. 22-26).

O material de resíduos da construção civil, quando descarregado na usina, sofre a primeira separação, onde os materiais que devem ser processados são selecionados e o restante é eliminado (por exemplo: madeiras, materiais metálicos, papéis, plásticos e outros), conforme ilustra a Figura 19. Após, o material passa por uma segunda separação para uma melhor composição do material final a ser processado.

Figura 19. Material indesejado, separado dos resíduos sólidos de construção



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 27/10/2011.

Em continuidade, o material é transferido para a máquina onde, após um primeiro peneiramento, segue para o setor da máquina denominado de primário. Em seguida, passa

para o setor secundário, onde é peneirado numa sequência de três peneiras. Através das Figuras 20, 21, 22 e 23 são apresentados alguns detalhes dos procedimentos descritos.

Figura 20 - Vista geral do equipamento



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 27/10/2011.

Figura 21 - Detalhe do setor primário da máquina



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 27/10/2011.

Figura 22 - Detalhe do setor secundário do equipamento



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 27/10/2011.

Após o peneiramento, os resíduos ficam depositados em montes divididos de acordo com os tamanhos dos grãos.

Figura 23 - Detalhe geral do setor secundário do equipamento e os depósitos de materiais produzidos



Fonte: (TAMURA, 2012). Data de registro da imagem: 27/10/2011.

Atualmente, a usina produz diariamente cerca de 15 a 20 caminhões de porte médio. Os agregados produzidos, brita nº1, pedrisco e areia reciclada, são utilizados na manutenção das estradas rurais do município.

#### **4.2.2 Usina de Reciclagem RCC Ambiental Dutrafer, de São José dos Campos (Usina RCC)**

A usina de reciclagem Dutrafer, localizada em São José dos Campos, na rua Coronel Gonçalves, 300 – Eugênio de Melo, SP, é uma empresa de reciclagens industriais que faz parte do Grupo Dutrafer.

Ela atua nas regiões do Vale do Paraíba e Mogi das Cruzes. Produz reciclados como: areia, pedrisco, pó de pedra, brita I e brita II, bica corrida I, bica corrida II e rachão.

Dentre estes materiais, os mais interessantes para este trabalho são a brita e a bica corrida. Já que são os materiais normalmente usados em pavimentação de estradas.

A brita tem dimensão característica entre 19,0 e 32 mm sem impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto. Onde é recomendado para fabricação de concretos não estruturais e obras de drenagens.

Bica Corrida é produto proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto. Material proveniente da reciclagem de resíduos da construção civil, sem impurezas, com dimensão máxima característica de 63 mm. Produto recomendado para obras de base e sub-

base de pavimentos, reforço e subleito de pavimentos, além de regularização de vias não pavimentadas, aterros e acerto topográfico de terrenos.

Infelizmente, quando as amostras de agregado reciclado foram coletadas na usina RCC, não havia bica corrida, apenas britas recicladas e areia reciclada. Portanto, somente foram colhidas amostras de brita II e areia reciclada.

O processo de reciclagem desta usina se assemelha com o da usina PMG. Inicialmente, após o descarregamento dos resíduos da construção civil, é feita a separação de materiais. Resíduos como lixo, ferro, plástico, papelão e isopor são eliminados. Vide Figura 24. Usa-se um ímã para a separação dos metais.

Figura 24 – Caçamba de lixo separado dos resíduos da construção civil



Fonte: Autora. Data de registro da imagem: 10/08/2015.

O restante dos materiais passa então por um processo de peneiramento e de trituração. Esse processo se dá primeiro no setor primário e depois para o secundário. Confira Figuras 25 e 26.

Figura 25 – Setor primário de peneiramento e trituração da usina RCC



Fonte: Autora. Data de registro da imagem: 10/08/2015.

Figura 26 – Setor secundário de peneiramento e trituração da usina RCC



Fonte: Autora. Data de registro da imagem: 10/08/2015.

O produto final dos agregados são depositados em montes separados. Conforme as Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Depósito de britas recicladas da usina RCC



Fonte: Autora. Data de registro da imagem: 10/08/2015.

Figura 28 – Depósito de areia reciclada da usina RCC



Fonte: Autora. Data de registro da imagem: 10/08/2015.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Solos

Ensaio de caracterização geotécnica e de Mini-MCV foram realizados para as amostras 1 ao 6 dos solos coletados na região do Vale do Paraíba, em 2011, para a pesquisa de Iniciação Científica de TAMURA, 2012. Em continuidade a essa pesquisa, para este trabalho foram coletadas as amostras 7 e areia reciclada (material fino reciclado coletado da Usina RCC) para possivelmente serem componentes da mistura de solo-agregado. Tais materiais também sofreram ensaios de caracterização geotécnica. Todos os ensaios foram realizados no laboratório de Transportes da FEG/UNESP.

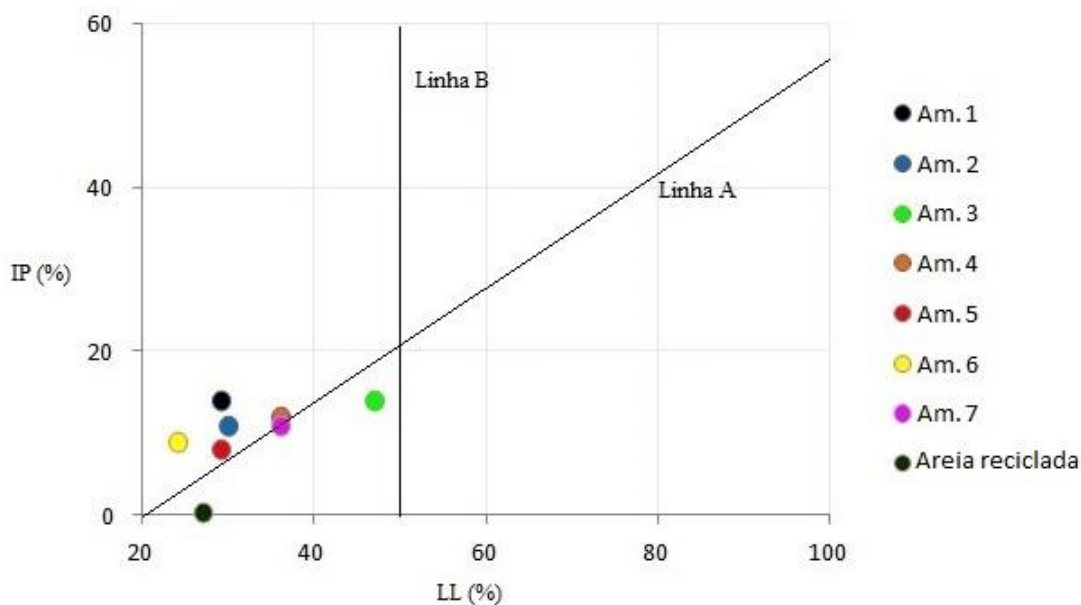
Pela Tabela 6 abaixo, é possível ver os resultados obtidos e as classificações das amostras através do Sistema Unificado. A localização das amostras é apresentada na Carta de Plasticidade de Casagrande pela Figura 29.

Tabela 6. Resultados da caracterização geotécnica básica

AMOSTRA	1	2	3	4	5	6	7	Areia Recicl.	
<b>Limite de Liquidez (%)</b>	29	30	47	36	29	24	36	27	
<b>Limite de Plasticidade (%)</b>	15	19	33	24	21	15	25	27	
<b>Índice de Plasticidade (%)</b>	14	11	14	12	8	9	11	0	
<b>Granulometria (% que passa)</b>	<b>#8</b>	100	100	100	100	100	100	94,8	100
	<b># 10</b>	100	100	100	100	100	100	73,8	83,4
	<b># 16</b>	98,6	98,4	100	98,8	98,3	98,7	63,9	73,9
	<b># 30</b>	95,9	95,8	95,8	96,1	91,5	93,1	48,7	51,8
	<b># 40</b>	87,8	90,2	92,8	93,5	83,7	84,6	42,9	38,7
	<b># 50</b>	75,9	79,5	89,1	90,1	75,2	75	34,0	27,6
	<b># 100</b>	53	57,5	79	77,8	57,7	52,2	18,8	12,1
	<b># 200</b>	43,6	45,8	69,3	61,4	30,9	35,1	8,4	4,5
<b>Classificação “USCS”</b>	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	ML	

Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

Figura 29 - Plasticidade das amostras



Fonte: (TAMURA, 2012, modificada).

Pelos resultados da Tabela 6, nota-se que todas as amostras de solo coletadas na região do Vale do Paraíba apresentaram características de solos argilo-arenosos de baixa plasticidade, sendo classificadas como CL, ou argila pouco plástica arenosa, com exceção do areia reciclada, que apresentou característica de solo silte-argiloso de baixa compressibilidade, classificada como ML.

As amostras 3 e 4, representativas da unidade pedológica LA5, apresentaram percentuais de partículas passando através da peneira #200 superiores às das demais amostras, coletadas na unidade pedológica LA6. Nota-se também que as amostras 4 e 7 possuem características geotécnicas semelhantes, o que deve-se ao fato de terem sido coletadas na mesma cidade de Guaratinguetá, porém sua distribuição granulométrica difere-se notavelmente.

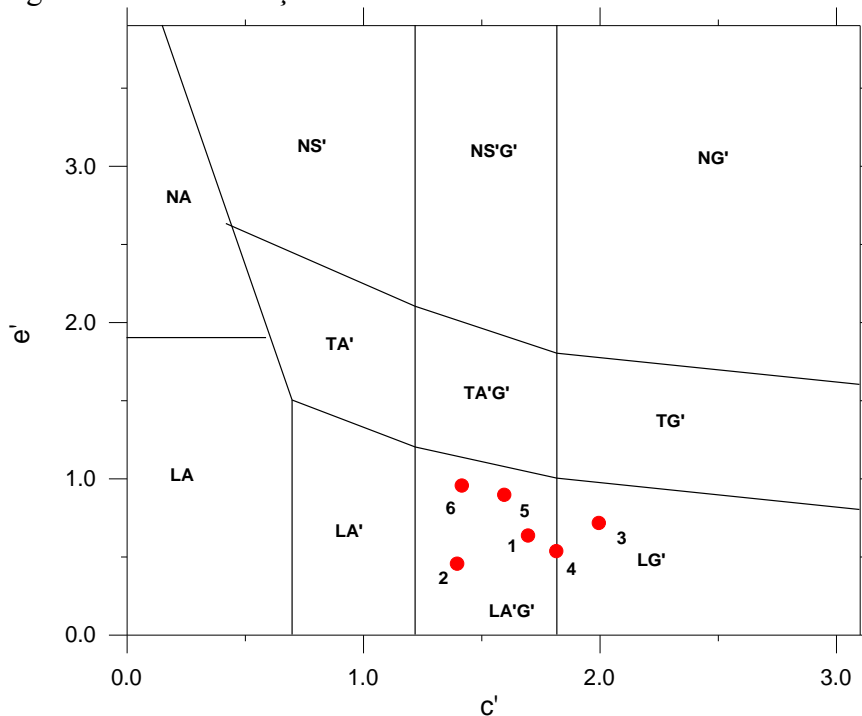
Os valores dos parâmetros classificatórios MCT e suas respectivas classificações MCT-M das amostras de 1 ao 6 se apresentam na Tabela 7, retirada da pesquisa de IC de TAMURA, 2012, abaixo. Em complementação, na Figura 30 as localizações das amostras estão indicadas no ábaco classificatório MCT-M, também retirada da mesma pesquisa. Tal ensaio não foi realizado para a amostra 7 e a areia reciclada por não ter disponibilidade de material necessário neste trabalho.

Tabela 7 - Parâmetros classificatórios MCT e classificações MCT-M das amostras

Amostra	Parâmetros Classificatórios MCT			Classificação MCT-M
	Pi (%)	e'	e'	
1	20	1,67	0,63	LA`G'
2	5	1,40	0,45	LA`G'
3	50	2,00	0,71	LG'
4	28	1,82	0,53	LG'
5	40	1,60	0,89	LA`G'
6	45	1,42	0,95	LA`G'

Fonte: (TAMURA, 2012).

Figura 30 - Classificação MCT-M das amostras de solo



Fonte: (TAMURA, 2012).

Pelo resultados da tabela 7, as amostras 1 ao 6 são classificadas como solos de comportamento laterítico areno-argiloso (LA'G') e de comportamento laterítico argiloso (LG') (TAMURA, 2012).

Pelos limites de plasticidade estabelecidos na Especificação Técnica (ET-DE-P00/006) do DER-SP, nota-se que os solos considerados apresentaram índices de plasticidade acima do especificado. Portanto, deve-se realizar a verificação do atendimento das condições A e B contidas nesta ET. Assim, ensaios de compactação, de determinação de massa específica real das partículas sólidas e de equivalente de areia foram executados. Na tabela 8 a seguir são apresentados seus resultados.

Tabela 8 – Resultados de ensaios de compactação, massa específica real das partículas sólidas e equivalente de areia

AMOSTRA	1	2	3	4	5	6	7	Areia Recicl.
Teor de Umidade Ótima (%)	14,5	15,0	22,0	18,0	15,0	13,0	18,4	10,1
Massa específica aparente seca máxima $\rho_{d_{\max}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,82	1,82	1,61	1,72	1,82	1,9	0,82	3,92
Massa específica real das partículas sólidas $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,69	2,70	2,71	2,69	2,70	2,71	0,97	4,40
Equivalente de areia (%)	19	12	8	9	20	17	29	40

Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

Com base nos resultados acima apresentados, observou-se que apesar das amostras 4 e 7 possuírem a mesma caracterização geotécnica, a amostra 7 apresentou a massa específica seca máxima e a massa específica real das partículas sólidas muito menores que da amostra 4. A areia reciclada mostrou-se mais densa e com maior porcentagem de areia do que as demais amostras. Também avaliou-se o enquadramento dos solos nas condições estabelecidas pelas inequações indicadas na condição A, obtendo-se os resultados constantes da Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados da verificação do atendimento às condições estabelecidas pelas inequações constantes na Condição A, da Especificação Técnica (ET-DE-P00/006)

AMOSTRA	1	2	3	4	5	6	7	Areia Recicl.
<b>Termos da Inequação</b> A	12,29	9,92	12,99	11,22	6,7	7,61	9,91	0,00
B	4,6	0,77	-5,41	-1,48	0,33	3,04	-3,67	-8,53
C	25,46	27,06	43,62	33,66	24,27	20,3	32,44	11,31
D	17,77	17,91	25,21	20,96	17,91	15,73	18,86	2,78

Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

Onde na Tabela 9, tem-se:

X: porcentagem de material que passa na peneira #40 (0,42 mm)

LL: limite de liquidez

LP: limite de plasticidade

IP: índice de plasticidade

$\rho_d$ : massa específica aparente máxima após compactação na energia intermediária

$\rho_s$ : massa específica real das partículas sólidas

E o cálculo segue-se:

$$A = (X / 100) \cdot IP \quad (1)$$

$$B = 100/\rho_d - [X \cdot (LP/100) + (100/\rho_s)] \quad (2)$$

$$C = (X / 100) \cdot LL \quad (3)$$

$$D = 100/\rho_d - 100/\rho_s \quad (4)$$

A Condição A desta Especificação Técnica determina que: A deve ser menor ou igual a B e que C deve ser menor ou igual a D.

Pela Tabela 9, percebe-se que nenhuma das amostras atenderam aos requisitos impostos. Esta tabela, como o próprio nome diz, apresenta os resultados da verificação do atendimento às condições estabelecidas pelas inequações constantes na Condição A, da Especificação Técnica (ET-DE-P00/006).

Contudo, deve-se enfatizar as preocupações externadas por Nogami e Villibor (1981) e Sória (1985), renomados autores que fizeram observações destacando que pelos países sub-desenvolvidos e em desenvolvimento estarem localizados, em grande parte do território, em regiões tropicais e sub-tropicais e em adição serem importadores naturais de tecnologia por encontrarem-se em um estágio menos avançado cientificamente, tem-se registrado, ao longo do tempo, experiências relatando diversas incompatibilidades quando da aplicação das metodologias citadas nesses países, notadamente no que se refere à seleção e escolha de materiais para comporem estruturas de pavimentos. Segundo Santana (1976), foi constatado que alguns solos com características tecnológicas que não se enquadravam nas especificações rodoviárias usuais, apresentavam bom comportamento geotécnico quando utilizados em obras, citando-se, como exemplo típico, a utilização de solos lateríticos em camadas estruturais de pavimentos (TAMURA, 2012).

As concreções lateríticas são muito utilizadas em algumas regiões do país onde há falta de material rochoso. Tais concreções são obtidas por peneiramento e, às vezes, complementadas por lavagem (BERNUCCI et al., 2006).

Conforme relatos realizados por Guimarães e Motta (2000), o meio rodoviário brasileiro que apresenta um solo concrecionado enriquecido com óxidos hidratados de ferro ou alumínio, tendo a caulinita como argilo-mineral predominante, com coloração vermelha, amarela, marrom ou alaranjada é denominado de laterita. Segundo Nogami e Villibor (1995), as lateritas contêm também freqüentemente a magnetita, a ilmenita, a hematita e, sobretudo, o quartzo; e ainda alertam para um dos problemas da laterita que é a grande variação de propriedades, o que dificulta a previsão de comportamento.

Em misturas asfálticas, empregam-se preferencialmente as lateritas lavadas, resultantes do processo de separação dos agregados graúdos desse material, maiores que 4,8mm (BERNUCCI et al., 2006). Segundo a granulometria realizada com as amostras de solo, 100%

dos materiais passam pela peneira #10. Na série de peneiras não foi usada a peneira #4, que retém partículas maiores que 4,8mm para usar como comparação com as lateritas lavadas.

Pelos resultados de EA, constantes da Tabela 8, pode-se afirmar que nenhum dos solos considerados apresentou EA superior a 30%, exceto pela amostra de areia reciclada, com um EA de 40%. Não obstante, deve-se lembrar que estes solos apresentam frações retidas na peneira 200 (vide Tabela 6, de ensaio de granulometria), constituídas predominantemente por areia fina, o que realça que os resultados obtidos nos ensaios de equivalentes de areia e granulometria não são consistentes.

Foram realizados os ensaios de compactação e capacidade de suporte CBR, cujos resultados são exibidos na Tabela 10. Constata-se que os valores indicados na coluna ( $\Delta w$ ) representam os desvios dos teores de umidade de moldagem dos corpos-de-prova, em relação aos teores de umidade ótima correspondentes aos ensaios Proctor.

**Tabela 10. Resultados de ensaios de compactação e capacidade de suporte CBR**

AMOSTRA	COMPACTAÇÃO PROCTOR		CAPACIDADE DE SUPORTE CBR		
	(ENERGIA INTERMEDIÁRIA)		(ENERGIA INTERMEDIÁRIA)		
	$\rho d_{\max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{\text{ót.}}$ (%)	$\Delta w$ (%)	CBR (%)	Exp. (%)
1	1,82	14,5	1,1	10	0,8
2	1,82	15,0	-1,3	10	1
3	1,61	22,0	1,6	13	1,3
4	1,72	18,0	1,2	11	1,2
5	1,82	15,0	-1	14	1,5
6	1,90	13,0	1,4	16	1,8
7	0,82	18,4	0,8	5	0,3
<b>Areia Recicl.</b>	3,95	10,1	2,4	1	0,1

Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

Os ensaios de compactação foram realizados na energia do Proctor Intermediário por ser a normalmente utilizada em camadas de sub-base e base de vias urbanas e estradas vicinais, e os resultados apresentados na Tabela 10 evidenciam o caráter argiloso dos solos considerados, exceto pela amostra de areia reciclada, que apresenta ser, obviamente, mais arenosa.

Os resultados de capacidade de suporte CBR de todas as amostras, tanto das amostras 1 ao 6 da pesquisa de IC de Tamura (2012) quanto as amostras 7 e areia reciclada coletadas para este trabalho, se considerados à luz das especificações clássicas para seleção de materiais para comporem estruturas de pavimentos, resultariam na não utilização desses solos em camadas de sub-base e base.

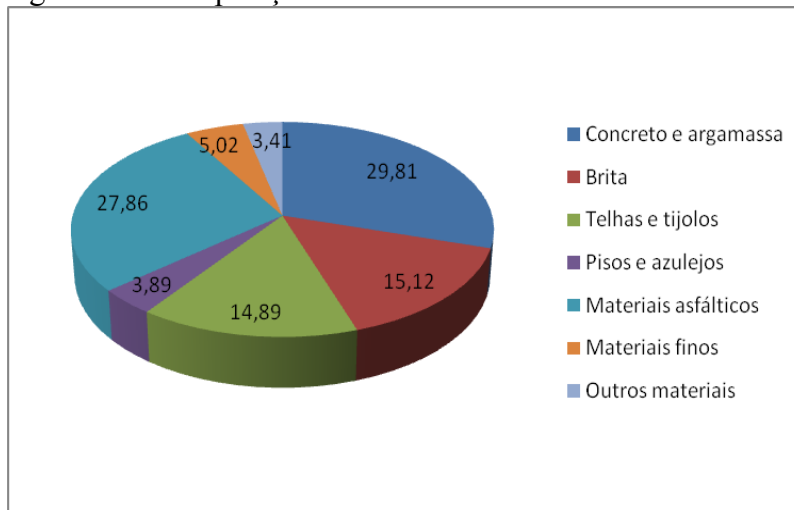
Pelo CBR da areia reciclada ter sido muito abaixo do que o esperado, este material não dará continuidade neste trabalho para ser usado como componente de mistura solo-agregado reciclado.

## 5.2 Agregados RCD

Todas as avaliações, tabelas, gráficos e fotos deste item sobre o agregado reciclado de Brita nº 1 coletado na Usina PMG foram retiradas da pesquisa de Iniciação Científica de TAMURA, 2012. E neste presente trabalho, como continuação da pesquisa, foram coletadas amostras de agregados reciclados de Brita nº 2 da Usina RCC.

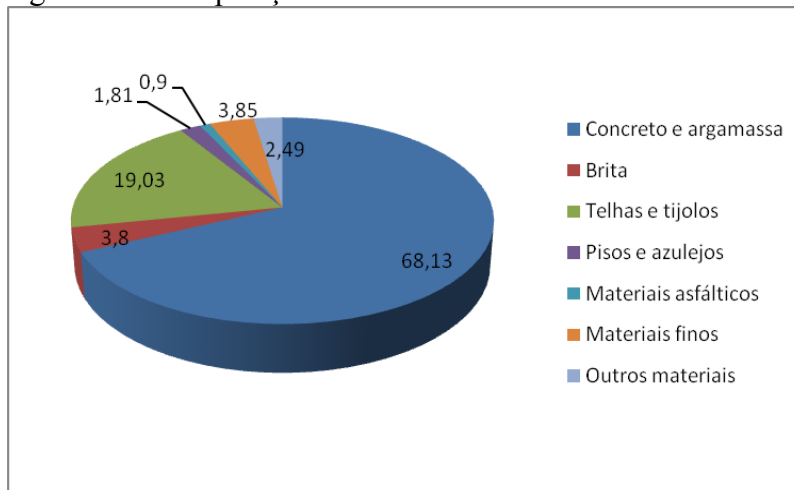
Tanto a brita nº 1 coletada na Usina PMG quanto a brita nº 2 coletada na Usina RCC apresentaram composições de sete grupos de materiais: (i) cimentícios (concretos e argamassas), (ii) britas, (iii) telhas e tijolos (materiais cerâmicos), (iv) pisos e azulejos (revestimentos), (v) resíduos de materiais asfálticos, (vi) materiais finos (areias, solos, etc) e (vii) outros materiais (não identificados). Através dos gráficos representados pelas Figuras 31 e 32 observam se os percentuais das Usinas PMG e RCC, respectivamente.

Figura 31 - Composição física da brita nº 1 coletada na usina PMG



Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

Figura 32 - Composição física da brita nº 2 coletada na usina RCC



Fonte: (UEDA, 2015, modificado).

Fica evidente notar que a brita nº 2 possui maior porcentagem de concreto e argamassa do que a brita nº 1. Em contrapartida, a brita nº 1 possui mais concentração de brita e de materiais asfálticos.

Em ambos os gráficos observa-se que os agregados reciclados apresentam composições bastante heterogêneas, destacando-se as participações majoritárias de resíduos de concreto, argamassa, materiais asfálticos e materiais cerâmicos.

Através das figuras 33 a 39 ilustram-se as características físicas observadas da brita nº 1, destacando-se que os materiais com diâmetro dos grãos menores que 2mm, por serem de difícil distinção, foram classificados como materiais finos.

Figura 33 – Material fino da brita nº 1



Fonte: (TAMURA, 2012).

Figura 34 - Material cerâmico da brita nº 1



Fonte: (TAMURA, 2012).

Figura 35 – Concreto e argamassa da brita nº 1    Figura 36 - Revestimentos da brita nº 1



Fonte: (TAMURA, 2012).



Fonte: (TAMURA, 2012).

Figura 37 – Materiais asfálticos da brita nº 1    Figura 38 - Britas da brita nº 1



Fonte: (TAMURA, 2012).



Fonte: (TAMURA, 2012).

Figura 39 - Seixos rolados da brita nº 1



Fonte: (TAMURA, 2012).

Em seguida, por meio das figuras 40 a 42 ilustram-se as características físicas observadas da brita nº 2. Do mesmo modo para a brita nº 1, os materiais com diâmetro dos grãos menores que 2mm, por serem de difícil distinção, foram classificados como materiais finos.

Figura 40 – Material fino da brita nº 2 reciclada



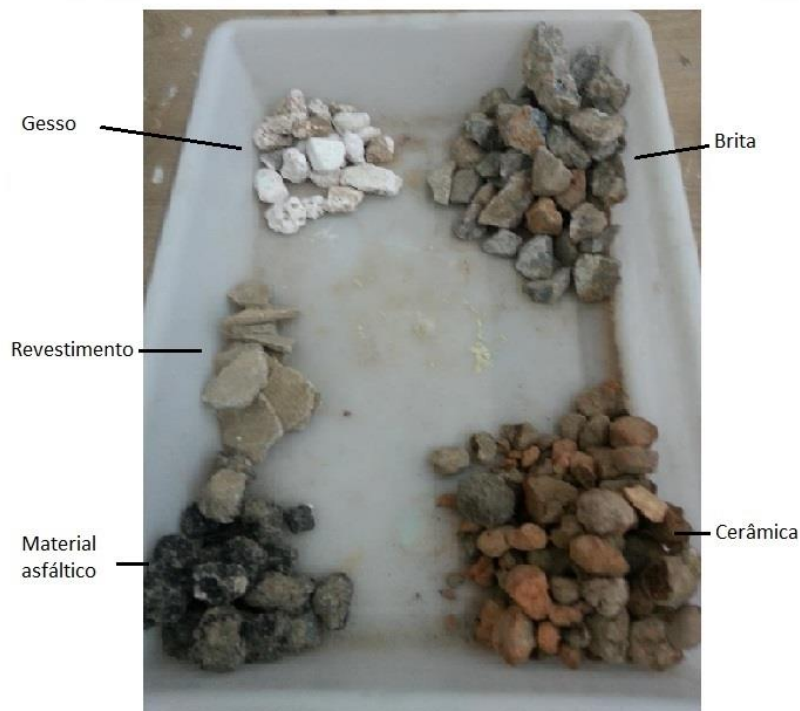
Fonte: Autora. Data de registro da imagem: 14/08/2015.

Figura 41 – Concreto e argamassa da brita nº 2 reciclada



Fonte: Autora. Data de registro da imagem: 14/08/2015.

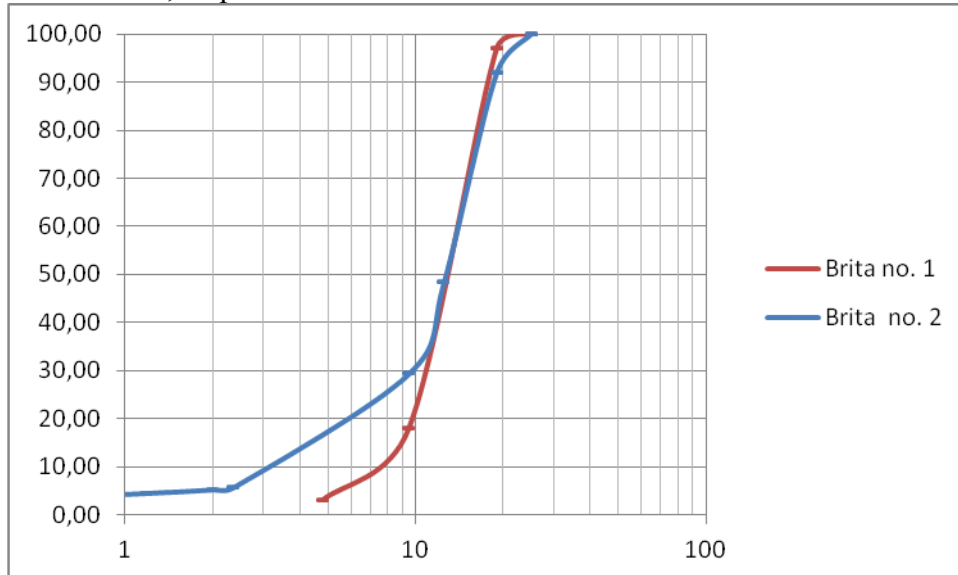
Figura 42 – Gesso, brita, cerâmica, material asfáltico e revestimento da brita nº 2 reciclada



Fonte: (UEDA, 2015, adaptado).

A Figura 43 a seguir mostra as curvas de distribuição granulométrica da brita 1 e da brita 2.

Figura 43 - Curva granulométrica dos agregados RCD (brita 1 e brita 2), coletados nas usinas PMG e RCC, respectivamente



Fonte: (TAMURA, 2012, modificada).

Ao comparar estas duas curvas, observa-se que a brita nº 2 da usina RCC possui mais materiais finos do que a brita nº 1.

Em seguida, apresentam-se pela Tabela 11 algumas características das curvas granulométricas.

Tabela 11 - Valores obtidos e limites fixados pela NBR 15115 (2004) com relação à graduação

	BRITA No. 1	NBR 15115 (2004)
Cu	2,86	$\geq 10$
% passa # No 40 (0,42mm)	1	$10 \leq a \leq 40$
Dimensão característica máxima dos grãos (mm)	25	63,5

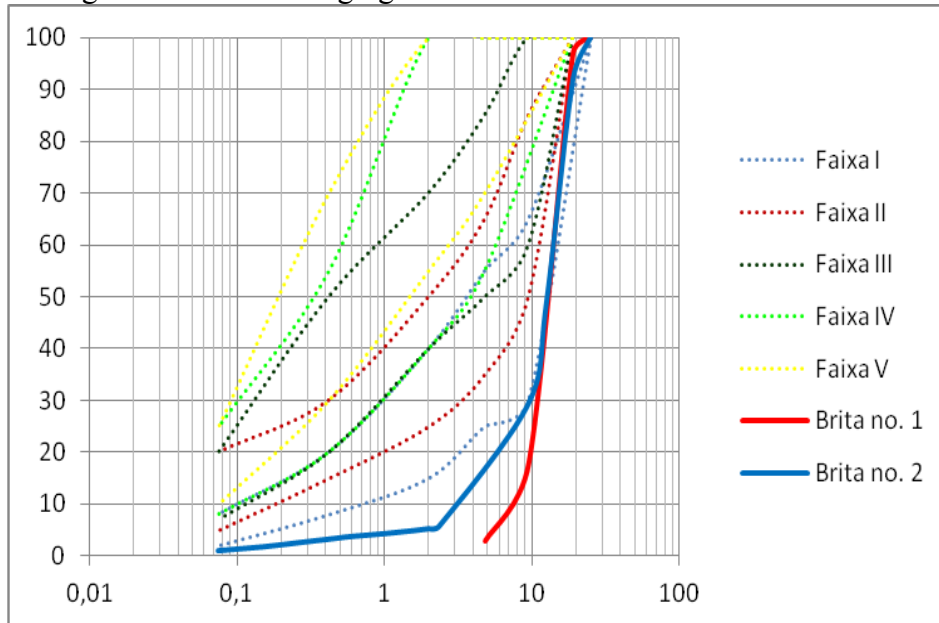
Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

Ao comparar os resultados obtidos na Tabela 11, com as exigências constantes da NBR 15115 (2004), observa-se que as brita nº 1 e nº 2, produzidas na usina PMG e RCC respectivamente, não atendem os requisitos estabelecidos na citada norma, pois apresentam percentuais de materiais passante na peneira no. 40 e coeficiente de uniformidade (Cu) inferiores aos preconizados.

Através do gráfico da Figura 44, onde se apresentam as curvas granulométricas de ambas as britas junto com os limites das Faixas I, II, III, IV e V da Especificação DER ET-

DE-P00/006, nota-se que ambos os agregados brita n° 1 e brita n° 2 possuem distribuição granulométrica fora do enquadramento dos limites estabelecidos nas citadas faixas.

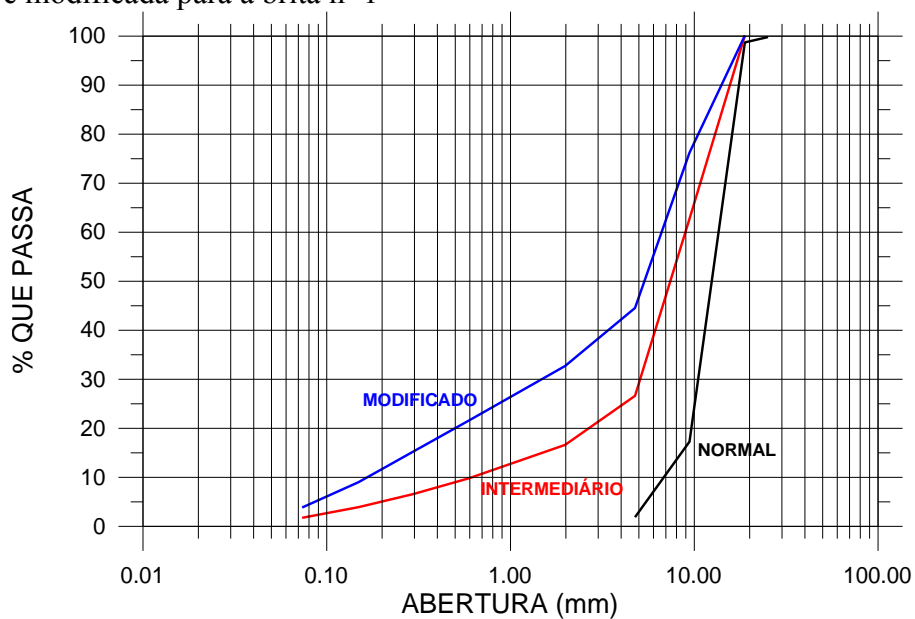
Figura 44 - Faixas granulométricas I, II, III, IV e V da Especificação DER ET-DE-P00/006, e curva granulométrica do agregado RCD



Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

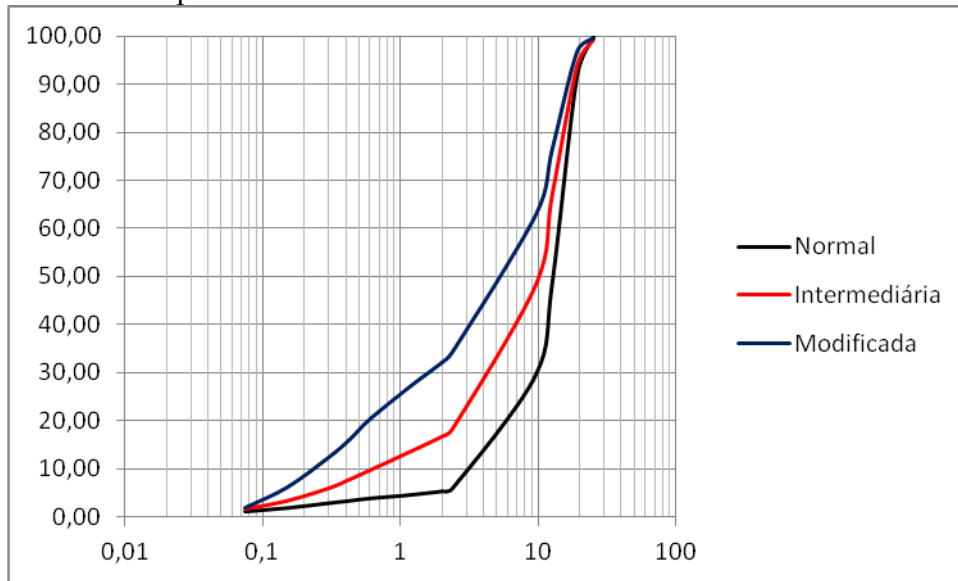
Após uma compactação nas energias intermediária e modificada das brita n° 1 e n° 2, houveram alterações nas suas curvas granulométricas, que podem ser observadas nas Figuras 45 e 46, respectivamente.

Figura 45 - Comparativo granulométrico antes e após compactação nas energias intermediária e modificada para a brita n° 1



Fonte: (TAMURA, 2012).

Figura 46 - Comparativo granulométrico antes e após compactação nas energias intermediária e modificada para a brita nº 2



Fonte: Autora.

Com o resultado destas curvas granulométricas e com os valores da Tabela 11, criou-se a Tabela 12 a seguir:

Tabela 12. Valores obtidos e limites fixados pela NBR-15115 (2004) com relação à graduação

Material	Condição	Dimensão característica máxima dos grãos (mm)	Porcentagem que passa na peneira 0,42mm (%)	Coefficiente de Uniformidade Cu
Agregado RCD (brita no. 1)	Inicial	25	1	2,86
	Após compactação	19	8,0 (PI) 19,0 (PM)	15,0 (PI) 36,1 (PM)
Agregado RCD (brita no. 2)	Inicial	48	3,24	5
	Após compactação	27	7,68 (PI) 15,9 (PM)	21,7 (PI) 35,4 (PM)
Agregado	NBR-15115 (2004)	63,5	$10 \leq a \leq 40$	$\geq 10$

Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

Junto com os valores de desvio padrão das curvas granulométricas das Figuras 45 e 46 e da Tabela 12, unindo com os valores do índice de degradação, ID, deslocamento máximo e deslocamento mínimo, produziu-se a Tabela 13 abaixo. Tal tabela torna possível a comparação de alguns parâmetros das curvas obtidas com os limites estabelecidos na NBR 15115 (2004) (TAMURA, 2012).

Tabela 13 - Índice de degradação de Ruiz

Material	Parâmetros	Energia empregada	
		Intermediária	Modificada
Agregado RCD (brita no. 1)	Índice de degradação de Ruiz (ID)	21,02	23,11
	Deslocamento máximo	45,5 (#9,5mm)	59,0 (#9,5mm)
	Deslocamento mínimo	1,4 (#19,0mm)	1,4 (#19,0mm)
	Desvio padrão	23,25	20,25
Agregado RCD (brita no. 2)	Índice de degradação de Ruiz (ID)	7,34	15,66
	Deslocamento máximo	18,75 (#9,5mm)	33,30 (#9,5mm)
	Deslocamento mínimo	0,56 (#0,075mm)	0,38 (#25,0mm)
	Desvio padrão	9,69	19,34

Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

Sendo que o Índice de Degradação de Ruiz (ID) é definido como a somatória dos deslocamentos  $\Sigma\Delta_i$  da curva granulométrica em cada peneira, dividida pelo número N de peneiras (SANTOS, 1990, p.94):

$$ID = \Sigma\Delta_i/N \quad (5)$$

Adicionalmente foi realizado o ensaio de Abrasão Los Angeles, na Graduação A, cujo resultado foi de 61,7%. O que é abaixo do que as normas brasileiras geralmente limitam, devendo estar entre 40 a 55% para utilização do agregado para camadas de base e revestimento de pavimentação.

Segundo Marques (2001), os agregados de algumas regiões do país, como a região do município do Rio de Janeiro, obtiveram resultados da abrasão Los Angeles muito acima de 55%, em alguns casos, chegando a 65%. Devido à escassez de matéria-prima com agregados que atendessem tal parâmetro nas proximidades da obra, muitas rodovias foram pavimentadas usando-se os agregados locais, embora estivessem em desacordo com a especificação vigente, mas com a autorização do DNER ou órgão regional competente para tal procedimento.

Ao analisar os resultados obtidos, notou-se que a brita nº 1 reciclada é mais suscetível à quebra na compactação do que a brita nº 2, mesmo possuindo maior percentual de material asfáltico e de brita. Em ambos os casos a fração fina do material é aumentado, como visto nas Figuras 45 e 46. Acrescenta-se que o ID cresce com o aumento da energia de compactação, visto na Tabela 13.

A faixa granulométrica em que houve a maior modificação ocorreu na peneira 19,0mm, em ambas as energias intermediária e modificada para os dois agregados.

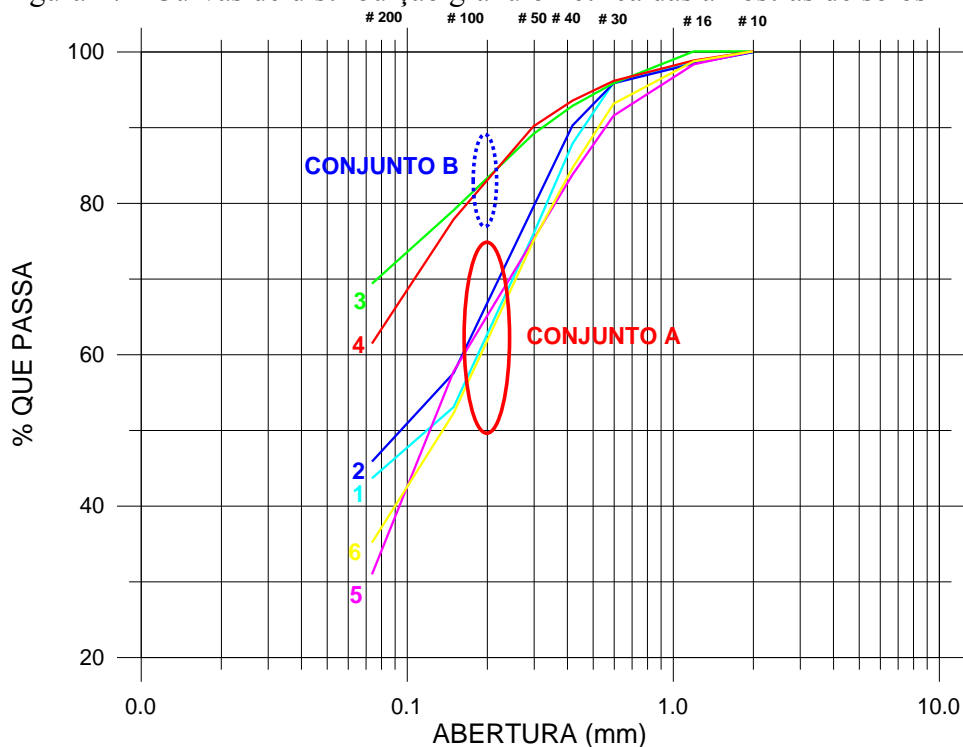
Pelas curvas granulométricas das Figuras 45 e 46, pode-se dizer que ao compactar as britas nº 1 e nº 2, nas energias intermediária e modificada, suas curvas alteradas satisfazem as

condições das Faixas I e II da Especificação DER ET-DE-P00/006, que anteriormente não satisfazia na condição normal. Na energia intermediária, ambos os agregados de brita nº 1 e nº 2 entram na Faixa I, exceto a porcentagem passante na peneira 4,8mm. E na energia modificada, as duas britas entram na Faixa II, exceto também para a porcentagem passante na peneira 4,8mm.

### 5.3 Solo-agregado RCD

Na pesquisa de iniciação científica de TAMURA, 2012, obteve dois conjuntos de misturas solo-agregado. Como pode ser evidenciado na Figura 47, em que foi considerado somente as amostras 1 e 4 como representativas, respectivamente, dos conjuntos A e B para misturar com o agregado de brita nº 1 reciclado.

Figura 47 - Curvas de distribuição granulométrica das amostras de solos



Fonte: (TAMURA, 2012).

Em continuação à essa pesquisa de IC, neste trabalho optou-se por misturar a amostra de solo 7 com o agregado de brita nº 2 reciclado.

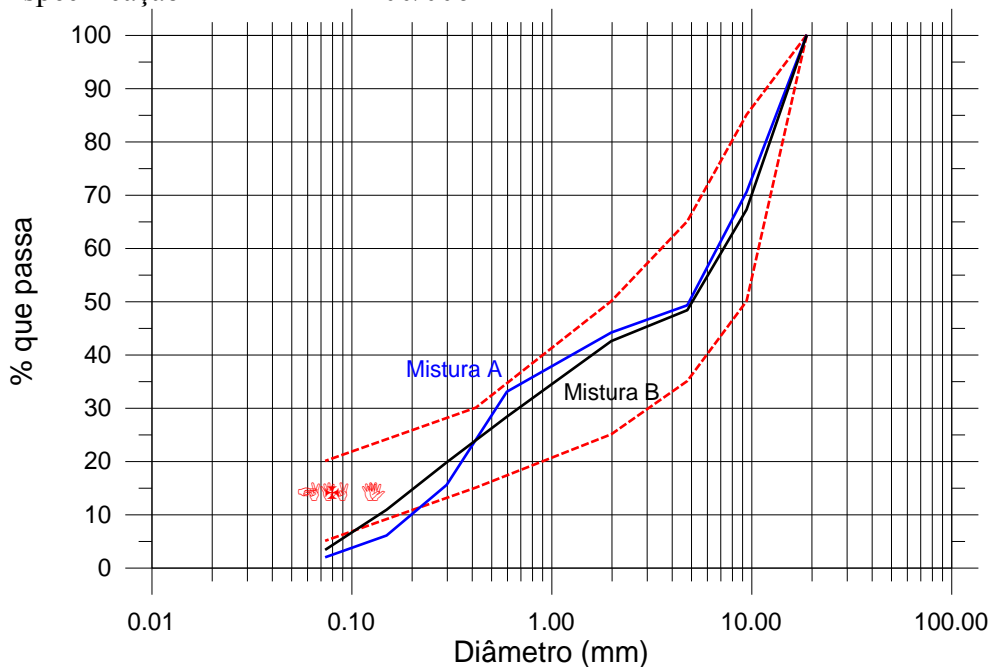
Assim, estabeleceram-se os percentuais de solo-agregado através do Método Rottfuchs, conforme descrito por Senço (1980), para as Misturas A (amostra de solo 1 + brita nº 1 reciclada), Mistura B (amostra de solo 4 + brita nº 1 reciclada) e Mistura C (amostra de solo 7

+ brita nº 2 reciclada), para que as suas curvas de distribuição granulométrica entre nas faixas da Especificação DER ET-DE-P00/006.

Da aplicação do referido método, constatou-se que os percentuais de solo, de ambas as amostras 1 e 4, foram similares nas diferentes misturas estabelecidas para as faixas granulométricas consideradas. Observou-se, também, que o melhor enquadramento ocorreu na faixa II, na proporção de 45% solo e 55% agregado (TAMURA, 2012).

Através da Figura 48 apresentam-se as curvas de distribuição granulométrica das Misturas A e B proporcionadas e os limites da faixa II da Especificação DER ET-DE-P00/006 (TAMURA, 2012).

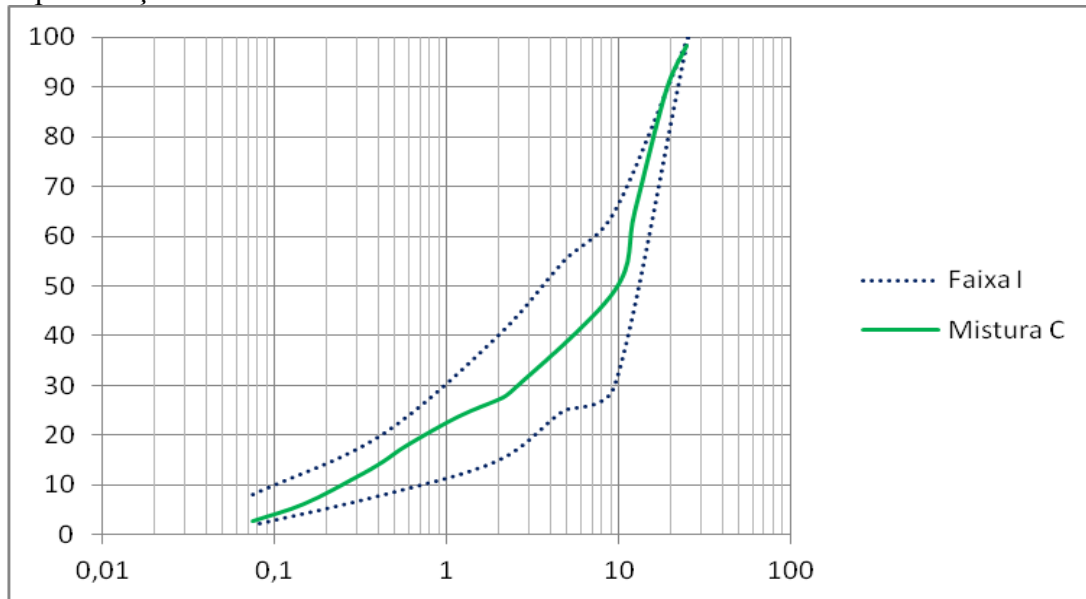
Figura 48 - Curvas de distribuição granulométrica das Misturas A e B e limites da faixa II da Especificação DER ET-DE-P00/006



Fonte: (TAMURA, 2012).

Da mesma forma, pelo mesmo método de Rottfuchs, determinou-se que o melhor enquadramento aconteceu na faixa I, na proposta de 30% solo e 70% agregado. Por meio da Figura 49, demonstra-se a distribuição granulométrica da Mistura C e os limites da Faixa I da Especificação DER ET-DE-P00/006.

Figura 49 - Curvas de distribuição granulométrica da Mistura C e limites da faixa II da Especificação DER ET-DE-P00/006



Fonte: Autora.

Submetidas a ensaios de compactação Proctor, nas energias intermediária e modificada, as misturas apresentaram os resultados constantes da Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados de ensaios de compactação das misturas A, B e C

Amostra	Compactação Proctor			
	Energia Intermediária		Energia Modificada	
	$\rho d_{m\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>ót</sub> (%)	$\rho d_{m\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>ót</sub> (%)
<b>Mistura A</b>	1,92	11	2,1	9,5
<b>Mistura B</b>	1,85	10	1,96	9
<b>Mistura C</b>	3,9	11,6	3,93	12,5

Fonte: (TAMURA, 2012, modificada).

Com os valores da Tabela 14, foi concebível fazer ensaios de ISC, ou CBR, para todas as misturas. Entretanto, diferente da pesquisa de IC de Tamura (2012), em que as Misturas A e B ficaram de cura por 10 e 30 dias, neste presente exercício a Mistura C ficou de cura por 4 dias, conforme o DNER-ME 049/94, o normal aplicado em ensaios de CBR.

Em observância, durante o processo de cura os corpos de prova tiveram suas massas determinadas, instantes antes do acondicionamento na caixa d'água com serragem umedecida e, imediatamente, após a sua retirada. As massas determinadas nesse período tiveram mudanças, conforme valores apresentados na Tabela 15, o que indica o aumento do teor de umidade das amostras. De forma geral, as maiores variações ocorreram nas amostras da mistura B (TAMURA, 2012).

Tabela 15 - Variação das massas dos corpos de prova, durante o processo de cura

Amostra	Energia de compactação	Tempo de cura	
		10 dias	30 dias
<b>Mistura A</b>	Intermediária	+ 45g	+ 30g
	Modificada	+ 40g	+ 40g
<b>Mistura B</b>	Intermediária	+ 70g	+ 55g
	Modificada	+ 45g	+ 55g

Fonte: (TAMURA, 2012).

Através da Tabela 16, que apresenta os resultados de ensaios de Índice de Suporte Califórnia para as três misturas, observa-se que os valores obtidos na energia modificada foram superiores aos da energia intermediária em todos os casos. Constata-se que, ao comparar os valores de CBR nos diferentes tempos de cura, houve reduções nas suas capacidades de suporte. Tal fato decorreu, muito provavelmente, da absorção de água pelos corpos de prova, indicadas pelas variações das massas dos mesmos, conforme indicado na Tabela 15.

Tabela 16 - Resultados do ensaio do Índice de Suporte Califórnia

Amostra	Tempo de cura (dias)	CBR (%)	
		Energia Intermediária	Energia Modificada
<b>Mistura A</b>	0	32	37
	10	23	28
	30	25	30
<b>Mistura B</b>	0	31	38
	10	25	30
	30	26	27
<b>Mistura C</b>	4	29	39

Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

Apresenta-se na Tabela 17 os valores de expansões medidas nos ensaios de Índice de Suporte Califórnia com o tempo de cura de 0, 10 e 30 dias para as Misturas A e B, e com o tempo de cura de 4 dias para a Mistura C. Pelos resultados, nota-se que ocorreram pequenas expansões nas Misturas A, B e C, porém nessas duas primeiras apenas nos corpos de prova que não sofreram o processo de cura, as quais se encontram abaixo dos valores máximos recomendados na Especificação DER ET-DE-P00/006.

Tabela 17 - Expansões medidas nos ensaios de Índice de Suporte Califórnia

Amostra	Tempo de cura (dias)	Expansão (%)	
		Energia Intermediária	Energia Modificada
Mistura A	0	0,4	0,3
	10	0	0
	30	0	0
Mistura B	0	0,3	0,2
	10	0	0
	30	0	0
Mistura C	4	0,3	0,5

Fonte: (TAMURA, 2012, modificado).

Segundo a Especificação Técnica ET-DE-P00/006 – sub-base ou base de Solo-Brita (DER-SP), a mistura solo-brita deve satisfazer, dentre outras, as seguintes exigências:

- a) a porcentagem de brita, em peso da mistura, não pode ser inferior a 50%;
- b)  $CBR \geq 80\%$  e expansão  $\leq 0,5\%$  na energia modificada, para base do pavimento;
- c)  $CBR \geq 30\%$  e expansão  $\leq 1,0\%$  na energia intermediária, para sub-base do pavimento.

Dessa maneira, ao se comparar e considerar os resultados apresentados nas Tabelas 16 e 17, constata-se que para as Misturas A e B, os maiores valores de capacidade de suporte CBR foram obtidos nos corpos de prova que não foram submetidos ao processo de cura. A Mistura C, mesmo passando por um processo de cura de 4 dias, foi o que obteve o melhor resultado de capacidade de suporte na energia modificada, com 39%. Entretanto, mesmo com o maior valor determinado de CBR, ainda não satisfazem a exigência da Especificação Técnica ET-DE-P00/006 para utilização das misturas em camadas de base de pavimentos. Podendo-se, no entanto, serem empregadas em camadas de reforço do subleito e sub-base.

A manutenção dos corpos-de-prova em processo de cura mostrou-se inadequada, pois propiciou a elevação dos teores de umidade com consequente redução dos valores de capacidade de suporte CBR. A diferença entre os resultados das Misturas A e B com a Mistura C deve-se, presumivelmente, às diferentes composições dos agregados reciclados, sendo a brita nº 2 da Mistura C com maior concentração de materiais cimentícios (concretos e argamassas), 68,13%, do que a brita nº 1 usada nas Misturas A e B, com 29,81%, vide Figuras 31 e 32. Outro fator que pode ter influenciado nesta diferença é que mesmo que a amostra de solo 7, usada na Mistura C, e a amostra 4, usada na Mistura B, tenham apresentado

características geotécnicas semelhantes, elas exibiram curvas granulométricas discrepantes, como mostrado na Tabela 6.

## 6 CONSIDERAÇÃO SOBRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Pelos resultados constatados nas Figuras 45 e 46, sobre a granulometria das britas nº 1 e nº 2 após sofrerem compactação nas energias intermediária e modificada, percebe-se claramente como suas curvas de distribuição granulométrica mudam consideravelmente. Assim como os resultados apresentados no Índice de Degradação Ruiz, da Tabela 13, e do ensaio de Abrasão Los Angeles, com valor de 61,7%, pode-se afirmar que o material de agregado reciclado é muito suscetível à quebra por meios mecânicos, ou seja, não há estabilidade física.

Ao saber disso, não é garantido que o agregado que compõe a mistura solo-agregado permanece o mesmo após sua compactação do ensaio de CBR. Pode-se dizer então que os resultados apresentados nas Tabelas 16 e 17 são falhos e inconsistentes, pois o agregado não possuirá sua granulometria original no produto final.

Talvez este material devesse sofrer um processo de desgaste ou receber algum tratamento, químico ou físico, antes de sua colocação como produto no mercado, pois os resultados destes ensaios mostram que o agregado reciclado não possui estabilidade física para a aplicação em camadas de base de pavimentação.

Em relação aos ensaios em geral, infelizmente não foram encontrados muitos artigos técnicos científicos dentro da literatura técnica pertinente, que relacionassem com o tema objeto deste trabalho.

Um dos poucos trabalhos encontrados, de autoria de Hortegal et al (2009), apresenta os resultados de três misturas solo-agregado RCD, preparadas nas seguintes proporções: mistura 1 (70% solo; 30% agregado RCD); mistura 2 (50% solo; 50% agregado RCD) e mistura 3 (30% solo; 70% agregado RCD). O solo utilizado caracteriza-se como uma areia fina pouco argilosa. Submetidas a ensaios de compactação e CBR, na energia intermediária, as misturas apresentaram os valores indicados na Tabela 18 (TAMURA, 2012).

Tabela 18 - Resultados de ensaios de compactação e CBR, extraídos de Hortegal et al (2009)

Mistura	Compactação Proctor		CBR (%) <sup>*</sup>
	$\rho_{d\text{máx}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	w <sub>ót</sub> (%)	
1	1,78	8	6
2	1,86	4,5	28
3	1,93	7,5	67

\*correspondente a umidade ótima de compactação

Fonte: (Hortegal et al, 2009).

Pelos resultados encontrados na Tabela 18, nota-se que a mistura 3 (30% solo; 70% agregado RCD) apresentou o melhor resultado de capacidade de suporte CBR, em que permite a sua utilização em camada de sub-base de pavimento, dentro das condições da Especificação Técnica ET-DE-P00/006 – sub-base ou base de Solo-Brita (DER-SP). Porém, por conta da falta de informações sobre a composição do agregado RCD utilizado nessa pesquisa, não foi possível estabelecer-se uma comparação com os resultados obtidos no presente trabalho, os quais apresentaram baixos valores de suporte devido, provavelmente, ao baixo percentual de materiais cimentícios e pétreos das Misturas A e B, conforme apresentado na Figura 45 (TAMURA, 2012).

Outro trabalho encontrado, de autoria de Santos e Matté (2014), se expressa sobre ensaios de CBR com mistura de solo-agregado RCD. Sendo o solo oriundo de União do Oeste (SC) e o agregado era composto de frações cimentícias (argamassas e concreto), rochosas (britas), cerâmica (pisos e azulejos), resíduos indesejáveis (papel, matéria, plástico, etc) e material fino (passante na peneira 4,8mm). Com suas maiores porcentagens em materiais cimentícios (41,69%) e britas (53,68%).

O teor de absorção encontrado nesta pesquisa foi de 15,8%. No tocante à forma dos grãos verificou-se que há predominância da forma cúbica na amostra analisada, cujo valor é de 65,7%. Do ensaio de granulometria obteve-se a seguinte composição do material: 40% de pedregulho, 22,21% de areia grossa, 13,82% de areia média, 14,38% de areia fina e 9,88% de finos. De acordo com a NBR 15115 (2004) o coeficiente de uniformidade (Cu) do agregado deve apresentar valor maior ou igual a 10. Nesta pesquisa foi encontrado um valor igual a 85, o que indica que o agregado reciclado ensaiado é bem graduado e não uniforme (SANTOS; MATTÉ, 2014).

Em relação ao solo trata-se de um silte inorgânico. A massa específica dos grãos é de 2,97 g/cm<sup>3</sup>, o limite de liquidez é de 60%, o limite de plasticidade é de 53% e o coeficiente de uniformidade igual a 38,5 (SANTOS; MATTÉ, 2014).

Em seguida, utilizou-se o método gráfico das áreas balanceadas para o enquadramento da mistura na faixa granulométrica de Faixa II do DER/SC. Foi encontrado que a mistura teria proporção de 20% solo e 80% agregado reciclado. Foi realizado ensaios de compactação nesta mistura, dando uma massa específica aparente de 1,6 g/cm<sup>3</sup> e umidade ótima de 26%. Também foram feitas ensaios de CBR para o solo e para a mistura de solo-agregado, tendo seus resultados obtidos segundo a Tabela 19 a seguir:

Tabela 19 – Resultados de CBR e Expansão, extraídos de Santos e Matté (2014)

	<b>CBR energia intermediária (%)</b>	<b>Expansão (%)</b>
<b>Solo</b>	18,5	0,5
<b>Solo-agregado reciclado</b>	42,7	0,03

Fonte: (SANTOS; MATTÉ, 2014).

Pelos resultados desta Tabela 19, nota-se que o agregado utilizado aumentou e melhorou o CBR da mistura de Santos e Matté (2014). Tendo um resultado melhor do que o deste presente trabalho quando comparado com a energia de compactação intermediária, com o máximo de CBR de 31%. Tal diferença muito se deve, provavelmente ao alto teor de brita que compõe o agregado reciclado de Santos e Matté (2014), de 53,68%, em vista com o 15,12% e 3,8% da brita nº 1 e nº 2 deste trabalho, respectivamente (Figuras 45 e 46). Outro fator que deve-se destacar é a alta capacidade de suporte do solo de Santos e Matté (2014), cujo valor é 18,5%, quando comparada com o maior valor de CBR na energia intermediária encontrado nas amostras de solo nesta pesquisa, de 16% (vide Tabela 10).

Adicionalmente, no trabalho de Santos e Matté (2014), foi utilizada uma proporção de 20% solo e 80% agregado, na mistura solo-agregado. Ao considerar os resultados de Hotergal et al (2009), pode-se afirmar que quanto maior a concentração de agregados na mistura, melhor o resultado do Índice de Suporte de Califórnia. Portanto. Talvez, ao invés de ter usado neste presente trabalho uma proporção de 30%-70%, uma quantidade maior de agregado na mistura pudesse ter melhorado o resultado de CBR.

Como aprimoramento dos próximos trabalhos referentes à esse tema, é indicado o uso de concentrações acima de ou igual a 80% para agregados. Não foram realizados ensaios para 100% de agregados, pois foge ao tema deste exercício que é o emprego do solo regional junto com agregados reciclados próximos da localidade para uso como base e sub-base de pavimentação com baixo custo.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho foi uma complementação e continuação da pesquisa de Iniciação Científica de Tamura (2012). Em que seus resultados deste e daquele não diferiram demasiadamente. Ambos os trabalhos concluíram que suas misturas podem ser usadas apenas como sub-base e reforço de subleito em camadas de pavimentação, entretanto não como base.

Averigua-se que o agregado reciclado, tanto da Usina PMG quanto da Usina RCC, não é bom o suficiente para seu uso no mercado como matéria-prima de camadas de base de pavimentação. Porém, deve-se destacar que ele possui um alto potencial de mercado em termos de redução de custo na pavimentação, redução de aquisição de agregados naturais e redução de volume nos aterros sanitários.

Nota-se que o processo atual de reciclagem desse agregado é o mesmo usado para a britagem de agregados naturais. O que não poderia ocorrer por se tratarem de materiais de origens diferentes e de qualidades diferentes. E percebe-se também que as composições dos agregados reciclados diferem bastante para cada usina de reciclagem, pois cada usina coleta os resíduos sólidos de construção civil em localidades diferentes. Portanto, tanto a área de coleta da usina, quanto a época de coleta e até mesmo as leis da prefeitura que influenciam na coleta seletiva de reciclagem podem influenciar em seus componentes.

Há falta de estudos que indiquem quais os melhores processos e tratamentos que o agregado reciclado deveria sofrer, além de ser necessário um controle tecnológico e de produção para o seu aprimoramento, principalmente no que se diz respeito sobre a sua estabilidade de forma física, que influenciam por demais nos resultados dos ensaios.

## REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. **O domínio dos mares de morro no Brasil**. São Paulo, USP/Instituto de geografia, (Série Geomorfologia, 2), 9 p. 1966.

AB'SABER, A. N.; BERNARDES, N. **Vale do Paraíba, Serra da Mantiqueira e Arredores de São Paulo**. Engenharia, Mineração e Metalurgia. 1956.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação, 1986.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2005.

ALBERNAZ, C. A. V. **Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão**. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

ALMEIDA, F. F. M. DE; CARNEIRO, C. D. R. **Origem e Evolução da Serra do Mar**. Revista Brasileira de Geociências, 1998.

ASTM C 125: *Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates*. USA, 2005.

BAPTISTA, A. **Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central: contribuição para o seu estudo e aplicação**. Dissertação (Doutorado) - FCTU de Coimbra, grau de Doutor em Engenharia Civil, Coimbra, 2006.

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

CABRAL, G. L. L. **Metodologia de produção de emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. Brasília, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em 18 ago. 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DER ET-DE-P00/006**: Sub-base ou base de solo brita, São Paulo, 2006.

DIÁRIO OFICIAL DA CIDADE DE SÃO PAULO. **Decreto nº 48.075, de 28 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil, em obras e serviços de pavimentação de vias públicas do Município de São Paulo. São Paulo, 51 (243) – pg. 9, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/95**: Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 049/94**: Solos – Determinação do “índice de suporte califórnia” utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/04 – ES**: Pavimentos flexíveis: concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS DO RIO DE JANEIRO. **DRM-RJ – Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro. Ponto de Interesse Geológico: Serra do Mar**. Rio de Janeiro, 2007.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Brasília, 2006.

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

GUIMARÃES, A. C. R.; MOTTA, L. M. G. **Execução de revestimento asfáltico com agregado de laterita lavada no Acre**. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 13. 2000, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 2000. p.86-95.

HORTEGAL, M. V.; FERREIRA, T. C.; SANT'ANA, W. C. **Utilização de agregados resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em São Luis, MA**. Revista Pesquisa em Foco, v. 17, n.2, p. 60-74, 2009

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. IAC. **Mapa Pedológico**. Campinas, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Banco de dados do IBGE**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>> Acesso em: 21 ago. 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT. Escala 1:1000000. São Paulo, 1981.

JOFRÉ, C. **Reciclado de firmes com cimento**. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários – Reciclagem de Pavimentos. FEUP, Porto. pp.41-76, 2003.

MARQUES, G. L. O. **Procedimentos de avaliação e caracterização de agregados minerais usados na pavimentação asfáltica**. Seminário de qualificação ao doutoramento – Coordenação 156 Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MDOT – MICHIGAN STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Sustainable recycled materials for concrete pavements*. Applied Pavement Technology, Inc. Michigan, 2011.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 1997. 380 p.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2000.

METSO MINERALS. **Manual de britagem**. 6. ed. São Paulo: Metso Brasil Indústria e Comércio Ltda., 2005.

MONTIBELLER-FILHO, G. **O mito do desenvolvimento sustentável: meio ambiente e custos sociais no moderno sistema produtor de mercadorias**. Florianópolis: UFCS, Florianópolis, 2004.

MOREIRA, J. P. **Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento**. Dissertação (mestrado) - Universidade do Minho. Engenharia Rodoviária. Guimarães, 2005.

NORMA BRASILEIRA. **NBR 15115**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação: procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Editora Vilibor, 1995.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: COPPE/CNPq/ABMS, 1981.

NUNES, E.; NÓBREGA JÚNIOR, O. B. **Geografia Física I – Minerais e Rochas**. Programa UNIDIS. UEPB. Rio Grande do Norte, 2009.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 10 ed. São Paulo: GLOBO, 1970.

SANTANA, H. **Os solos lateríticos e a pavimentação**. IPR, Rio de Janeiro, 1976, 37p. (Publicação 543).

SANTOS, A. G. B. **Bases Granulares e Agregados Reciclados**. Trabalho de Mestrado da Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil, 2009.

SANTOS, A. G; MATTE, G. R. **Estudo da mistura de solo e agregado reciclado para construção de camadas de pavimentos de União do Oeste – SC**. In: XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2014, Curitiba. ANPET 2014, 2014.

SANTOS, G. T. **Caracterização Geotécnica de Riodacito de Santa Catarina**. Dissertação (mestrado) - CPGEC/UFRGS. Rio Grande do Sul, 1990.

SENÇO, W. **Pavimentação**. 3ª. ed. São Paulo. Grêmio Politécnico, 1980.

SÓRIA, M.H.A. **Reflexões lógicas sobre classificação de solos**. Tese de Doutorado. EESC-USP, 1985.

TAMURA, J. Y. **Estudo sobre misturas solo-agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil, para fins de pavimentação de vias urbanas de baixo volume de tráfego**. Pesquisa de Iniciação Científica da FAPESP - UNESP de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2012.

UEDA, C. M. **Estudo sobre Materiais Reciclados em Construção Civil: Caracterização e Qualificação de Agregados Reciclados oriundos de Resíduos de Construções Civis.** Trabalho de Graduação de Engenharia Civil - UNESP de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2015.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Igneous Rocks United States Geological Service.** Disponível em: <<http://geomaps.wr.usgs.gov/parks/rxmin/rock.html>>. Acesso em: 29 dez. 14.

WIRTGEN. **Reciclagem a frio: Tecnologia de Reciclagem a Frio Wirtgen.** 2 ed. 2008.

WOODS, K.B. *Highway engineering handbook*. New York: McGraw Hill, 1960.