

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**

Fundação Instituída nos termos da Lei nº  
5.152, de 21/10/1966 – São Luís – Maranhão



**Coordenadoria do Curso de Engenharia  
Civil. (Campus Bacanga - São Luís)**

**IGOR ADAN GONÇALVES SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
AGREGADOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL (RCD) PARA USO EM  
CAMADAS DE PAVIMENTO**

**SÃO LUÍS – MA**

**2019**



**IGOR ADAN GONÇALVES SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
AGREGADOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL (RCD) PARA USO EM  
CAMADAS DE PAVIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC II)  
apresentado à Universidade Federal do Maranhão  
(UFMA) como requisito parcial para a obtenção  
do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. George Fernandes Azevedo.

**SÃO LUÍS – MA**

**2019**

**IGOR ADAN GONÇALVES SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE AGREGADOS DE  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCD) PARA USO EM  
CAMADAS DE PAVIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC II) apresentado à Universidade Federal do Maranhão (UFMA) como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil, avaliado e aprovado em sua versão final pela banca examinadora constituída pelos docentes abaixo assinados:

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. George Fernandes Azevedo.** (Orientador)

Universidade Federal do Maranhão

---

**Prof. Esp. Joselia Siqueira Machado Fiterman**

Universidade Federal do Maranhão

---

**Prof. Dr. Felipe Vargas Bazan**

Universidade Federal do Maranhão

## RESUMO

A pavimentação é um dos principais indicadores de desenvolvimento do meio urbano e é notável o déficit de qualidade técnica nos pavimentos brasileiros. O trabalho objetivou analisar a viabilidade da substituição total do material pétreo tradicional por agregado de resíduos de construção e demolição em camadas de pavimento. O material coletado foi submetido aos ensaios de granulometria, calculados os fatores de densidade efetiva e absorção do agregado, ensaios de perda por abrasão, equivalente de areia e ensaio de compactação dos corpos de prova, objetivando obter os valores de umidade ótima e peso aparente seco máximo para realização do ensaio de CBR. O ensaio de granulometria classificou a amostra como medianamente uniforme e fora do intervalo estabelecido para uma composição bem graduada. A perda por abrasão se mostrou consideravelmente alta em relação aos agregados usuais, assim como a absorção, que caracteriza maior consumo de ligante asfáltico, contudo o ensaio de equivalência de areia mostrou relativa vantagem do RCD nesse aspecto. O ensaio de CBR apresentou valor de 24%, classificado insuficiente para aplicações em camadas de base, entretanto suficiente para camadas de sub-base e reforço de subleito.

Palavras-chave: Agregado Alternativo, Resíduos de Construção e Demolição, Pavimentação

## **ABSTRACT**

Paving is one of the main indicators of urban development and the technical quality deficit in Brazilian pavements is remarkable. The objective of this project was to analyze the viability of the total replacement of the traditional material by aggregate of construction and demolition waste in layers of pavement. The collected material was submitted to the granulometry tests, calculated the factors of effective density and absorption of the aggregate, abrasion loss tests, equivalent sand and compaction test of the test specimens, in order to obtain the values of optimal humidity and apparent maximum dry weight for the CBR test. The particle size test ranked the sample as being fairly uniform and out of range for a well graded composition. The loss of abrasion was considerably high in relation to the usual aggregates, as well as the absorption, which characterizes higher consumption of asphalt binder, but the sand equivalence test showed a relative advantage of RCD in this aspect. The CBR test presented a value of 24%, classified as insufficient for applications in the base layer, but sufficient for sub-base layers and subgrade reinforcement.

**Keywords:** Alternative Aggregate, Construction and Demolition Waste, Paving.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Preparação de terreno para pavimentação urbana na MA-123. ....	20
Figura 2 Estrutura típica de pavimento rígido de concreto-cimento (corte longitudinal). .....	20
Figura 3 Estrutura e componentes de seção transversal de pavimento flexível. ....	21
Figura 4 Resquícios do Caminho do Ouro ou Estrada Real em Paraty, RJ.....	22
Figura 5 Processo de tratamento e reforço do subleito.....	25
Figura 6 Lançamento de Bica Corrida para base.....	26
Figura 7 Modelo estrutural da via férrea como sistema em camadas.....	29
Figura 8 Agregado graúdo para lastro ferroviário. ....	31
Figura 9 Composições granulométricas comparativas entre um SMA e um CA. ....	35
Figura 10 Concreto asfáltico na faixa B do DNIT; graduação densa.....	36
Figura 11 Camada porosa de atrito; graduação aberta. ....	36
Figura 12 Brita macadame.....	37
Figura 13 Disposição irregular de RCD. ....	39
Figura 14 Gestão de resíduos da construção civil. ....	44
Figura 15 Queixada. ....	45
Figura 16 Blocos de concreto sendo triturados. ....	45
Figura 17 Agregado produzido após processo de trituração. ....	46
Figura 18 Pavimento sendo construído com RCD. ....	47
Figura 19 Resíduo de Construção utilizado no experimento.....	53
Figura 20 RCD selecionado e britado ....	54
Figura 21 Amostra sendo quarteada ....	55
Figura 22 Balança de precisão e cesto metálico ....	58
Figura 23 Aparelho Los Angeles.....	59
Figura 24 Proveta de acrílico.....	60
Figura 25 Corpo de prova moldado no cilindro CBR ....	62
Figura 26 Máquina para ensaio de CBR.....	63
Figura 27 Gráfico de curva granulométrica.....	66
Figura 28 Gráfico da curva de compactação ....	70
Figura 29 Gráfico da curva pressão/penetração ....	71

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Ensaio de Granulometria .....	65
Tabela 2 Umidades higroscópicas das amostras .....	67
Tabela 3 Resultados de LA das amostras de RCD .....	67
Tabela 4 Dados para obtenção do EA .....	68
Tabela 5 Dados obtidos para cálculo de densidade e absorção do agregado .....	68
Tabela 6 Umidades das amostras de RCD.....	69
Tabela 7 Obtenção do peso específico aparente seco.....	69
Tabela 8 Tabela do ensaio de CBR .....	71

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 Termos aplicáveis a camadas de revestimento asfáltico. ....	27
Quadro 2 Tamanho e classificação da brita quanto a numeração.....	38
Quadro 3 Aspectos prescritos com relação às características do agregado reciclado para emprego em camadas base e sub-base de pavimentos. ....	42
Quadro 4 Especificações do CBR para camadas de pavimento .....	71

## LISTA DE SIGLAS

ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
AB	Asfalto Borracha
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
ASAC	Agregados Sinterizado de Argila Calcinada
BOF	Blast Oxygen Furnace
CALTRANS	Departamento de Transportes da Califórnia
CaO	Óxido de Cálcio (Cal)
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CA	Concreto Asfáltico
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio ambiente
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DER	Departamento de Estradas e Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ECL	Engenharia, Consultoria e Econômica
FDOT	Florida Department of Transportation
FeO	Óxido de Ferro
Fe	Ferro
FHWA	Federal Highway Administration
FUNTAC	Fundação de Tecnologia do Estado do Acre
HRB	Highway Research Board
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia.
IEL	Instituto Evaldo Lodi
IME	Instituto Militar de Engenharia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LD	Linz e Donawitz

MgO	Óxido de Magnésio
MnO	Óxido de Manganês
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
PET	Polietileno Tereftalato
PMF	Pré-Misturado a Frio
PMSP	Prefeitura do Município de São Paulo
PTM	Pennsylvania Testing Method
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício
SO <sub>3</sub>	Óxido Sulfúrico
SMA	Stone Matrix Asphalt
SWANA	Solid Waste Association of North América
TS	Tratamentos Superficiais

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
1.1. Justificativa .....	16
1.2. Objetivos .....	18
1.2.1. Objetivo Geral .....	18
1.2.2. Objetivos Específicos .....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	19
2.1. Pavimentação .....	19
2.1.1. Histórico da pavimentação no Brasil.....	22
2.2. Pavimento Rodoviário.....	23
2.2.1. Subleito .....	24
2.2.2. Reforço do Subleito.....	24
2.2.3. Sub-base .....	25
2.2.4. Base .....	26
2.2.5. Revestimento.....	27
2.3. Pavimento Ferroviário.....	28
2.3.1. Sublastro.....	30
2.3.2. Lastro.....	31
2.3.3. Materiais para Lastro.....	32
2.4. Agregados .....	33
2.4.1. Classificação.....	33
2.4.2. Brita.....	38
2.5. Resíduos de Construção e Demolição (RCD) .....	39
2.5.1. Definição .....	40
2.5.2. Especificações e Classificação .....	41
2.5.3. Utilização como agregado alternativo .....	43
2.5.4. Características Físicas .....	46
2.5.5. Experiências internacionais.....	48
2.5.6. Experiências no Brasil.....	50
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	52
3.1. Coleta .....	52
3.2. Britagem.....	53
3.3. Ensaios de Caracterização .....	54

3.3.1.	Análise granulométrica .....	55
3.3.2.	Teor de Umidade .....	56
3.3.3.	Massa específica.....	57
3.3.4.	Perda por Abrasão .....	59
3.3.5.	Equivalente de areia .....	60
3.3.6.	Compactação .....	61
3.4.	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia.....	61
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	65
4.1.	Curva Granulométrica.....	65
4.2.	Umidade Higroscópica.....	66
4.3.	Perda por Abrasão .....	67
4.4.	Equivalente de areia .....	68
4.5.	Massa específica.....	68
4.6.	Compactação .....	69
4.7.	CBR.....	70
5.	CONCLUSÃO .....	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74

## 1. INTRODUÇÃO

A pavimentação é um dos principais parâmetros de desenvolvimento urbano de uma localidade, sendo peça-chave para trazer um bom padrão de vida e em impressões não só relacionadas à sua funcionalidade, mas também à estética de determinada região. Um pavimento de qualidade, segundo Bernucci et al. (2008), precisa assegurar ao seu usuário um percurso confortável no rolamento e segurança em quaisquer variações de clima ou fluxo de veículos, desempenhando assim seu papel em projeções estruturais e funcionais.

Todavia, é notável o déficit desses quesitos nos pavimentos brasileiros. A Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2017) estipula que quase 79% das rodovias brasileiras não são pavimentadas, sendo que cerca de apenas 12% é pavimentada e 9% de fato é planejada. A CNT destaca também que o crescimento da malha rodoviária não chegou a 12% nos últimos dez anos, sendo que mais da metade dessas estradas já apresentam problemas de funcionalidade e são classificadas como abaixo da média em seu desempenho.

Esses dados trazem à tona a necessidade de um grande investimento na primeira pavimentação asfáltica das estradas do Brasil. O estudo de novas tecnologias e o investimento para implantação de métodos tecnológicos não se mostram satisfatórios. Um pavimento que propicie a circulação segura e satisfatória do usuário, utilizando como totalidade o seu tempo de vida, é o principal anseio dos projetistas. Por isso, é necessária a busca de métodos que melhorem a qualidade do asfalto brasileiro.

Em contrapartida, a constante atividade do homem no meio ambiente e sua influência negativa, no que diz respeito às alterações climáticas e no esgotamento das fontes de recursos naturais, têm levado a conscientização e mobilização das nações para minimizar os efeitos colaterais da ação humana e diminuir a sua exploração no planeta. Para a obtenção da mistura asfáltica, é extraída uma grande quantidade de brita. Essa exploração desenfreada das jazidas provoca constante desgaste ambiental e custos mais altos de exploração para as empresas responsáveis pela implantação do asfalto.

Segundo John (2000), a construção civil consome entre 14% a 50% dos recursos que são obtidos pela natureza. Todavia, alguns estados não têm jazidas pétreas suficientes para atender a demanda de construções, como os situados na região Norte e a região do Distrito Federal, onde as jazidas de cascalho para base rodoviária estão em

fase de exaustão, fora a escassez de britas de qualidade que possam ser utilizadas como agregados para as camadas de base, sub-base ou para as misturas asfálticas dos revestimentos (Farias, 2009). Sendo o setor da construção civil um dos mais atuantes nesse quesito negativo, tem sido bem vinda à inclusão de novas formas de construir utilizando materiais residuais. Dados da American Concrete Pavement Association (ACPA, 2009) mostram que o consumo de agregados naturais na pavimentação, para um quilômetro de pista simples, pode-se consumir 5,1 vezes a quantidade de agregados usados na construção de um edifício de 15 andares.

Um dos agregados alternativos mais viáveis são os resíduos de construção e demolição (RCD), popularmente chamados por entulho ou caliça, que provém de construções, reformas, reparos e demolições de obras e resultantes da preparação e da escavação de terrenos, segundo o CONAMA (2002). Levy e Helene (1997) destacam que, por serem oriundos de demolição de estradas, edifícios e diversos tipos de estruturas, possuem grande quantidade de solos e agregados em sua constituição.

Estes resíduos, segundo Rao et al (2007), são responsáveis pela maior quantidade em massa de resíduos sólidos gerados no planeta, entre 51 a 70%, com valores estimados de 180 milhões de toneladas na Europa (EC, 2000), 136 milhões nos EUA (EPA, 1998) e 68,5 milhões no Brasil (ANGULO, 2005), por ano. O descarte dessa enorme quantidade de material tem sido uma questão bastante controversa por conta dos diversos problemas que este gera ao meio urbano e sua sociedade, sendo que 90% desses resíduos são recicláveis, de acordo com a Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo, (2012).

Das diversas consequências geradas pela disposição incorreta desses materiais, pode-se citar a degradação das áreas de mananciais e de preservação permanente, o assoreamento de rios e córregos, a erosão de encostas, a proliferação de agentes transmissores de doenças e a ocupação de vias, terrenos e praças por entulhos, com prejuízo à circulação de pessoas e veículos (SINDUSCON-SP, 2005). Além disso, segundo Grubba (2009), em cidades de médio e grande porte, estes resíduos obstruem sistemas de drenagem, gerando constantes alagamentos em períodos chuvosos, o que compromete o trânsito, provoca acidentes, invade residências e contribui para a deterioração precoce dos pavimentos.

Quanto aos aterros sanitários, também não é um destino adequado para dispor tais materiais, visto que, pela imensa quantidade de rejeito, estes locais são fadados a um constante esgotamento. Além disso, segundo o Intergovernmental Panel on Climate

Change (IPCC) de 2007 elaborado pela Organização das Nações Unidas (ONU), os resíduos sólidos, juntamente aos líquidos, são responsáveis por 2,8% da emissão de CO<sub>2</sub> e de outros gases que colaboram para o aquecimento global. A distância dos aterros em relação ao meio urbano também acarreta em altíssimos custos com transporte de carga desse material. Tais fatores inviabilizam a ocupação de tal espaço, destinado a resíduos não recicláveis, com um material com um alto potencial de reciclagem (Grubba, 2009).

De acordo com Quiñones (2014), a falta de aplicação de agregados de RCD no Brasil e na América Latina é retrato da disponibilidade de recursos naturais, enquanto em outros países a escassez dos mesmos atrelados a certo desenvolvimento econômico e tecnológico e à densidades populacionais existentes, os levam a utilizar de novas tecnologias para melhorar a infraestrutura rodoviária urbana e rural. É extremamente importante adotar políticas de gerenciamento de resíduos para reduzir a sua geração e estimular a sua reciclagem, por meio do desenvolvimento e da difusão de novas tecnologias (IPCC, 2007).

No Brasil, foi criada em 2002 a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 307 (CONAMA) que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, responsabilizando os geradores de resíduos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas e estradas da redução, da reutilização, da reciclagem e da destinação final dos mesmos (CONAMA, 2002). Em 2004, também foi criada a norma NBR 15115 “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos” (ABNT, 2004). As propriedades físicas, químicas e mecânicas do RCD vêm sendo estudadas no Brasil desde a década de 80 (TRICHÊS e KRYCKYJ, 1999; MOTTA, 2005). Entretanto, sua utilização é pouco difundida no país e há carência de pesquisas nacionais realizadas sobre o comportamento mecânico deste agregado reciclado.

## 1.1. Justificativa

No meio urbano, a insatisfação da população quanto à qualidade das estradas e rodovias é quase unânime, principalmente nas regiões Norte e Nordeste. Trazendo um pouco de pesquisas já realizadas em outros países e até mesmo no Brasil, uma forma de melhorar a situação precária na qual se encontra os projetos de estrada dessas regiões é investir em estudos sobre materiais alternativos e geralmente residuais que possam ser usados como substitutos da brita, usualmente empregada na mistura asfáltica. Alguns estados brasileiros do Norte e Centro Oeste têm dificuldade na obtenção de agregado pétreo, sendo os alternativos, muitas vezes, a única opção viável.

Esses materiais são escolhidos por serem de fácil obtenção e, muitas vezes, resíduos abundantes e bastante problemáticos quanto a seu destino. Essa quantidade significativa de rejeitos se tornaria bem viável se usada como agregado alternativo à mistura asfáltica, tendo aspectos positivos na parte ambiental, estrutural e econômico na indústria. No aspecto ambiental, além de dar um destino a esse material, que ocuparia aterros e geraria acúmulo de lixo, responsáveis pela contaminação do solo, rios e lençóis freáticos, também é uma alternativa à escavação de jazidas para obtenção de matéria prima do solo para construção de pavimentos.

Cabral (2011) classifica os agregados alternativos em reciclados ou secundários e destaca que tais transposições podem acarretar em melhorias para a estrutura do pavimento. Os pneus triturados são exemplos de matérias já utilizados nessa finalidade e que aumentam a flexibilidade do asfalto. Outra vantagem é a iminente minoração dos custos, tanto na própria construção quanto em possíveis manutenções futuras (SERRA, 2017). Porém, é importante salientar a necessidade de técnicas específicas para o correto manuseio e dosagem desses materiais na mistura, de forma que estes não tragam problemas comprometendo sua resistência, níveis de expansão e heterogeneidade.

A utilização de Resíduos de Construção e Demolição em pavimentos não é novidade no mundo, e já existem diversas pesquisas realizadas acerca da aplicação de agregados de RCD em camadas granulares de base e de sub-base, como por exemplo, o uso de RCD em coberturas e sistemas de drenagem de aterros de resíduos (Barbosa et al., 2008), estacas de compactação para melhoramento de solos (Araújo Jr. et al., 2010), agregado graúdo em estaca de compactação (Medeiros Jr. et al., 2010), material de aterro em muros reforçados com geossintéticos (Palmeira, 2010), entre outros.

Países como Holanda, Bélgica, França, Estados Unidos e Japão, estão investindo em pesquisas que visam à quantificação e a reciclagem do RCD para atender às necessidades das gerações futuras (GRUBBA, 2009), sendo que nos EUA, segundo a FHWA (2004), dos 50 estados norte-americanos, 38 já empregam esse tipo de agregado para construção de camadas de base e sub-base de pavimentos. No país, 85% dos resíduos de concreto que são reciclados são utilizados em pavimentos (WILBURN; GOONAN, 1998).

O RCD é um material tecnicamente nobre, pois se apresenta resistente e com baixa expansão e é similar aos materiais de fontes minerais não renováveis, podendo ser útil tanto na massa asfáltica dos pavimentos flexíveis quanto no concreto dos pavimentos rígidos. Segundo Saeed et al(2007), o Índice de Suporte Califórnia (CBR) deste tipo de agregado varia de 94% a 184%, seu módulo de resiliência é similar ao dos agregados naturais e em alguns casos até superior (BENNERT ET. AL, 2000) além de ter apresentado melhoria em seu desempenho ao longo do tempo.

Assim reciclar RCD para utilização em camadas de sub-bases e bases de pavimentos se mostra uma alternativa interessante sob aspectos técnicos, ambientais, econômicos e sociais, reduzindo a exploração de novas matérias primas e conservando as fontes naturais de agregados, diminuindo a emissão de gases tóxicos e a contribuição para o efeito estufa, além de promover a diminuição dos custos em transporte, deposição em aterros sanitários e energético (ÂNGULO et al., 2003) e, conseqüentemente, aumentar a produtividade de obras de pavimentação. O presente trabalho busca contribuir para o acervo brasileiro com resultados de testes realizados a fim de determinar a viabilidade mecânica e estrutural do uso dos agregados de RCD em camadas de base e sub-base de pavimentos.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Analisar o comportamento e viabilidade técnica da substituição total por agregado de RCD em camadas de base e sub-base de pavimento.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Levantar informações sobre as propriedades do RCD, assim como estudos do seu emprego na área da pavimentação asfáltica.
- Aprender sobre os ensaios necessários para definir a viabilidade dos agregados.
- Coletar materiais RCD, determinar a granulometria e dosagens adequadas e realizar os ensaios de caracterização dos agregados de RCD.
- Comparar os resultados e analisar o comportamento mecânico das misturas asfálticas com RCD, determinando a viabilidade das mesmas em camadas de pavimento.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Para ser realizado um trabalho científico, é necessário reunir informações já estudadas sobre os métodos e materiais a serem aplicados na pesquisa. Esta revisão visa apresentar uma breve percepção sobre o pavimento rodoviário, suas principais características, os materiais que o compõem e, finalmente, sobre os agregados alternativos e a inserção do RCD como agregado de pavimento. Também são apresentadas as propriedades desse material, assim como problemas ambientais quanto a sua disposição e experiências já realizadas na área de pavimentação utilizando-o.

### **2.1. Pavimentação**

A etimologia da palavra pavimento provém do latim *pavimentu* que designa, em arquitetura, a base horizontal de uma determinada construção (ou as diferentes bases de cada andar de um edifício) que serve de apoio a pessoas, animais ou qualquer corpo em movimento. É uma estrutura formada por várias camadas que são dispostas em um terreno, geralmente terraplanado, de maneira que essa estrutura resista aos esforços causados pelo tráfego de veículos que passam por ele, levando tais ações para as camadas inferiores e se difundam no solo. Santos (2013) cita ainda a sua predisposição a opor-se aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento assim como o conforto e a segurança dos usuários das estradas.

Os pavimentos são construídos através de camadas que são desenvolvidas a partir de um subleito, onde é feita uma fundação e terraplanagem, como pode ser visto na Figura 1. Usualmente, se classificam esses pavimentos como flexíveis e rígidos. Em diversas literaturas, os pavimentos rígidos são comumente relacionados ao pavimento de cimento Portland, enquanto os flexíveis são denominados pavimentos asfálticos.

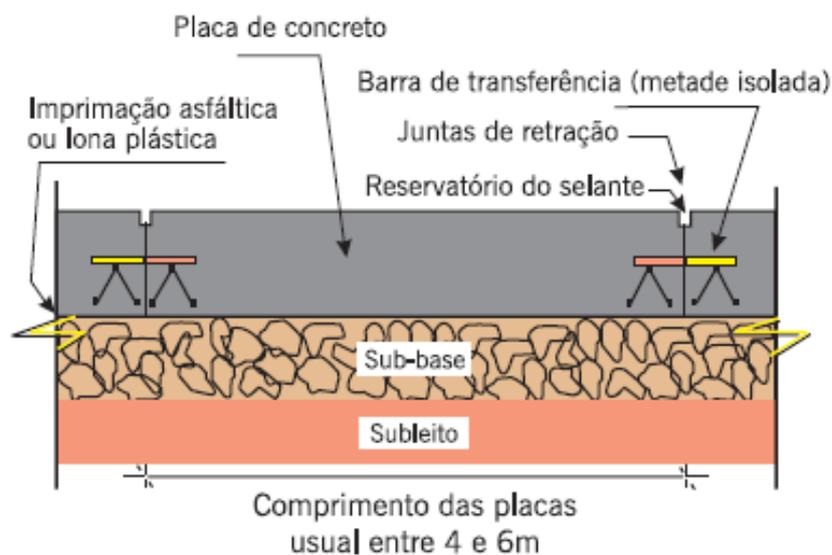
Figura 1 Preparação de terreno para pavimentação urbana na MA-123.



Fonte: Governo do Maranhão (2016).

Os pavimentos de cimento Portland são fabricados a partir de blocos de concreto (que podem ou não ser armados com barras de aço) e são indicados para locais com grandes cargas estáticas e altos pontos de frenagem, com estrutura característica apresentada na Figura 2. Esses apresentam pouca deformabilidade e degradação a esforços, assim, não necessitam de manutenções periódicas. Porém, apresenta custos altos de implantação e não é reciclável, sendo necessária total remoção do material em caso de falhas.

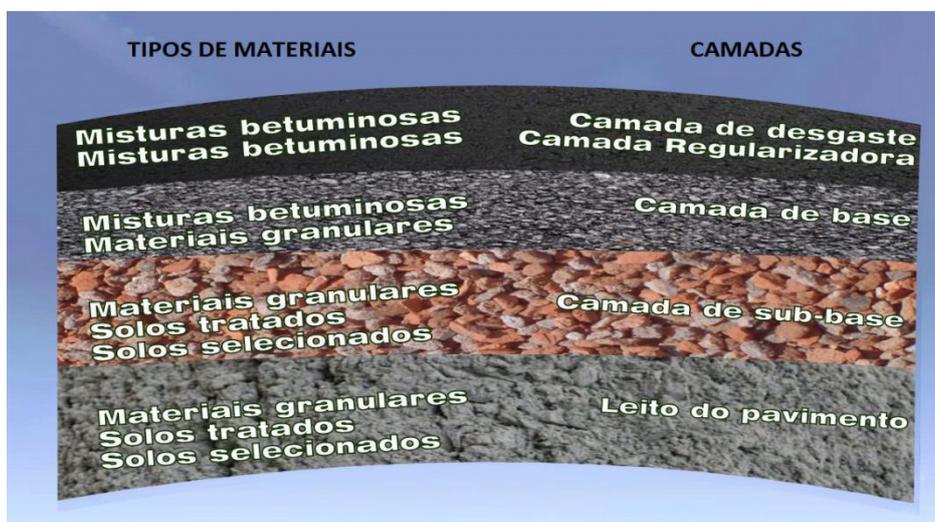
Figura 2 Estrutura típica de pavimento rígido de concreto-cimento (corte longitudinal).



Fonte: BERNUCCI *et al.*(2008)

Todavia, os pavimentos asfálticos são constituídos, geralmente, por misturas de agregados e ligantes asfálticos, e possuem quatro camadas principais: revestimento asfáltico ou camada superficial asfáltica, base, sub-base e reforço do subleito. A Figura 3 apresenta os materiais que geralmente compõem cada camada. Esse asfalto apresenta menores custos de implantação em relação ao rígido, porém é menos resistente a degradações e necessita de reparos periódicos. Contudo, os reparos são geralmente de simples aplicação, sendo necessário apenas intervir na área afetada, além de ser possível a reciclagem parcial e até total do material, quando for preciso removê-lo por completo.

Figura 3 Estrutura e componentes de seção transversal de pavimento flexível.



Fonte: Própria do autor.

Os materiais escolhidos para compor as camadas de base e sub-base vão classificar diretamente a qualidade do pavimento, dependendo de como tais são avaliados (SANTOS, 2013). Sousa *et al.* (2009) destaca que, durante a fase de projeto, os materiais, quando realizadas simulações mecânicas dos esforços aos quais a estrutura será submetida, preveem as possíveis cargas que o projeto pode suportar futuramente.

Se a estrutura estiver bem projetada para as cargas que atuarão e bem construída, essas cargas gerarão deslocamentos que não provocam ruptura ou deformação excessiva após uma única passada de roda ou algumas poucas solicitações. Esses conceitos devem ser utilizados no dimensionamento da estrutura e condicionam a escolha dos materiais (MARTELL, 2009. apud. MEDINA E MOTTA, 2005).

É importante analisar cada obra para delimitar o tipo de pavimento a ser aplicado, dependendo de fatores como a intensidade do tráfego, as características geotécnicas e as condições de drenagem superficial da área. Bernucci *et al.* (2008)

explica que, dependendo de tais condições, podem ser suprimidas algumas dessas camadas.

### 2.1.1. Histórico da pavimentação no Brasil

As camadas de pavimento tem a função básica de proteger o subleito e os primeiros projetos nessa área eram exclusivamente dados de forma empírica. Segundo Bernucci *et al.* (2008), uma das primeiras estradas mencionadas da história foi em 1560, época do terceiro governador-geral do Brasil, Mem de Sá, que ligava São Vicente ao Planalto Piratininga. Em 1661, já era possível a circulação de veículos mediante a transformação do trecho na então Estrada do Mar e depois sendo reestruturada com lajes de granito, em 1789, onde parte do seu trecho está preservada até hoje como calçada de Lorena, como visto na Figura 4.

Figura 4 Resquícios do Caminho do Ouro ou Estrada Real em Paraty, RJ.



Fonte: Prefeitura de Paraty/RJ (2015).

O investimento na implantação de novas estradas na época imperial brasileira foi extremamente baixo. Prego (2001) retrata que, até o começo do século XX, as estradas eram exclusivamente para veículos de tração animal e que, apenas em 1906, após a licenciatura dos primeiros carros, foi instaurado o Ministério da Viação e Obras Públicas.

Em 1928 foi inaugurada pelo presidente Washington Luiz a Rodovia Rio-São Paulo, com 506 km de extensão, representando um marco da nova política rodoviária federal. Em 1949, quando da entrega da pavimentação de mais um trecho da que era conhecida como BR-2, a rodovia passou a se chamar Presidente Dutra. Também em 1928 foi inaugurada pelo presidente a Rio-Petrópolis. Destaca-se em 1937 a criação, pelo presidente Getúlio Vargas, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), subordinado ao Ministério de Viação e Obras Públicas. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Santos (2013), em 1929 Terzaghi propõem os primeiros métodos empíricos para pavimentação asfáltica e também começavam a ser feitos estudos de ensaios técnicos, realizados pelo Departamento de Estradas da Califórnia, relacionados à espessura dos pavimentos. Foram amplamente utilizados após aprimoramentos realizados durante a Segunda Guerra Mundial (HUANG, 1993).

Todavia, em 1970, passou-se a utilizar de tais estudos técnicos aprimorados para a diminuição de obras de pavimento realizadas por meio empírico, onde eram utilizados computadores com programas que analisavam o desempenho estrutural e mecânico das camadas do pavimento, levando em consideração cálculos prévios de tensões e deformações. Santos (2013) cita como responsável o professor Murilo Lopes de Souza por trazer os estudos sobre dimensionamento de pavimentos relativos ao ensaio Califórnia Bearing Ratio (CBR), no qual Castelo Branco (2004) define como método que avalia a disposição da carga estática, utilizando da brita californiana graduada como material padrão, para geração de valores que resultaram em dados que serviram de base para o dimensionamento do pavimento como estrutura de camadas.

## **2.2. Pavimento Rodoviário**

Se tratando de pavimentos flexíveis, Bernucci *et al.* (2008) apresenta os constituintes dessas camadas como, geralmente, materiais granulares, solos ou misturas de solos, e destaca a não adição de agentes cimentantes. As várias partes da estrutura de um pavimento constituirão um conjunto que sofrerá deslocamentos e tensões a fim de resistir às cargas solicitantes pelos veículos e pelo clima. Ou seja, assim como as estrutura de construção civil em geral, as cargas são distribuídas de forma compatível com a resistência de cada camada do pavimento (MOTTA, 1995).

### **2.2.1. Subleito**

O subleito é a área de fundação onde o pavimento será disposto e, segundo Marques (2006), deve-se levar em consideração a profundidade máxima onde as cargas geradas pelo tráfego sejam significativas. É onde se aplica a etapa final de terraplenagem e, se houver erros quanto à topografia do terreno que estejam fora das especificações normatizadas, ou, ainda, relacionados ao grau de compactação exigido, será preciso à regularização dessa área.

Balbo (2007) classifica-o como camada mais adentra do pavimento, sendo considerada como a fundação do mesmo, o que o torna muito dependente do material natural da região onde se pretende inserir o pavimento. O material natural desse subleito é tido como consolidado e compactado, sejam por cortes do corpo da estrada ou, no caso dos aterros, por materiais de solos retirados de outras fontes, depositados e compactados no local a ser trabalhado. Se não for executando com requintes técnicos, como limpeza e correção de falhas, poderá comprometer todo o projeto do pavimento.

### **2.2.2. Reforço do Subleito**

O DNIT (2006) define o reforço de subleito como a camada disposta sobre o subleito – devidamente compactado e regularizado – estabilizada granulometricamente quando o subleito necessita de maior capacidade de suporte para camadas grossas de base e sub-base. Parte do processo é mostrada na Figura 5. Ele pode ou não ser necessário, dependendo, assim, das características de suporte do subleito (DIAS, 2004).

Figura 5 Processo de tratamento e reforço do subleito.



Fonte: EMCONBRAS (2014).

Tem, basicamente, função semelhante a da sub-base (que será apresentada mais a frente) em relação à base, que consiste em reforçar um subleito geralmente fraco ou quando haverá intensa movimentação de tráfego nessa estrada, requerendo, assim, maior resistência do pavimento. Ele possui espessura constante, é dimensionado através das solicitações futuras de tráfego do pavimento e é constituído de materiais serão sempre de propriedades superiores as do subleito (SENÇO, 1997).

### **2.2.3. Sub-base**

A sub-base pode ser a camada corretiva do subleito ou complementar à base (SANTOS, 2013), e possui características semelhantes a esta última, sendo disposta ao subleito ou reforço do subleito depois de devidas compactações e regularizações (DNIT, 2010). Balbo (2007) explica que, quando há necessidade de diminuição de custos da obra perante um tamanho relativamente grande da espessura da camada de base, é viável a divisão desta, gerando uma camada de sub-base que apresentará um custo de implantação consideravelmente menor.

Esta camada deve ser estável, a fim de suportar a base e as tensões que se dissiparem através dela, assim como apresentar ótima capacidade de drenagem para acumulo de água e pouca sensibilidade a possíveis variações de volume (PINTO, 2002). Souza (2004) ainda traz outras funcionalidades desta camada, como prevenir a intrusão

ou bombeamento do solo do subleito na base, prevenir o acúmulo de água livre no pavimento, além de servir como base temporária de trabalho para os obreiros durante a implantação do pavimento.

#### 2.2.4. Base

A base, que é executada sobre a camada de sub-base, como ilustrado na Figura 6, ou, em alguns casos, sobre o próprio subleito, tem a função de absorver os esforços verticais causados pelo tráfego de veículos no pavimento. É a parcela sobre o qual é assentado o revestimento asfáltico. Balbo (2007) destaca materiais como solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos como principais componentes desta camada. Souza (2004) também apresenta materiais residuais como cimento Portland, betume, cal, cinzas volantes (todos devidamente estabilizados) como alternativa para a construção dessa base.

Figura 6 Lançamento de Bica Corrida para base.



Fonte: EMCONBRAS (2014)

Podem ocorrer trincas transversais no revestimento quando há utilização de bases “pozolânicas” revestidas com capas asfálticas. Os materiais que compõem essa camada geralmente são escolhidos baseados na disponibilidade deste na região, já que

estes apresentam uma gama elevada de opções e também demandam de bastante volume de matéria.

### 2.2.5. Revestimento

Disposto sobre a camada de base, o revestimento é a camada mais nobre do pavimento, a mais fina e superficial também, e é constituída por uma mistura de ligante betuminoso com agregado miúdo. Nogueira (1961) classifica-o como camada mais nobre do pavimento por garantir a proteção das camadas inferiores contra a deterioração e por precisar de grande capacidade de suporte, alta resistência ao desgaste quanto à durabilidade e ser a menos ondulada possível para proporcionar melhor conforto. Tais fatores acarretam ao revestimento os maiores custos entre os outros constituintes do pavimento. O Quadro 1 mostra os termos aplicáveis a camadas de revestimento.

Quadro 1 Termos aplicáveis a camadas de revestimento asfáltico.

Designação do Revestimento	Definição
Camada de Rolamento	É a camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e com ações ambientais.
Camada de Ligação	É a camada intermediária, também em mistura asfáltica, entre a camada de rolamento e a base do pavimento.
Camada de Nivelamento	É a primeira camada de mistura asfáltica empregada na execução de reforços (recapeamento), cuja função é corrigir os desníveis em pista e afundamentos localizados.
Camada de Reforço	Nova camada de rolamento, após anos de uso do pavimento existente, executada por razões funcionais, estruturais ou ambas.

Fonte: Balbo (2007)

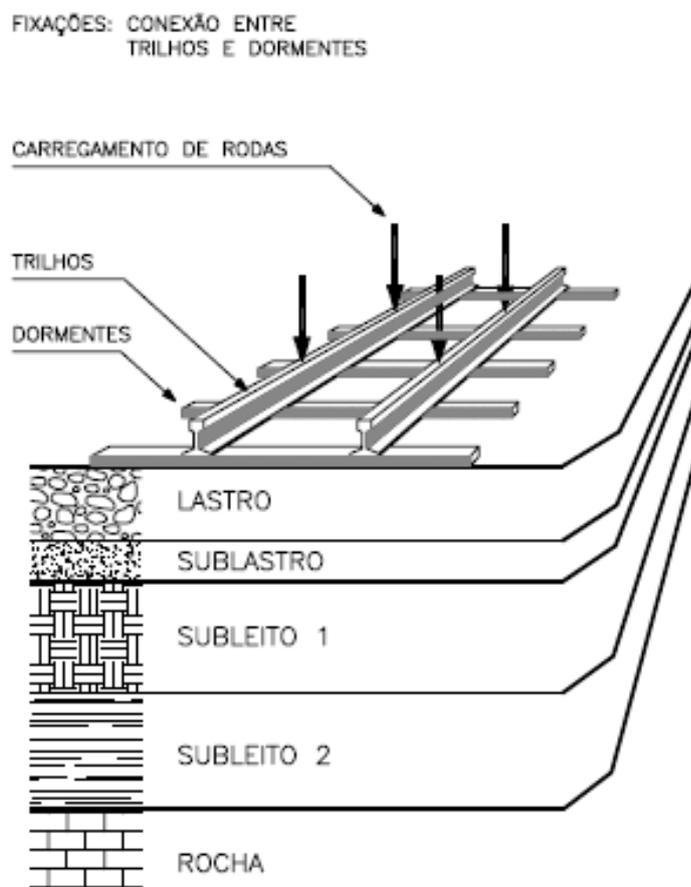
É o revestimento asfáltico que está em contato direto com o veículo e este não é só responsável pelas condições de rolamento e conforto do tráfego, mas também em transferir os esforços abrasivos gerados na superfície do pavimento de forma graduada às outras camadas; também possui caráter impermeabilizante (Bernucci *et al*, 2008), reduzindo a infiltração de água nas outras camadas inferiores. O autor ainda enfatiza que esta camada é submetida a esforços de tração e compressão e que ela comprime as demais camadas do pavimento. Precisa ter equilíbrio e viabilidade nos quesitos técnico e econômico.

SPECHT (2004) destaca que a qualidade do revestimento está diretamente relacionada às características dos materiais constituintes, assim como a quantidade destes na mistura, pela energia de compactação, pela qualidade de execução, pelo processo construtivo, pelo controle sobre excesso de carga e pela periodicidade da manutenção e restauração. Para determinar o tipo de revestimento, é necessária avaliação das condições técnicas e econômicas de determinado material e Souza (2004) cita os revestimentos de concreto asfálticos como os mais renomados em questão de padrão e desempenho estrutural de rodovias principais. Para rodovias secundárias, ele apresenta opções do concreto asfáltico com pré-misturado a frio ou tratamento superficial, duplo ou triplo, e em estradas vicinais, os tratamentos superficiais (TS) triplos, duplos ou simples, são os mais indicados.

### **2.3. Pavimento Ferroviário**

O pavimento ferroviário é relativamente semelhante ao pavimento rodoviário quanto à disposição de suas camadas. Esta estruturação em faixas, como mostrada na Figura 7, assim como nas rodovias, tem objetivo de dissipar tensões verticais sofridas pelo tráfego dos veículos que neles passam. A infraestrutura das estradas é geralmente dada após o processo de terraplenagem, e todas as obras situadas abaixo do greide de terraplenagem, sendo denominado leito ou plataforma da estrada sua superfície final (BRINA 1979).

Figura 7 Modelo estrutural da via férrea como sistema em camadas.



Fonte: SELIG e WATERS (1994)

Até o começo do século XX, não havia muita preocupação quanto ao estudo do dimensionamento de pavimentos e não haviam experimentos relacionados a essa área. Sendo assim, as aplicações, tanto de rodovias quanto de ferrovias, eram dadas de forma empírica por métodos de correlação (BROWN E SELIG, 1991). Como o crescimento dos modais rodoviário e ferroviário e, conseqüentemente, maior incidência de cargas nas vias, foi necessária a implementação de mais pesquisas, sendo Selig e Waters (1994) responsáveis pelos primeiros estudos que analisavam os materiais que poderiam constituir as camadas, baseado nas especificações de cada uma, assim como a relação entre a espessura do lastro, espaçamento e tipo dos dormentes e métodos de manutenção classificando as propriedades de cada componente da linha férrea como um todo (DELGADO, 2012).

Medeiros (2010) cita o Lastro, dormente, trilho e o sublastro como principais elementos da via ferroviárias, nomeadas como permanentes. Ela é formada por subsistemas de infraestrutura e superestrutura férrea e dá suporte à movimentação dos

trens. Os componentes da via, trilhos, fixações, dormentes, lastro, sublastro e subleito são considerados de forma independente, desempenhando funções distintas (SPADA, 2003).

A superestrutura absorve os impactos gerados pelo tráfego dos veículos e os encaminha ao subleito enquanto a infraestrutura é composta pelo corpo estradal abaixo do pavimento da superestrutura, das estruturas de drenagem, de pontes e viadutos, de túneis que proporcionam o suporte à via férrea (Cordeiro, 2007). Muniz (2002) retrata a via férrea como suscetível a forças nas direções vertical, lateral e longitudinal, apesar de apenas os carregamentos verticais serem utilizados para fins de estudos geotécnicos.

### **2.3.1. Sublastro**

Esta camada de sublastro apresenta uma função bem semelhante à camada de sub-base nos pavimentos rodoviários, que é disposta sob o lastro de forma a servir de reforço deste e absorver os esforços como forma de caminho entre o carregamento presente no lastro e o terreno subjacente. (CORDEIRO, 2007). O autor também enfatiza que o sublastro impedirá a penetração dos agregados da parte inferior do lastro, tendo que fornecer drenagem suficiente de qualquer água. De acordo com SELIG e WATERS (1994), o subleito é um elemento crucial do desempenho do lastro do pavimento ferroviário, pois a influência das tensões induzidas pelas cargas de tráfego pode propagar-se a uma profundidade de até cinco metros abaixo dos dormentes.

O subleito é quaisquer solos dispostos sob o sublastro e STOPATTO (1987) define como 1,50m a espessura da camada de subleito que recebe as forças oriundas da superfície em um aterro. Os agregados a serem empregados no sublastro poderão ser obtidos "in natura" (lateritas, cascalhos, solos arenosos, etc.) ou através da mistura de dois ou mais materiais, de modo que o produto resultante atenda às características granulométricas, capacidade de suporte e expansão previstos pela norma, além de serem compostos por partículas duras e duráveis, isentos de fragmentos moles, alongados ou achatados, isentos de matéria vegetal ou qualquer outra substância prejudicial (DNIT, 2006).

### 2.3.2. Lastro

O Regulamento Operacional Ferroviário (2005) caracteriza o lastro como a camada de assentamento dos dormentes, evitando que estes se desloquem por meio dos esforços sofridos devido à movimentação dos veículos e variação na temperatura, realocando essas forças até a infraestrutura do pavimento. São compostas geralmente por pedra britada de graduação entre 25,0 mm a 63,5 mm, como mostrado na Figura 8. O lastro, nas condições em que é aplicado no Brasil, é geralmente o maior responsável pelo nível de resiliência e pela acumulação de recalques do pavimento ferroviário.

Figura 8 Agregado graúdo para lastro ferroviário.



Fonte: Embu (2017)

Brina (1979) descreve as funções do lastro como:

- Distribuir convenientemente sobre a plataforma (sublastro) os esforços resultantes das cargas dos veículos, produzindo uma taxa de trabalho menor na plataforma;
- Formar um suporte, até certo limite elástico, atenuando as trepidações resultantes da passagem dos veículos;
- Sobrepor-se à plataforma e suprimir as irregularidades, formando uma superfície contínua e uniforme para os dormentes e trilhos;
- Impedir os deslocamentos dos dormentes quer no sentido longitudinal, quer no transversal;

Segundo Stopatto (1987) o conceito de qualidade do lastro, assim como sua espessura, esta diretamente ligada à qualidade da ferrovia. Além disso, confere ao lastro tal distribuição de carga aplicada sobre uma grande superfície, a manutenção horizontal das obras de madeira, promover elasticidade à estrutura e protege-la de ações climáticas como a chuva e o gelo.

### 2.3.3. Materiais para Lastro

Stopatto (1987) descreve alguns métodos para selecionar o material a ser utilizada no lastro, como a importância da ferrovia quanto ao fluxo e tipo de carga, velocidade etc., a possibilidade de aquisição e o custo dos materiais são parâmetros fundamentais que estabelecem os critérios de escolha do tipo de lastro a ser adotado.

Brina (1979) apresenta alguns materiais geralmente utilizados em lastros e destaca algumas características dos mesmos:

- ✓ Terra: Sendo o de menor custo, em contrapartida, apresenta os menores valores de produtividade, sendo pobre na drenagem de água e, o factível acúmulo gera problemas de nível nas linhas no trem, causa principal dos acidentes nas linhas férreas.

- ✓ Areia: Se torna inviável, pois, apesar de apresentar boa drenabilidade e pouca capacidade de compressibilidade, gera desgaste nos veículos por formações de cristais de quartzo nos trilhos, além de ter pouca resistência a ação do movimento de água.

- ✓ Pedra britada: material padrão para utilização nesse segmento, é resistente, não gera poeira, é permeável – garantindo a socaria do lastro – tem elasticidade limitada e reage bem a mudanças climáticas. Obtida através de rochas com dureza relativamente altas, pode-se citar como exemplo as pedras de micaxisto, quartzito, diorito, basalto, diabase, granito, gneiss, arenito, calcário, mármore, dolomita, sendo as sete primeiras mais recomendadas por terem mais estabilidade quanto as especificações técnicas para os projetos de pavimentos ferroviários.

- ✓ Cascalho: As pedras de cascalho são bastante viáveis por “formar arestas vivas, quando quebrados” e é usualmente utilizado de forma bruta, sendo

necessária a limpeza e segregação de impurezas desse material apenas quando os trechos de pavimento apresentarem maior volume de tráfego.

✓ Escórias: Alguns estudos inovadores tem trazido para o âmbito ferroviário a utilização de materiais residuais, provindos geralmente na malha industrial, como alternativos à brita e que apresentem módulos de resistência e dureza satisfatórias para a sua aplicação em pavimentos.

## **2.4. Agregados**

Segundo Woods (1960), os agregados se caracterizam como sendo 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. A formação dos agregados é um fator de suma importância para a determinação do material que de ser escolhido em determinado tipo de obra, já que seu desempenho potencial será utilizado devido às tensões exercidas na superfície do pavimento (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

Na pavimentação, os agregados mais comuns provêm de materiais pétreos provindos de jazidas naturais rochosas. Contudo, diversas pesquisas tem trazido outros tipos de agregados, como as escórias e a argila calcinada, como constituintes de potenciais satisfatórios à mistura asfáltica.

Os agregados são constituintes fundamentais nas misturas asfálticas e chegam a representar entre 70 a 85% do volume e 95% do peso total da mistura asfáltica. As propriedades químicas dos agregados geram efeitos em seu desempenho que são pequenos em relação a outros fatores, porém, o efeito é significativo se for levado em consideração à adesão do asfalto ao agregado (Cavalcanti, 2010).

### **2.4.1. Classificação**

É importante classificar estes materiais, pois assim será possível delimitar seu potencial de utilização nas misturas asfálticas. Estas classificações são dadas quanto ao tamanho, distribuição dos grãos e à natureza dos mesmos.

### 2.4.1.1. Tamanho

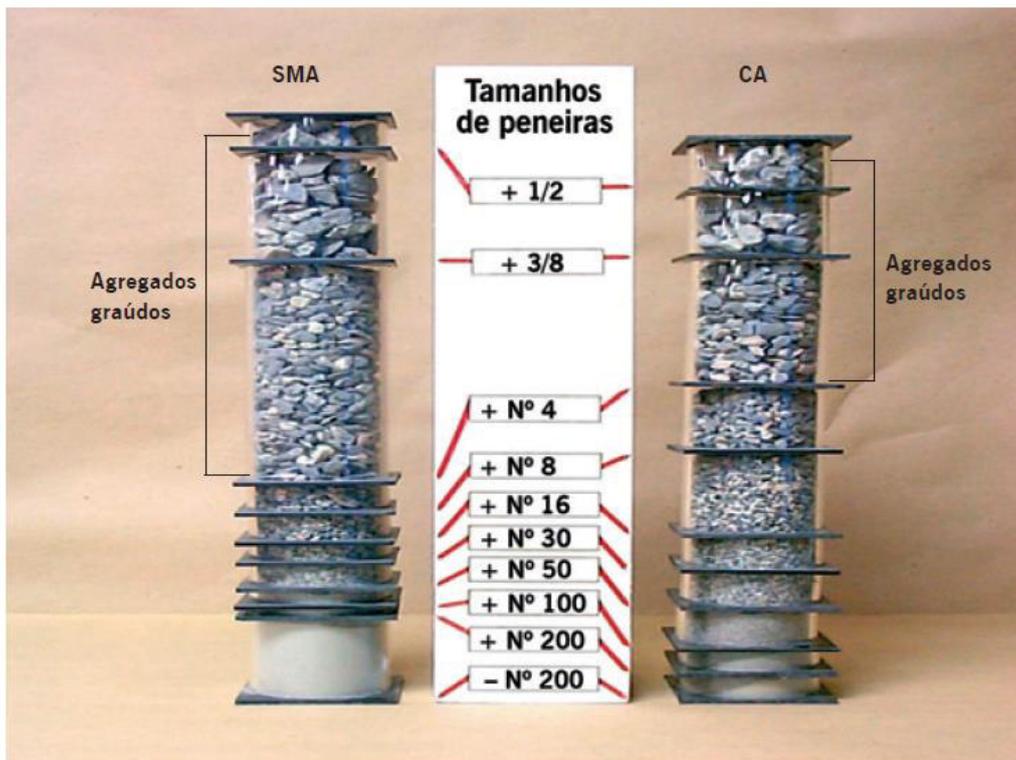
O tamanho dos agregados influencia de forma direta a compactação e estabilidade do pavimento. Por exemplo, segundo Bernucci *et al.* (2008), se não forem respeitados os tamanho máximos e mínimos admitidos para inclusão de agregados na mistura asfáltica, esta pode gerar segregação e diminuição na trabalhabilidade, para materiais muito grandes, e instabilizar a mistura para materiais demasiado pequenos.

O DNIT (2006) classifica esses materiais como:

- ✓ Graúdo: é o material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira N° 10. São as britas, cascalhos, seixos etc.;
- ✓ Miúdo: é o material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. É o material que é retido na peneira de n° 200, mas que passa na de abertura n° 10. É as areias, o pó de pedra etc.;
- ✓ Material de enchimento (fíler): é o material onde pelo menos 65% das partículas são menores que 0,075mm, correspondente à peneira de n° 200, e.g., cal hidratada, cimento Portland etc.

A Figura 9 mostra o tamanho de agregados classificados através de peneiras granulométricas. São comparadas as composições de grãos entre o concreto asfáltico (CA) tradicional ao SMA (Stone Matrix Asphalt), que é um tipo de revestimento asfáltico usinado a quente e composto por ligantes asfálticos especiais e agregados graúdos cúbicos, com poucos agregados miúdos.

Figura 9 Composições granulométricas comparativas entre um SMA e um CA.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

#### 2.4.1.2. *Distribuição dos grãos*

Este é um dos fatores que mais influem nas qualidades técnicas do asfalto que, segundo Bernucci *et al.* (2008), são rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, etc.

Após um processo de peneiramento, onde uma amostra de material é submetida à passagem de várias peneiras com graduações diferentes, é identificado através da quantidade de material retido em cada peneira as propriedades do agregado.

Dentre os principais resultados obtidos por esse método, o DNIT (2006):

- a) Agregado de graduação densa é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínuo, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores (Figura 10).

Figura 10 Concreto asfáltico na faixa B do DNIT; graduação densa.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

- b) Agregado de graduação aberta é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínuo, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores (Figura 11).

Figura 11 Camada porosa de atrito; graduação aberta.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

- c) Agregado tipo macadame (Figura 12) é aquele que possui partículas de um único tamanho, o chamado "one size aggregate". Trata-se, portanto, de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo.

Figura 12 Brita macadame.



Fonte: Concretul (2017)

#### 2.4.1.3. *Natureza*

Delimitando a origem do agregado, esses podem ser fornecidos por fontes:

- ✓ Naturais: é todo material utilizado proveniente de extração direta de recursos naturais, que, segundo Bernucci *et al.* (2008), são derivados de processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. São os pedregulhos, britas, seixos, areias, etc;

- ✓ Artificiais: São geralmente materiais residuais gerados por processos industriais ou até fabricados especificamente para atender uma necessidade técnica específica do asfalto, com é o caso da argila calcinada (Cabral, 2005). Um exemplo é a escória de aciaria, um produto tecnicamente competitivo no mercado da pavimentação rodoviária (Baltazar, 2001);

- ✓ Reciclados: São provindos da reutilização de materiais e dão fins diferentes a aterros. Em muitos países, o estudo e aplicação desses materiais são bastante difundidos e estes são fontes principais de agregados na pavimentação. No Brasil, destacam-se os Resíduos na Construção e Demolição (RCD), cujas pesquisas são desenvolvidas desde a década de 80 (MOTTA, 2005);

Balaguer (2012) cita a acidez dos agregados (referente à presença de materiais silicosos, como quartzitos e algumas espécies de granito em sua superfície) como sendo o principal motivo da baixa adesividade do agregado no pavimento, prejudicando sua capacidade de sustentação e resistência aos esforços impostos.

#### 2.4.2. Brita

A brita é o material mais utilizado e é definido como padrão em uma obra de pavimento. De acordo com Bauer (1997), ela é obtida através das jazidas, que são depósitos naturais de rochas compactadas, onde há um processo de fracionamento dessa rocha em diversos grupos, onde ele cita a pedra britada, o pó de pedra, a areia de brita, o fíler, a bica-corrída, o rachão, o restolho e os blocos.

A pedra britada é classificada como material oriundo da fragmentação – denominada cominuição – que apresenta granulometrias nominais enquadradas entre 2,4 e 64 mm. Senço (1997) destaca as definições comumente utilizadas no mercado para classificar a pedra britada mediante o seu diâmetro: brita 3, brita 2, brita 1, brita 0 e pó de pedra, sendo os números diretamente proporcionais ao decréscimo do diâmetro das pedras. Quadro 2 traz uma relação detalhada entre a numeração e o diâmetro da brita:

Quadro 2 Tamanho e classificação da brita quanto a numeração.

Brita	Limites	
	(mm – mm)	(" – ")
3	19,10 – 50,80	$\frac{3}{4}$ – 2
2	9,5 – 38,10	$\frac{3}{8}$ – $1\frac{1}{2}$
1	4,76 – 19,10	n° 4 – $\frac{3}{4}$
0	2,38 – 9,50	n° 8 – $\frac{3}{8}$
Pó de pedra	Inferior a 2,38	Inferior à n° 8

Fonte: Senço (1997)

A finalidade principal do desmonte da rocha são – realizada por meio de explosivos – é reduzir o material, de modo a produzir os agregados utilizáveis na

execução de um pavimento. O agregado britado ideal é aquele que tenha formato cúbico e não achatado ou alongado (BERNUCCI, 2008).

De acordo com Marques (2001), além de a rocha matriz estabelecer constantes como resistência, abrasão e dureza desses agregados, o processo de britagem também influi em diversas características importantes como a forma e a graduação do mesmo.

## 2.5. Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

A construção civil é uma área de atuação humana no universo que se tem conhecimento desde os primórdios das civilizações. Em contrapartida, sua execução ainda gera uma quantidade grande de rejeitos de diversas naturezas além de requerer uma quantidade massiva de fontes naturais não renováveis (BOLDRIN *et al.*, 2006; LINTZ *et al.*, 2012). Blumenschein (2004) relata que há grande prejuízo ao meio ambiente em todas as etapas da construção civil.

Os resíduos de construção civil e demolição (RCD), chamados popularmente de entulhos, compõem, aproximadamente, dois terços do peso de resíduos sólidos em geral produzidos no meio urbano (PINTO, 2002). O processo de reaproveitamento desse material é viável tanto a questões de impactos ambientais quanto economicamente.

Figura 13 Disposição irregular de RCD.



Fonte: Pinto (1999)

Balbo (2007) relata a importância de destinar um fim a estes materiais, que são geralmente produzidos por escórias de edificações e estruturas de concreto, sendo que estes, muitas vezes, são utilizados de forma errônea ou, simplesmente, descartados de maneira irregular, como mostrado na Figura 13. Utilizar desse material como alternativo para pavimentação é uma forma de aplicar essa grande quantidade de resíduo como agregado, substituindo o processo de extração de novas matérias-primas. Este material tem grande potencial de utilização em camadas de base e sub-base de estradas.

### **2.5.1. Definição**

A Resolução do Conama n. 307 (BRASIL, 2002, p. 1) define os resíduos de construção civil como:

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

John (2001) caracteriza como constante a produção de RCD, no decorrer de uma construção, que vai desde o processo de obtenção de materiais e preparação inicial da obra até o acabamento final das mesmas. Dentre as formas de aquisição do RCD estão os processos de escavação de superfícies, assim como demolição para a renovação de prédios ou até uma limpeza total de espaço para uma nova construção (SWANA, 1993). Segundo Levy e Helene (1997), as catástrofes naturais e artificiais (terremotos, tornados, incêndios e desabamentos) são fatores que também propiciam a obtenção desse tipo de resíduo.

## **2.5.2. Especificações e Classificação**

Os resíduos de construção são classificados de acordo com o material do qual foram originados, assim como a ação a que estes foram submetidos para serem considerados resíduos. A NBR 10.004 (ABNT, 2004) e a Resolução do Conama n. 307 (BRASIL, 2002) estabelecem diretrizes que caracterizam esses materiais.

### **2.5.2.1. *Classificação pela NBR 10.004***

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em 2004, publicou quatro normas que classificavam os resíduos sólidos de construção para utilização como agregados recicláveis. Também é citado o uso desse material em pavimentação. Esta foi uma das primeiras especificações sobre o RCD no Brasil. A NBR 10004 (2004) classifica os resíduos sólidos de acordo com a natureza e umidade do material (seco ou úmido), por sua composição química, ou seja, se tal material apresenta formação inorgânica ou orgânica, e pela periculosidade e risco que causa ao meio ambiente, que determina se ele é perigoso ou não e, no caso de não ser, se são inertes os não, todavia, se reagem e participam ou não efetivamente de uma reação química.

No ano de 2003, antes das normas definidas pela ABNT, a Prefeitura do Município de São Paulo definiu a PMSP/SP ETS-001, que estabelecem diretrizes para reutilização desse tipo de material, assim como determina regras para seu uso como agregado em pavimentação. Porém, essa norma é mais restritiva que a da NBR 15115 (ABNT, 2004), pois esta é mais rígida quanto às propriedades físicas ideais para o uso do RCD. O Quadro 3 mostra as definições da NBR 15115 quanto às características de emprego do agregado de RCD

Quadro 3 Aspectos prescritos com relação às características do agregado reciclado para emprego em camadas base e sub-base de pavimentos.

Ensaio	Detalhamento	
Análise Granulométrica	Dimensão característica máxima	63,5 mm
	Coefficiente de uniformidade	Maior ou igual a 10
	% passantes na peneira 0,42 mm	Entre 10% e 40%
Porcentagem de materiais indesejados	De mesmo grupo	2,0%
	De grupos distintos	3,0%
Forma dos grãos	% de grãos lamelares	Máximo 30%
Índice de Suporte Califórnia (CBR)	De acordo com o tipo de camada	Base: 60% (*)
		Sub-base: 20%
		Reforço de subleito: 12%
Expansão (por imersão em água por quarto dias)	De acordo com o tipo de camada	Base: 0,5% (*)
		Sub-base: 1,0%
		Reforço de subleito: 1,0%
(*) É permitido o uso de agregado reciclado em camada de base para vias de tráfego com N = 106 repetições do eixo padrão de 80 KN no período de projeto.		

Fonte: NBR 15115 (2004).

É importante seguir as normas de especificação quanto ao uso desses e outros agregados nas vias públicas de acordo com cada localidade, assim como é importante investir em pesquisas para determinar as condições que ao mesmo tempo obedeçam às condições físicas e químicas necessárias ao pavimento, assim como também admitam à implantação de novas técnicas, de forma que sejam difundidas e consolidadas como referencial. Nos Estados Unidos, por exemplo, dos 28 estados que aprovam a utilização dos resíduos de concreto em camadas de base e sub-base de pavimento, apenas 15 possuem normas que especifiquem o seu uso. (KUO et al., 2002).

#### 2.5.2.2. *Classificação segundo o Conama*

A Resolução do Conama n. 307 (BRASIL, 2002, p. 2), estabelece os seguintes parâmetros de classificação dos RCD:

✓ Classe A: são os materiais recicláveis provindos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação ou ademais serviços públicos de uma cidade (que inclui resíduos de solos após o processo de terraplanagem), de edificações, como os tijolos, telhas e concreto, e dos restos oriundos da fabricação em canteiro de obras de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.);

✓ Classe B: são os materiais provindos da construção, demolição, reformas e reparos e que sejam usualmente recicláveis para o reuso em suas próprias áreas, como plástico, papel, borracha, vidro, metal, etc;

✓ Classe C: são materiais provindos da construção, demolição, reformas e reparos que não possuem tratamento e processo de reutilização especificada, como o caso dos materiais de gesso;

✓ Classe D: são os materiais provindos da construção, demolição, reformas e reparos, que sejam nocivos ao meio ambiente e que geram impacto ambiental se não tratados quanto sua periculosidade. São geralmente óleos e solventes e, principalmente, materiais provenientes de clínicas radiológicas e instalações industriais.

### **2.5.3. Utilização como agregado alternativo**

O processo de conversão do RCD em agregados reciclados é semelhante ao processo usual de usinas tradicionais de britagem (BODI *et al.*, 1995), apesar de serem necessárias algumas etapas preparatórias para livrar esse material de algumas impurezas. Porém, depois de feito esse tratamento, as máquinas para a obtenção do agregado são as mesmas utilizadas convencionalmente. Ângulo *et al.* (2005) descreve as etapas iniciais como um processo de catação de material, que separa os materiais segundo suas classes, sendo selecionados apenas os resíduos da classe A para a britagem posterior. O autor destaca o uso de separação magnética para a segregação de materiais metálicos.

Figura 14 Gestão de resíduos da construção civil.



Fonte: Química, Meio Ambiente e Edificações (2005).

A Figura 14 mostra o processo de catação manual para separação de resíduos. Muitas vezes as usinas recicladoras fazem uma nova pré-seleção do RCD, dividindo o produto da catação em três diferentes gêneros, que são definidos por Trichês e kryckyj (1999) como:

- ✓ Entulho branco: são os materiais geralmente provindos de peças de concreto e argamassa;
- ✓ Entulho vermelho: são os materiais geralmente de composição cerâmica como tijolos, telhas, etc.

Logo após esses processos, entra o processo de britagem do material, diminuindo o tamanho dos grãos e o transformando em agregado reciclado utilitário. (ÂNGULO *et al.*, 2005). O queixada, conforme a Figura 15, é um equipamento destinado a trituração de resíduos classe A possibilitando a reciclagem no canteiro de obras. Nas Figuras 16 e 17 é possível ver o processo de trituração de blocos de concreto em agregado britado.

Figura 15 Queixada.



Fonte: REHNI (2010)

Figura 16 Blocos de concreto sendo triturados.



Fonte: REHNI (2010)

Figura 17 Agregado produzido após processo de trituração.



Fonte: REHNI (2010)

O'Mahony e Milligan (1991) atribuem às grandes cidades a maior viabilidade de processos de reciclagem desse material, todavia que são as principais consumidoras de fontes de agregados, por suas constantes obras. No ano de 1991, a primeira usina recicladora do Brasil foi construída com finalidade de gerar agregados para camadas de base e sub-base de pavimentos pela Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP) no bairro do Itatinga (CARNEIRO *et al.*, 2001). Porém, esta usina ficou anos fora de operação, sendo apenas depois de alguns anos utilizados seus equipamentos para este fim no bairro de Itaquera (SCHNEIDER, 2003).

#### **2.5.4. Características Físicas**

Segundo Poon (2007), o uso de RCD em camadas de base e sub-base tem sido bastante viável do ponto de vista técnico, no decorrer das últimas décadas. A obtenção de matéria-prima nova para construção de pavimentos é bastante cara, enquanto que os resíduos de construção apresentam custos bastante inferiores. Blankenagel e Guthrie (2006) destacam que o valor desses resíduos é aproximadamente 30% mais barato que a brita graduada utilizada convencionalmente, que tem levado muitos órgãos e

construtoras a utilizar sempre dessa substituição quando possível. A Figura 18 mostra o processo de compactação de agregado de base por meio de rolo compressor

Figura 18 Pavimento sendo construído com RCD.



Fonte: Abrecon (2016)

Apesar disso, é importante destacar que esses materiais podem apresentar variabilidade em algumas características se comparadas aos materiais tradicionais (MOTTA e FERNANDES, 2003). Tais características influem bastante no resultado final do pavimento, como o caso da sua porosidade, que por ser elevada em relação ao material usual, gera maiores porcentagens de absorção de água (ZORDAN, 2003).

Com isso, é preciso analisar dadas propriedades isoladamente para a implantação dos RCD como agregado, para que este se adeque às especificações definidas pelas normas definidas para o projeto a que será aplicado. De acordo com Leite (2007), por ser um tipo de material cujas características podem variar na medida em que é trabalhado, o projeto inicial a que for submetido se torna passível de alterações posteriores.

De acordo com Blankenagel e Guthrie (2006), diversas pesquisas mostram que as especificações de controle de qualidade de materiais padrões não se aplicam ao RSU (resíduo sólido urbano), enquanto Bennert *et al.*, (2000) enfatiza a importância de estudos de técnicas específicas quando se trata de reutilização de material reciclado. Alguns órgãos vetam ou restringem a utilização do RCD como agregado na pavimentação. Um dos fatores citados por Nataatmadja e Tan (2001) é a problemática

quanto à durabilidade deste material ao longo da sua vida útil como camada de pavimento.

Contudo, Brasileiro (2013) descreve aspectos culturais, que incitam a desconfiança dos clientes e construtores em relação à qualidade do asfalto gerado por resíduos de RCD, como um dos fatores que mais embargam a aplicação dessa técnica na pavimentação, além da falta de normas (por conta da heterogeneidade do tipo de material) que especifiquem as diretrizes para aplicação dos métodos necessários, dificultando sua aceitação no mercado. A autora relaciona a radicação de novas normas de controle de qualidade para diminuição de inconstância dos resíduos quanto sua aplicação como forma de afirmar tais materiais como alternativas de bom desempenho e qualidade. Algumas estratégias que diminuem essa inconstância são o uso de dosadores para produção de misturas com agregados reciclados e naturais, a realização do processo de britagem apenas com certas classes de RCD, visando à finalidade a que este é proposto, e a remoção de conteúdos orgânicos do material, através de um classificador espiral.

#### **2.5.5. Experiências internacionais**

Por conta da alta densidade demográfica e pouco espaço para estocagem, países europeus e outros, como o Japão, desenvolveram políticas estruturadas e consolidadas para controle e gerenciamento de seus resíduos, tornando-os pioneiros no processo de manuseio e reaproveitamento do RCD. (PINTO, 1999). Países como a Itália, por exemplo, possuem especificações próprias no controle de produção e de aplicação desse material reciclado para pavimentação, que relacionam características técnicas à forma e à heterogeneidade dos agregados obtidos (MOTTA, 2005).

A Holanda foi um dos países pioneiros na reutilização dos resíduos de concreto e alvenaria como agregado constituinte das camadas de base e sub-base de pavimento, sendo mencionado o seu uso desde a década de 70. Estudos realizados por Molenaar e Van Niekerk (2002) pesquisaram sobre as características mecânicas dos agregados mediante influência da natureza, granulometria e grau de compactação dos mesmos. Tais pesquisas concluíram que o fator que mais contribui para a qualidade do pavimento no qual o material reciclado é empregado é o fator de compactação, o que é se apresenta

um resultado bem viável, já que o trabalho de compactação é relativamente mais fácil e barato do que o de um controle sobre as características físicas iniciais do agregado.

No Reino Unido, foram realizados, diversos estudos quanto à possibilidade de uso dos RCD como agregados alternativos para pavimentação, na década de 90. A pesquisa de O'Mahony e Milligan (1991) consistiu na comparação das propriedades de amostras de resíduos britados de concreto e de alvenaria com amostras de brita calcária, material utilizado usualmente em camadas de pavimento no Reino Unido. Todos os materiais do estudo demonstraram estar acima do piso estipulado pelo índice de suporte Califórnia de 30%. Porém, as amostras de alvenaria apresentaram níveis de suporte mais baixo, por ser formado por uma quantidade mais variável de materiais.

A Austrália, que constrói rodovias com o agregado reciclado de concreto desde a década de 90, investiu em pesquisas sobre o módulo de resiliência do dado material. Nataatmadja e Tan (2001) estudaram quatro amostras de resíduos de concreto com diferentes características de resistência à compressão (15,0 MPa; 18,5 MPa; 49,0 MPa e 75,0MPa) e apontaram que, apesar da resistência inicial do concreto utilizado influenciar no módulo de resiliência e deformação permanente do agregado na pavimentação, o fator que mais influi é a graduação dos materiais, que quanto melhor for, maior será o módulo de resiliência.

A Federal Highway Administration – FHWA (1997) relata que cerca de 20 estados americanos utilizam dos resíduos de construção civil como material em camadas de base e sub-base de pavimentos, e que o agregado reciclado de concreto tem sido, desde então, um ótimo material granular, se mostrando durável e com boas capacidades de suporte e drenabilidade. No final da década de 90, foram realizadas pesquisas em New Jersey a respeito do uso de resíduos de concreto (BENNERT *et al.*, 2000), que utilizaram algumas porcentagens de brita graduada simples acrescida ao material reciclado de concreto. Após testes triaxiais de carga repetida que indicavam os aspectos de módulo de resiliência e a deformação permanente do material estudado, foi possível observar que o agregado reciclado de concreto, apesar de apresentar um grau de deformação permanente superior a da brita graduada, que caracteriza um ponto fraco no material reciclado, também mostrou um módulo de resiliência superior, se mostrando uma boa característica.

Estudos realizados pelo Departamento de transportes da Florida (Florida Department of Transportation - FDOT) utilizaram da reciclagem de matéria obtida

através da retirada de pavimentos rígidos de concreto para a sua reutilização como novos pavimentos rígidos e/ou flexíveis (KUO *et al.*, 2001). Estes testes sobre os novos pavimentos foram desenvolvidos para serem aplicados no mesmo local aonde foi retirado, agindo como substituto ao antigo, o que, segundo CHINI *et al.* (2001), diminui bastante os custos com condução e acúmulo de matéria. Os resultados dos testes envolvendo a utilização do concreto reaproveitado nos pavimentos comprovaram vantagem no seu desempenho em relação ao material convencional, e não foram encontradas trincas ou fissuras por fadiga nos trechos que continham tal agregado (CHINI *et al.*, 2001; KUO *et al.*, 2001).

Pesquisas relacionadas ao potencial auto-cimentante dos materiais reciclados de concreto foram realizadas no estado de Utah. Os testes de compressão simples realizados por Blankenagel e Guthrie (2006) indicaram um aumento na resistência deste material ao longo dos dias (resistência 130% maior em 3 dias de cura e 180% em 7 dias), e citaram a hidratação das partículas de cimento e/ou reações pozolânicas como possíveis causas desse fenômeno.

#### **2.5.6. Experiências no Brasil**

Em 1984, na cidade de São Paulo, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) acompanhou a primeira via do Estado contendo, em seu pavimento, agregados reciclados de resíduos de construção. A Rua Gervásio da Costa, situada no oeste da cidade, teve como objetivo sanar um volume de tráfego baixo (MOTTA, 2005). Entretanto, segundo Pinto (1999), desde 1989, técnicos atuantes na Prefeitura de São Paulo já desenvolveram diversos estudos que traziam informações sobre a utilização dos RCD na pavimentação de estradas.

O uso de agregados reciclados nas camadas de reforço do subleito, subleito, sub-base e base da pavimentação, segundo Motta (2005) realiza-se desde 1996, em algumas avenidas de Belo Horizonte, como a Raja Gabaglia e a Mário Werneck. A cidade é exemplo na gestão dos resíduos de construção e demolição e contém três estações de reciclagem de entulhos (GRUBBA, 2009). Blumenschein (2004) destaca que cerca de 35% dos resíduos sólidos provenientes de canteiros passam por métodos de reciclagem.

Também no estado de São Paulo, tem operado na cidade de São Carlos uma usina de triagem e reciclagem de RCD desde 2005. Esta foi criada visando abolir interromper a deposição em áreas ilegais de resíduos que afetassem o meio ambiente, como córregos e áreas verdes. O produto dessa usina é aplicado na pavimentação em sub-bases e pisos intertravados, como exemplo em algumas ruas do Bairro Santa Angelina (SANTOS, 2007).

Algumas pesquisas foram realizadas no Brasil quanto a métodos de aplicação desses agregados em pavimentos. Frota et al. (2003), no estado de Manaus, utilizaram dos agregados de RCD como substitutos para o agregado graúdo de seixo, que já é o material alternativo usual para suprir as necessidades pétreas da região. Os estudos comprovaram a viabilidade do agregado reciclado, mas enfatizaram a necessidade do aumento de consumo do ligante. Ron et al. (2008) também que, apesar de atender a todas as características técnicas previstas em norma, o teor ótimo de ligante da mistura se mostrou alto (7,6%), em comparação a misturas usuais. De acordo com Silva (2009), os agregados de construção civil são mais indicados na substituição de agregados convencionais para camadas betuminosas de vias urbanas de tráfego leve.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são mostradas as origens do agregado reciclado de construção e demolição, assim como o processo de britagem e quarteamento das amostras. São descritos os procedimentos utilizados de caracterização física para o desenvolvimento e, em seguida, a metodologia observada na preparação e compactação dos corpos de prova a serem testados para a determinação do comportamento mecânico. Também são descritos os equipamentos e técnicas que serão utilizados para realizar o teste de Índice de Suporte Califórnia (CBR). Ao final, é apresentada a metodologia para análise dos resultados experimentais.

#### **3.1. Coleta**

O material de estudo foi coletado em um terreno baldio localizado no bairro do Parque dos Nobres em São Luís – MA, como visto na Figura 19. Foram aproximadamente 80 kg de entulho coletados e armazenados em sacos para serem transportados para o laboratório da Geocret, também localizada no bairro Parque dos Nobres, sendo facilitado assim seu transporte e evitadas quaisquer interferências do meio nas amostras.

É importante ressaltar que esse resíduo foi encontrado exposto de forma completamente inadequada, o que é muito comum em regiões periféricas da cidade de São Luís por conta da falta de locais e meios de transporte e descarte adequados desse material, assim como o próprio descaso da população. Esse resíduo, segundo informações, estava há mais de um mês no terreno.

Figura 19 Resíduo de Construção utilizado no experimento



FONTE: Própria do Autor (2019)

Foram previamente retirados, de forma manual, materiais poluentes como ferro, vidros, papéis, e madeiras, de acordo com o Método de Ensaio DNER-ME 083/98 (Agregados – análise granulométrica). A coleta do agregado reciclado de concreto foi realizada de acordo com a norma DNER PRO 120/97 “Coleta de Amostra de Agregados”. Como sua composição tem suscetível variabilidade ao longo do tempo, optou-se por coletar todo o material em um único dia.

### **3.2. Britagem**

Em relação à composição do material recolhido, tem-se, basicamente, argamassa e material cerâmico, o que classifica esse RCD como “misto”. Como não foi possível utilizar um equipamento adequado para esse processo de britagem, esta foi feita de forma manual, utilizando de um martelo, conforme especificações da norma NBR 15115 (ABNT, 2004) – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos, respeitando a dimensão máxima do agregado em 63,50 mm.

Figura 20 RCD selecionado e britado



FONTE: Própria do Autor (2019)

A Figura 20 ilustra o resultado. Não foi recolhido solo para o desenvolvimento dos ensaios de caracterização mecânica das amostras. Com o processo de britagem, foi produzido um grande volume de finos, o que se mostrou viável para utilizar nas amostras e analisar se o RCD pode ser usado como um todo em camadas de pavimento.

### **3.3. Ensaios de Caracterização**

Aqui são descritos os procedimentos utilizados para a obtenção de dados referentes às propriedades físicas e mecânicas dos agregados de RCD, a fim de estabelecer parâmetros comparativos de eficiência e durabilidade em relação ao agregado tradicional. As características tecnológicas dos agregados servem para assegurar uma fácil distinção de materiais, de modo a poder comprovar sua homogeneidade, bem como selecionar um material que resista de maneira adequada às cargas e à ação ambiental às quais o pavimento irá sofrer. Os ensaios utilizados para a avaliação das condições físicas foram: Análise granulométrica, Teor de Umidade, Massa Específica, Abrasão Los Angeles, Equivalente de Areia e Compactação, enquanto que as condições mecânicas foram determinadas pelo Índice de Suporte Califórnia (CBR).

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), para realização dos ensaios é necessário fazer o quarteamento, processo onde se mistura a amostra

formando uma pilha cônica em uma superfície plana. O cone é então achatado em um círculo com uma espessura constante e se divide esse círculo em quatro quartos iguais. Dois quartos opostos do material são removidos (Figura 21) e os dois quartos opostos remanescentes são agrupados em uma nova amostra, sendo finalizado o processo quando se tem a quantidade necessária (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 21 Amostra sendo quarteada



FONTE: Própria do Autor (2019)

### 3.3.1. Análise granulométrica

Analisar a granulometria dos agregados é uma das principais etapas a serem realizadas quando se trata de trabalho com solo, pois permite obter um esqueleto que convenientemente distribui as cargas em profundidade, obtendo esta característica através de uma sobreposição dos grãos (Branco *et al.*, 2006). A determinação da granulometria dos agregados é realizada por peneiramento e pesando a fração retida em cada peneira. Além disso, permite a identificação de escassez de partículas de determinado tamanho de material, corrigindo então se for considerado relevante (Silva, 2005).

A norma brasileira utilizada foi a NBR 7181: Análise granulométrica do solo e das partículas. Foram coletados 2000 gramas do material para a realização do ensaio,

após o processo de quarteamento. As normas NBR 5734 e NBR 6457 foram consultadas também, a fim de estabelecer diretrizes para a realização do ensaio.

Calculou-se a porcentagem da massa dos agregados retidos em cada peneira em relação à massa total da amostra. Também se obteve a porcentagem de material passante de cada peneira relacionando-as com o logaritmo da abertura da peneira, onde foi possível formar uma curva de tamanho de grãos, possibilitando uma visualização gráfica da distribuição das partículas por tamanho.

Por último, foram verificados os Coeficientes de uniformidade ( $C_u$ ) e curvatura ( $C_c$ ), além do percentual de amostra passante na peneira de 0,42mm. Estes valores são estabelecidos e limitados em norma, usando as equações Eq. 1 e Eq. 2, com intuito de estabelecer uma granulometria uniforme e bem graduada.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{Eq.1}$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad \text{Eq.2}$$

Onde:

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

$d_{30}$ : diâmetro correspondente a 30% da porcentagem passante, em [mm];

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

### 3.3.2. Teor de Umidade

As amostras de RCD foram destorroadas e secas ao sol até atingirem a umidade higroscópica. A umidade higroscópica é quando, mesmo permanecendo bastante tempo secando, o solo ainda aprisiona uma quantidade de água absorvida da atmosfera, em forma de vapor, se equilibrando ao ambiente.

Utilizou-se a norma NBR 7181: Análise do tamanho solo-partícula. Foram recolhidas três amostras do material retido na peneira No. 10 (2 mm) do ensaio de granulometria. Depois, foram pesadas e, logo em seguida, imersas em água, e pesadas novamente. Em seguida, foram expostas ao sol até sua massa se tornar constante, sendo

pesado e anotado seu peso seco bruto e, assim, determinada a umidade higroscópica do agregado através da Eq. 3.

$$h = \frac{\text{Peso}_{\text{cápsula com solo úmido}} + \text{Peso}_{\text{cápsula com solo seco}}}{\text{Peso}_{\text{cápsula com solo seco}} - \text{Peso}_{\text{cápsula}}} \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Esse valor é dado em porcentagem. É tirada então a média aritmética entre os valores a fim de chegar ao resultado final, que deve ser expresso em apenas uma casa decimal.

### 3.3.3. Massa específica

Processo muito importante que, mediante obtenção da massa específica real, aparente e efetiva do agregado, consegue chegar a valores cruciais de densidade e absorção do agregado que servem de indicador de porosidade e da quantidade de ligante que os agregados absorvem. Seguindo às normas ASTM C127 - DNER ME 081/94, foram separados 2000g de material retido na peneira 9,5mm, pesado o agregado seco, pesado na condição de completamente saturado por 24hrs, em superfície seca e pesado imerso em água, com auxílio de um cesto metálico, mostrado na Figura 22, e um dispositivo para pesagem hidrostática.

Figura 22 Balança de precisão e cesto metálico



FONTE: Própria do Autor (2019)

De posse desses valores de peso, foi possível calcular as densidades real e aparente, absorção e, logo após, densidade efetiva através das equações:

$$\text{Densidade Real} = \frac{P_{\text{seco}}}{P_{\text{seco}} - P_{\text{imerso}}} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{P_{\text{seco}}}{P_{\text{saturado}} - P_{\text{imerso}}} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\text{Absorção} = \frac{(P_{\text{saturado}} - P_{\text{seco}})}{P_{\text{seco}}} \times 100 \quad \text{Eq. 6}$$

$$\text{Densidade Efetiva} = \frac{D_{\text{real}} + 2D_{\text{efetiva}}}{3} \quad \text{Eq. 7}$$

### 3.3.4. Perda por Abrasão

Este ensaio visa determinar o nível de desgaste do agregado na perda por abrasão. Foi preciso utilizar o aparelho Los Angeles, que não tinha não laboratório da Geocret. Sendo assim, foi preciso utilizar o laboratório de solos e pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como mostrado na Figura 23. A norma utilizada foi a NBR 7211:2009 – Agregados para concreto – Especificação e DNER-ME 035/98: “Agregados - determinação da abrasão Los Angeles”. O ensaio consiste em submeter cerca de 5.000g de agregado em duas categorias denominadas B (2500g retidos na peneira 12,5mm e 2500g retidos na peneira 9,5mm) e C (2500g retidos na peneira 9,5mm e 2500g retidos na peneira 4,8mm), por cerca de 500 revoluções no interior do cilindro da máquina com 10 esferas padronizadas de aço adicionadas, causando danos a este, verificados através da pesagem do novo material obtido e retido em uma peneira de 1,7 mm. Com auxílio da Eq. 8, calculou-se a perda por abrasão (LA), dada em porcentagem.

$$LA = \frac{\text{massa}_{\text{inicial}} + \text{massa}_{\text{final}}}{\text{massa}_{\text{inicial}}} \times 100$$

Eq. 8

Figura 23 Aparelho Los Angeles



FONTE: Própria do Autor (2019)

### 3.3.5. Equivalente de areia

Estabelecido pela norma DNER-ME 054/97 “Equivalente de Areia”, tem por finalidade identificar a presença de finos plásticos no agregado miúdo. Foi colocado o material passante na peneira de 4,8mm em uma proveta (Figura 24) com solução padronizada, deixado em repouso, agitado e, logo após, foram lidas as alturas da suspensão (leitura do topo da argila –  $h_1$ ) e da sedimentação (leitura do topo da areia –  $h_2$ ), sendo calculado seu Equivalente de Areia (EA) utilizando a Eq. 9.

$$EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

**Eq. 9**

Figura 24 Proveta de acrílico



FONTE: Própria do Autor (2019)

### 3.3.6. Compactação

Este ensaio utiliza da aplicação de certa energia de compactação (número de golpes de um soquete sobre o solo contido num molde) em busca de determinar umidade ótima e o peso específico seco para o material analisado. A adição de água a um solo seco facilita sua compactação e estabelecer a quantidade que melhor traz esse benefício é o principal intuito desse ensaio, de maneira a não satura-lo demais.

Foi aplicada norma DNER-ME 129/94: Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Foram moldados cinco corpos de prova com o material umedecido em um cilindro metálico utilizando energia de compactação intermediária de 26 golpes. A cada corpo de prova, foi adicionado um volume de água crescente em 2%. Logo após, o cilindro é rasado, limpo e pesado. Como o valor do cilindro é padronizado (2410 gf), assim como seu volume de 1000 cm<sup>3</sup>, foi possível encontrar o peso do solo compactado e o peso específico aparente do solo úmido ( $\gamma$ ), através da Eq.10.

$$\gamma = \frac{\text{Peso do solo compactado}}{\text{Volume do cilindro}} \quad \text{Eq. 10}$$

Foi também retirada uma amostra do material para armazenagem em cápsulas e pesagem para calcular a umidade (h) e, conseqüentemente, o peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) através da Eq. 11.

$$\gamma_s = \gamma \times \frac{100}{100 + h} \quad \text{Eq. 11}$$

Em posse desses valores, pode-se montar um gráfico que relaciona o teor de umidade de cada amostra ao peso específico aparente seco do solo, revelando assim os valores de peso específico máximo do solo ( $\gamma_{s\max}$ ), como sendo o ponto máximo da curva, e da umidade ótima ( $h_{ot}$ ), como o valor referente associado a este último.

### 3.4. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Após a realização dos ensaios de caracterização, foi feita a etapa de avaliação mecânica do RCD coletado. O ensaio utilizado foi o de Índice de suporte Califórnia

(CBR) e a norma que foi referenciada para sua realização foi a DNER-ME 049/94: Solo – Determinação do Índice de Suporte Califórnia. Tal ensaio tem como finalidade avaliar o potencial de ruptura do subleito, ou seja, a resistência do material mediante possíveis deslocamentos que sofrerá se aplicado nas camadas de pavimento (BERNUCCI *et. al.* 2008).

Figura 25 Corpo de prova moldado no cilindro CBR



FONTE: Própria do Autor (2019)

Foram moldados cinco corpos-de-prova com 7000g material de RCD passante na peneira de 19 mm. Esse material foi compactado conforme procedimento citado no item anterior (Figura 25), utilizando a massa específica e umidade ótima estabelecidas em cálculo. Estes valores foram necessários para estabelecer a quantidade de água ótima necessária para umedecer o solo antes da compactação, e é encontrada utilizando a Eq. 12.

$$\text{Volume de água (V}_a\text{)} = \frac{P_{\text{seco}}(h_{\text{ot}} - h)}{100\gamma_{\text{água}}}$$

**Eq. 12**

Porém, foram desenvolvidos corpos de prova com valores de umidade abaixo e acima da umidade ótima, a fim de se estabelecer uma curva para cálculo do CBR. O peso seco do solo pode ser encontrado com a Eq. 13.

$$P_{\text{seco}} = P_{\text{umido}} \times \frac{1}{1 + \frac{h}{100}}$$

**Eq. 13**

Figura 26 Máquina para ensaio de CBR



FONTE: Própria do Autor (2019)

Logo após, estes foram imersos cuidadosamente em um tanque por quatro dias com uma sobrecarga-padrão de dois discos anulares de aproximadamente 2,5kg, sendo feitas leituras a cada 24 horas com um extensômetro, verificando sua expansão axial. Dado o período de quatro dias, a amostra é escorrida por 15 minutos e são colocados os discos de sobrepeso novamente para a penetração do material com um pistão (Figura 26) se movimentando a 1,27 mm/min, anotando as pressões de perfuração e os deslocamentos correspondentes, em intervalos de tempo estabelecido. Em seguida, foi

feito um gráfico relacionando essas duas últimas variáveis obtidas, de maneira que foi possível verificar as tensões equivalentes às penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas, para utilizar então no cálculo de CBR, utilizando as fórmulas abaixo, sendo adotado o maior valor encontrado entre as duas.

$$ISC_{0,1''} = \frac{P_{0,1''}}{70} \times 100 \quad (4)$$

**Eq. 14**

$$ISC_{0,1''} = \frac{P_{0,2''}}{105} \times 100 \quad (5)$$

**Eq. 15**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos mediante a realização dos ensaios do capítulo anterior. Os cálculos foram feitos utilizando as fórmulas descritas e o programa Microsoft Excel. São dispostas tabelas que facilitam a organização e visualização dos dados e gráficos, de autoria própria, feitos de acordo com a necessidade dos ensaios. Foram também realizados comentários a respeito dos resultados, utilizando como base dados obtidos referentes aos agregados tradicionais e outras conclusões sobre o próprio RCD em estudos anteriores.

### 4.1. Curva Granulométrica.

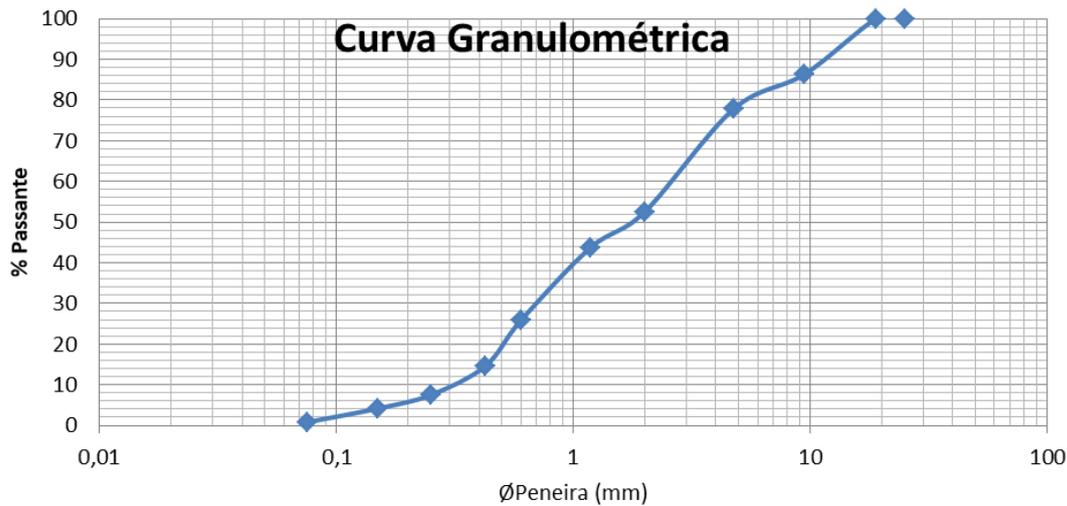
Com o ensaio de granulometria, foi possível elaborar a Tabela 1 com os valores de massa e porcentagem retidos e passantes em cada peneira. A Figura 27 mostra os resultados obtidos através do teste de granulometria, com a curva granulométrica plotada em escala logarítmica.

Tabela 1 Ensaio de Granulometria

<b>Ø Peneira (mm)</b>	<b>Massa retirada (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Acumulada</b>	<b>% Passante</b>
25	0	0	0	100
19	0	0	0	100
9,5	272,5	13,6	13,6	86,4
4,75	172,2	8,6	22,2	77,8
2	504,9	25,2	47,5	52,5
1,18	176,6	8,8	56,3	43,7
0,6	358,2	17,9	74,2	25,8
0,425	223,5	11,2	85,4	14,6
0,25	142,3	7,1	92,5	7,5
0,15	66,3	3,3	95,8	4,2
0,075	68,3	3,4	99,2	0,8
Sobra	15,2	0,8	100	0
Σ	2000	100		

FONTE: Própria do Autor (2019)

Figura 27 Gráfico de curva granulométrica



FONTE: Própria do Autor (2018)

Valores encontrados:

Dimensão máxima característica: 19mm

Coefficiente de uniformidade ( $C_u$ ) = 8,125

Coefficiente de curvatura ( $C_c$ ) = 0,63

Material menor que 0,42 cm = 15 %

De acordo com o gráfico e prescrição da norma, foi possível observar que a granulometria da amostra se apresenta uniformidade média. Foram atendidos os critérios da NBR 15115 (ABNT, 2004) quanto à porcentagem de passagem de material na peneira de 0,42 mm. Por se tratar de agregado alternativo, não foi considerado o cálculo de coeficiente de curvatura dos grãos, pois não esta prevista na norma tal categoria. Os agregados de RCD britados são envolvidos por pastas de cimento que se desagregam facilmente com o impacto e esmagamento, contribuindo assim para uma maior quantidade de finos relativamente aos agregados naturais.

#### 4.2. Umidade Higroscópica

Realizados os procedimentos de pesagem, saturação e secagem, foram obtidos e calculados os seguintes resultados:

Tabela 2 Umidades higroscópicas das amostras

Cápsula (gf)	Cápsula + solo úmido (gf)	Cápsula + solo úmido (gf)	h(%)
5,67	25,17	24,20	5,2
6,02	29,84	28,97	3,8
5,35	26,43	25,56	4,3
		Média =	4,4

FONTE: Própria do Autor (2019)

O agregado reciclado misto apresentou umidade higroscópica de 4,4%, sendo tal valor abordado mais a frente no teste de compactação.

### 4.3. Perda por Abrasão

O ensaio foi realizado três vezes pra cada classe granulométrica (B e C). Os valores já calculados de seu LA, assim como as médias de cada classe são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 Resultados de LA das amostras de RCD

Faixa Granulométrica	LA Amostra 1 (%)	LA Amostra 2 (%)	LA Amostra 3 (%)	Média
19,5 - 12,5	43,8	44,3	44,1	44
9,5 - 4,8	46,4	45,6	45,9	46

FONTE: Própria do Autor (2019)

Em comparação aos agregados naturais, onde a abrasão Los Angeles tende a apresentar valores entre 15 e 30% (FERREIRA 2009, PESTANA 2008), tais valores se mostraram altos, o que já era esperado pela variabilidade e resistência própria dos resíduos provindos de demolição. Porém, a norma dita um valor aceitável de até 50% para o LA e, apesar da desvantagem, ainda se adequa às especificações.

#### 4.4. Equivalente de areia

Após três análises diferentes utilizando o material fino do agregado, foi possível estabelecer uma média entre os resultados de EA, como descrito na Tabela 4:

Tabela 4 Dados para obtenção do EA

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
h1 (cm)	97,5	102,5	103,6	101,2
h2 (cm)	78,5	80,6	79,7	79,6
EA (%)	80,5	78,6	76,9	78,7

FONTE: Própria do Autor (2019)

O DNER-ME 054/97 estabelece que os valores de EA sejam superiores à 55%, a fim de evitar torrões de argila e substâncias nocivas. Foi possível verificar que o RCD atende muito bem a esse requisito, sendo até superior a alguns estudos já realizados com agregados naturais, que apresentaram média em torno de 70% (BRASILEIRO, 2013).

#### 4.5. Massa específica

O processo foi realizado duas vezes para a obtenção da média aritmética dos resultados calculados, como previsto em norma. Os valores dos pesos encontrados, assim como as densidades e absorção média das amostras de agregado de RCD são dispostas na Tabela 5.

Tabela 5 Dados obtidos para cálculo de densidade e absorção do agregado

Amostra	P <sub>seco</sub> (g)	P <sub>saturado</sub> (g)	P <sub>imerso</sub> (g)	D <sub>real</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>aparente</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	D <sub>efetiva</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
A	2989,9	3173,3	1826,5	2,57	2,22	6,13	2,34
B	2989,6	3169,2	1821,3	2,56	2,22	6,09	2,33
			Média	2,57	2,22	6,11	2,33

FONTE: Própria do Autor (2019)

Enquanto a densidade do agregado de RCD se apresenta superior, automaticamente, este possui uma absorção, muito maior até, que o dos agregados tradicionais naturais, segundo estudos já realizados por Silva et al (2009). Isso indica maior porosidade que, por consequência, sugere maior utilização de ligante asfáltico, já que parte dele acabará sendo absorvido pelo próprio agregado, diminuindo seu potencial coesivo.

#### 4.6. Compactação

Os valores das umidades do solo de cada uma das cinco amostras foram calculados e dispostos na Tabela 6. Foram calculados também os valores de peso específico aparente seco de cada uma e apresentados na Tabela 7, a fim de relacioná-los no gráfico (Figura 28). De posse disso, foi possível achar os valores de umidade ótima (hot) = 13,6% e peso específico aparente máximo do solo ( $\gamma_{s \max}$ ) = 1,8 gf/cm<sup>3</sup>.

Tabela 6 Umidades das amostras de RCD

Amostra	P. cápsula (gf)	P.cápsula+solo úmido (gf)	P.cápsula+solo seco (gf)	h(%)
1	36,33	102,36	96,08	10,51
2	36,78	109,78	101,79	12,29
3	36,83	110,41	101,16	14,38
4	37,98	127,83	115,09	16,36
5	37,63	111,74	101,32	17,52

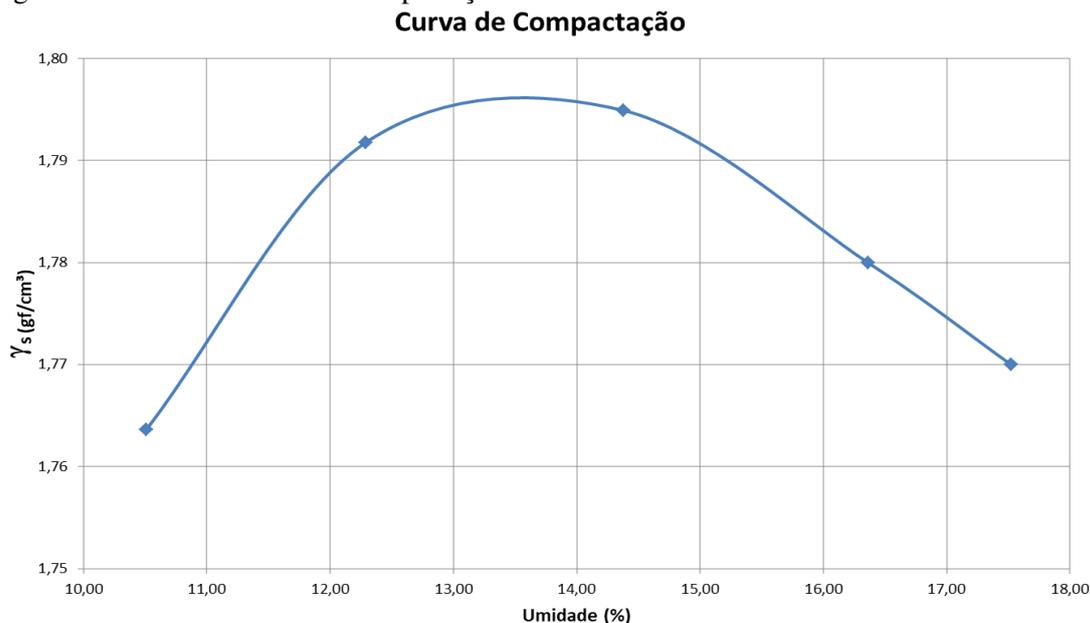
FONTE: Própria do Autor (2019)

Tabela 7 Obtenção do peso específico aparente seco

Amostra	P solo compactado (gf)	$\rho$ ( gf/cm <sup>3</sup> )	h (%)	$\rho_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )
1	1949	1,949	10,51	1,76
2	2012	2,012	12,29	1,79
3	2053	2,053	14,38	1,79
4	2032	2,032	16,36	1,78
5	2023	2,023	17,52	1,77

FONTE: Própria do Autor (2019)

Figura 28 Gráfico da curva de compactação



FONTE: Própria do Autor (2019)

Segundo estudos realizados por Molenaar e Nieker (2002) e O'Mahony e Milligan,(1991), por conta da variabilidade do RCD, se torna difícil estabelecer valores de umidade ótima através da curva de compactação se mostram dispersos e de difícil visualização dos dados. Porém, neste ensaio, foi possível estabelecer valores similares ao determinado em outros estudos.

#### 4.7. CBR

Utilizando a umidade higroscópica ( $h$ ) = 4,4%, umidade ótima ( $h_{ot}$ ) = 13,6% e o peso específico aparente máximo do solo ( $\gamma_{s \text{ max}}$ ) = 1,8 gf/cm<sup>3</sup> o  $\gamma_{\text{água}} = 1\text{gf/cm}^3$ , foi encontrado o peso seco da amostra = 6704,98gf e o volume de água de 616,86 ml de água a ser adicionado ao RCD pré-compactação.

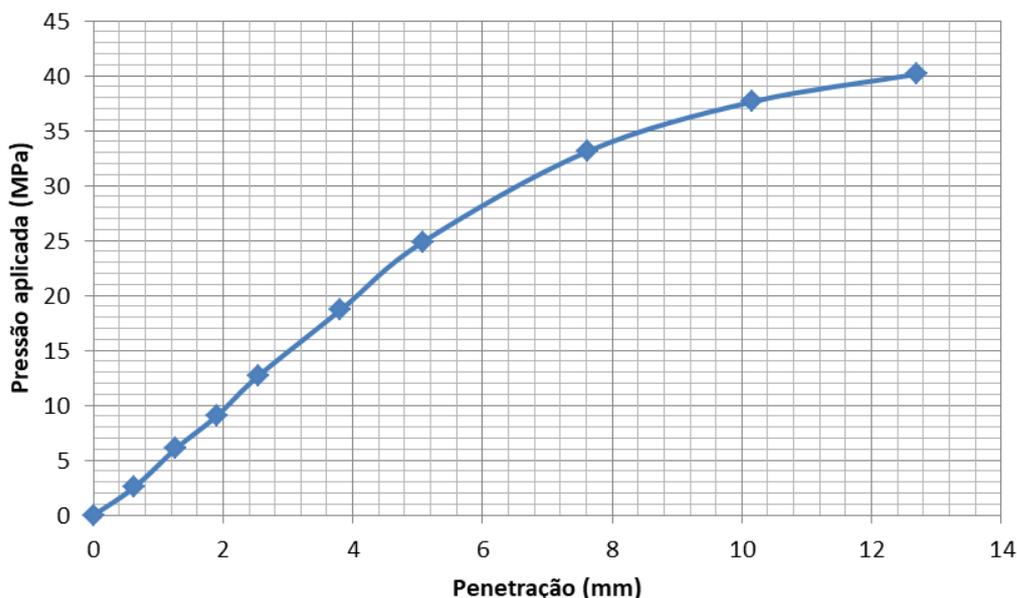
Os valores de expansão observados pelo ensaio foram praticamente nulos, o que configura boa estabilidade do material em presença de umidade. Porém, uma amostra apresentou certo nível de contração. Este aspecto é plausível pela incorporação do agregado e diminuição de expansibilidade fato ocorrido nos estudos de Motta (2005).

Os valores observados de pressão em diferentes tempos de penetração foram dispostos na Tabela 8, segundo a norma. Foi escolhido o ramo de tensões que apresentou maiores valores.

Tabela 8 Tabela do ensaio de CBR

Penetração (mm)	Tempo (min)	Carga (N)	Pressão aplicada (MPa)
0	0	0	0
0,63	0,5	3172,54	2,55
1,27	1	4758,81	6,06
1,9	1,5	7024,91	9,03
2,54	2	9517,62	12,67
3,81	2,5	12236,94	18,68
5,08	3	14503,04	24,87
7,62	3,5	16315,92	33,12
10,16	4	18582,02	37,64
12,7	4,5	20621,51	40,15

Figura 29 Gráfico da curva pressão/penetração



FONTE: Própria do Autor (2018)

Mediante a curva e cálculo, foi encontrado o valor de CBR = 24%. Tal valor se mostra incompetente para a utilização em camadas de base de pavimento, já que essa permite apenas um CBR maior que 60%. Porém, ainda é possível utilizá-lo em camadas de sub-base e reforço de subleito, pois essas são atendidas com CBR que seja acima de 20%.

Quadro 4 Especificações do CBR para camadas de pavimento

NBR15115 (ABNT, 2004)	Base	Sub - Base	Reforço de Subleito
ISC (%)	≥ 60	≥ 20	≥ 12

FONTE: ABNT (2014)

## 5. CONCLUSÃO

O estudo de novas técnicas na pavimentação é sempre bem vindo, e é importante que se insista em pesquisas para aprimorar o uso desses materiais, e de outros que possam agregar qualidade e durabilidade aos pavimentos brasileiros. É também bastante atrativa a ideia de utilizar recursos sustentáveis, que contribuam para a reutilização de resíduos e que diminua a exploração de nova matéria-prima. O trabalho teve por objetivo avaliar a utilização total de RCD como agregado e solo alternativo em camadas de pavimento. Apesar do grande numero de trabalho já realizados a respeito dos resíduos de construção como agregado alternativo, a maioria utilizava faixas de substituição parcial. Nesse, foi utilizado o material total, sem mistura com agregados naturais e solos.

Foram coletados 80 Kg de resíduo de característica mista, segregados os materiais que poderiam interferir diretamente na composição da amostra, como plásticos, metais e gesso, e britados. Todo o trabalho foi feito de forma manual, segundo norma, por falta de acesso a equipamentos automatizados que realizassem o serviço. O material coletado estava disposto em um aterro próximo à região do laboratório da Geocret, onde foram realizados a maioria dos ensaios de caracterização e o ensaio de CBR. Apesar da viabilidade da proximidade do local de obtenção de amostra, é ressaltado o problema que essa facilidade com que esses resíduos são encontrados descartados de forma indevida.

No laboratório, a amostra foi previamente quarteada, umedecida e seca ao sol, como previstos em norma, a fim de realizar os ensaios de caracterização e CBR. Foram realizados os ensaios de granulometria, a fim de determinar a graduação dos agregados, calculada os fatores de densidade efetiva e absorção do agregado, para prever seu comportamento junto ao ligante e outros fluidos, ensaios de perda por abrasão e equivalente de areia e, finalmente, a compactação dos corpos de prova, objetivando obter os valores de umidade ótima e peso seco aparente máximo, realizando assim o ensaio de CBR e verificando a disponibilidade do agregado de RCD para uso em camadas de pavimento. O ensaio de perda por abrasão teve de ser realizado no laboratório da UEMA pela falta do aparelho de Los Angeles no laboratório da Geocret.

O ensaio de granulometria dos agregados apresentou índices não muito bons de coeficientes de uniformidade e curvatura, sendo seu  $CU = 8,13$  classificado com medianamente uniforme e seu  $CC$  fora do intervalo estabelecido para uma composição

bem graduada, contudo a amostra não apresentou agregados graúdos acima do estabelecido e nem peso de finos demais. O processo de britagem manual pode ter interferido negativamente nessa composição, porém vale ressaltar que esta especificação foi estabelecida para agregados de brita tradicional, não sendo feitas ressalvas em norma sobre possíveis adaptações a agregados alternativos.

A perda por abrasão se mostrou consideravelmente alta em relação aos agregados usuais, o que é uma desvantagem visto que o desgaste do material em estradas seria diretamente maior, assim como os valores altos de absorção caracterizam um consumo de ligante asfáltico conseqüentemente maior, na perda do material aplicado por percolação. Entretanto ainda se adequou ao limite estabelecido por norma. Todavia, o ensaio de equivalência de areia por apresentar um resultado maior que o da brita tradicional, configurou relativa vantagem do RCD nesse aspecto.

Ao atingir os valores ótimos através do ensaio de compactação e umidade, foi possível moldar os corpos de prova para o ensaio de Índice de Suporte Califórnia, onde foi obtido o valor do CBR = 24 % da camada simulada de pavimento nos cilindros. Esse valor não foi alto o suficiente para aplica-lo em camadas de base de pavimento, o que já era esperado visto que a variedade da mistura levou muitos pesquisadores a utilizar faixas diferentes de porcentagem de substituição de agregado alternativo alternadas com o uso do agregado pétreo tradicional. No entanto, este índice de CBR se mostrou suficiente para a utilização do resíduo de construção civil como um todo, desde os agregados graúdos até os finos, como camadas de sub-base e reforço de subleito, o que já é um avanço perante a grande quantidade de material necessário para composição dessas camadas.

Alguns ensaios não foram realizados pela falta de equipamento disponível, assim como a própria britagem e coleta do material não foi propensa a otimização dos resultados. Se espera que haja cada vez mais pesquisas e aplicação no que se diz respeito ao controle de variabilidade do RCD e melhoramento técnico, talvez utilizando estabilizantes ou aditivos. Esse é um tipo de resíduo que pode ter sua massa quase que 100% aproveitada e, frente a iminente escassez de matéria prima natural e ao avanço tecnológico nos processos de reciclagem, se torna extremamente inviável que estes materiais ainda ocupem grande áreas de solo como lixo urbano.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10004**: Resíduos sólidos – Classificação. 71p. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 3p. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR10007**: Amostragem de resíduos. 21p. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. 12p. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. 10p. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. 12p. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR5734**: Peneiras para ensaio – Especificação. 5p. Rio de Janeiro, 1980.
- \_\_\_\_\_. **NBR6457**: Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e caracterização Método de ensaio. 9p. Rio de Janeiro, 1986.
- \_\_\_\_\_. **NBR7181**: Solos – Análise granulométrica. 13p. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1984b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7207**: terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. **Mercado**. 2016. Página da Internet. Disponível em <<https://www.abrecon.org.br/wp-content/uploads/pavimentacao02.png>> Acesso em 21/06/2017.
- AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION - ACPA – Recycling concrete pavements. Skokie, USA. 2009. 84p. Disponível em:< <http://www.acpa.org/>>. Acessado em: 8 abr.2017.
- ANGULO, S. C., et al. **Análise comparativa da tecnologia de processamento na reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição**. In XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa,

- Natal, 2005. XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. : CEFET RN, 2005.
- ARAÚJO JR., E. d., Gusmão, A. D., & Sukar, S. F. (2010). Uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Estacas de Compactação para Melhoramento de Solos. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Gramado/RS ,pp. 805-811
- ASTM - American Society for Testing and Materials, 2001, C 127, “**Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate**”. USA.
- BALAGUER, Marcos. **Avaliação estrutural de um pavimento flexível executado em Asfalto- Borracha, elaborado pelo Processo de Produção Contínua em Usina**. 2012. 193f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos. São Paulo. [s.n.]. 2007.
- BALTAZAR, R. P. **Caracterização do Fator de Expansão de Uma Escória de Aciaria em Diferentes Processos de Cura para Uso em Pavimentação**. Dissertação de M.Sc., UFV, Viçosa, MG, Brasil. 2001.
- BARBOSA, M. C., Affonso, F. J., & Barros, M. C. (2008). Caracterização de Agregados Reciclados de RCDs para Uso em Coberturas e Sistemas de Drenagem de Aterros de Resíduos. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Búzios/RJ , pp. 1111-1117.
- BENNERT, T.; PAPP JR., W. J.; MAHER, A.; GUCUNSKI, N. **Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications**. Transportation Research Record, Washington, n.1714, p.33-39, 2000.
- BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**. Rio de Janeiro, 2008.
- BLANKENAGEL, B. J.; GUTHRIE, W. S. **Laboratory characterization of recycled concrete for use as pavement base material**. Transportation Research Record, Washington, n.1952, p.21-27, 2006.
- BLUMENSCHNEIN, R. N. A sustentabilidade na cadeia produtiva da indústria da construção. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2004.

- BODI, Janos; Brito Filho, J.A.; Almeida, S. **.Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana..** In: anais da 29ª Reunião Anual de Pavimentação, v. 3, pp 408-436, Cuiabá, out.1995.
- BOLDRIN, A. J., Machado, R. L., Campos, M. A., Lintz, R. C. C. **Estudo das Propriedades Mecânicas do Concreto com Resíduos de Construção e Demolição Empregados na Produção de Blocos de Concreto.** In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 48º, Rio de Janeiro, Anais, 48CBC0237. 2006.
- BRANCO, F., Pereira, P. e Picado-Santos, L. (2006). Pavimentos Rodoviários. 2ª Reimpressão, Edições Almedina (ISBN 972-40-2648-5), Coimbra.
- BRASILEIRO, L. L. **Análise das Propriedades do Concreto Asfáltico Utilizando Agregados Reciclados Provenientes de Resíduos da Construção Civil.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais da Universidade Federal do Piauí. 2013.
- BRINA. Estradas de Ferro- Volume 1, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro. 1979
- BROWN, S.F., SELIG, E.T. **Chapter 6, The Design of Pavement and Rail Track Foudations.** Cyclic Loading of Soils: From Theory to Design, O'Reilly e Brown Editores, Blackie, London. 1991
- Cabral, G. L. L. **Utilização do Agregado Artificial de Argila Calcinada em Obras de Pavimentação e Aperfeiçoamento da Tecnologia.** UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2011.
- CABRAL, G.L.L. **Metodologia de Produção e Emprego de Agregados de Argila Calcinada para Pavimentação,** Tese de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ. 2005.
- CARNEIRO, A. P; BURGOS, P. C; ALBERTE, E. P. V. **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos.** Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA/ Caixa Econômica Federal, 2001.
- CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado.** Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- CAVALCANTI, L. S. **Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas.** Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 177 p., 2010.

- CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. **O sucateiro e a coleta seletiva**. Reciclagem & Negócios – Mercado de Sucatas, CEMPRE, São Paulo, 2005.
- CHINI, A. R.; KUO, S.; ARMAGHANI, J. M.; DUXBURY, J. P. **Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track**. Journal of Transportation Engineering. Reston, Virginia, v.127, n.6, p.486-492, 2001.
- CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Anuário CNT dos Transportes Estatísticas Consolidadas 2017**. Disponível em: < <https://goo.gl/G8fwXK> >; <<https://goo.gl/7FW6oJ>>; <<https://goo.gl/zVFmN8>>; <<https://goo.gl/4kSshD>>. Acesso em 03 de abril de 2017.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002). **Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação**. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.
- CORDEIRO, J. F. S. **Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, como solo para uso em camadas de base e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários**. Dissertação de mestrado. PPGECA/UFCG. 2007.
- DELGADO, B.S. “**Análise da deformabilidade de um solo tropical do oeste do Maranhão como material de sublastro na Estrada de Ferro Carajás**”. Dissertação de mestrado. UFOP, Ouro Preto, 2012.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 049/94: Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. **DNER - ME 054 – 1997: Equivalente de areia – Rio de Janeiro - 1997**
- \_\_\_\_\_. **DNER-ME 081/94: Agregado graúdo – determinação da densidade**. Rio de Janeiro, 1994. 04p.
- \_\_\_\_\_. **DNER-ME 082/94: Solos – determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. **DNER-ME 083/98: Análise granulométrica da fração granular**. Rio de Janeiro, 1998.
- \_\_\_\_\_. **DNER-ME 129/94: Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. **DNER-PRO 120/97: Coleta de amostras de agregados**. Rio de Janeiro, 1997.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES  
(2006). **Manual de Pavimentação** - Versão Preliminar DNIT. 3ª Edição. 274p.  
(IPR. Publ., 719). Rio de Janeiro/RJ.
- DIAS, João Fernando. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- EMCONBRAS - Empresa de Conservação Brasileira LTDA. 2014. **Pavimentação e Terraplenagem**. *Página da Internet*. Disponível em <http://www.emconbras.com.br/areas-atuacao#pavimentacao> Acesso em 21/06/2017.
- EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – MUNICIPAL AND INDUSTRIAL SOLID WASTE DIVISION – OFFICE OF SOLID WASTE. United States. 1998. Report nº EPA530-R-98-010 – Characterization of building- related construction and demolition debris in the United States. Disponível em: <http://www.p2pays.org/ref/02/01095.pdf>. Acesso em: 04 de ago. 2008.
- EUROPEAN COMMISSION. 2000. Management of construction and demolition waste. Disponível em: [ec.europa.eu/enterprise/environment/index\\_home/waste\\_management/constr\\_dem\\_waste\\_000404.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/environment/index_home/waste_management/constr_dem_waste_000404.pdf) >. Acesso em: 04 de ago. 2008.
- FARIAS M. M. (2009). Materiais reciclados para utilização em pavimentação. FAPDF processo nº 2009/00111-1.
- FERREIRA, J. (2009). **Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não ligadas de Estradas de Baixo Tráfego**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.FONSECA, J. J. S. Metodologia da pesquisa científica. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.
- FERROVIA TEREZA CRISTINA. ROF: Regulamento Operacional Ferroviário. 2005.
- FROTA, C. A. da, Menta, C. de O., Nunes, R. F. G. **Utilização de entulho reciclado em misturas asfálticas para a região de Manaus – AM**. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12, Aracaju. Anais: CD-ROM. 2003.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

- GOVERNO Do Maranhão. **Obras Do Governo Beneficiam As Regiões Central E Leste Do Maranhão.** 2016. *Página da internet.* Disponível em <[HTTP://WWW.MA.GOV.BR/OBRAS-DO-GOVERNO-BENEFICIAM-AS-REGIOES-CENTRAL-E-LESTE-DO-MARANHAO/](http://www.ma.gov.br/OBRAS-DO-GOVERNO-BENEFICIAM-AS-REGIOES-CENTRAL-E-LESTE-DO-MARANHAO/)> Acesso em 21/06/2017.
- GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo Do Comportamento Mecânico De Um Agregado Reciclado De Concreto Para Utilização Na Construção Rodoviária.** 133 F. (Doutorado Em Engenharia Civil) – Departamento De Transportes, Escola De Engenharia De São Carlos, Universidade De São Paulo, São Carlos.2009.
- HUANG, H. Y. **Pavement Analysis and Design.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- IDEC – Instituto de Defesa do Consumidor. **Do lixo quase tudo se aproveita.** Revista do IDEC on line. Disponível em [www.idec.org.br](http://www.idec.org.br) [acesso em 26.05.06]
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for Policymakers. Fourth Assessment Report, Working Group III. Genebra, Suíça, 2007. Disponível em: <[http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/docs/FAR/Approved%20SPM%20WGIII\\_0705rev5.pdf](http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/docs/FAR/Approved%20SPM%20WGIII_0705rev5.pdf)>. Acesso em: 18 de mai. 2007
- JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil:** Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.
- KUO, S.; CHINI, A. R.; ARMAGHANI, J. M.; DUXBURY, J. P. **Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track.** Journal of Transportation Engineering. Reston, Virginia, v.127, n.6, p.486-492, 2001.
- LEITE, F. C.; BERNUCCI, Liedi Légi Bariani ; MOTTA, Rosângela dos Santos; MOURA, Edson de . **Influência da composição e da energia de compactação nas propriedades físicas e mecânicas de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil.** In: XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro. Panorama nacional da pesquisa em transportes. 2007.
- LEVY, S. M., Helene, P. R. L. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1997.

- LINTZ, R. C. C., Jacintho, A. E. P. G. A., Pimentel, L. L., Gachet-Barbosa, L. A. **Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos.** *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 5, 166-181. 2012
- MARQUES, G. L. O. **Procedimentos de Avaliação e caracterização de Agregados Minerais Usados na Pavimentação Asfáltica.** 1º Seminário de Qualificação ao Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 2001.
- MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Notas de Aula da Disciplina Pavimentação.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2006.
- MARTELL, D.W. Dimensionamento de Pavimento Aeroportuário: Análise Mecânica com o Software Alisé. 2009.
- MEDEIROS, J. M. Dimensionamento De Ferrovia – Estudo De Caso. Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no curso de Engenharia Civil da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC. 2010
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2ª Edição, 2005
- MOGHADDAM, T. B.; KARIM, M. R. **Properties of SMA Mixtures Containing Waste Polythylene Terephthalate.** World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 6, p. 612-622, 2012.
- MOLENAAR, A. A. A.; VAN NIEKERK, A. A. **Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials.** Transportation Research Record, Washington, n.1787, p.73-82, 2002.
- MOTTA, L.; Fernandes, C. Utilização de resíduo sólido da construção civil em pavimentação urbana. In: anais da 12ª Reunião Anual de Pavimentação. Aracaju, nov. 2003.
- MOTTA, L.M.G. **Considerações a respeito de pavimentos e tráfegos em vias urbanas.** In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 6ª. 1995, Santos. Anais.Santos, Associação Brasileira de Pavimentação, Santos. p 25-52. 1995.
- MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentos de baixo volume de tráfego.** 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.

- MUNIZ DA SILVA, L.F. **“Fundamentos para um Sistema de Gerência de Manutenção de Pavimentos Ferroviários Utilizando Critério de Deformação Resiliente”** Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- NATAATMADJA, Andreas. and Tan, Y.L. **Resilient response of recycled concrete road aggregates.** *Journal of Transportation Engineering* 127(5):pp. 450-453. 2001.
- NOGUEIRA, Cyro. **Noções de mecânica dos solos – Pavimentos flexíveis – Pavimentos rígidos** – Rio de Janeiro, 1961.
- O’MAHONY, M. M.; MILLIGAN, G. W. E. **Use of recycled materials in subbase layers.** *Transportation Research Record*, Washington, n.1310, p.73-80, 1991.
- PALMEIRA, E. M. (2010). Soluções de Baixo Custo Envolvendo Geossintéticos e Materiais Alternativos em Obras Geotécnicas e de Proteção Ambiental. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Gramado/RS , pp. 1-24.
- PESTANA, R. (2008). **Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados em Estradas de Baixo Tráfego.** Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do IST da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E.S. **Pavimentação rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** 2ª Edição, Editora Copiarte, Rio de Janeiro, 2002.
- PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. 189p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999
- POON, C. S. **Management of construction and demolition waste.** *Waste Management*, 27, 159-160. 2007.
- PREGO, A.S.S. **A memória da pavimentação no Brasil.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.
- QUIÑONES, F.S. (2014). Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-099/14, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.
- RAO, A.; JHA, K.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, no 50, p. 71–81, 2007.

- REHNI, Máquinas e Equipamentos. **CONJUNTO Q400**. 2010. Página da Internet. Disponível em <<http://www.rehni.com.br/>> Acesso em 21/06/2017.
- SAEED, A; HAMMONS, M. I.; REED, J. L. Comprehensive Evaluation, Design, and Construction Techniques for Airfield Recycled Concrete Aggregate as Unbound Base. In: Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Washington DC, United States, 2007. 16p.
- SANTOS, G. P. P. **Um Estudo Sobre A Utilização Da Escória De Ferroníquel Em Pavimento Rodoviário**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, 2013.
- SCHNEIDER D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Saúde Pública da USP. 2003.
- SELIG, E.T. e WATERS, J.M. **Track Geotechnology and Substructure Management**. Thomas Telford Services. London. 1994.
- SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo, Ed. PINI, 1997.
- SERRA, Gleyciane Almeida. Estudo das Características Mecânicas do Asfalto com Adição de Resíduos de Polietileno Tereftalato (PET). Monografia apresentado ao Curso de Engenharia Civil do IFMA. 2017
- SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO, SINDUSCON-SP. Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil: A experiência do SindusCon-SP/ Tarcísio de Paula Pinto. São Paulo: SINDUSCON-SP, 2005. 48 p.
- SILVA, C. A. R. da. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas**. Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto. 2009
- SILVA, H. (2005). Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique – Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da EE da Universidade do Minho, Minho.
- SILVA, J. A. A.; RODRIGUES, J. K. G.; LUCENA, L. C.; LUCENA, A. E.; PATRICIO, J. D. **Estudo da Utilização do Politereftalato de Etileno (PET) para Compôr As misturas Asfálticas dos Revestimentos Rodoviários**. 42<sup>a</sup>

- Reunião Anual de Pavimentação e 16º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Gramado, 2013.
- SOUSA, P. C.; VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B., **Abordagem Mecânica em Projetos de Superestruturas de Estradas de Rodagem**. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço Fortaleza/CE - BRASIL - out 2009.
- SOUZA, Maurício José de. **Patologia em Pavimentos Flexíveis**. 2004. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2004.
- SPADA, J.L.G. **Uma Abordagem de Mecânica dos Pavimentos Aplicada ao Entendimento do Mecanismo de Comportamento Tensão-Deformação da Via Férrea**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- SPECHT, L.P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (Tese de Doutorado)2004.
- STOPATTO, S. **Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações**. Ed. T.A. Queiroz: Ed. Universidade de São Paulo: CBTU: São Paulo, Brasil, 1987.
- SWANA – THE Solid Waste Association of North América. (1993). Construction waste & demolition debris recycling. Maryland: SWANA.
- TRICHES, G.; KRUCKYJ, P.R. . **Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana**. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental 4., São José dos Campos, São Paulo, 1999.
- TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.
- WILBURN, D. R; GOONAN T. G. U.S. Geological Survey Circular 1176 – Aggregates from Natural and Recycled Sources: Economic Assessments for Construction application/ Materials flow analysis. Disponível em: <<http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/circulars/c1176/c1176.html>>. Acesso em: 04 de ago. 2008.
- WOODS, K.B. **Highway engineering handbook**. New York: McGraw Hill, 1960
- ZORDAN Sérgio Edurado. ÂNGULO, Sérgio Cirelli JOHN, Vanderley Moacyr. **Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos Na Construção Civil**. 2003.