



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA**

**Sayonara Andrade de Medeiros**

**INCORPORAÇÃO DO LODO DE TANQUE SÉPTICO COMO  
MATÉRIA-PRIMA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA**

**Natal, RN 29 de Setembro de 2006**

Sayonara Andrade de Medeiros

**INCORPORAÇÃO DO LODO DE TANQUE SÉPTICO COMO  
MATÉRIA-PRIMA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Maria del Pilar Durante Ingunza  
Co-orientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Jr

Natal, RN 29 de Setembro de 2006

Divisão de Serviços Técnicos  
Catalogação da Publicação na Fonte / Biblioteca Central Zila Mamede

Medeiros, Sayonara Andrade de.

Incorporação do lodo de tanque séptico como matéria-prima de uma mistura asfáltica /  
Sayonara Andrade de Medeiros. – Natal, 2006.

105 p. : il.

Orientador: Maria Del Pilar Durante Ingunza.

Co-Orientador: Olavo Francisco dos Santos Jr.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

1. Tanques sépticos – Dissertação. 2. Lodo (Engenharia sanitária) – Reaproveitamento  
– Dissertação. 3. Lodo *in natura* – Dissertação. 4. Lodo calcinado – Dissertação. 5. Mistura  
asfáltica – Dissertação. I. Durante Ingunza, Maria Del Pilar. II. Santos Júnior, Olavo Francisco  
dos. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM  
628.352

CDU

SAYONARA ANDRADE DE MEDEIROS

**INCORPORAÇÃO DO LODO DE TANQUE SÉPTICO COMO  
MATÉRIA-PRIMA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria del Pilar Durante Ingunza – Orientadora

---

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior – Co-orientador

---

Prof. Ph. D. André Luis Calado Araújo – Examinador Interno (CEFET - RN)

---

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues – Examinador Externo (UFCG)

Natal, 29 de Setembro de 2006

# INCORPORAÇÃO DO LODO DE TANQUE SÉPTICO COMO MATÉRIA-PRIMA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA

**Sayonara Andrade de Medeiros**

Orientador: Prof. Dr. Maria del Pilar Durante Ingunza  
Co-orientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Jr

## RESUMO

Em Natal/RN, 68% da população adotam algum tipo de sistema individual para o tratamento dos seus esgotos domésticos, sendo que a mais empregada é a do tipo tanque séptico, seguido de sumidouro. Todo sistema de tratamento de esgotos, usualmente empregado, gera um subproduto denominado lodo. Esse resíduo apresenta alguns componentes, em sua constituição, indesejáveis sob o ponto de vista ambiental e sanitário. Sendo assim, para garantir que o sistema de tratamento tenha resultados satisfatórios, é necessário fazer a disposição final adequada do lodo de esgoto. Vários países vêm buscando alternativas técnicas para o aproveitamento e disposição de resíduos. Sob condições técnicas e ambientais adequadas, estes materiais podem ser empregados, diminuindo assim o consumo dos recursos naturais e a necessidade de tratamento, armazenamento ou eliminação dos rejeitos, tendo-se, como consequência, a redução dos riscos gerados. Algumas das alternativas de reciclagem do lodo de esgoto são: a aplicação do mesmo na agricultura, na produção de energia e como insumo na construção civil. Este trabalho avalia o comportamento de misturas asfálticas que substituem parcialmente os agregados convencionais por lodo de tanque séptico. O lodo de tanque séptico originou duas matérias-primas denominadas lodo *in natura* e lodo calcinado. O lodo *in natura* foi empregado como um agregado miúdo e o lodo calcinado como um *filler*. No primeiro experimento, fez-se a comparação entre a mistura que empregou somente agregados convencionais e as misturas que

substituíram a areia por lodo *in natura* nas proporções de 5% a 40%. No segundo experimento, fez-se a comparação entre as misturas com 1%, 2% e 3% de lodo calcinado e de cimento. As etapas desenvolvidas ao longo do estudo foram: caracterização física dos materiais convencionais; caracterização física, química, térmica, mineralógica e análise de risco ambiental do lodo *in natura*; caracterização física e análise de risco ambiental do lodo calcinado; análise do desempenho das misturas que incorporaram os resíduos, através de seu comportamento volumétrico e mecânico; previsão da susceptibilidade das misturas estudadas na presença de umidade. Para a composição granulométrica utilizada e com o teor de asfalto adotado, as misturas com até 7,5% de lodo *in natura* em sua composição atendem as especificações do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – DNIT. No entanto, de acordo com o ensaio de susceptibilidade à umidade, as misturas com adição de lodo *in natura* não apresentam desempenho satisfatório. Sendo assim, elas poderiam ser empregadas em regiões áridas e semi-áridas. A incorporação de lodo *in natura* aumenta o volume de vazios e a estabilidade das misturas. No entanto, prejudica a adesividade das mesmas na presença de água. As misturas com lodo calcinado apresentam comportamento semelhante às misturas com cimento. No entanto, apresentam melhor desempenho quanto à estabilidade e a relação de resistência à tração. A mistura com 1% de lodo calcinado é a que apresenta melhor desempenho, segundo os critérios estudados. Os resíduos estudados não representam risco ambiental, de acordo com a análise preliminar feita.

**Palavras-chave:** Tanque séptico; Lodo *in natura*; Lodo calcinado; Mistura Asfáltica.

# SEPTIC TANK SLUDGE APPLIED AS RAW MATERIAL OF ASPHALT MIXTURE

**Sayonara Andrade de Medeiros**

Adviser: Prof. Dr. Maria del Pilar Durante Ingunza

Co-adviser: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Jr

## ABSTRACT

In Natal/RN, 68% of the population uses some kind of individual system for their domestic sewers treatment, being that the most used it is septic tank, followed by *sumidouro*. Every treatment system of sewers, usually used, generates a by-product denominated sludge. That residue presents some components, in its constitution, undesirable under the environmental and sanitary point of view. In such case, to assure that the system treatment has satisfactory results, it is necessary to do the adjusted disposition of the sludge sewage. Several countries are looking for technical alternatives for the use and disposition of residues. Under technical and environmental conditions appropriate, these materials can be used, decreasing the consumption of the natural resources and the treatment need, storage or elimination of the wastes, what decrease the risks created. Some of the alternatives of recycling of the sludge sewage are: the application in the agriculture, in the production of energy and as raw material in the civil construction. This study evaluated asphalt mixtures behavior that partially substituted conventional aggregates by septic tank sludge. The septic tank sludge gave origin to two raw materials called raw sludge and sludge ash. The raw sludge was put as a small aggregate and the sludge ash as filler. In the first experiment it was made a comparison between the mixture with conventional aggregates and the mixtures that replaced sand by raw sludge in the proportions from 5% to 40%. In the second experiment, it was made comparison between mixtures with 1%, 2% and 3% of sludge ash and cement. The stages

developed along the study were: physical characterization of the conventional materials; physical, chemistry, thermal, mineralogical characterizations and analysis of environmental risk of the raw sludge; physical characterization and analysis of environmental risk of the sludge ash; analysis of the mixtures performance through its volumetric and mechanical characteristics; forecast of the mixtures susceptibility in the moisture presence. For the grain size composition used and with the percentage asphalt adopted, the mixtures with up to 7,5% of raw sludge in his composition attend to the National Department of Transports Infrastructure (DNIT) specifications. However, in agreement with the mixtures susceptibility in the moisture presence, the mixtures with addition of raw sludge don't present satisfactory acting. In such case, they could be used in arid and semi-arid areas. The raw sludge application in mixtures increased their voids volume and their stability. However, it damaged mixtures adhesiveness. Mixtures with sludge ash and with cement presented similar behavior. However, mixtures with sludge ash presented a better performance than mixtures with cement as for their stability and their tensile strength ratio. The mixture with 1% of sludge ash is better. The wastes studied don't represent environmental risk.

**Key-words:** Septic tank; Raw sludge; Sludge ash; Asphalt mixture.



Dedico este trabalho aos meus pais, Ernesto (*in memoriam*) e Dete, pelo exemplo de fé, luta, determinação e dedicação. Sou muito grata por todo apoio e incentivo nas horas difíceis, por todas as lições ensinadas e as repreensões que me mantiveram no caminho que segui e pelo amor incondicional que me dedicam.

Não deixe que a saudade sufoque, que a rotina acomode e que o medo impeça de tentar. Desconfie do destino e acredite em você. Gaste mais horas realizando que sonhando, fazendo que planejando, vivendo que esperando, porque, embora quem quase morra esteja vivo quem quase vive já morreu.

Luiz Fernando Veríssimo

## **AGRADECIMENTOS**

Diversas pessoas contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. No entanto, gostaria de particularizar alguns dos meus sinceros agradecimentos:

Inicialmente a Deus, por toda paz, fé, força e orientação que me concede em cada momento de minha vida.

A minha família que sempre confiou em mim mesmo quando eu não acreditava que conseguiria. Incentivou-me nos momentos que me senti frágil. Apoiou-me mesmo quando não me entendia. E me ergueu quando minhas forças faltaram.

Aos meus orientadores, pelo direcionamento, o apoio, a atenção, a compreensão, o incentivo e o tempo que me dedicaram.

A todos os meus amigos, por todos os momentos vividos e por toda a experiência que me proporcionaram adquirir. Em especial gostaria de agradecer a Cibele Costa por todo apoio e ajuda.

Aos professores e funcionários do PPgES pelo agradável convívio e pelo conhecimento e apoio transmitidos.

Ao pessoal de Campina Grande por toda ajuda, carinho e atenção dedicados.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

A Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior – ATECEL e toda a sua equipe pelo espaço, orientação e tempo que foram dedicados durante a realização deste trabalho.

Ao DNIT pelos dados e materiais fornecidos à pesquisa. Em especial, agradeço ao Eng. Berilo pela atenção destinada.

Aos funcionários do laboratório do DER/RN, pelo conhecimento transmitido.

Ao professor Rubens Nascimento e sua equipe pela ajuda.

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE SIGLA E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	4
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	5
2.2 PRINCIPAIS CONTAMINANTES DO LODO .....	7
2.2.1 Metais pesados.....	8
2.2.2 Microorganismos.....	8
2.2.2.1 Processo de higienização térmica do lodo.....	9
2.2.3 Poluentes orgânicos.....	9
2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS .....	10
2.4 DISPOSIÇÃO FINAL DOS LODOS DE ESGOTOS.....	12
2.5 PAVIMENTAÇÃO - ASPECTOS GERAIS .....	13
2.5.1 Revestimento asfáltico .....	15
2.6 CONCRETO ASFÁLTICO.....	16
2.6.1 Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP.....	16
2.6.2 Agregados.....	17
2.6.2.1 Influência dos agregados nas misturas asfálticas.....	18
2.7 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS: MÉTODO MARSHALL.....	20
2.7.1 Composição granulométrica .....	22
2.7.2 Características volumétricas .....	23
2.7.2.1 Volume de vazios (Vv) .....	25
2.7.2.2 Vazios do agregado mineral (VAM) .....	26
2.7.2.3 Relação betume vazios (RBV).....	27
2.7.3 Características mecânicas .....	27
2.7.3.1 Estabilidade .....	27
2.8 SUSCEPTIBILIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS À UMIDADE .....	28
2.9 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO INSUMO NA ENGENHARIA CIVIL .	31
2.9.1 Aplicações dadas ao lodo de esgoto.....	31
2.9.2 Reciclagem de outros resíduos em misturas asfálticas .....	34
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	36

3.1	COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE LODO.....	36
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO .....	39
3.2.1	Caracterização do lodo <i>in natura</i> .....	39
3.2.2	Caracterização do lodo calcinado .....	43
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS CONVENCIONAIS .....	43
3.3.1	Caracterização dos agregados graúdos .....	43
3.3.2	Caracterização dos agregados miúdos.....	44
3.3.3	Caracterização do <i>filler</i> .....	44
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO .....	44
3.5	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	45
3.5.1	Mistura Convencional.....	45
3.5.2	Experimento 01: Lodo <i>in natura</i> sendo aplicado como agregado miúdo .....	47
3.5.3	Experimento 02: Lodo calcinado sendo aplicado em substituição ao cimento.....	48
3.6	AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS À UMIDADE.....	49
3.7	AVALIAÇÃO DO RISCO AMBIENTAL.....	50
CAPÍTULO 4: APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES .....		51
4.1	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONVENCIONAIS.....	51
4.1.1	Agregados graúdos .....	51
4.1.2	Agregados miúdos .....	52
4.1.3	<i>Filler</i> .....	54
4.2	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO LODO <i>IN NATURA</i> .....	54
4.3	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO LODO CALCINADO.....	58
4.4	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO.....	59
4.5	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA CONVENCIONAL.....	60
4.6	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DO EXPERIMENTO 01 .....	61
4.6.1	Resultados da caracterização volumétrica.....	61

4.6.1.1 Massa específica aparente .....	61
4.6.1.2 Volume de vazios.....	62
4.6.1.3 Vazios do agregado mineral .....	63
4.6.1.4 Relação betume vazios.....	64
4.6.2 Resultados da caracterização mecânica.....	65
4.6.2.1 Estabilidade .....	65
4.6.3 Relação de resistência à tração (RRT).....	67
4.7 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DO EXPERIMENTO 02 .....	68
4.7.1 Resultados da caracterização volumétrica.....	68
4.7.1.1 Massa específica aparente .....	68
4.7.1.2 Volume de vazios.....	70
4.7.1.3 Vazios do agregado mineral .....	71
4.7.1.4 Relação betume vazios.....	72
4.7.2 Resultados da caracterização mecânica.....	73
4.7.2.1 Estabilidade .....	73
4.7.3 Relação de resistência à tração (RRT).....	75
4.8 AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO RISCO AMBIENTAL .....	77
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES .....	78
CAPÍTULO 6: RECOMENDAÇÕES .....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

#### CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Caracterização e classificação dos resíduos sólidos.....	11
Figura 2.2 Perfis de pavimentos: (a) Flexível (b) Rígido.....	14
Figura 2.3 Distribuição de tensões no pavimento.....	15
Figura 2.4 Vazios na mistura.....	24
Figura 2.5 Esquema de compressão Marshall – Estabilidade.....	28

#### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Secagem natural do resíduo: (a) Vista do leito de secagem (b) Amostra seca ao ar.....	37
Figura 3.2 Etapas desenvolvidas para preparar o lodo que foi aplicado na mistura asfáltica.....	37
Figura 3.3 Processo de desintegração mecânica do lodo: (a) Moinho de bolas (b) Carga do moinho.....	38
Figura 3.4 Amostra do material que passa na peneira N°. 200: (a) Antes da calcinação (b) Depois da calcinação (900°C por 3 horas).....	39
Figura 3.5 Etapas da mistura do agregado miúdo com o ligante para ensaio de adesividade: (a) Amostra de agregado (b) Amostra de agregado e ligante (c) Mistura final.....	40
Figura 3.6 Ensaio de adesividade: (a) Preparação da amostra (b) Fervura da amostra.....	41
Figura 3.7 Ensaios de caracterização das misturas do Experimento 01.....	47
Figura 3.8 Ensaios de caracterização das misturas do Experimento 02.....	48

#### CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Amostras de agregado graúdo após ensaio de adesividade: (a) Brita ½” (b) Brita 5/8”.....	52
---	----

### LISTA DE GRÁFICOS

#### CAPÍTULO 4

Gráfico 4.1 Análise granulométrica dos agregados graúdos que foram aplicados na mistura.....	52
--	----

Gráfico 4.2 Análise granulométrica dos agregados miúdos que foram aplicados na mistura.....	53
Gráfico 4.3 Análise granulométrica do lodo <i>in natura</i> por peneiramento.....	54
Gráfico 4.4 Análise granulométrica do lodo <i>in natura</i> por difração a laser.....	55
Gráfico 4.5 Difração de raios-X do lodo <i>in natura</i> .....	56
Gráfico 4.6 Análise térmica diferencial (DTA) do lodo <i>in natura</i> .....	57
Gráfico 4.7 Análise termogravimétrica (TGA) e termogravimétrica derivada (DrTGA) do lodo <i>in natura</i> .....	57
Gráfico 4.8 Análise granulométrica do lodo calcinado por difração a laser.....	58
Gráfico 4.9 Curva granulométrica da mistura convencional.....	60
Gráfico 4.10 Variação da massa específica dos corpos de prova em função da percentagem de lodo <i>in natura</i> .....	61
Gráfico 4.11 Variação do volume de vazios das misturas em função da percentagem de lodo <i>in natura</i> adicionada.....	63
Gráfico 4.12 Variação dos vazios do agregado mineral nas misturas.....	64
Gráfico 4.13 Variação da relação betume vazios em função da percentagem de lodo <i>in natura</i> .....	65
Gráfico 4.14 Variação das estabilidades em função da percentagem de lodo <i>in natura</i> e do tipo de condicionamento dado .....	66
Gráfico 4.15 Variação da RRT em função da percentagem de lodo <i>in natura</i> .....	67
Gráfico 4.16 Variação da massa específica das misturas em função da percentagem de lodo calcinado e cimento.....	68
Gráfico 4.17 Variação do volume de vazios das misturas em função da percentagem de lodo calcinado e cimento.....	70
Gráfico 4.18 Variação dos vazios do agregado mineral nas misturas.....	71
Gráfico 4.19 Variação da relação betume vazios em função da percentagem de lodo calcinado e cimento.....	72
Gráfico 4.20 Variação da estabilidade em estufa nas misturas.....	74
Gráfico 4.21 Variação da estabilidade imersa nas misturas.....	74
Gráfico 4.22 Variação da RRT em função da percentagem de lodo calcinado e cimento.....	76

## **LISTA DE QUADROS**

### **CAPÍTULO 2**



Quadro 2.1 Composição química típica do lodo de esgoto.....	6
Quadro 2.2 Caracterização dos resíduos provenientes de tanques sépticos de Natal/RN.....	7
Quadro 2.3 Custos de algumas alternativas de disposição final de lodo de esgoto.....	12
Quadro 2.4 Principais meios de disposição dos lodos de esgoto.....	13
Quadro 2.5 Especificações para a composição granulométrica do concreto asfáltico.....	23

### **CAPÍTULO 3**

Quadro 3.1 Ensaio de caracterização do lodo como um material para uso em pavimentação.....	39
Quadro 3.2 Ensaio de caracterização dos agregados graúdos.....	43
Quadro 3.3 Ensaio de caracterização dos agregados miúdos.....	44
Quadro 3.4 Dosagem do concreto asfáltico convencional.....	46
Quadro 3.5 Especificações para um concreto asfáltico.....	46
Quadro 3.6 Especificações dos vazios do agregado mineral para um concreto asfáltico.....	46
Quadro 3.7 Proporções de lodo <i>in natura</i> nas misturas do Experimento 01.....	47
Quadro 3.8 Proporções de lodo calcinado e cimento nas misturas do Experimento 02.....	48

### **LISTA DE TABELAS**

#### **CAPÍTULO 4**

Tabela 4.1 Resultados dos ensaios realizados nos agregados graúdos.....	51
Tabela 4.2 Resultados dos ensaios em agregados miúdos.....	53
Tabela 4.3 Granulometria do cimento.....	54
Tabela 4.4 Resultados da fluorescência de raios-X do lodo <i>in natura</i> .....	56
Tabela 4.5 Análise química do lixiviado por espectrofotometria de absorção atômica.....	59
Tabela 4.6 Caracterização do CAP 50/70.....	59
Tabela 4.7 Características volumétricas e mecânicas da mistura convencional.....	60

Tabela 4.8 Variação média da massa específica aparente dos corpos de prova com o acréscimo de lodo <i>in natura</i> a mistura.....	61
Tabela 4.9 Variação média do volume de vazios dos corpos de prova com o acréscimo de lodo <i>in natura</i> a mistura.....	62
Tabela 4.10 Variação média dos vazios do agregado mineral nas misturas.....	63
Tabela 4.11 Variação média da relação betume vazios nas misturas.....	64
Tabela 4.12 Variação média das estabilidades nas misturas.....	66
Tabela 4.13 Variação do <i>filler</i> total da mistura, em função da porcentagem de lodo adicionada.....	67
Tabela 4.14 Variação da resistência à tração por compressão diametral e da relação de resistência a tração das misturas com lodo <i>in natura</i> .....	67
Tabela 4.15 Variação média da massa específica aparente com o acréscimo de lodo calcinado e cimento as misturas.....	69
Tabela 4.16 Variação média do volume de vazios das misturas com o acréscimo de lodo calcinado e cimento.....	70
Tabela 4.17 Variação média dos vazios do agregado mineral nas misturas.....	71
Tabela 4.18 Variação média da relação betume vazios nas misturas.....	72
Tabela 4.19 Variação média das estabilidades nas misturas.....	73
Tabela 4.20 Variação do <i>filler</i> nas misturas.....	75
Tabela 4.21 Variação da resistência a tração por compressão diametral e da relação de resistência a tração das misturas com lodo calcinado e cimento.....	75
Tabela 4.22 Análise química do lixiviado das misturas com lodo calcinado e cimento.....	77

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

### **CAPÍTULO 2**

Equação 2.1.....	18
Equação 2.2.....	25
Equação 2.3.....	25
Equação 2.4.....	26
Equação 2.5.....	26
Equação 2.6.....	27

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADP – Asfalto Diluído de Petróleo

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

CAERN – Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTGÁS – Centro de Tecnologias do Gás

Da – Densidade Aparente

$D_b$  – Densidade real da massa do asfalto

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DER – Departamento Estadual de Estradas

DMT – Densidade Máxima Teórica

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

DQO – Demanda Química de Oxigênio

DrTGA – Derivada da Análise Termogravimétrica

DRX – Difração de Raios-X

DTA – Análise Térmica Diferencial

EA – Equivalente de Areia

EMPARN – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte

EPA – Environmental Protection Agency

ES – Especificação de Serviço

ETE – Estação de Tratamento de Esgotos

FRX – Fluorescência de Raios-X

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICDD – Internacional Centre for Diffraction Data

LABEMAT – Laboratório de Ensaios de Materiais

LUBNOR – Unidade de Refino de Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste

ME – Método de Ensaio

NBR – Norma Brasileira

$P_b$  – Porcentagem de asfalto usado na mistura

RBV – Relação Betume Vazios

RN – Rio Grande do Norte

RRT – Relação de Resistência à Tração

SS – Sólidos Suspensos

ST – Sólidos Totais

TGA – Análise Termogravimétrica

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

VAM – Vazios do Agregado Mineral

VCB – Volume de vazios preenchidos com asfalto

$V_v$  – Volume de Vazios Total

## **CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento sustentável é definido como o crescimento tecnológico e social que garante a manutenção adequada das condições ambientais tanto no presente, quanto no futuro. Este conceito visa promover o equilíbrio entre a integridade dos sistemas naturais e o suprimento das necessidades humanas, permitindo a continuidade desta inter-relação.

O consumo indiscriminado dos recursos hídricos, aliado a disposição inadequada dos resíduos, vem provocando a deterioração dos ecossistemas aquáticos. Isto caracteriza a necessidade de minimizar os impactos negativos sobre o meio ambiente, que é feita através da gestão adequada do consumo e principalmente dos resíduos.

Os esgotos sanitários são fontes de poluição dos corpos de água que os recebem. Por isso, a disposição adequada dos esgotos é essencial à proteção da saúde pública e do meio ambiente. Entretanto, antes de se fazer sua disposição, é necessário que eles passem por um tratamento. Esta etapa é feita para compatibilizar o padrão de lançamento do efluente com a qualidade do corpo de água que irá recebê-lo.

O tratamento de esgotos pode ter caráter coletivo ou individual. Isto depende da existência ou não de uma rede coletora pública de esgotos que é responsável pelo encaminhamento dos afluentes para tratamento. O sistema de esgotamento sanitário público é o mais indicado.

Quase metade do Brasil não tem rede pública de coleta de esgoto. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE(2005), em 2002, 47,8% dos municípios não coletam nem tratam os esgotos. Entre os 52,2% dos municípios que têm o serviço de coleta, 20,2% coletam e tratam o esgoto coletado e 32% só coletam.

De acordo com a Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte – CAERN (2006), em Natal/RN, somente 32% da população é atendida por rede coletora de esgotos. Os 68% da população restante adota o sistema individual para o tratamento dos seus esgotos domésticos.

A solução individual mais empregada é a do tipo tanque séptico, seguido de sumidouro. Porém este tipo de tratamento não apresenta grande eficiência na correção das características indesejáveis dos esgotos, tais como a presença de

nutrientes e a remoção de organismos patogênicos. Os grandes inconvenientes operacionais dos sistemas individuais são o tratamento e disposição final dos resíduos gerados.

Em Natal, a coleta, transporte e destinação final destes resíduos são de responsabilidade das empresas imunizadoras locais. Com o decreto da Lei Municipal Nº. 4.867 de 27 de Agosto de 1997, as empresas imunizadoras são obrigadas a garantir tratamento complementar aos resíduos de tanques sépticos que elas coletam, antes de fazerem sua disposição final.

Todo sistema de tratamento de esgotos, usualmente empregado, gera um subproduto denominado lodo. Esse resíduo é formado por todos os sólidos que não foram aproveitados durante o processo de tratamento do efluente.

Para garantir que o sistema de tratamento tenha resultados satisfatórios, é necessário fazer a disposição final adequada do lodo de esgoto, pois o mesmo pode apresentar alguns componentes, em sua constituição, indesejáveis sob o ponto de vista ambiental e sanitário. Os principais contaminantes do lodo podem ser agrupados em metais pesados, microorganismos patogênicos e poluentes orgânicos.

Quando é feita a destinação adequada do lodo, a opção mais empregada é descartá-lo em aterros sanitários. Porém, quando ocorre grande produção de lodo, os custos com esse tipo de disposição são elevados. Do ponto de vista econômico, a geração desordenada e a destinação final dos resíduos sem critérios para proteger o meio ambiente podem ser identificados como fontes de desperdício de insumos e de matérias-primas.

A partir da conceituação de desenvolvimento sustentável, vários países vêm buscando alternativas técnicas para o aproveitamento e disposição de resíduos. Sob condições técnicas e ambientais adequadas, estes materiais podem ser empregados, diminuindo assim o consumo dos recursos naturais e a necessidade de tratamento, armazenamento ou eliminação dos rejeitos, tendo-se, como consequência, a redução dos riscos gerados.

Mundialmente há um estímulo às práticas de reciclagem do lodo como alternativa para sua destinação final. A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento / Rio 92 reconhece essa importância através da Agenda 21. O capítulo 21, cujo tema é Manejo Ambientalmente Saudável dos Resíduos Sólidos e Questões Relacionadas com Esgotos, define em um de seus

programas a maximização da reutilização e reciclagem dos resíduos sólidos municipais. Este capítulo esclarece que o lodo proveniente de instalações de tratamento de esgoto é considerado um resíduo sólido.

A reciclagem é o processo pelo qual o resíduo é transformado em matéria-prima. A confecção de materiais alternativos, tendo-se como constituintes diferentes resíduos, poderá promover o aparecimento de novas oportunidades de trabalho e renda, imprescindíveis ao processo de desenvolvimento. O aproveitamento de rejeitos deve ser encarado como atividade complementar, que poderá, inclusive, contribuir para a redução de custos finais, a partir da adição de algum valor ao resíduo.

Diversos produtos podem ser gerados pela utilização do lodo de esgoto como matéria-prima, dentre eles adubos orgânicos, óleos, combustível, etc. A aplicação de resíduos como insumo na construção civil é uma área que vem sendo pesquisada. Um dos fatores que torna essa área atrativa é o elevado volume de recursos naturais consumidos em suas atividades. Dentre as formas de reuso do lodo como insumo na construção civil destacam-se as seguintes alternativas: uso como matéria-prima na fabricação de agregados leves, de aglomerante, de cerâmica vermelha, em matrizes de concreto e argamassa e em misturas asfálticas.

Em 2001, aproximadamente 30% dos agregados empregados na construção civil eram destinados à pavimentação de ruas e construção de bases e sub-bases em rodovias. Devido a uma política governamental adotada ainda em meados do século passado, as rodovias constituem-se o principal meio de mobilidade no Brasil. Esta infra-estrutura é responsável pelo transporte de aproximadamente 62% das cargas e de 96% dos passageiros. A prática mais comum em todo o país é a utilização de misturas asfálticas densas e com graduação contínua como revestimentos. As rodovias e vias públicas do município de Natal, no Estado do Rio Grande do Norte, costumam ser pavimentadas com concreto asfáltico.

A aplicação de resíduos em pavimentação vem sendo pesquisada. Em misturas asfálticas pode-se citar o uso dos seguintes materiais não convencionais: o resíduo de areia de fundição, de escória de aciaria e de serragem de rochas graníticas, as cinzas de resíduos sólidos urbanos e de lodo de estação de tratamento de esgotos, dentre outros.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas, do tipo concreto asfáltico, utilizando o lodo de tanque séptico em substituição parcial do agregado miúdo e depois em substituição total do *filler*, empregados na mistura convencional. Esta avaliação foi feita com base em parâmetros técnicos e ambientais, através de ensaios laboratoriais. Os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Caracterizar os materiais convencionais que foram empregados na mistura asfáltica em estudo;
- Caracterizar o lodo que foi incorporado à mistura em substituição parcial do agregado miúdo e como *filler*;
- Determinar e avaliar as características volumétricas e mecânicas das misturas que incorporaram os resíduos, tomando como parâmetro balizador o comportamento obtido para a dosagem ideal da mistura convencional;
- Prever a susceptibilidade das misturas à umidade;
- Avaliar o risco ambiental da mistura não convencional que apresentou as melhores características.



## **CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS**

Esgoto é o nome dado à água depois de utilizada e eliminada. Sua origem pode ser doméstica, pluvial ou industrial.

Cada tipo de esgoto é constituído de diferentes substâncias, materiais e organismos. Se não receber tratamento adequado, o esgoto pode causar enormes prejuízos à saúde pública por meio de transmissão de doenças. Além disso, ele pode contaminar o solo, os recursos hídricos e a vida vegetal e animal. Para evitar esses problemas, é necessário o tratamento adequado do mesmo.

O planejamento de um sistema de esgoto tem dois objetivos fundamentais: a saúde pública e a preservação ambiental. Os sistemas de esgotamento sanitário são divididos em duas categorias: coletivos e individuais.

Os sistemas coletivos são os mais indicados, no entanto, é necessária a existência de uma rede coletora cujo objetivo é encaminhar as contribuições individuais (residências, indústrias, etc.) para a Estação de Tratamento de Esgotos – ETE. Ela reproduz, num menor espaço e tempo, a capacidade que os cursos de água têm naturalmente de decompor a matéria orgânica.

Como resultado do tratamento nas ETEs, qualquer que seja o processo empregado, tem-se no final as fases líquida e sólida. A fase líquida é a água com reduzidos teores de materiais poluentes. A fase sólida de um tratamento biológico, de forma geral, é composto por material gradeado, areia, espuma, lodo primário e secundário.

Destes, o principal em termos de volume e importância é o lodo. Este resíduo, na maior parte das etapas de seu manuseio, é constituído por mais de 95% de água. O lodo é denominado fase sólida, para distingui-lo do fluxo líquido que está sendo tratado.

Os lodos resultantes dos processos de tratamento de esgotos são constituídos basicamente de materiais orgânicos (sólidos voláteis), minerais (sólidos fixos) e água. Suas características, composição e propriedades podem variar bastante, dependendo, principalmente, da origem do esgoto e do processo de tratamento empregado.

Segundo Andreoli & Fernandes (1999), o lodo de esgoto normalmente apresenta em sua composição entre 40% e 80% de matéria orgânica. A sua disposição final é problemática e pode representar até 60% dos custos operacionais de uma unidade de tratamento.

De acordo com Ferreira *et al.* (1999), levantamentos feitos em vários países indicam que o volume de lodo produzido em uma estação de tratamento representa cerca de 1% a 2% do volume de esgoto tratado. A composição química do lodo de esgoto pode ser vista no Quadro 2.1.

**QUADRO 2.1** Composição química típica do lodo de esgoto

CARACTERÍSTICAS	LODO PRIMÁRIO CRU		LODO DIGERIDO	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média
<b>Sólidos totais – ST (%)</b>	2,0 – 8,0	5,0	6,0 – 12,0	10,0
<b>Sólidos voláteis (% ST)</b>	60 – 80	65	30 – 60	40
<b>Proteínas (% ST)</b>	20 – 30	25	15 – 20	18
<b>Nitrogênio (% ST)</b>	1,5 – 6,0	4,0	1,6 – 6,0	4,0
<b>Fósforo (%ST)</b>	0,8 – 3,0	2,0	1,5 – 4,0	2,5
<b>Potássio (%ST)</b>	0,0 – 1,0	0,4	0,0 – 3,0	1,0
<b>pH</b>	5,0 – 8,0	6,0	6,5 – 7,5	7,0
<b>Alcalinidade (mg CaCO<sub>3</sub>/l)</b>	500 – 1500	600	2500 - 3500	3000
<b>Ácidos orgânicos (mg/l)</b>	200 – 2000	500	100 – 600	200

Fonte: Ferreira *et al.* (1999)

Devido à presença de agentes tóxicos e patogênicos, o lodo pode trazer risco a saúde humana e animal, sendo assim, verifica-se que a má gestão deste resíduo e o destino final adotado podem comprometer os benefícios sanitários e ambientais esperados do sistema de tratamento de esgotos, invalidando assim o investimento.

Meneses (2001) caracterizou físico, química e biologicamente os resíduos do sistema tanque séptico – sumidouro da cidade de Natal/RN. As coletas foram realizadas com frequência quinzenal, totalizando 15 amostras analisadas. Os resultados da pesquisa encontram-se no Quadro 2.2.

**QUADRO 2.2** Caracterização dos resíduos provenientes de tanques sépticos de Natal/RN

<b>PARÂMETROS FÍSICOS</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>VALOR MÉDIO</b>
Temperatura	°C	29,88
pH		6,93
Cor	uH	4813,33
Turbidez	UT	7677,33
Condutividade	μS/cm	1550,00
<b>PARÂMETROS QUÍMICOS</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>VALOR MÉDIO</b>
Sólidos Totais	mg/l	12879,71
Sólidos Totais Fixos	mg/l	2823,64
Sólidos Totais Voláteis	mg/l	5436,18
Sólidos Suspensos	mg/l	7090,71
Sólidos Suspensos Fixos	mg/l	1574,91
Sólidos Suspensos Voláteis	mg/l	3470,55
Sólidos Dissolvidos	mg/l	5789,00
Sólidos Dissolvidos Fixos	mg/l	1248,73
Sólidos Dissolvidos Voláteis	mg/l	1965,64
Sólidos Sedimentáveis	ml/l	265,69
Cloreto	mg/l	254,00
Acidez	mg/l	205,33
Alcalinidade total	mg/l	498,40
Fósforo	mg P/l	18,05
Nitrogênio total	mg N/l	117,26
Nitrogênio orgânico	mg N/l	34,91
Nitrogênio amoniacal	mg N/l	80,27
Nitrito	mg N/l	0,00
Nitrato	mg N/l	1,87
Óleos e graxas	mg N/l	861,42
DBO	mg N/l	2434,00
DQO	mg N/l	6892,80
<b>PARÂMETROS BIOLÓGICOS</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>VALOR MÉDIO</b>
Coliformes Fecais	UFC/100ml	3,16. 10 <sup>7</sup>
Helmintos	Ovos/l	224,50

Fonte: Meneses (2001)

## 2.2 PRINCIPAIS CONTAMINANTES DO LODO

Alguns componentes do lodo podem ser indesejáveis do ponto de vista sanitário e ambiental.

### 2.2.1 Metais pesados

O metal pesado é aquele que oferece risco à saúde humana e ao ambiente, pois pode prejudicar a atividade dos organismos vivos, dependendo da concentração e do tempo de exposição a que os mesmos são submetidos.

Os elementos químicos que se enquadram nesse conceito são os que têm densidade maior que  $5\text{g/cm}^3$ . Os principais metais encontrados geralmente no lodo de esgoto são: Prata (Ag), Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Antimônio (Sb), Selênio (Se) e Zinco (Zn).

Segundo Werther & Ogada *apud* Santos (2003), eles são encontrados na matéria sólida do lodo sob a forma de hidróxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos. A única forma de reduzir sua presença é restringir as descargas nos sistemas de coleta. Em escala laboratorial consegue-se alguma redução com a adição de ácidos, no entanto é um processo muito caro.

### 2.2.2 Microorganismos

O lodo contém uma grande variedade de microorganismos. Os cinco grupos patogênicos que podem estar presentes no lodo são: helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias. Sua procedência pode ser humana ou animal.

O manuseio e o emprego de lodo de esgoto de origem doméstica, sem prévio tratamento de estabilização e higienização, pode possibilitar a infecção de homens e animais. A simples presença dos mesmos não garante a infecção, pois é necessária uma dose mínima.

Além do problema sanitário, a utilização de lodo de esgoto *in natura* em materiais de construção pode causar problemas de degradação microbiológica devido à presença de microorganismos.

A seguir apresentam-se alguns exemplos da ação de microorganismos sobre as infra-estruturas: degradação/deterioração de estradas e pistas de aterrissagem por bactérias consumidoras de hidrocarbonetos, biodeterioração dos concretos e biocorrosão de metais.

Pendrys (1989) cita que várias pesquisas comprovam a existência de grande grupo de bactérias e fungos que apresentam a habilidade de degradar hidrocarbonetos de petróleo.

Atlas (1981) diz que o asfalto é utilizado pelas bactérias como fonte de carbono e energia. A degradação microbiológica do petróleo depende da natureza do produto e da comunidade microbiológica e de uma variedade de fatores ambientais capazes de influenciar a atividade microbiana.

O processo de degradação microbiológica de hidrocarbonetos vem sendo aplicado em estudos sobre a biorremediação de ecossistemas contaminados por petróleo.

#### 2.2.2.1 Processo de higienização térmica do lodo

Os helmintos são os organismos que apresentam maior resistência de vida dentro do lodo de esgoto, principalmente seus ovos, que podem continuar viáveis por até sete anos.

O tratamento térmico do lodo é uma alternativa de higienização eficaz na remoção de helmintos, pois eles são resistentes à dessecação e a desinfecção química do lodo. Neste tipo de tratamento, é importante conhecer a relação entre o tempo e a temperatura a qual o lodo é exposto.

O estudo de Andreoli *et al.* (2000) obteve níveis aceitáveis de redução dos ovos de helmintos com exposição do lodo em estufa à 80°C por 5 minutos. Lima *et al.* (2005) chegou à conclusão de que após 10 minutos de exposição do lodo à 70°C, há total redução dos ovos de helmintos. Eles citam ainda que a *Environmental Protection Agency* – EPA apresenta uma lista com tempo e temperatura de desinfecção para alguns organismos presentes no lodo. O organismo mais resistente foi destruído com exposição em estufa por 30 minutos a uma temperatura de 70°C.

#### 2.2.3 Poluentes orgânicos

A preocupação com compostos orgânicos perigosos está associada ao potencial de carcinogenicidade, mutagenicidade, textatogenicidade e risco substancial à saúde humana.

A presença destes componentes é função da qualidade do esgoto bruto e do sistema de tratamento. A remoção dos mesmos requer métodos considerados economicamente inviáveis, sendo a melhor estratégia evitar tal contaminação nos esgotos brutos.

A maioria das estações de tratamento é concebida em termos de remoção da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos (SS) e organismos patogênicos.

Negligencia-se a remoção dos poluentes orgânicos perigosos e sua conseqüente problemática, visto que esses compostos são biodegradados muito lentamente, permanecendo no meio ambiente por um longo período de tempo. Devido a sua característica de bioacumulação eles representam um risco à saúde dos seres vivos.

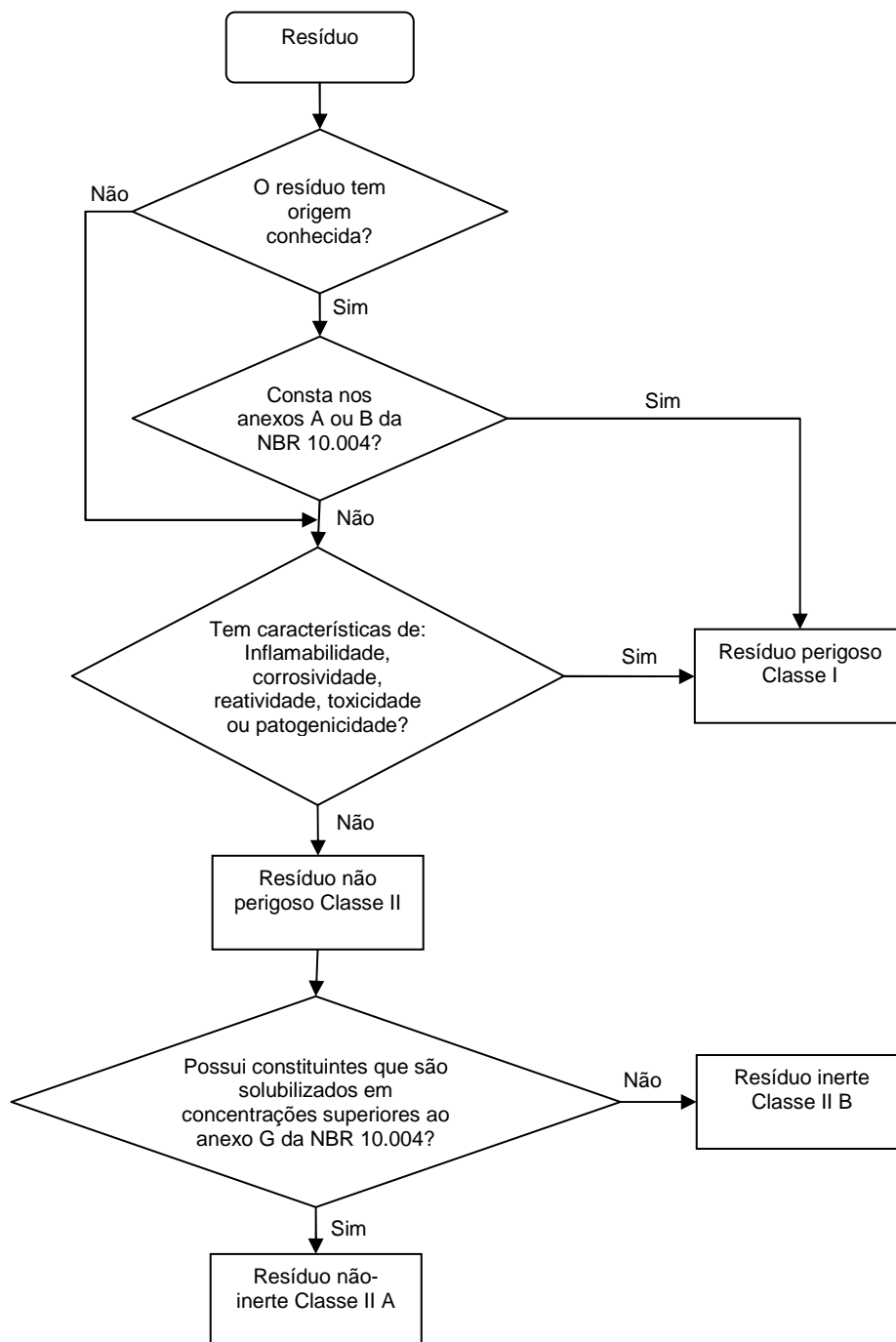
## **2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS**

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), são os resíduos sólidos e semi-sólidos resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água.

Os resíduos são classificados em função de seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, de forma que eles possam ter manuseio e destinos adequados. A periculosidade de um resíduo é função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas. A seguir apresenta-se sua classificação geral:

- Resíduos Classe I – Perigosos: São aqueles que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: Inflamabilidade, Corrosividade, Reatividade, Toxicidade e/ou Patogenicidade.
- Resíduos Classe II – Não Perigosos: Ele é subdividido nas seguintes categorias:
  - Resíduos Classe II A – Não Inertes: São aqueles que não se enquadram nas classificações de Resíduos Classe I - Perigosos ou de Resíduos Classe II B – Inertes. Os resíduos desta classe podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
  - Resíduos Classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos que quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004c), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A Figura 2.1 apresenta as etapas de classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente.



**FIGURA 2.1** Caracterização e classificação dos resíduos sólidos

Fonte: ABNT (2004a)

A reciclagem de resíduos está sujeita à legislação ambiental, na qual é imperativa a análise do impacto ambiental causado pela sua incorporação. Um

resíduo que é totalmente incorporado na forma de produto final a um volume inerte de material perde sua identidade como resíduo.

A análise da periculosidade ambiental causada pela utilização de um resíduo baseia-se nos riscos da utilização e descarte final do produto gerado. A grande preocupação está relacionada à possibilidade de lixiviação ou arraste, diluição ou dessorção em meio líquido de elementos poluentes tais como metais pesados ou substâncias tóxicas para o meio ambiente.

Segundo a NBR 10.005 (ABNT, 2004b), “lixiviação é a operação de separar certas substâncias contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação”. De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), um resíduo é caracterizado como tóxico se o extrato obtido de uma amostra representativa dele, segundo a NBR 10.005 contiver qualquer um dos contaminantes em concentrações superiores aos valores admissíveis (Anexo F da NBR 10.004). Neste caso, o resíduo deve ser caracterizado como tóxico com base no ensaio de lixiviação.

## 2.4 DISPOSIÇÃO FINAL DOS LODOS DE ESGOTOS

Existem várias práticas de destinação final que podem ser aplicadas ao lodo de esgoto. O Quadro 2.3 apresenta uma avaliação dos custos de diferentes alternativas de disposição.

**QUADRO 2.3** Custos de algumas alternativas de disposição final de lodo de esgoto

ALTERNATIVA DE DISPOSIÇÃO FINAL	CUSTO (US\$/T)
Aterros sanitários	20 a 60
Incineração	55 a 250
Reciclagem agrícola	20 a 125

Fonte: Andreoli & Pegorini (2000)

Santos (2003) expandiu a classificação das diferentes práticas de disposição do lodo de esgoto. Elas são agrupadas, genericamente, em duas categorias:

- Descarte: inclui todas as alternativas de disposição não produtivas;
- Uso benéfico: inclui todas as alternativas de disposição útil ao solo ou à indústria.

Geyer (2001) faz citações sobre o aproveitamento do lodo no Japão, EUA e Cingapura, em diferentes alternativas. Ele referencia a 11ª Conferência Americano-Japonesa sobre Tecnologia de Tratamento de Esgotos Sanitários como o evento



incentivador da consciência de que o caminho para a disposição final do lodo de esgoto é a reciclagem e a aplicação do mesmo como insumo na fabricação de algum produto. É referenciado ainda o *ACE Plan* Japonês que estabeleceu três áreas básicas de pesquisa para aplicação do lodo: agricultura (A), construção (C) e produção de energia (E). A aplicação do lodo na agricultura foi muito difundida. No entanto, devido à presença de contaminantes, pode haver contaminação do solo, da vegetação, do lençol freático e do homem.

O Quadro 2.4 mostra um comparativo dos principais meios de disposição adequada dos lodos em países desenvolvidos e no Brasil.

**QUADRO 2.4** Principais meios de disposição dos lodos de esgoto

	<b>ATERROS (%)</b>	<b>AGRICULTURA(%)</b>	<b>INCINERAÇÃO (%)</b>	<b>OUTROS (%)</b>
<b>Europa</b>	43	38	10	9
<b>Japão</b>	6	10	80	4
<b>EUA</b>	30	20	30	20
<b>Brasil</b>	80	5	-	15

Fonte: Geyer (2001)

Segundo Mata Alvarez *et al. apud* Carneiro (2005), em países desenvolvidos, como os da Comunidade Européia, existem recomendações para se diminuir o número de aterros sanitários, devido ao impacto ambiental que causam. A extinção de aterros já foi introduzida na Dinamarca, Alemanha, Holanda, Suécia e Suíça. Esse cenário tem motivado à busca por alternativas à incineração tradicional. Apesar da redução dos riscos de contaminação do solo e da água, a incineração gera preocupação com respeito à poluição atmosférica e a disposição final da cinza residual.

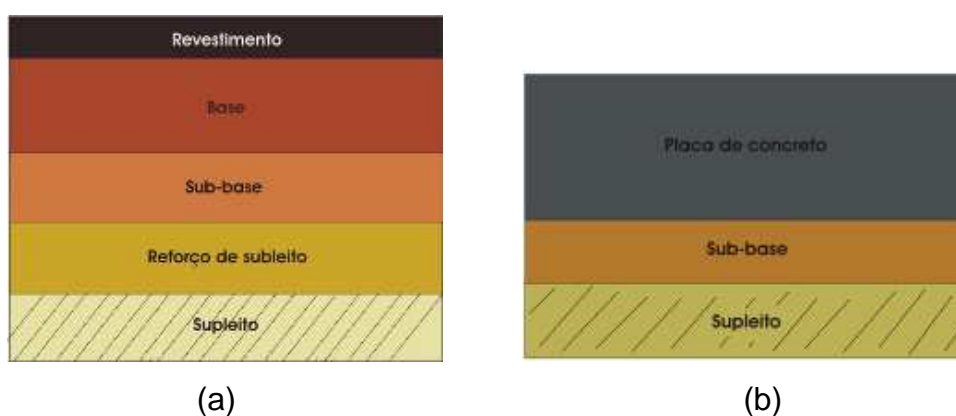
## **2.5 PAVIMENTAÇÃO - ASPECTOS GERAIS**

De acordo com Frankel (1980), entende-se por pavimento a superestrutura constituída por múltiplas camadas assentes sobre fundação apropriada. Essa estrutura deve ser econômica e tem que resistir à ação das solicitações do tráfego e do tempo (variação térmica e hidrométrica) em sua superfície.

Ele proporciona a distribuição dos esforços que atuam no revestimento para as camadas inferiores, que tem que ser capazes de resisti-los. Sua finalidade é proporcionar uma superfície de rolamento que permita tráfego seguro e confortável dos veículos, como estabelecido em projeto.

Cada camada que compõe o pavimento tem uma finalidade específica. As principais camadas que constituem o pavimento são: sub-base, base e revestimento. Podem conter outras camadas adicionais, conforme a necessidade. Admite-se que as camadas vão ficando tecnicamente e economicamente mais nobres a partir do subleito, à medida que elas se aproximam do revestimento.

Os pavimentos normalmente são classificados como pavimentos flexíveis e rígidos, como ilustrado na Figura 2.2. Esta classificação está relacionada ao comportamento da estrutura como um todo, especialmente no que se refere à transmissão de tensões para o subleito.

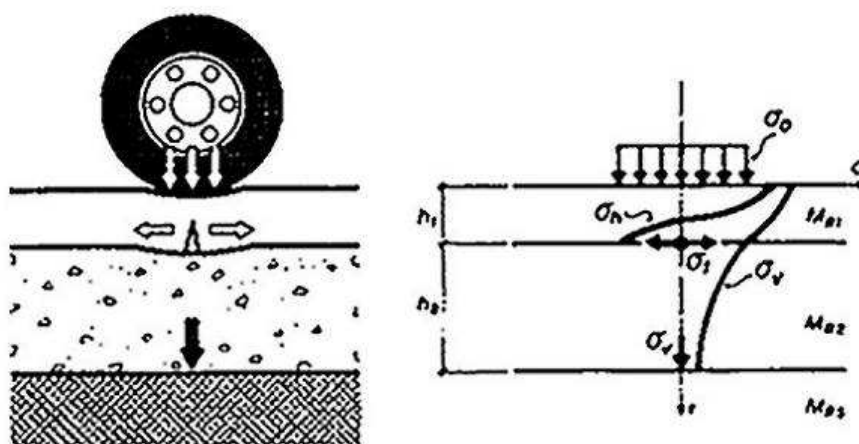


**FIGURA 2.2** Perfis de pavimentos: (a) Flexível (b) Rígido

Tradicionalmente, os pavimentos rodoviários nacionais são flexíveis. Os pavimentos flexíveis são aqueles constituídos por uma camada de revestimento asfáltico sobre camadas granulares que podem ou não ser estabilizadas granulometricamente.

Entende-se como revestimento a camada que tem por finalidade: impermeabilizar o pavimento, aumentar a resistência à derrapagem, melhorar o conforto ao rolamento e resistir aos esforços causados pelo tráfego e pelo intemperismo.

Nos pavimentos flexíveis, a absorção dos esforços oriundos do tráfego se dá de forma dividida entre várias camadas. No entanto, as pressões verticais tendem a se concentrar nas proximidades da região próxima da área de aplicação da carga, como mostra a Figura 2.3. Sendo assim, o subleito sofre maior influência da distribuição de pressões, se comparado aos pavimentos rígidos, para uma mesma carga aplicada.



**FIGURA 2.3** Distribuição de tensões no pavimento

### 2.5.1 Revestimento asfáltico

A escolha do tipo de revestimento a ser empregado é baseada em alguns critérios, tais como: solicitação de cargas a que ele estará submetido devido à ação do tráfego, textura da superfície de rolamento e custo.

De acordo com informações do Departamento Estadual de Estradas do Rio Grande do Norte – DER/RN, os revestimentos aplicados na região são os tratamentos superficiais e os pré-misturados. Os principais são: o tratamento superficial duplo e o concreto asfáltico.

Os tratamentos superficiais constituem um revestimento de ligante asfáltico e agregado mineral. Este pode ser por penetração direta ou invertida. Quanto ao número de camadas, os tratamentos superficiais variam em função da destinação da capa de rolamento. No caso de acostamento, pode-se usar o tratamento superficial simples, enquanto os tratamentos superficiais duplo e triplo são empregados para tráfego médio ou leve.

Nos revestimentos asfálticos por mistura, o agregado é pré-envolvido com o ligante asfáltico, antes da compressão. Dá-se o nome de pré-misturado à mistura de agregado graúdo, agregado miúdo e ligante asfáltico. Quando o tipo de agregado e de ligante utilizado permite que o espalhamento da mistura seja feito à temperatura ambiente, tem-se o pré-misturado a frio. Caso contrário, se o espalhamento for feito ainda quente, tem-se o pré-misturado a quente. Nas misturas a frio os ligantes asfálticos que podem ser empregados são os emulsões asfálticas ou os asfaltos

diluídos de petróleo (ADP). Já nas misturas a quente, aplica-se o cimento asfáltico de petróleo (CAP).

De acordo com o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – DNIT (2006b), denomina-se concreto asfáltico os pré-misturados a quente de graduação densa, em que são feitas rigorosas exigências no qual diz respeito a equipamentos de construção e índices tecnológicos – granulometria, teor de betume, estabilidade, volume de vazios, etc.

Nesta pesquisa optou-se pelo emprego do concreto asfáltico, pois seu controle tecnológico é mais rigoroso e pôde-se avaliar o comportamento da mistura antes e após a incorporação do resíduo.

## **2.6 CONCRETO ASFÁLTICO**

De acordo com o DNIT (2006a), concreto asfáltico é um revestimento flexível de alta qualidade, que consiste na mistura a quente, em usina apropriada, de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento e cimento asfáltico de petróleo (CAP), de acordo com proporções definidas previamente em laboratório, de forma a atender os requisitos granulométricos, de densidade, de vazios e de resistência, compatíveis com padrões preestabelecidos.

### **2.6.1 Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP**

É um material termoplástico, reológico e tixotrópico, ideal para aplicação em trabalhos de pavimentação. Sua principal função é promover a união entre as partículas de agregado miúdo e graúdo (esqueleto mineral), proporcionando com isso uma distribuição dos esforços produzidos na superfície do revestimento para as camadas subjacentes. Outra importante característica do CAP é a alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis. Ele garante flexibilidade e durabilidade ao revestimento.

Souza Neto *et al.* (2004) citam que sua natureza viscoelástica é muito influenciada pela temperatura e pelo tempo de aplicação da carga. O seu comportamento a altas temperaturas em curto período de aplicação é equivalente ao comportamento do mesmo em baixas temperaturas e cargas aplicadas durante um maior período de tempo.

O concreto asfáltico tem características viscoelásticas semelhante às do cimento asfáltico. Sendo assim, seu comportamento é fortemente influenciado por parâmetros de misturas como a porcentagem de vazios (compacidade), frequência de aplicação da carga e a temperatura. Quanto maior a temperatura, menor a consistência do ligante, o que torna a mistura mais dúctil. À medida que a temperatura diminui, o ligante torna-se mais consistente e a mistura mais frágil.

Segundo o *Road Research Laboratory apud Coelho (1992)*, o bom desempenho mecânico e a durabilidade de uma mistura asfáltica depende da dosagem certa da quantidade de ligante. O excesso de ligante pode produzir misturas com tendência à instabilidade e baixa resistência à deformação, pois o atrito interno das partículas granulares é reduzido devido à superlubrificação das mesmas. Por outro lado, as misturas com ligante insuficiente, podem diminuir a estabilidade, durabilidade e flexibilidade por causa da desagregação granular.

### **2.6.2 Agregados**

De acordo com DNIT (2006a), os agregados que compõem o concreto asfáltico são constituídos por uma mistura de agregado graúdo, agregado miúdo e *filler*, quando necessário. As propriedades físicas dos agregados podem ser exploradas por meio de diversos ensaios, como por exemplo: resistência à abrasão, durabilidade, forma e textura da partícula, material danosos, tamanho e graduação, densidade, entre outros.

O agregado graúdo pode ser pedra britada, escória, seixo rolado preferencialmente britado ou outro material indicado nas especificações complementares.

O agregado miúdo pode ser areia, pó de pedra ou mistura de ambos ou outro material indicado nas especificações complementares.

O material de enchimento (*filler*) deve estar seco e isento de grumos, e deve ser constituído por materiais minerais finamente divididos, tais como cimento Portland, cal extinta, pós calcários, cinza volante, etc. No mínimo 65% de suas partículas devem ter diâmetro inferior a 75µm. Segundo Santana *apud Souza Neto et al. (2004)*, pode-se definir *filler* como um material finamente dividido, formado por partículas minerais, que se incorpora a mistura para melhorar seu desempenho reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água. Sua origem pode ser

natural, quando procede dos agregados empregados na mistura, ou artificial, quando provier de outras fontes.

#### 2.6.2.1 Influência dos agregados nas misturas asfálticas

Felippe & Castro *apud* Bonet (2002) comentam a importância dos agregados em uma mistura asfáltica, pois os mesmos representam aproximadamente 90% a 95%, em peso, dos seus materiais constituintes. Além disso, suas características influenciam diretamente as propriedades volumétricas e conseqüentemente as propriedades de rigidez e resistência ao cisalhamento. Devido a isso, devem ser escolhidos materiais capazes de suportar as pressões aplicadas pelo tráfego sem se fraturarem. Eles também devem ser resistentes às ações do intemperismo.

O *Road Research Laboratory apud* Coelho (1992) expõe que, quando a relação entre a porcentagem de agregado graúdo e a porcentagem total de material granular da mistura se encontra entre 40% e 50%, forma-se uma estrutura mecânica que oferece resistência às deformações permanentes devido ao contato entre as partículas de agregado graúdo. Essa resistência pode crescer acentuadamente, atingindo um máximo quando a relação é da ordem de 65%.

De acordo com Pinheiro (2004), a resistência à tração e à deformação permanente de qualquer mistura é derivada do intertravamento do esqueleto mineral. Usando a teoria de Morh-Coulomb para representar o comportamento dos agregados granulares na mistura, verifica-se através da Equação 2.1, que a resistência ao cisalhamento da mistura ( $\tau$ ) é função da coesão ( $c$ ), da tensão normal aplicada sobre o agregado ( $\sigma$ ) e do ângulo de atrito interno dos agregados ( $\phi$ ).

$$\tau = c + \sigma.tg\phi \quad (\text{Equação 2.1})$$

Percebe-se a influência da granulometria e da textura das partículas dos agregados, representada pelo ângulo de atrito interno. Como materiais granulares praticamente não possuem coesão, a resistência ao cisalhamento imposta a uma granulometria se deve principalmente ao atrito interno, daí a necessidade da forma cúbica dos agregados. A coesão de uma mistura asfáltica é conferida pelo ligante asfáltico, pois este mantém os agregados unidos, aumentando assim a resistência da mesma ao cisalhamento.

A porcentagem de material que tem diâmetro inferior a  $75\mu\text{m}$ , tem vários efeitos na densificação de uma mistura. Isto vai depender da granulometria apresentada pelas partículas, da forma e da natureza das mesmas.

Segundo Cavalcante & Soares (2001), o *filler* agregado é aquele formado pelas partículas de diâmetro maior que  $40\mu\text{m}$ , preenchem os vazios do esqueleto estrutural que é formado pelos agregados graúdos e miúdos. Isto promove o contato pontual entre as partículas maiores, o que garante maior equilíbrio à estrutura. Conseqüentemente, ocorre o aumento da estabilidade e da densidade da mistura quando compactada, sem que haja a necessidade de aumentar o teor de betume. O *filler* aditivo é o formado pelas partículas com diâmetro inferior a  $20\mu\text{m}$ . Ele se mistura com o ligante asfáltico, formando o que alguns autores chamam de mastique, aumentando a sua viscosidade e o ponto de amolecimento e diminuindo a susceptibilidade térmica do mesmo.

Quanto maior for à concentração volumétrica do sistema *filler*-betume, mais próximas estarão às partículas dos agregados na mistura, menor será o volume de vazios e, conseqüentemente, mais rígida a mesma ficará. Quando a concentração atinge uma concentração crítica, a rigidez da mistura começa a comprometer a vida de fadiga da mesma.

Lima (2003) diz que o aumento da consistência do mastique contribui para a cimentação das partículas maiores ao meio. Ou seja, ao incorporar-se o *filler* ao betume, aumenta-se a coesão do meio, pois o ligante torna-se mais consistente. Este fato aumenta a resistência à deformação do meio coesivo formado nas misturas betuminosas. Isto é de particular importância quando as misturas têm escassa estabilidade por apresentarem resistência friccional deficiente, como ocorre quando se empregam agregados naturais de grãos arredondados. Mas o uso excessivo de *filler* pode tornar o asfalto muito duro levando-o a misturas rígidas, frágeis e quebradiças.

Além disso, o aumento da viscosidade do mastique provoca também um aumento da resistência aos esforços de cisalhamento (estabilidade), no módulo de rigidez e da resistência à tração da mistura asfáltica.

O incremento de *filler* além de diminuir os vazios da mistura, também é importante para a melhoria da adesividade entre o ligante asfáltico e os agregadas graúdo e miúdo. Observa-se ainda uma redução na absorção da água, nas perdas de resistências após o período de imersão prolongado e também na redução do

envelhecimento das misturas asfálticas, o que proporciona aumento da durabilidade. A utilização de *filleres* nas misturas asfálticas é importante, pois tendem a diminuir a desuniformidade na consistência e na susceptibilidade térmica que possam existir nas misturas asfálticas.

Mourão (2003) relata em seu trabalho que o uso da cal hidratada como *filler* tem um efeito mais significativo, em comparação com o cimento e o pó de pedra, pois ela apresenta, em geral, 80% de suas partículas com diâmetro menor ou igual a 20 $\mu$ m. Por outro lado, o cimento tem uma distribuição muito mais contínua, com diâmetro médio de aproximadamente 60 $\mu$ m e o pó de pedra possui graduação mais grossa com grande proporção de partículas maiores que 40 $\mu$ m.

Segundo o *Highway Research Board apud Coelho* (1992) o uso criterioso do *filler* mineral é uma das maneiras mais eficiente de melhorar a qualidade de uma mistura betuminosa do tipo densa. Se o *filler* mineral for do tipo bem-graduado ele contribui para o aumento a estabilidade da mistura. Além disso, ele influencia significativamente a redução do volume de vazios dos agregados minerais o que reflete na redução da quantidade de vazios da mistura final.

## **2.7 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS: MÉTODO MARSHALL**

O projeto de um pavimento é o processo de determinação da combinação mais econômica da espessura da camada com o tipo de material a ser empregado, com o intuito de tornar viável a sua construção, garantindo que o pavimento seja capaz de suportar os carregamentos do tráfego e as condições climáticas.

A dosagem de uma mistura asfáltica deve ser feita nas proporções que garantem trabalhabilidade suficiente sem segregação, com o objetivo de garantir durabilidade e estabilidade aos pavimentos. Para isto é necessário limitar o teor de vazios na mistura, tendo sempre em vista que podem ocorrer fenômenos como pós-compactação do asfalto pelo tráfego e expansão térmica do mesmo. O volume máximo de vazios deve limitar a permeabilidade de ar e umidade na mistura. Teores de vazios muito baixos levam à mistura a perder estabilidade. Já altos teores de vazios prejudicam a durabilidade.

O objetivo final do projeto de misturas asfálticas é determinar o teor de asfalto que resulte num balanço equilibrado de todas as propriedades desejadas. O comportamento do pavimento se relaciona com as seguintes características do



mesmo: textura, durabilidade, impermeabilidade, resistência, estabilidade, rigidez, flexibilidade, resistência à fadiga e trabalhabilidade.

No Brasil, o método Marshall é o mais utilizado para a determinação do teor ótimo de ligante a ser empregado em uma mistura asfáltica. Este é um método empírico, ou seja, não mede as condições do pavimento em serviço e nem leva em consideração as condições climáticas e ambientais nas quais ele está inserido.

Suas principais vantagens são:

- Método simples, prático, rápido e eficiente para a tarefa de dosagem e controle da qualidade das misturas asfálticas;
- É um método bem conhecido;
- Não requer aparelhagem sofisticada;
- Os ensaios de caracterização exigidos são simples;

Entretanto, por ser um método empírico, é bastante limitado:

- Não permite uma generalização adequada para outras condições de contorno;
- Não é possível classificar corretamente as misturas quanto às deformações permanentes;
- Os parâmetros utilizados por esse método são afetados por diversos fatores, tais como:
  - Influência dos materiais envolvidos;
  - Influência da temperatura de mistura e compactação dos corpos de prova;
  - Influência da compactação;
  - Influência das dimensões dos corpos de prova;
  - Influência das condições operacionais;
  - Influência das condições locais e regionais na utilização do Método Marshall.

De acordo com Senço (2001), o ensaio Marshall é um método de laboratório que avalia as propriedades de certas misturas asfálticas. É empregado para auxiliar na estimativa do teor ótimo de ligante asfáltico a ser utilizado na composição das misturas asfálticas. A obtenção desse teor considerava os seguintes critérios: estabilidade, densidade, vazios preenchidos e não preenchidos e fluência.

Tenta-se estimar as características físicas da mistura compactada através de três parâmetros que são a densidade aparente, volume de vazios não preenchidos com asfalto e volume de vazios ocupado pelo asfalto, através da relação betume vazios – RBV. Para se avaliar as características mecânicas são empregados os ensaios de estabilidade e fluência.

Em trabalhos acadêmicos, segundo Soares *et al. apud* Vasconcelos (2004), o método Marshall para dosagem de misturas asfálticas sofreu algumas alterações, como a exclusão dos parâmetros estabilidade e fluência como pré-requisitos na dosagem de misturas. Atualmente, as pesquisas desenvolvidas sugerem que o teor de projeto de ligante asfáltico para misturas a quente seja determinado com base em parâmetros volumétricos, geralmente o volume de vazios (3% a 5%) e a relação betume vazios (75% a 82%).

### **2.7.1 Composição granulométrica**

A granulometria dos agregados é um dos elementos mais importantes em uma mistura asfáltica, visto que afeta quase todas as propriedades físicas da mistura.

O projeto estrutural do agregado tem como finalidade a seleção de uma distribuição de agregados onde haja maior acomodação destes, o que resulta em maior intertravamento do esqueleto mineral e na obtenção de propriedades volumétricas pré-estabelecidas, como os vazios do agregado mineral (VAM), a relação betume vazios (RBV) e o volume de vazios total (Vv).

A curva granulométrica é a representação da distribuição do tamanho das partículas de agregados em relação ao peso ou volume total da mistura.

A seleção de uma estrutura granular consiste em estabelecer misturas experimentais combinando matematicamente a granulometria individual dos materiais em uma única granulometria por tentativa e erro. De acordo com DNIT (2006a), a composição de uma curva granulométrica de uma mistura de concreto asfáltico deve se enquadrar em uma das seguintes faixas apresentadas no Quadro 2.5.

**QUADRO 2.5** Especificações para a composição granulométrica do concreto asfáltico

PENEIRA DE MALHA QUADRADA		% EM MASSA, PASSANDO.			
ASTM	Abertura(mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	±7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7%
3/4"	19,1	60-90	80-100	100	±7%
1/2"	12,7	-	-	80-100	±7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	±7%
Nº 4	4,8	25-50	28-60	44-72	±5%
Nº 10	2,0	20-40	20-45	22-50	±5%
Nº 40	0,42	10-30	10-32	8-26	±5%
Nº 80	0,18	5-20	8-20	4-16	±3%
Nº 200	0,075	1-8	3-8	2-10	±2%
Asfalto solúvel no CS <sub>2</sub> (+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	±0,3%

Fonte: DNIT(2006a)

No Rio Grande de Norte, a faixa normalmente empregada para a composição de uma mistura asfáltica do tipo Concreto Asfáltico é a Faixa C do DNIT.

### 2.7.2 Características volumétricas

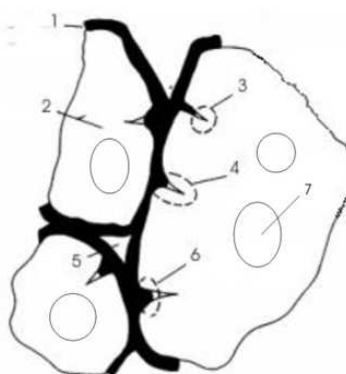
A composição volumétrica entre o ligante asfáltico e os agregados é considerada um parâmetro importante para avaliar o comportamento das misturas asfálticas, pois influencia a estabilidade e a durabilidade do pavimento.

As propriedades volumétricas mais importantes de uma mistura compactada são: Volume de vazios total (Vv), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume vazios (RBV). Estas propriedades proporcionam uma idéia sobre o comportamento da mistura durante a vida de serviço.

Qualquer método de projeto de misturas asfálticas simula em laboratório a densidade de campo que as mesmas terão devido à densificação produzida pelo tráfego. Sendo assim, o comportamento mecânico é avaliado mediante as propriedades volumétricas.

É necessário entender as definições e procedimentos analíticos da avaliação das relações entre peso e volume, para selecionar a mistura adequada.

O agregado mineral é poroso e pode absorver diferentes quantidades de água e asfalto, como mostra a Figura 2.4. A porosidade é uma relação entre o volume de vazios e o volume total de um material. Até certo grau, a porosidade do agregado é desejável, pois beneficia a união asfalto/agregado. Se o material for muito poroso, ele pode absorver quantidades expressivas de asfalto. Isto provocaria a diminuição da espessura do filme de asfalto que envolve as partículas. Essa diminuição torna a mistura mais frágil e mais suscetível às ações do clima, água, envelhecimento e tráfego.



**FIGURA 2.4** Vazios na mistura

Onde: 1 – Volume do ligante asfáltico; 2 – Volume do agregado; 3, 4 e 6 – Vazios permeáveis: Preenchimento parcial do vazio do agregado com asfalto; 5 – Vazio de ar entre os agregados; 7 – Vazio impermeável.

O controle do volume de vazios e da relação betume vazios, dentro dos limites, pode estabelecer influência na deformação oriunda da canalização do tráfego. Além disso, monitoram indiretamente a durabilidade dos concretos asfálticos.

- Densidades da mistura asfáltica
  - Densidade aparente

É a relação entre o peso seco e o peso submerso do corpo de prova. Através dos valores de densidade aparente obtidos em laboratório, pode-se controlar o processo de compactação da mistura na pista fazendo a comparação das mesmas.

o Densidade máxima teórica – DMT

No Brasil, a DMT é normalmente calculada através da ponderação das densidades reais dos materiais constituintes da mistura. A densidade real dos agregados é numericamente igual à razão entre a massa da parte sólida e a soma do volume de agregados e vazios impermeáveis. A densidade do ligante considera apenas o volume da parte sólida.

De posse das densidades reais de todos os materiais envolvidos na mistura e de suas respectivas proporções, faz-se uma ponderação para a determinação da DMT da mistura para os diferentes percentuais de ligante. A Equação 2.2 apresenta a fórmula adotada para o cálculo da DMT através dos pesos ( $P_i$ ) e das densidades reais ( $G_i$ ) dos materiais constituintes.

$$DMT = \frac{P_b + P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde:

$P_i$  : é a porcentagem de cada material empregado na mistura;

$P_b$  : é a porcentagem de asfalto empregado na mistura;

$G_i$  : é a densidade real da massa dos grãos de cada material empregado na mistura;

$G_b$  : é a densidade real do asfalto empregado na mistura.

A DMT representa a densidade real da mistura sem vazios.

### 2.7.2.1 Volume de vazios ( $V_v$ )

O volume de vazios total de uma mistura é a porcentagem de vazios não preenchidos com ligante asfáltico. Ou seja, é o volume dos espaços vazios do corpo de prova expresso, percentualmente, em relação ao volume aparente do mesmo.

O  $V_v$  é um parâmetro comum aos mais diversos métodos de dosagem. Sua determinação depende da densidade máxima teórica da mistura (DMT) e da densidade aparente do corpo de prova compactado, como mostra a Equação 2.3.

$$V_v = \frac{DMT - D_a}{DMT} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde:

DMT é a densidade máxima teórica da mistura;

Da é a densidade aparente do corpo de prova.

De acordo com o *Highway Research Board apud Coelho (1992)*, o valor mínimo de Vv deve ser tal que permita um pequeno aumento da densificação da camada por ação do tráfego e corresponda a um volume mínimo de vazios que permita a expansão térmica dos agregados, devido às elevações de temperatura das camadas de modo a evitar a exurdação do ligante para a superfície das mesmas.

O valor máximo é fixado para garantir uma densidade suficiente em conjunto com as outras propriedades requeridas, tais como, estabilidade e resistência à tração. Além disso, é necessário garantir a durabilidade da mistura, através da limitação da permeabilidade da mesma.

De acordo com desempenho dos pavimentos, o Vv do concreto asfáltico deve ficar entre 3% e 5%. Porcentagem de vazios inferiores a 3% conduz a mistura ao fluxo plástico. Já valores superiores a 6% resultam na permeabilidade elevada do ar e de água tendo por resultado problemas da durabilidade. Desse ponto de vista, pode-se dizer que o controle dos vazios das misturas asfálticas é uma medida de prevenção dos possíveis danos que a mistura possa vir a sofrer.

#### 2.7.2.2 Vazios do agregado mineral (VAM)

É o volume de vazios entre as partículas dos agregados minerais da mistura compactada que incluem os vazios de ar e a os vazios com betume, expresso em porcentagem do volume total da mistura, como indicado nas Equações 2.4 e 2.5.

$$VAM = V_v + VCB \quad (\text{Equação 2.4})$$

$$VCB = \frac{D_a \times P_b}{D_b} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Onde:

VCB é o volume de vazios preenchidos com asfalto;

Da é a densidade aparente do corpo de prova;

P<sub>b</sub> é a porcentagem de asfalto usado na mistura;

D<sub>b</sub> é a densidade real da massa do asfalto.

### 2.7.2.3 Relação betume vazios (RBV)

É a porção do volume de vazios entre as partículas de agregado (VAM) que são ocupados por asfalto. Ou seja, é o volume ocupado pelo material asfáltico da mistura, expresso, percentualmente, em relação ao volume de vazios dos agregados minerais. A Equação 2.6 apresenta esta relação.

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (\text{Equação 2.6})$$

A RBV garante o nível ótimo de vazios intergranulares cheios com betume, onde a resistência é obtida pela imobilização do grão sem o efeito de lubrificação do betume.

“As misturas asfálticas com RBV superiores a 90%, produzem camadas betuminosas instáveis”. (*HIGHWAY RESEARCH BOARD apud COELHO, 1992, p. 255*).

### 2.7.3 Características mecânicas

As propriedades mecânicas das misturas asfálticas dependem muito do tipo e quantidade de asfalto usado.

#### 2.7.3.1 Estabilidade

De acordo com Coelho (1992), estabilidade de um concreto asfáltico é uma propriedade mecânica que mede a capacidade que a mistura tem de suportar os carregamentos oriundos do tráfego sem sofrer deformações plásticas (permanentes). Ela está associada à resistência do material ao deslocamento (mudança de forma geométrica sem modificação de volume) que pode ser medida através da sua resistência as tensões de cisalhamento. A aplicação do termo estabilidade como sinônimo de resistência mecânica pode ser mal interpretado.

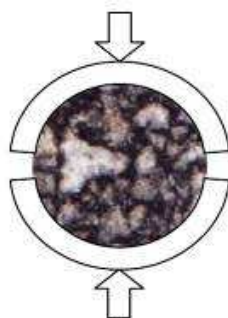
Os principais fatores a influir na estabilidade das camadas betuminosas são:

- Granulometria dos agregados;
- A forma (geométrica) e a textura superficial das partículas dos agregados;
- O tamanho máximo das partículas de agregados graúdos;
- A relação entre as quantidades de ligante e de agregados;

- A consistência do ligante;
- O grau de compactação da mistura;
- A porcentagem de *filler* adicionada a mistura.

Além desses fatores, ressalte-se que boa adesividade nas interfaces de camadas adjacentes e boa durabilidade dos agregados são fundamentais para uma boa estabilidade mecânica dessas camadas.

A máxima carga de compressão diametral, suportada pelos corpos de prova, foi associada, por Marshall, à resistência mecânica do concreto asfáltico, e por isso, chamado de estabilidade Marshall (Figura 2.5).



**FIGURA 2.5** Esquema de compressão Marshall – Estabilidade

Coelho (1992) diz que a estabilidade Marshall mede principalmente a coesão e a viscosidade do ligante asfáltico e de certa forma constitui-se também numa medida da estabilidade mecânica dos agregados. No entanto, os parâmetros medidos nesse ensaio têm uma correlação muito limitada com as deformações que ocorrem em escala real, pois, na pista, o material trabalha sob confinamento e a amostra ensaiada é comprimida sem confinamento.

## **2.8 SUSCEPTIBILIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS À UMIDADE**

De acordo com Zeng & Ksaibati (2002), a umidade causa danos à mistura asfáltica e conseqüentemente a deterioração prematura do pavimento asfáltico. Os danos causados pela umidade resultam no enfraquecimento da ligação entre o asfalto e os agregados da mistura asfáltica, geralmente conhecido como *stripping*.

A adesão se define como a força de atração entre moléculas simples que formam um corpo unido. A adesão entre materiais é um fenômeno superficial. Isto



depende do contato entre os materiais e da mútua atração de suas superfícies. Um dos fatores que determinam a durabilidade de uma camada de concreto asfáltico é o grau de adesividade desenvolvido entre o asfalto e o agregado.

A água (umidade) pode prejudicar a união asfalto/agregado, reduzindo assim a resistência ou estabilidade das misturas. A resistência da mistura é decorrente da coesão da mesma e do intertravamento e atrito entre as partículas dos agregados.

A sensibilidade das misturas à umidade associa-se a dois mecanismos que se inter-relacionam: a perda de adesão e a perda de coesão. A perda de adesão deve-se à existência de água entre o asfalto e o agregado, causando o deslocamento do filme de asfalto. Já a perda de coesão se dá devido ao enfraquecimento do asfalto na presença de água, que diminui a resistência da união asfalto/agregado, causando uma redução severa na resistência e integridade da mistura.

O *stripping* é um problema que depende de muitas variáveis como: o tipo e uso da mistura; as características do cimento asfáltico; as características dos agregados empregados; as condições do ambiente onde a mistura será empregada (clima e umidade); o tráfego; as práticas construtivas; e o uso de aditivos *anti-stripping*.

De acordo com Furlan *et al.* (2004), os seguintes fatores que podem influenciar na susceptibilidade das misturas asfálticas à umidade:

- A natureza do asfalto: sabe-se que asfaltos mais viscosos apresentam maior resistência ao deslocamento da película na presença de água quando comparado a asfaltos menos viscosos;
- Influência do tipo de mistura: Misturas de granulometria densa geralmente exibem perda de resistência na presença de água quando o volume de vazios ou a umidade são excessivos ou a quantidade de asfalto é insuficiente, muitas vezes causada por uma absorção elevada de asfalto pelo agregado;
- Propriedades dos agregados: Este é o principal responsável pela influência na resistência adesiva entre o asfalto e o agregado. Dentre as principais características dos agregados que influenciam o fenômeno de adesividade pode-se citar a composição mineralógica, a porosidade e absorção dos mesmos e sua forma, textura e angularidade.

O principal objetivo dos estudos sobre a susceptibilidade de misturas asfálticas a umidade é desenvolver um ensaio laboratorial que identifique misturas

de pavimentos que são susceptíveis ao *stripping*, permitindo achar soluções antes que o problema ocorra.

Dentre os ensaios que normalmente são empregados para avaliar os danos por umidade, destacam-se os seguintes:

- Ensaios de adesividade dos agregados envolvidos na mistura

São ensaios que avaliam visualmente o *stripping*. Estes procedimentos são subjetivos e requerem uma estimativa visual do desligamento da película de asfalto sobre o agregado. Eles normalmente não se correlacionam ao comportamento em campo.

- Ensaio de Lottman modificado (AASHTO T283)

É provavelmente o ensaio mais apropriado para se detectar o dano causado pela água nas misturas asfálticas. Ele visa determinar a capacidade da mistura asfáltica em manter sua resistência à tração após a ação deletéria da água em ciclos de temperaturas intermediárias e baixas.

O ensaio consiste em comparar os valores de resistência à tração por compressão diametral entre grupos de corpos de prova com vazios entre 6% e 8%, com e sem condicionamento térmico. O condicionamento dos mesmos se dá em três fases: saturação entre 55% e 80% (254mmHg – 660mmHg), congelamento a uma temperatura de  $-18^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$  por um período entre 16 e 18 horas e aquecimento através da imersão em banho-maria à  $60^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$  por  $24 \pm 1$  hora. Este método faz a previsão do efeito da adesividade nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica por um período estimado de 4 a 12 anos.

A relação entre estes grupos é denominada relação de resistência à tração (RRT) e tem como finalidade avaliar a resistência da mistura ao deslocamento da película de ligante devido à ação deletéria da água na mistura, visando identificar misturas que possam apresentar degradação durante sua vida de serviço devido a problemas de adesividade ligante-agregado. A RRT indica, em termos percentuais, o desempenho da mistura asfáltica quanto à adesividade e, por conseqüência, a sua susceptibilidade à presença de água.

Souza Neto (2004) avaliou o comportamento de misturas quanto à presença de umidade através da RRT. Para verificar a dispersão dos resultados, fez-se a

análise em duas etapas. Em uma etapa foram utilizados três corpos de prova e na outra apenas um. Os resultados indicam que não houve variação significativa da RRT entre as etapas estudadas.

## **2.9 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO INSUMO NA ENGENHARIA CIVIL**

### **2.9.1 Aplicações dadas ao lodo de esgoto**

De acordo com Santos (2003), o uso do lodo de esgotos em processos industriais é classificado como tecnologia emergente. Diferentes formas de reciclagem do lodo como materiais de construção estão sendo sugeridas internacionalmente como alternativa segura para encapsulamento dos metais pesados, redução de emissões atmosféricas poluentes, redução de custos, além de consistir numa forma de aproveitamento benéfico de matéria-prima e energia disponíveis, causando uma economia na extração destes recursos do ambiente, mesmo que em pequenas quantidades, e desta forma adequando-se ao modelo de desenvolvimento sustentável.

Muller *apud* Geyer (2001) diz que a disposição final dos resíduos de estações de tratamento de esgotos sanitários tem sido alvo de inúmeros estudos, os quais, na sua maioria, têm apontado preferencialmente pelo aproveitamento do lodo incinerado como insumo.

A seguir apresentam-se algumas aplicações do lodo *in natura* e da cinza de lodo de esgoto na indústria da construção civil.

- **Fabricação de agregado leve**

Brosch *apud* Geyer (2001) empregou os lodos de estação de tratamento de esgotos na produção de agregados graúdos leve. Os resultados atenderam as normas técnicas e quando foram comparados com outros agregados leves, com a argila expandida, verificou-se que os resultados eram bastante satisfatórios.

Kato & Takesue *apud* Geyer (2001) avaliaram o agregado miúdo leve resultante da cinza de lodo sanitário. Os resultados da pesquisa mostraram que o agregado feito de resíduo pode ser uma alternativa viável tecnicamente.

- **Produção de cerâmica**

Alleman & Berman (1984) avaliaram o emprego de lodo parcialmente seco em tijolos cerâmicos numa proporção volumétrica de até 50% de lodo. Os resultados mostraram que há uma redução da resistência à compressão com o acréscimo do lodo à mistura. Os tijolos com adição de lodo têm maior absorção de água que os tradicionais, pois neles há formação de vazios devido à queima da matéria orgânica. A recomendação feita pelo estudo é o uso de até 30% de lodo em volume.

Geyer (2001) referencia em seu trabalho um estudo realizado por J. Tay em 1987. Neste empregou-se dois tipos de resíduos, lodos digeridos e parcialmente desidratados e cinzas de lodo de esgoto. Os tijolos feitos com o primeiro resíduo citado apresentaram uma textura pobre e pouco regular, o que impossibilitaria a aplicação dos mesmos em alvenaria aparente. Quanto ao desempenho mecânico, observou-se que com o acréscimo de lodo os tijolos passaram a perder qualidade sob o ponto de vista da massa específica, resistência à compressão e absorção de água. Já os tijolos executados com cinzas de lodo, em comparação aos executados com lodo natural seco, apresentaram-se vantajoso. Dentre os benefícios observados podem-se citar o melhor desempenho quanto à resistência à compressão, massa específica, absorção de água e fissuramento.

Costa & Ferreira (1986) avaliaram a introdução de lodo de esgoto industrial, contendo metais pesados, em tijolos cerâmicos. Os resultados apontaram viabilidade desta aplicação, pois os metais foram fixados nas matrizes, devido ao emprego do calor.

Favoni *et al.* (2005) investigou a obtenção de cerâmica sintética a partir da calcinação de lodo de esgoto municipal e escória de usina de aço. Os resultados comprovaram que a resistência mecânica obtida por esta cerâmica é considerada satisfatoriamente boa quando comparada com a tradicional. Além disso, o processo de calcinação conseguiu inertizar os metais pesados dos resíduos utilizados para produzir a cerâmica sintética.

- **Adição de cinza de lodo em concreto e argamassa**

Geyer (2001) estudou o emprego da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto. Os resultados mostraram que a cinza de lodo pode ser utilizada como adição ao concreto, com efeito predominante de *filler*, em percentuais de até 20%, em concretos com relação água/aglomerante

entre 0,65 e 1,10. Quando a relação água/aglomerante varia entre 0,65 e 0,80 obtiveram-se benefícios ambientais com este emprego. Já quando a relação varia entre 0,95 e 1,10 se obteve benefícios econômicos com a redução do consumo de cimento e técnicos com a melhoria das propriedades mecânicas dos concretos. Os resultados de solubilização mostraram que a matriz de concreto é capaz de reter de forma segura os compostos nocivos presentes no resíduo.

Monzó *et al.* (1996) estudou a composição química de cinza de lodo de esgoto e sua granulometria. Algumas diferenças em sua composição química foram observadas. A análise microscópica por varredura mostrou que as partículas da cinza têm tamanho irregular, o que influencia decisivamente na trabalhabilidade das argamassas. Ao substituir 15% de cimento Portland por cinza e avaliou-se a resistência à tração e à compressão dessa mistura. O estudo revela um aumento na resistência quando as cinzas são usadas, isto ocorre provavelmente devido as propriedades pozolânicas da mesma.

Fontes (2003) avaliou o emprego de cinza de lodo de estação de tratamento de esgotos como substituto parcial do cimento Portland na produção de argamassas e concretos. Os resultados mostraram que o uso da cinza de lodo de esgoto é viável tecnicamente devido à melhoria das propriedades investigadas, além de trazer benefícios econômicos através da redução no consumo de cimento, sendo a sua atuação predominantemente física (efeito *filler*). Quanto à análise ambiental, os resultados indicam que o concreto conseguiu reter de forma segura a cinza de lodo de esgoto em sua matriz cimentícia.

- **Cimento produzido a partir de cinza de lodo**

Tay & Show *apud* Geyer (2001) desenvolveram uma metodologia para produção de um cimento a partir de uma mistura de cinza de lodo de esgoto com cal. Baseando-se na análise química e em ensaios para medir a atividade pozolânica e a resistência, chegou à conclusão que o cimento formado não pode ser considerado cimento pozolânico. Quanto à resistência mecânica à compressão, ensaios mostraram que o aumento apresentou resistência compatível a dos cimentos comerciais.

- **Cinza de lodo como *filler* em mistura asfáltica**

Al Sayed *et al* (1995) utilizaram cinza de lodo de esgoto como material de enchimento mineral de misturas de concreto asfáltico em Bahrain. Os resultados indicaram que o resíduo pode ser empregado como *filler*, pois todas as especificações de Bahrain para concreto asfáltico foram satisfeitas. Além disso, ficou provado que o desempenho do resíduo como *filler* em ambientes quentes é satisfatório, pois a estabilidade e a fluência Marshall testada a elevadas temperaturas de 70° e de 80°C tiveram desempenho satisfatório.

### **2.9.2 Reciclagem de outros resíduos em misturas asfálticas**

A construção de pavimentos é uma área de grande consumo de recursos naturais. Por isso, a reciclagem de resíduos representa uma oportunidade para: reduzir o consumo de recursos naturais; diminuir os custos com a destinação dos resíduos para os aterros; e proporcionar a valorização do rejeito.

A seguir apresentam-se alguns estudos realizados sobre a incorporação de resíduos em misturas asfálticas.

Bonet (2002) analisou a aplicação do resíduo de areia de fundição incorporado nas massas asfálticas do tipo concreto asfáltico. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica da incorporação de 8% do resíduo no traço da massa de asfalto. Concluiu-se ainda que esta aplicação seja ambientalmente viável, pois o resíduo foi totalmente envolvido pelo material asfáltico, evitando assim possíveis contaminações.

Branco (2004) avaliou a possibilidade de uso de escória de aciaria como agregado em revestimentos asfálticos do tipo concreto asfáltico. O resíduo apresentou possibilidade de uso, no entanto o aperfeiçoamento da metodologia normalmente empregada mostrou-se necessário face à dificuldade encontrada devido à heterogeneidade dos agregados de escória de aciaria. Concluiu-se que o tamanho da amostragem utilizada na dosagem e caracterização mecânica de misturas que empregam materiais pétreos não deve ser o mesmo para as que utilizam rejeitos em sua composição. Devido à heterogeneidade do resíduo, os dados podem ser insuficientes para que conclusões mais embasadas sejam feitas.

Hassan (2005) investigou a possibilidade de aplicar cinzas incineradas de resíduos sólidos em concreto asfáltico a quente. Os resultados indicam o uso

potencial de cinza de resíduos municipais em misturas de concreto asfáltico para revestimento de superfícies e base, sendo possível substituir até 15% dos agregados do concreto para superfície pelas cinzas e no caso da base o percentual de substituição é de 20%.

Souza (2001) utilizou um resíduo proveniente de serragem de rocha granítica em mistura asfáltica do tipo concreto asfáltico. Este resíduo é constituído de água, gralha, cal e rocha moída. Os resultados encontrados indicam que este resíduo pode ser empregado como *filler* na mistura asfáltica em substituição aos produtos convencionais (cal e cimento Portland) na proporção de 6% de material, para um teor de 5,5% de cimento asfáltico.

Pinheiro *et al.* (2003) analisaram alguns parâmetros mecânicos de misturas asfálticas com incorporação de borracha de pneu, usando os processos úmido e seco. Para todas as misturas foi usada uma única distribuição granulométrica de agregados, Faixa C do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. No processo úmido utilizou-se um ligante asfalto-borracha com 20% de borracha e 20% de óleo extensor. Já para o processo seco foram substituídos 2,5% de agregado por borracha de mesma granulometria e analisado o tempo de digestão de 1h. Em ambos os processos se usaram borracha entre as peneiras N<sup>o</sup>. 40 e N<sup>o</sup>. 200, que correspondem a partículas com diâmetros entre 0,42 e 0,075 mm. Os resultados apontam à importância do tempo de digestão no processo seco e mostram que as misturas com borracha possuem valores menores de resistência à tração e módulo de resiliência e uma maior vida de fadiga para baixos níveis de tensão, quando comparados a uma mistura convencional.

Aldigueri *et al.* (2004) avaliou o potencial de uso de um solo contaminado com petróleo como material componente de uma mistura asfáltica do tipo concreto asfáltico para pavimentos rodoviários de baixo volume de tráfego, possibilitando uma destinação mais nobre do ponto de vista ambiental e econômico. Nas misturas asfálticas estudadas foram incorporados quatro teores de resíduo, 10%, 20%, 30% e 40% em massa. Somente a mistura com 30% de solo contaminado com petróleo e 4,5% de ligante satisfaz as especificações volumétricas da norma nacional do DNIT. Com relação à influência do teor de resíduo nas propriedades mecânicas das misturas estudadas, verificou-se que as misturas asfálticas apresentaram valores, de módulo de resiliência e resistência à tração, compatíveis com a literatura, com exceção das misturas que continham 40% de resíduo.

## CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho apresenta-se como um projeto piloto em escala laboratorial que propõe avaliar a possibilidade de aplicação do lodo proveniente de tanque séptico como matéria-prima constituinte de mistura asfáltica a ser aplicada em pavimento de estradas.

O resíduo foi incorporado a uma mistura do tipo concreto asfáltico. Os agregados convencionais foram substituídos pelo lodo, que foi considerado como um agregado não convencional. O lodo foi preparado e empregado como dois tipos de matéria-prima. A hipótese de utilização do lodo *in natura* como agregado miúdo e do lodo calcinado como *filler*, baseou-se inicialmente na granulometria dos mesmos.

A parcela do material que passa na peneira N<sup>o</sup>. 10 (2,00 mm) e fica retido na N<sup>o</sup>. 200 (0,075mm) foi denominado lodo *in natura*. Este foi utilizado no Experimento 01, onde se fez a substituição da areia por lodo *in natura* nas proporções de 5% a 40%.

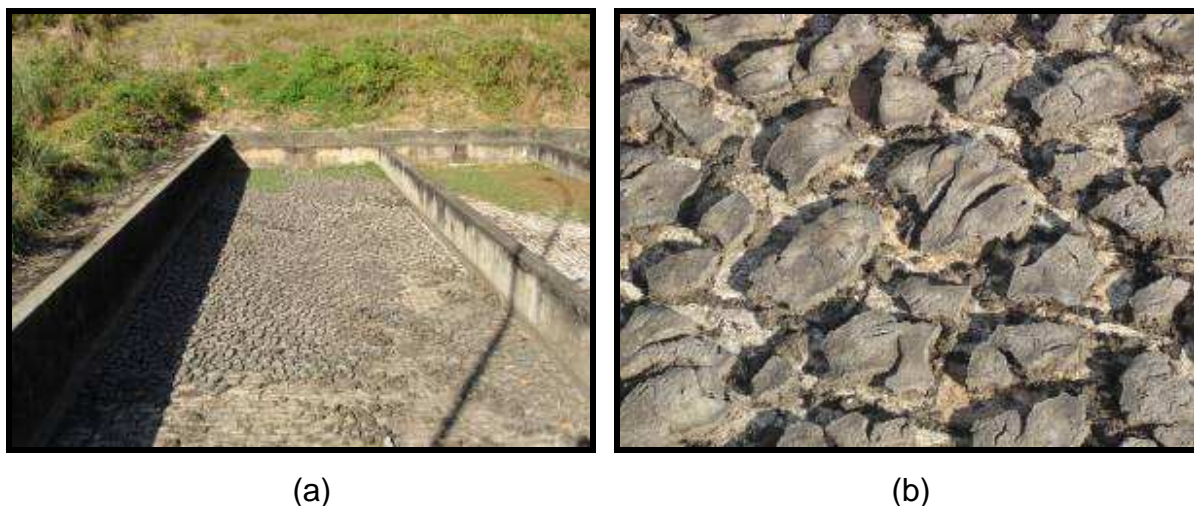
A parcela que passou na peneira N<sup>o</sup>. 200 foi calcinada e o material resultante denominou-se de lodo calcinado. Este foi empregado no Experimento 02, onde se fez a comparação entre as misturas usando cimento e as que substituíram o cimento por lodo calcinado nas mesmas proporções, que foram 1%, 2% e 3%.

Com base nos parâmetros dosados pelo método Marshall para a mistura convencional, foi feita a investigação comparativa entre a mistura com agregados convencionais e as com agregados não convencionais, através das características físicas e volumétricas das mesmas.

### 3.1 COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE LODO

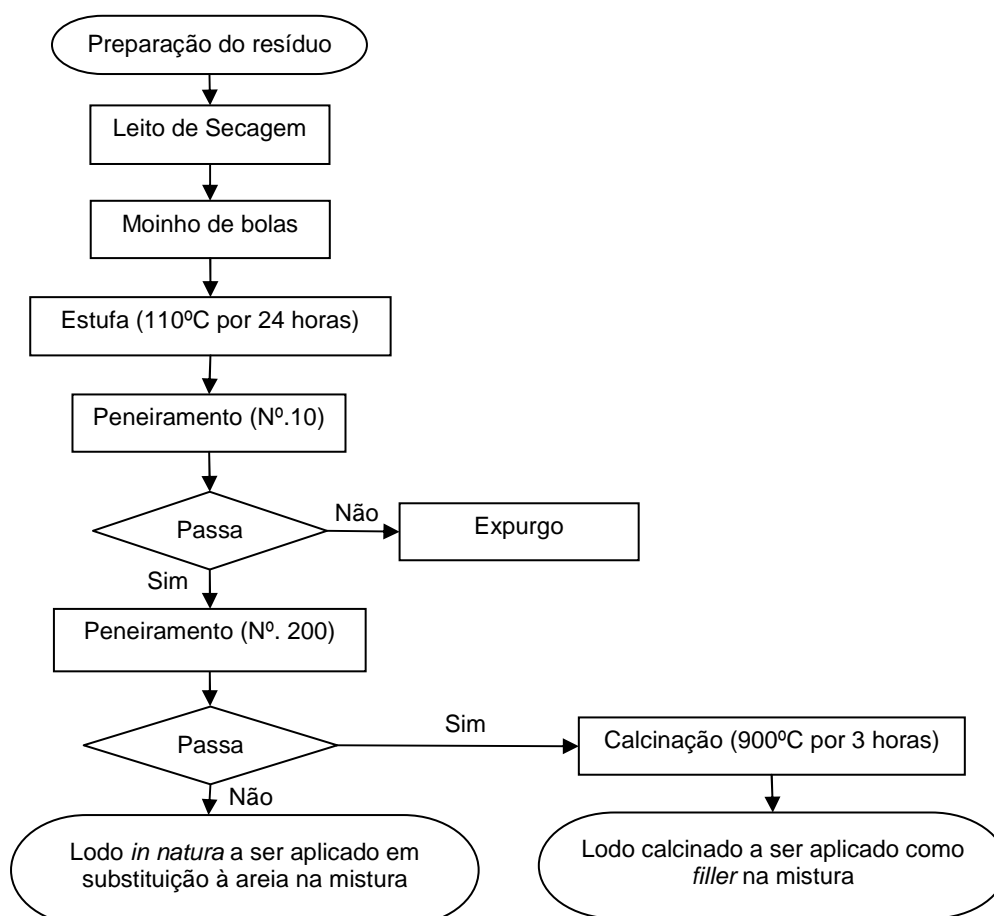
A amostra utilizada na pesquisa foi proveniente de uma das empresas imunizadoras da cidade de Natal/RN. A amostra coletada foi transportada até a Estação de Tratamento da UFRN, onde foi disposta em um leito de secagem (Figura 3.1), com o intuito de reduzir a umidade da amostra.





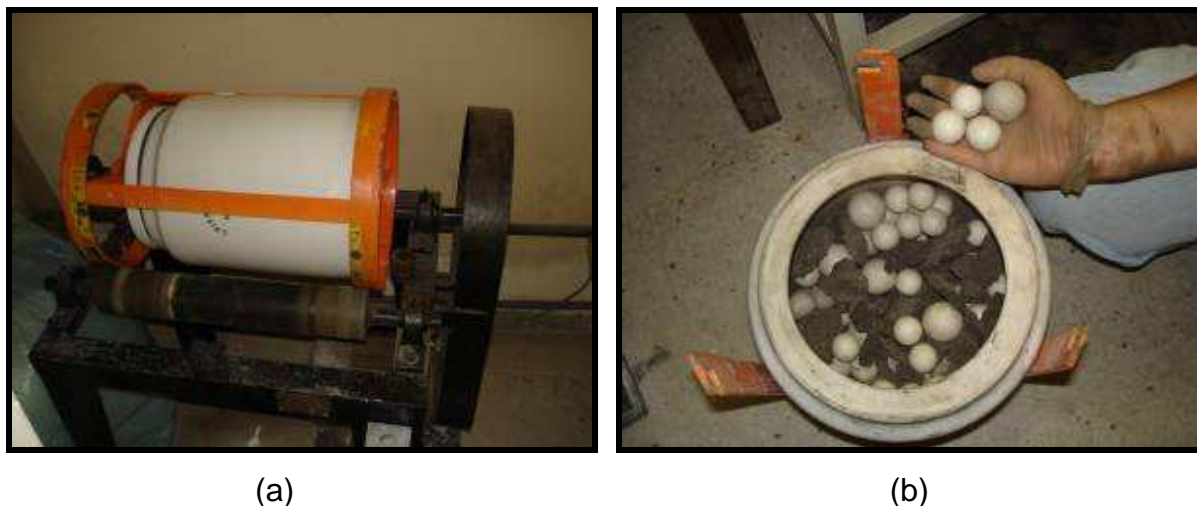
**FIGURA 3.1** Secagem natural do resíduo: (a) Vista do leito de Secagem (b) Amostra seca ao ar

A Figura 3.2 indica as etapas utilizadas na preparação da amostra para ser incorporada à mistura como um agregado.



**FIGURA 3.2** Etapas desenvolvidas para preparar o lodo que foi aplicado na mistura asfáltica

O lodo, coletado do leito de secagem, foi encaminhado ao moinho de bolas (Figura 3.3), onde foi feita a desintegração mecânica da amostra. O material foi encaminhado à estufa (110°C por 24 horas) para retirar a umidade que o material ainda apresentava.

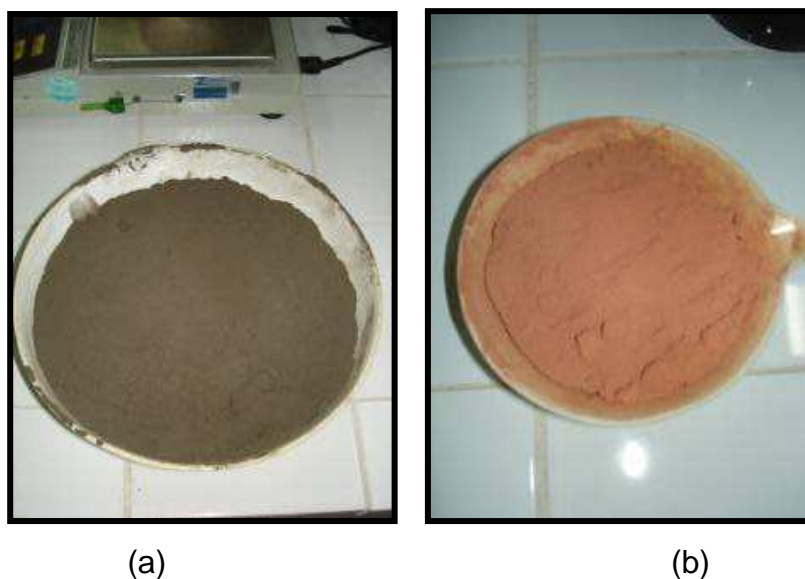


**FIGURA 3.3** Processo de desintegração mecânica do lodo: (a) Moinho de bolas (b) Carga do moinho

O lodo, já desagregado, foi encaminhado para peneiramento. O material foi parcelado em dois tipos de matéria-prima, de acordo com a granulometria.

O primeiro tipo, denominado lodo *in natura*, foi empregado no Experimento 01 e é constituído pelo material que ficou retido entre as peneiras N<sup>o</sup>. 10 (2,00mm) e N<sup>o</sup>. 200 (0,075mm).

O segundo tipo, chamado de lodo calcinado, é composto pelo material que passou na peneira N<sup>o</sup>. 200 e foi encaminhado para calcinação (900°C por 3 horas). Ele foi empregado no Experimento 02. A Figura 3.4 ilustra o lodo, empregado no Experimento 02, antes e depois da calcinação.



**FIGURA 3.4** Amostra do material que passa na peneira N<sup>o</sup>. 200: (a) Antes da calcinação (b) Depois da calcinação (900°C por 3 horas)

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

### 3.2.1 Caracterização do lodo *in natura*

A hipótese inicial de emprego do lodo *in natura* foi que o mesmo poderia ser usado para substituir um agregado miúdo, pois era formado pelas partículas que se encontram entre as peneiras N<sup>o</sup>. 10 e N<sup>o</sup>. 200.

- **Caracterização física**

Foi necessário verificar o comportamento do lodo *in natura*, considerando-o um material a ser empregado em pavimentação. Os ensaios a serem realizados para isto se encontram no Quadro 3.1.

**QUADRO 3.1** Ensaios de caracterização do lodo como um material para uso em pavimentação

ENSAIO	MÉTODO
Determinação da análise granulométrica	ME 080/94
Determinação da densidade real	ME 093/94
Determinação do limite de liquidez	ME 122/94
Determinação do limite de plasticidade	ME 082/94
Adesividade ao ligante betuminoso	ME 079/94
Equivalente de areia	ME 054/97

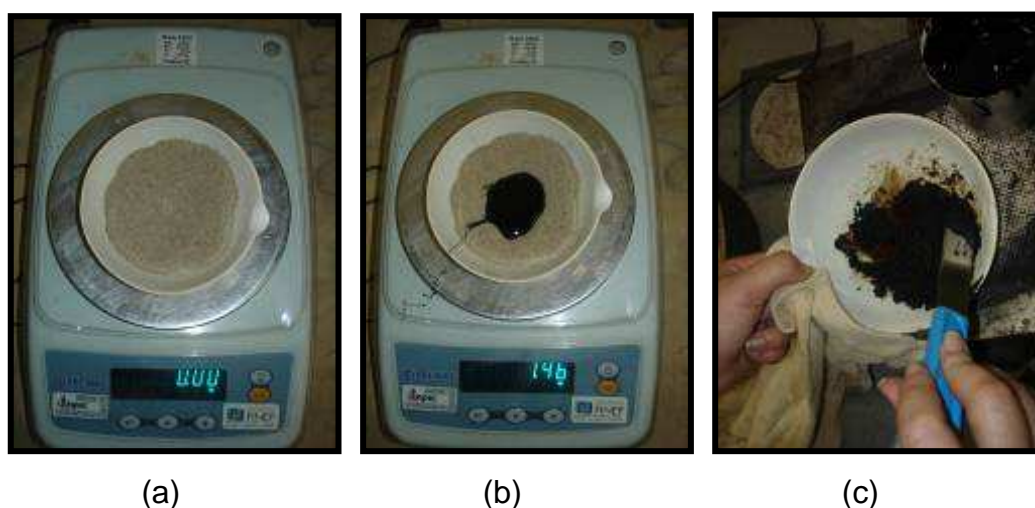
Fonte: DNIT

O ensaio de equivalente de areia (EA) é usado para avaliar a quantidade e a qualidade dos elementos finos presentes na amostra. O ensaio consiste em agitar energicamente uma amostra de solo numa proveta contendo solução flocculante e, após o repouso, determinar a relação entre o volume de areia e volume de areia mais o de finos que se separam da areia e flocculam.

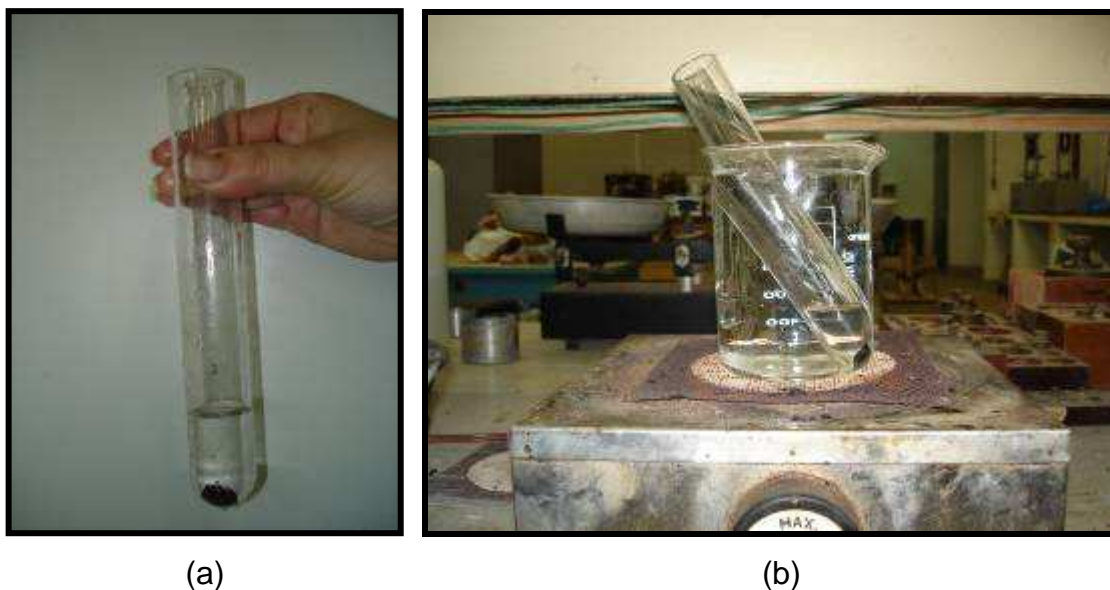
Para uma areia pura EA é de 100%, decrescendo seu valor à medida que aumenta o teor de impurezas ou de finos. Para argilas EA é praticamente nulo. De acordo com DNIT (2006a), o agregado miúdo deve apresentar equivalente de areia igual ou superior a 55%.

Para a realização do ensaio de equivalente de areia, fizeram-se algumas adaptações para o lodo. Durante a fase inicial de colocação da amostra no frasco com a solução, foi necessário que a amostra seja colocada aos poucos e à medida que ela vai sendo adicionada, tem que ser misturada, senão não se consegue obter a homogeneização entre o líquido e a mesma. No final do ensaio, percebeu-se que o particulado da amostra ainda permaneceu dispersa na solução flocculante, entretanto, conseguiu-se fazer as leituras necessárias.

O ensaio de adesividade faz uma análise visual da adesão da película ao agregado após fervura em água destilada e soluções molares de carbonato de sódio. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram as etapas do ensaio.



**FIGURA 3.5** Etapas da mistura do agregado miúdo com o ligante para ensaio de adesividade: (a) Amostra de agregado (b) Amostra de agregado e ligante (c) Mistura final



**FIGURA 3.6** Ensaio de adesividade: (a) Preparação da amostra (b) Fervura da amostra

No ensaio de adesividade, utilizaram-se as peneira com abertura de 212 $\mu$ m e 600  $\mu$ m, para fazer a separação da amostra. Esta adaptação foi feita devido à ausência das peneiras com aberturas de 0,21mm e 0,59mm, exigidas neste método.

O ensaio de análise granulométrica tem o objetivo de fornecer a distribuição do tamanho das partículas em função do peso total da mistura. O método especificado no Quadro 3.1 fez o enquadramento da amostra por peneiramento. Para avaliar o comportamento do material com diâmetro inferior a 0,15mm, empregou-se a técnica de classificação de partículas por difração a laser. A análise foi feita no Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. O equipamento utilizado foi um Granulômetro à Laser modelo 1064L, Cilas. Empregou-se *Ethanol* para dispersar a amostra de lodo *in natura*.

- **Caracterização química e mineralógica**

A composição química do lodo foi obtida por fluorescência de raios-X por energia dispersiva (FRX). Para isso, utilizou-se o equipamento EDX-700 da *Shimadzu*, do Laboratório de Ensaio de Materiais (LABEMAT) do Centro de Tecnologias do Gás (CTGÁS).

Para analisar a mineralogia foi feito o ensaio de difração de raios-X (DRX). O equipamento também está alocado no LABEMAT do CTGÁS e foi um XRD-6000 Shimadzu com tubo de Cu ( $\lambda= 1,54056\text{\AA}$ ). A tensão utilizada foi de 40kV e a corrente

de 30mA, com varredura de 2° a 80° para 2 $\theta$ , com velocidade de 2°/min e passo de 0,02°/passo. A avaliação das fases foi feita por comparação entre os picos gerados no difratograma com cartas padrões do programa de computador JCPDF, cadastradas no ICDD (*Internacional Centre for Diffraction Data*).

A caracterização do material por DRX indica as fases cristalinas presentes no material. Isto é possível porque na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-X.

- **Caracterização térmica**

A análise térmica do material foi feita no LABEMAT do CTGÁS usando o Analisador Termogravimétrico TGA-51H Shimadzu e o Analisador Termodiferencial DTA-50H Shimadzu. A taxa de aquecimento foi de 10°C/min com temperaturas variando entre 27°C e 1200°C, aproximadamente. A análise dos resultados foi realizada utilizando-se o programa de computador denominado TA-60, para análises térmicas da Shimadzu.

A análise térmica diferencial (DTA) consiste no aquecimento em velocidade constante do material juntamente com uma substância termicamente inerte, registrando as diferenças de temperatura entre elas. Quando ocorrem transformações endo ou exotérmicas, estas aparecem como deflexões em sentidos opostos numa curva termodiferencial. As transformações endotérmicas se referem normalmente à desidratação (perda de umidade, de água adsorvida). Já as transformações exotérmicas se devem à oxidação, reconstrução da estrutura cristalina, etc.

A análise termogravimétrica (TGA) consiste no aquecimento do material a uma velocidade constante, com ligação a uma balança, o que permite o registro das variações de massa em função da temperatura de queima. A perda ao fogo de um material é dada pela variação de massa, ocorrida entre as temperaturas 110°C e 1000°C.

- **Análise de risco ambiental**

A análise de risco ambiental do lodo *in natura* foi feita submetendo uma amostra aos ensaios de lixiviação, de acordo com o procedimento da NBR 10.005, e de solubilização, de acordo com a NBR 10.006.

### 3.2.2 Caracterização do lodo calcinado

- **Caracterização física**

O ensaio de análise granulométrica aplicou a técnica de classificação de partículas por difração a laser. A análise foi feita no Laboratório de Materiais da UFCG. O equipamento utilizado foi um Granulômetro à Laser modelo 1064L, Cilas. Utilizou-se água para dispersar a amostra de lodo calcinado.

- **Análise de risco ambiental**

Para avaliar preliminarmente o risco ambiental do material, uma amostra de lodo calcinado foi submetida ao ensaio de lixiviação segundo a NBR 10.005. A análise química do lixiviado foi feita no Laboratório de Análises da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte - EMPARN, por Espectrofotometria de Absorção Atômica. Modelo 220AA, Varian.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS CONVENCIONAIS

Os agregados convencionais empregados na mistura foram: Brita 5/8" e Brita 1/2" (Agregados Graúdos), Areia e Pó de Pedra (Agregados Miúdos) e Cimento Portland (*filler*).

Os agregados graúdos e miúdos foram precedentes de uma pedreira a 18 km da cidade de Natal/RN. Estes materiais estavam sendo empregados numa mistura de concreto asfáltico empregada na pavimentação da BR101/RN061 – trecho entre Ponta Negra e Arês.

#### 3.3.1 Caracterização dos agregados graúdos

O Quadro 3.2 apresenta os ensaios realizados para esses materiais.

**QUADRO 3.2** Ensaios de caracterização dos agregados graúdos

ENSAIO	MÉTODO
Determinação da análise granulométrica	ME 080/94
Adesividade ao ligante betuminoso	ME 078/94
Determinação da massa específica	ME 195/97
Determinação da abrasão Los Angeles	ME 035/98
Determinação do índice de forma	NBR 7809/83

Fonte: DNIT e ABNT

De acordo com a NBR 7809 (ABNT, 1983), o índice de forma permite avaliar a qualidade de um agregado graúdo em relação à forma dos grãos, considerando que os agregados com grãos de forma cúbica terão índice próximo de 1 (um), enquanto que os grãos lamelares apresentarão valores bem mais altos, sendo aceitável o limite de 3 (três). Ele se baseia na medida da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado.

De acordo com o DNIT (2006a), o agregado graúdo deve apresentar um índice de desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50%. O desgaste por Abrasão Los Angeles avalia a resistência do agregado submetido simultaneamente ao desgaste por atrito e por impacto, duas características muito importantes para a pavimentação.

### 3.3.2 Caracterização dos agregados miúdos

O Quadro 3.3 apresenta os ensaios que foram realizados nesses materiais.

**QUADRO 3.3** Ensaios de caracterização dos agregados miúdos

<b>ENSAIO</b>	<b>MÉTODO</b>
<b>Determinação da análise granulométrica</b>	ME 080/94
<b>Adesividade ao ligante betuminoso</b>	ME 079/94
<b>Determinação da massa específica</b>	ME 194/98
<b>Equivalente de areia</b>	ME 054/97

Fonte: DNIT

No ensaio de adesividade, utilizaram-se as peneira com aberturas de 212µm e 600 µm, para fazer a separação da amostra.

### 3.3.3 Caracterização do *filler*

O *filler* empregado na mistura asfáltica convencional foi do tipo Cimento Portland CII Z-32. Sua massa específica era 2,766 g/cm<sup>3</sup>. O material estava seco e isento de grumos.

## 3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO

O CAP empregado na mistura foi do tipo 50/70, com densidade de 1,027 g/cm<sup>3</sup>. Os ensaios de caracterização e as especificações do mesmo foram



fornecidos pela Unidade de Refino de Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste (LUBNOR/Petrobras).

### **3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS**

O trabalho foi realizado com base na dosagem obtida para a mistura convencional de concreto asfáltico. A dosagem e os materiais aplicados nesta mistura foram fornecidos pelo DNIT/RN.

Os experimentos definidos no trabalho utilizaram os mesmos materiais da mistura convencional e a dosagem fornecida para esta. Ou seja, a pesquisa avaliou o comportamento das misturas de cada experimento quanto as suas características volumétricas e mecânicas tomando-se como orientação o comportamento da mistura que não contem lodo (convencional).

Lima (2003) apresenta em seu trabalho, que a massa específica aparente dos corpos de prova Marshall ensaiados com e sem imersão, não apresentam diferenças significativas quanto a este parâmetro. Isso se deve ao fato da mistura de concreto asfáltico ser dosada com um índice de vazios muito baixo (3% a 5%), o que limita a permeabilidade. Sendo assim, as características volumétricas das misturas foram feitas sem imersão e para cada mistura utilizou-se 06 (seis) corpos de prova.

O comportamento da mistura quanto à estabilidade Marshall foi feita com e sem imersão, pois se pretendia avaliar se a adição de lodo a mistura influência a estabilidade em presença de água. Por isso, para cada mistura, em cada um dos experimentos, optou-se por usar 03 (três) corpos de prova ensaiados com imersão em banho-maria à 60°C por 30 a 40 minutos e 03 (três) corpos de prova submetidos a aquecimento à 60°C por 2 (duas) horas em estufa.

#### **3.5.1 Mistura Convencional**

A composição granulométrica e o teor ótimo de ligante encontram-se no Quadro 3.4.

**QUADRO 3.4** Dosagem da mistura de concreto asfáltico convencional

<b>MATERIAIS</b>	<b>COMPOSIÇÃO</b>
<b>Brita 5/8"</b>	10%
<b>Brita 1/2"</b>	45%
<b>Pó de pedra</b>	14%
<b>Areia</b>	30%
<b>Cimento</b>	1%
<b>CAP</b>	5,5%

De acordo com DNIT (2006a) um concreto asfáltico deve atender as características específicas no Quadro 3.5.

**QUADRO 3.5** Especificações para um concreto asfáltico

<b>CARACTERÍSTICA DA MISTURA</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>CAMADA DE ROLAMENTO</b>
<b>Porcentagem de vazios (%)</b>	ME 043/95	3 a 5
<b>Relação betume vazios</b>	ME 043/95	75 a 82
<b>Estabilidade mínima, em kgf (75 golpes)</b>	ME 043/95	500

Fonte: DNIT(2006a)

A determinação da densidade aparente das misturas betuminosas foi feita com base no DNER-ME 117/94.

Os vazios do agregado mineral (VAM) devem obedecer aos valores especificados no Quadro 3.6. Eles são obtidos em função do tamanho máximo dos agregados da mistura, que é o número da peneira da série normal na qual a porcentagem acumulada é inferior ou igual a 5%.

**QUADRO 3.6** Especificações dos vazios do agregado mineral para um concreto asfáltico

<b>TAMANHO MÁXIMO NOMINAL DO AGREGADO</b>		<b>VAM<sub>MÍNIMO</sub></b>
<b>#</b>	<b>mm</b>	
<b>1 1/2"</b>	<b>38,1</b>	13
<b>1"</b>	<b>25,4</b>	14
<b>3/4"</b>	<b>19,1</b>	15
<b>1/2"</b>	<b>12,7</b>	16
<b>3/8"</b>	<b>9,5</b>	18

Fonte: DNIT(2006a)

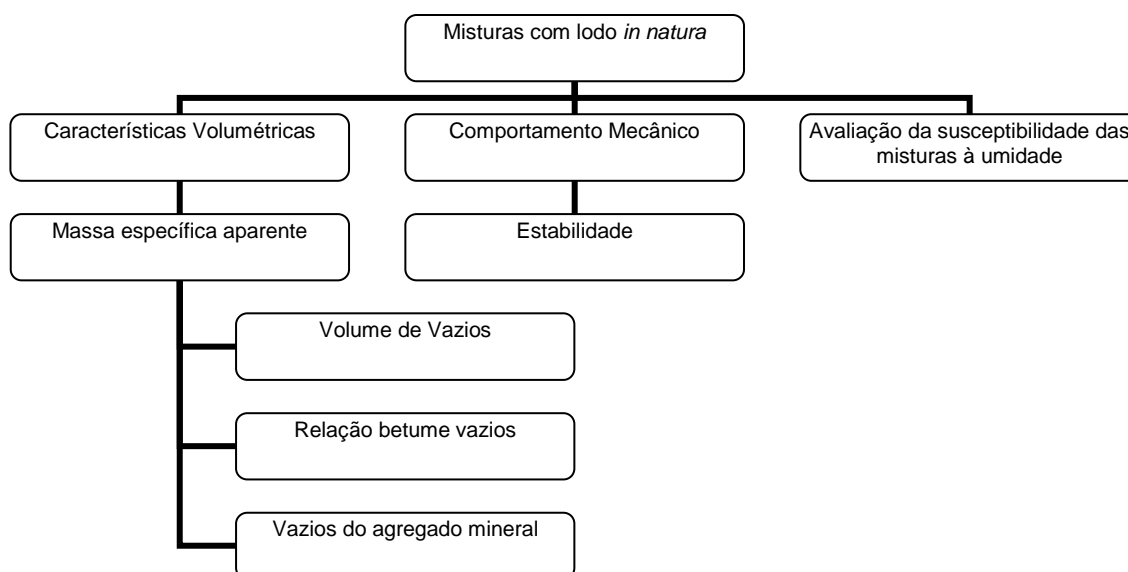
### 3.5.2 Experimento 01: Lodo *in natura* sendo aplicado como agregado miúdo

As misturas ensaiadas no Experimento 01 apresentaram o mesmo teor de betume e as mesmas proporções de agregados da mistura convencional. A diferença entre as misturas encontra-se na substituição parcial e gradativa da areia por lodo *in natura*. O Quadro 3.7 apresenta as proporções de lodo e areia empregadas em cada uma das misturas.

**QUADRO 3.7** Proporções de lodo *in natura* nas misturas do Experimento 01

MISTURA	PORCENTAGEM DE LODO EM RELAÇÃO A AREIA	PORCENTAGEM TOTAL DE LODO NA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MISTURA
01	0%	0%
02	5%	1,5%
03	10%	3%
04	15%	4,5%
05	20%	6%
06	25%	7,5%
07	30%	9%
08	35%	10,5%
09	40%	12%

Foram feitos 60 (sessenta) corpos de prova, que foram compactados com 75 golpes por face. O esquema de ensaios realizados encontra-se na Figura 3.7.



**FIGURA 3.7** Ensaios de caracterização das misturas do Experimento 01

### 3.5.3 Experimento 02: Lodo calcinado sendo aplicado em substituição ao cimento

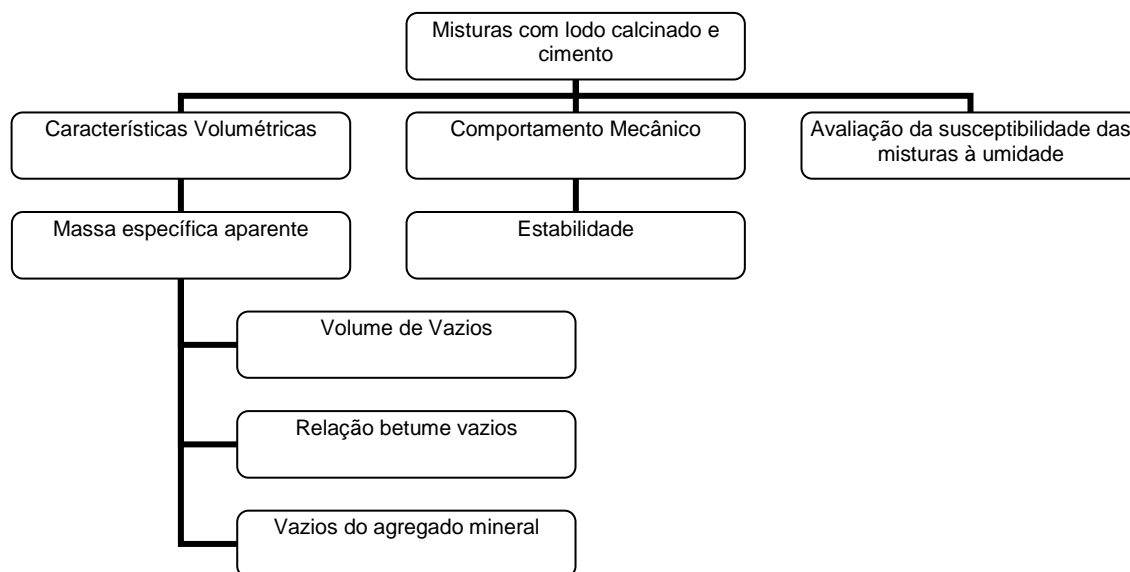
Neste experimento foi feita a substituição total do cimento por lodo calcinado, nas mesmas proporções. Para analisar o comportamento da mistura com a adição de lodo calcinado e cimento, empregou-se misturas com 1%, 2% e 3% destes materiais. As misturas empregadas no Experimento 02 encontram-se no Quadro 3.8. À medida que se acrescentava lodo calcinado ou cimento à mistura, diminuiu-se a mesma proporção de pó de pedra.

A substituição destas porcentagens foi escolhida porque o pó de pedra é um material que tem em sua composição todas as frações granulométricas da mistura. Além disso, ele contribuía com a maior quantidade de *filler* na mistura. As demais proporções dosadas para a mistura convencional foram mantidas.

**QUADRO 3.8** Proporções de lodo calcinado e cimento nas misturas do Experimento 02

<b>MISTURA</b>	<b>PORCENTAGEM</b>
<b>1C</b>	1% de cimento
<b>2C</b>	2% de cimento
<b>3C</b>	3% de cimento
<b>1L</b>	1% de lodo calcinado
<b>2L</b>	2% de lodo calcinado
<b>3L</b>	3% de lodo calcinado

Foram feitos 35 (trinta e cinco) corpos de prova, que foram compactados com 75 golpes por face. A mistura 1C do Experimento 02 é a mistura 01 do Experimento 01. O esquema de ensaios realizados encontra-se na Figura 3.8.



**FIGURA 3.8** Ensaio de caracterização das misturas do Experimento 02

### 3.6 AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS À UMIDADE – RELAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Baseando-se no trabalho de Souza Neto (2004), optou-se por fazer uma análise preliminar do comportamento das misturas quanto à relação de resistência à tração. Sendo assim, para cada mistura ensaiada, fez-se a análise do comportamento de 1 (um) corpo de prova.

Este ensaio avaliou preliminarmente o comportamento das misturas quando submetidas à presença de água. Para isto, durante o condicionamento, os corpos de prova foram submetidos a um ciclo de saturação, resfriamento e aquecimento, que tende a representar o envelhecimento do mesmo quando submetido à ação deletéria da água.

Na realização deste ensaio utilizou-se o Ensaio de Lottman Modificado (AASHTO, 1994). Entretanto, optou-se por fazer as seguintes adaptações ao método:

- Os corpos de prova ensaiados tinham índice de vazios variando de 3% a 5%, de acordo com o especificado para concretos asfálticos (DNIT-ES 031/2006);

- Durante a fase de resfriamento, a temperatura utilizada foi de 16°C. A justificativa foi o fato de que a menor temperatura que já houve em Natal/RN foi de aproximadamente 15°C e a temperatura média anual é de 24°C.
- Não foi feita replica do ensaio.

As misturas devem apresentar uma relação de resistência à tração (RRT) maior que 70%, para serem consideradas aceitáveis.

### **3.7 AVALIAÇÃO DO RISCO AMBIENTAL**

Para avaliar, de forma preliminar, o risco ambiental decorrente da aplicação do lodo na mistura, foi feita a lixiviação (ABNT, 2004b) do corpo de prova que apresentou as melhores características. A análise química do lixiviado foi feita no Laboratório de Análises da EMPARN, por Espectrofotometria de Absorção Atômica. Modelo 220AA, Varian.

## CAPÍTULO 4: APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONVENCIONAIS

Os agregados convencionais empregados na mistura foram: brita 5/8", brita 1/2", pó de pedra, areia e cimento.

#### 4.1.1 Agregados graúdos

Foi empregada uma mistura de dois tipos de agregado graúdo, ambos de origem granítica. Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados para estes materiais.

**TABELA 4.1** Resultados dos ensaios realizados nos agregados graúdos

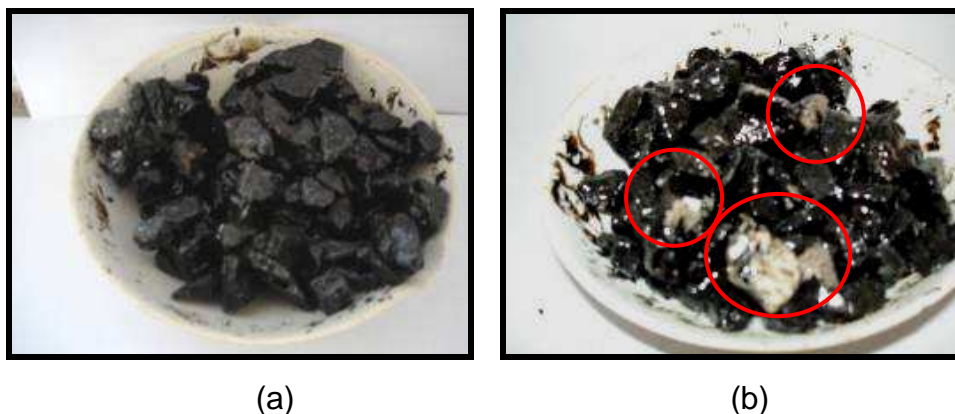
<b>RESULTADOS</b>	<b>BRITA 5/8"</b>	<b>BRITA 1/2"</b>
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,643	2,638
<b>Desgaste por Abrasão Los Angeles (%)</b>	39,8	34,4
<b>Índice de forma</b>	2,66	2,48
<b>Adesividade ao ligante</b>	Má adesividade	Boa adesividade

As amostras apresentaram diâmetro máximo de 19,1 mm. Os agregados foram classificados como normais, pois apresentaram massa específica entre 2 e 3 g/cm<sup>3</sup>.

O desgaste por abrasão, de acordo com as especificações, deve ser de no máximo 50%. Esta especificação foi atendida pelos dois materiais ensaiados.

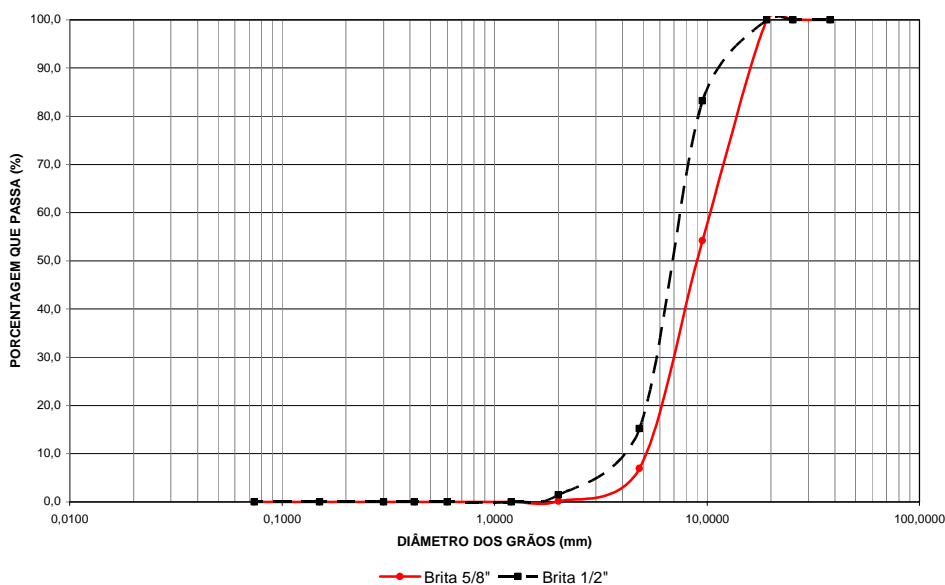
De acordo com o resultado apresentado pelo índice de forma, os agregados têm grãos com forma lamelar, mas encontram-se dentro do limite especificado pelo método adotado.

O ensaio de adesividade indicou que a brita 1/2" apresentou boa adesividade, enquanto que a de brita 5/8" apresentou má adesividade, pois se verificou o descolamento da película de asfalto, após o ensaio (Figura 4.1).



**FIGURA 4.1** Amostras de agregado graúdo após ensaio de adesividade (a) Brita 1/2" (b) Brita 5/8"

O Gráfico 4.1 apresenta as distribuições granulométricas dos agregados graúdos.



**GRÁFICO 4.1** Análise granulométrica dos agregados graúdos que foram aplicados na mistura

#### 4.1.2 Agregados miúdos

Foi empregada uma mistura de dois tipos de agregado miúdo, areia quartzosa e pó de pedra. Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização desses materiais.



TABELA 4.2 Resultados dos ensaios em agregados miúdos

RESULTADOS	AREIA	PÓ DE PEDRA
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,618	2,604
Equivalente de areia (%)	89,42	66,69
Adesividade ao ligante	Boa adesividade	Boa adesividade

As amostras apresentaram diâmetro máximo de 4,75 mm. Os agregados são classificados como normais, pois apresentam massa específica entre 2 e 3 g/cm<sup>3</sup>.

A areia apresentou equivalente de areia médio de 89,42%, com os valores variando de 87,76% a 91,32%. O do pó de pedra foi 66,69%, com valores variando de 63,95% a 68,54%. As amostras apresentam valores superiores a 55%, logo atendem as especificações.

Os resultados dos ensaios de adesividade indicaram que tanto a areia quanto o pó de pedra apresentam descolamento da película betuminosa somente na solução 03 (M/64). Sendo assim, estes agregados apresentam uma adesividade satisfatória.

As curvas granulométricas dos agregados miúdos estão apresentadas no Gráfico 4.2.

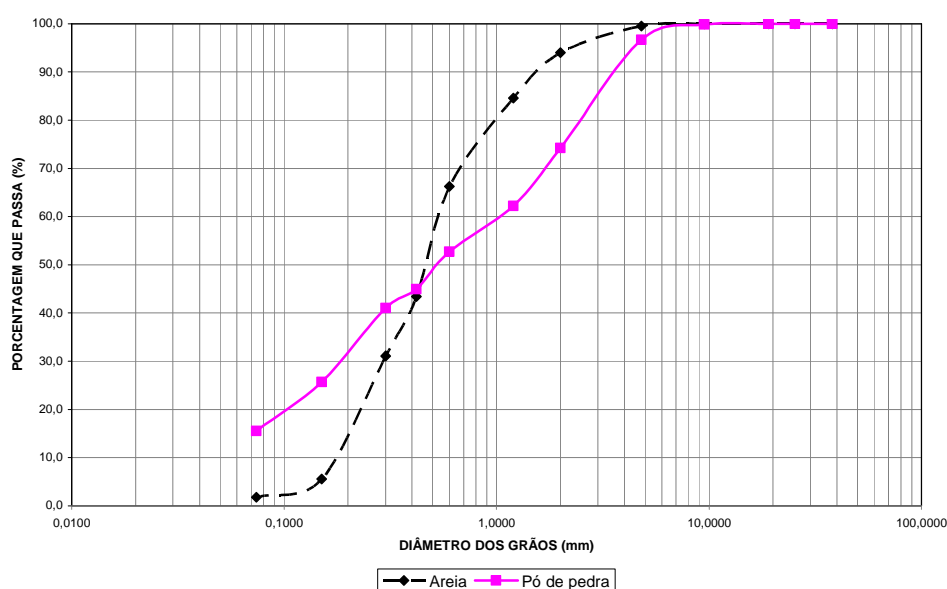


GRÁFICO 4.2 Análise granulométrica dos agregados miúdos que foram aplicados na mistura

Foi observado que 1,83% dos grãos de areia passaram na peneira N<sup>o</sup>. 200 (0,075mm), sendo assim, este material foi considerado *filler*. A amostra de pó de pedra apresentou 15,49% de *filler* em sua constituição.

#### 4.1.3 Filler

O material de enchimento (ou *filler*) empregado foi Cimento Portland CII Z - 32, cuja massa específica é de 2,766 g/cm<sup>3</sup>. Na Tabela 4.3 é apresentada a granulometria por peneiramento do material.

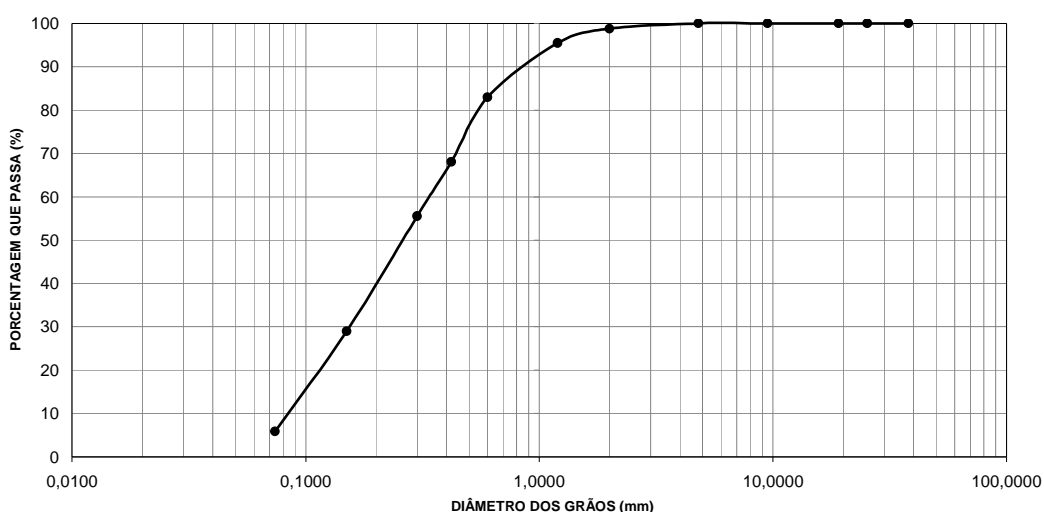
**TABELA 4.3** Granulometria do cimento

PENEIRA	% QUE PASSA
0,42	100,00%
0,18	100,00%
0,074	96,53%

## 4.2 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO LODO *IN NATURA*

- **Caracterização física**

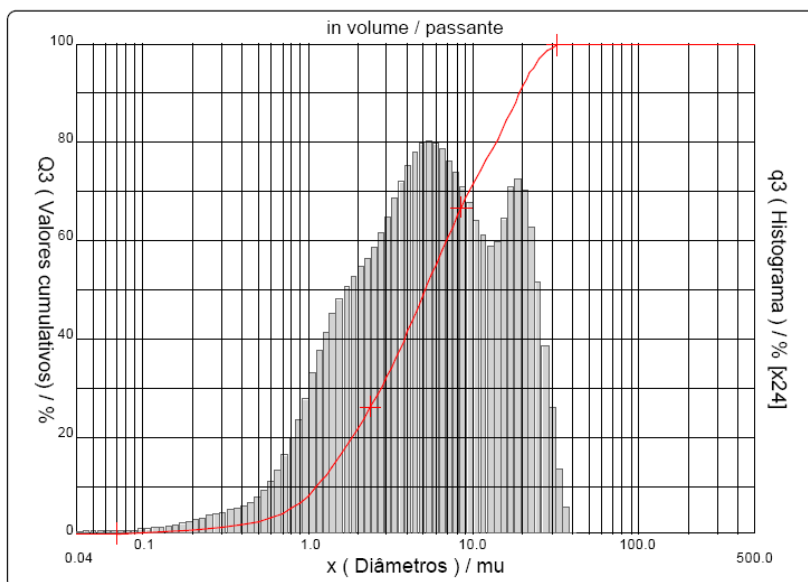
O lodo *in natura* apresenta massa específica igual a 1,740 g/cm<sup>3</sup>. É considerado um agregado leve, pois sua massa específica é inferior a 2g/cm<sup>3</sup>. A curva granulométrica é apresentada no Gráfico 4.3.



**GRÁFICO 4.3** Análise granulométrica do lodo *in natura* por peneiramento

De acordo com esta análise, o material tem uma distribuição contínua e é formado por grãos que o caracterizam como um agregado miúdo. Observa-se que a amostra apresenta 5,83% de grãos com diâmetro inferior a 0,075mm.

A análise da distribuição das partículas de lodo *in natura* com diâmetro inferior a 0,15mm encontra-se apresentada no Gráfico 4.4.



**GRÁFICO 4.4** Análise granulométrica do lodo *in natura* por difração a laser

De acordo com os resultados deste ensaio, o material apresenta diâmetro médio de 7,77 $\mu$ m. A curva granulométrica representativa dessa amostra indica que 100% das partículas apresentam diâmetro inferior a 40  $\mu$ m e 91,47% tiveram diâmetro inferior a 20  $\mu$ m. Essa distribuição é considerada uniforme.

O equivalente areia médio do material é 56,13%. Os valores apresentaram variação de 54,90% a 57,36%. Este valor está dentro do especificado que é de no mínimo 55%. Ele está muito próximo do limite devido à quantidade de material fino existente na amostra. Sendo assim, o lodo *in natura* poderia substituir totalmente a areia.

O material apresenta má adesividade ao ligante asfáltico, pois durante a realização do ensaio, a desagregação da amostra aconteceu em água destilada.

- **Caracterização química e mineralógica**

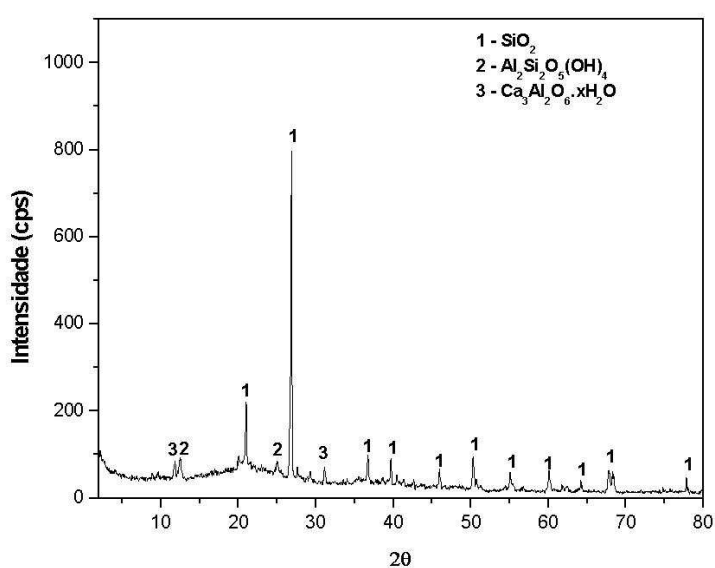
A análise química do material é apresentada na Tabela 4.4. Os resultados indicam que os principais componentes do lodo *in natura* são Dióxido de Silício

(SiO<sub>2</sub>), Alumina ou Óxido de Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Óxido de Ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Óxido de Cálcio (CaO) e Trióxido de Enxofre (SO<sub>3</sub>).

**TABELA 4.4** Resultados da fluorescência de raios-X do lodo *in natura*

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
38,31%	2,21%	15,84%	11,56%	0,10%	2,01%	12,49%	0,06%
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>SrO</b>	<b>ZnO</b>	<b>CuO</b>	<b>ZrO<sub>2</sub></b>	<b>NiO</b>
1,57%	2,95%	11,18%	0,07%	1,09%	0,31%	0,17%	0,09%

A análise mineralógica por difração de raios-X é apresentada no Gráfico 4.5.

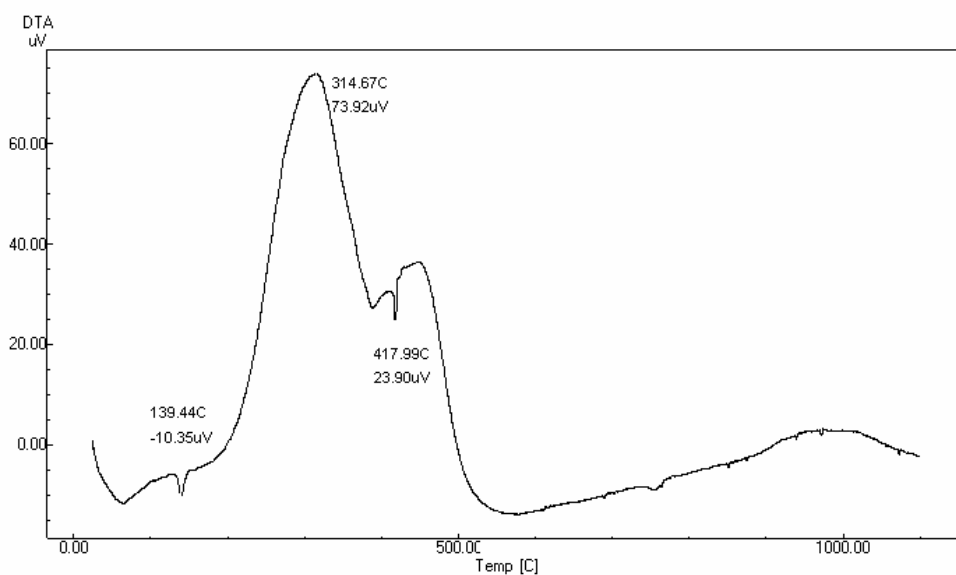


**GRÁFICO 4.5** Difração de raios-X do lodo *in natura*

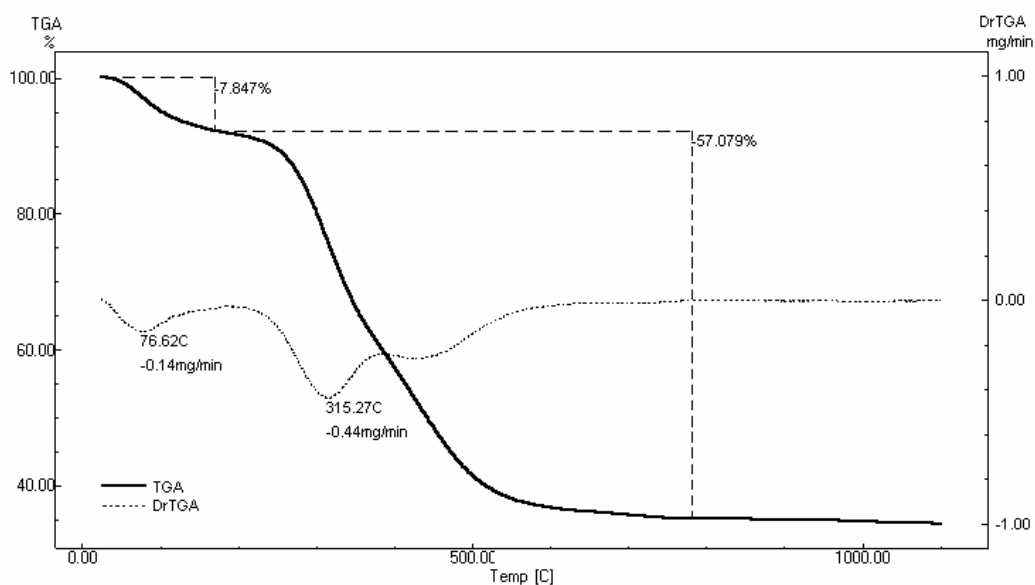
Esta é uma análise qualitativa que mostra a presença de quartzo (1), caulinita (2) e aluminato de cálcio (3).

- **Caracterização térmica**

As análises térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TGA) do lodo *in natura* estão apresentadas, respectivamente, nos Gráficos 4.6 e 4.7.



**GRÁFICO 4.6** Análise térmica diferencial (DTA) do lodo *in natura*



**GRÁFICO 4.7** Análise termogravimétrica (TGA) e termogravimétrica derivada (DrTGA) do lodo *in natura*

Os resultados das análises térmicas foram feitos em conjunto. A perda de massa relativa à desidratação da amostra é de 7,847%. Observa-se 57,079% de perda de massa relativa à calcinação da matéria orgânica. A partir de 780°C não se nota variação significativa de massa com a temperatura.

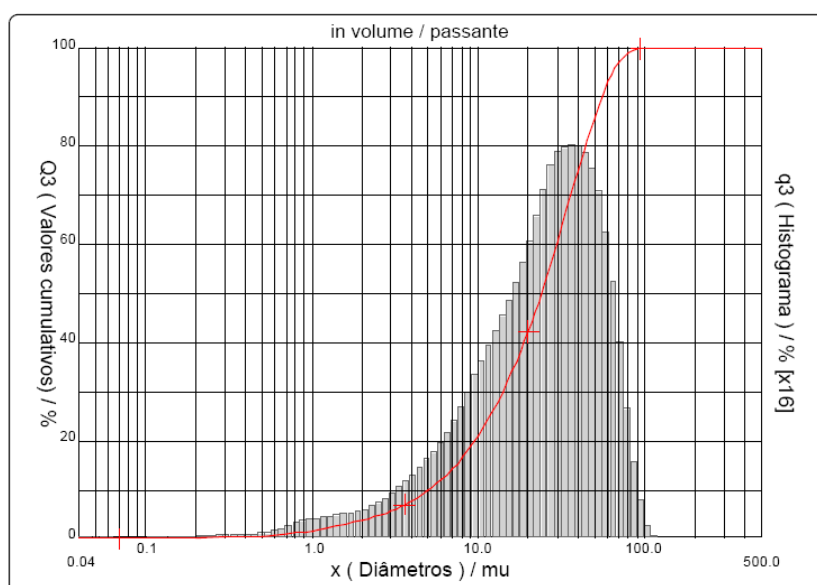
- **Análise de risco ambiental**

Os resultados das análises dos extratos lixiviado e solubilizado indicam que o lodo *in natura* é classificado, de acordo com a NBR 10.004, como um resíduo classe II-A (não inerte e não perigoso), não reativo e não corrosivo.

### 4.3 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO LODO CALCINADO

- **Caracterização física**

O material apresenta massa específica igual a  $2,860 \text{ g/cm}^3$ . A análise de distribuição das partículas por difração a laser é apresentada no Gráfico 4.8.



**GRÁFICO 4.8** Análise granulométrica do lodo calcinado por difração a laser

O resultado do ensaio confirma que o resíduo pode ser considerado um *filler*, já que de acordo com esta análise, aproximadamente 98,28% da amostra têm diâmetro inferior a 75 µm.

A distribuição do material é uniforme e o diâmetro médio das partículas foi de 27,44 µm. Sabe-se ainda que 75,32% das partículas tiveram diâmetro inferior a 40 µm e 42,18% apresentaram tamanho inferior a 20 µm.

- **Análise de risco ambiental**

A análise química preliminar do lixiviado da amostra de lodo calcinado por espectrofotometria de absorção atômica encontra-se na Tabela 4.5.

**TABELA 4.5** Análise química do lixiviado por espectrofotometria de absorção atômica

<b>DETERMINAÇÕES</b>	<b>VALOR ENCONTRADO (mg/l)</b>	<b>LIMITE MÁXIMO</b>
<b>Cádmio (Cd)</b>	0,006	0,5
<b>Cobre (Cu)</b>	0,358	
<b>Chumbo (Pb)</b>	0,048	1,0
<b>Cromo (Cr)</b>	0,000	5,0
<b>Manganês (Mn)</b>	0,212	
<b>Níquel (Ni)</b>	0,022	
<b>Zinco (Zn)</b>	1,694	
<b>Ferro (Fe)</b>	3,060	

De acordo com a NBR 10.004, os valores encontrados para os metais pesados são inferiores as concentrações máximas permitidas.

#### **4.4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO**

O CAP empregado na mistura foi do tipo 50/70. A caracterização do mesmo foi feita pela LUBNOR e encontra-se na Tabela 4.6.

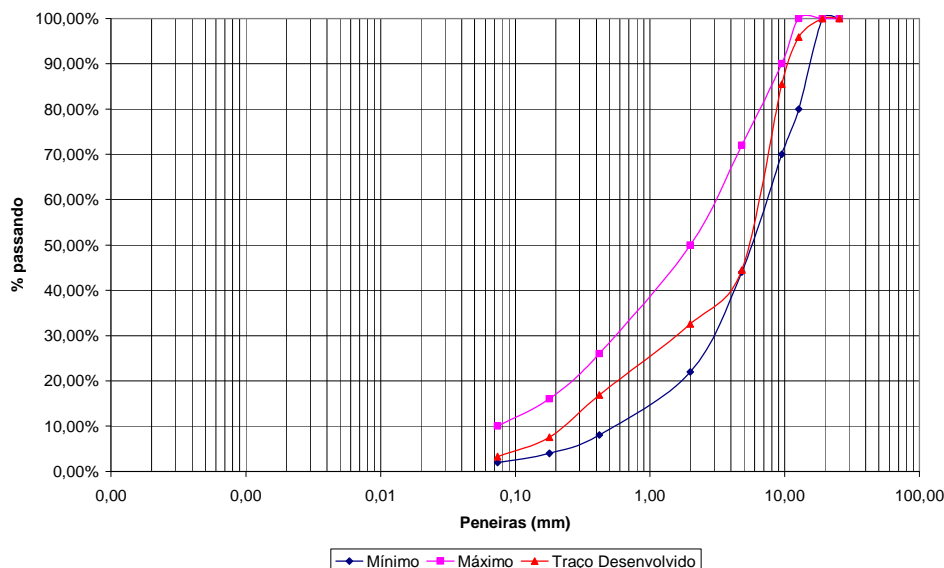
**TABELA 4.6** Caracterização do CAP 50/70

<b>ENSAIO</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>UNIDADE</b>
<b>Penetração</b>	D5	50 a 70	63	0,1 mm
<b>Ponto de amolecimento</b>	D36	46 (mínimo)	48,2	°C
<b>Viscosidade Saybolt Furol a 135°C</b>	E102	141 (mínimo)	220	s
<b>Viscosidade Brookfield 135°C-SP21 20RPM</b>	D4402	274(mínimo)	437	cp
<b>Viscosidade Brookfield 150°C-SP21</b>	D4402	12(mínimo)	219	cp
<b>Viscosidade Brookfield 177°C-SP21</b>	D4402	57 a 285	79	cp
<b>Ductibilidade a 25°C</b>	D113	60(mínimo)	>150	cm
<b>Solubilidade no Tricloroetileno</b>	D2042	99,5(mínimo)	99,9	%massa
<b>Ponto de fulgor</b>	D92	235(mínimo)	298	°C
<b>Índice de Susceptibilidade Térmica</b>	X018	-1,5 a 0,7	-1,2	
<b>Aquecimento a 177°C</b>	X215	Não espuma	Não espuma	

Fonte: LUBNOR (2006)

#### 4.5 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA CONVENCIONAL

O Gráfico 4.9 apresenta a curva granulométrica da mistura convencional.



**GRÁFICO 4.9** Curva granulométrica da mistura convencional

A curva ajusta-se dentro dos limites estabelecidos nas especificações. Esta distribuição apresenta uma mistura contínua. A Tabela 4.7 mostra as características volumétricas e mecânicas da mistura convencional. É importante ressaltar que estes valores foram obtidos usando o teor de 5,5% de CAP.

**TABELA 4.7** Características volumétricas e mecânicas da mistura convencional

CARACTERÍSTICA	N	MÉDIA	D. PADRÃO	MÍN	MÁX
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	6	2,326	0,004	2,321	2,331
Vazios no agregado mineral (%)	6	16,378	0,157	16,185	16,573
Relação betume vazios (%)	6	76,070	0,871	74,997	77,150
Volume de vazios (%)	6	3,920	0,180	3,698	4,144
Estabilidade após estufa (kgf)	3	453,00	31,921	427,10	488,66
Estabilidade após imersão (kgf)	3	585,46	51,126	533,88	636,12

A mistura convencional apresenta todas as características volumétricas dentro dos limites especificados. Observa-se que o comportamento mecânico de estabilidade com condicionamento em estufa não obteve o valor mínimo exigido. No entanto, fez-se a aplicação dessa mistura, pois o objetivo do trabalho é comparar o comportamento das misturas não convencionais em relação a convencional.



## 4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DO EXPERIMENTO 01

### 4.6.1 Resultados da caracterização volumétrica

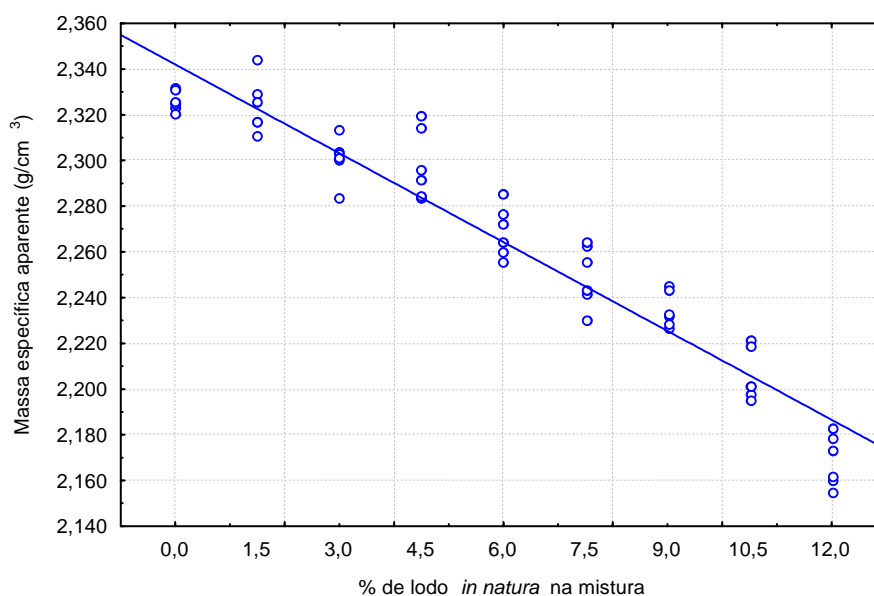
#### 4.6.1.1 Massa específica aparente

A Tabela 4.8 apresenta os valores médios da massa específica aparente das misturas do Experimento 01.

**TABELA 4.8** Variação média da massa específica aparente dos corpos de prova com o acréscimo de lodo *in natura* a mistura

% LODO <i>IN NATURA</i>	N	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO-PADRÃO
0	6	2,326	2,321	2,332	0,004
1,5	6	2,324	2,311	2,344	0,012
3	6	2,301	2,284	2,313	0,010
4,5	6	2,298	2,283	2,320	0,015
6	6	2,269	2,256	2,286	0,012
7,5	6	2,250	2,230	2,265	0,013
9	6	2,235	2,227	2,246	0,008
10,5	6	2,206	2,196	2,222	0,011
12	6	2,169	2,155	2,183	0,011

O Gráfico 4.10 apresenta a variação da massa específica nas misturas.



**GRÁFICO 4.10** Variação da massa específica dos corpos de prova em função da porcentagem de lodo *in natura*

Observa-se que à medida que foi realizada a substituição da areia por lodo *in natura* ocorre um decréscimo na massa específica da mistura. Este fato acontece principalmente devido a variação volumétrica do corpo de prova à medida que o lodo é adicionado, já que a massa específica do lodo *in natura* é  $1,74\text{g/cm}^3$ , enquanto que a da areia é de  $2,618\text{ g/cm}^3$ .

#### 4.6.1.2 Volume de vazios

A Tabela 4.9 apresenta as densidades máximas teóricas e o volume de vazios médio das misturas.

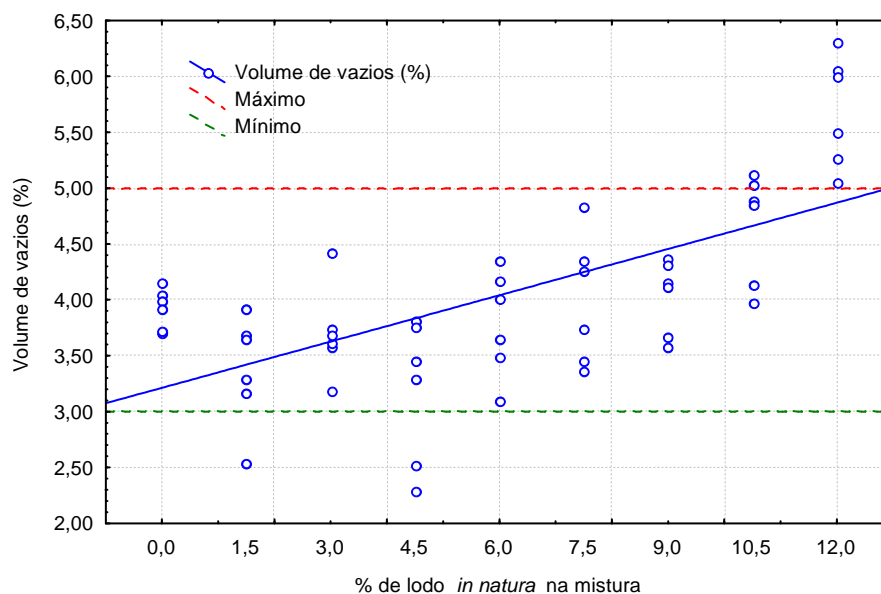
**TABELA 4.9** Variação média do volume de vazios dos corpos de prova com o acréscimo de lodo *in natura* a mistura

% LODO <i>IN NATURA</i>	N	DMT	VOLUME DE VAZIOS(%)	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO-PADRÃO
0	6	2,421	3,920	3,698	4,144	0,180
1,5	6	2,405	3,376	2,542	3,919	0,492
3	6	2,390	3,703	3,188	4,419	0,401
4,5	6	2,374	3,186	2,285	3,816	0,644
6	6	2,359	3,793	3,098	4,355	0,470
7,5	6	2,344	4,002	3,371	4,833	0,572
9	6	2,329	4,034	3,572	4,374	0,334
10,5	6	2,314	4,663	3,979	5,117	0,485
12	6	2,299	5,693	5,050	6,301	0,496

Os resultados apresentados na Tabela 4.9 indicam que à medida que o lodo *in natura* é adicionado à mistura, a DMT tende a diminuir.

Avaliando os resultados médios apresentados acima, observa-se que a mistura 01 (convencional) apresenta um volume de vazios próximo do valor ideal de projeto, que é de 4%. As misturas não convencionais 06 e 07 são as que apresentam os melhores resultados.

O Gráfico 4.11 apresenta a variação dos vazios devido ao acréscimo gradativo de lodo *in natura* à mistura.



**GRÁFICO 4.11** Variação do volume de vazios das misturas em função da porcentagem de lodo *in natura* adicionada

De acordo com os resultados apresentados, observa-se que à medida que o lodo foi adicionado à mistura, o volume de vazios tende a aumentar.

Os resultados médios indicam que as misturas que continham até 10,5% de lodo *in natura* em sua composição tendem a satisfazer as especificações. A mistura 09, com 12% de lodo em sua constituição, apresenta valores de vazios superiores ao máximo permitido.

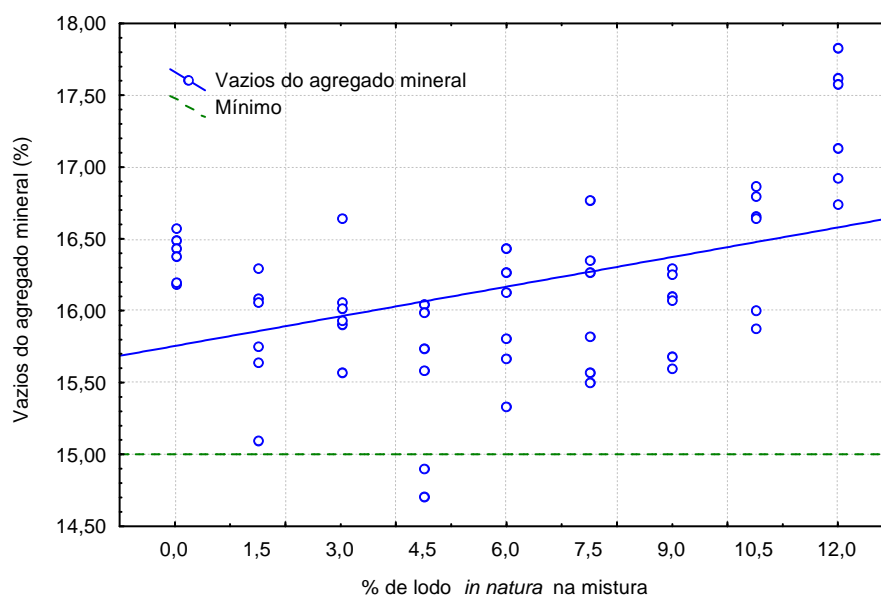
#### 4.6.1.3 Vazios do agregado mineral

A Tabela 4.10 apresenta os valores médios dos vazios do agregado mineral nas misturas.

**TABELA 4.10** Variação média dos vazios do agregado mineral nas misturas

% LODO IN NATURA	N	VAZIOS DO AGREGADO MINERAL (%)	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO-PADRÃO
0	6	16,378	16,185	16,573	0,157
1,5	6	15,823	15,096	16,295	0,429
3	6	16,026	15,577	16,651	0,350
4,5	6	15,495	14,708	16,045	0,562
6	6	15,946	15,339	16,437	0,410
7,5	6	16,051	15,499	16,778	0,501
9	6	16,002	15,598	16,300	0,292
10,5	6	16,478	15,879	16,876	0,425
12	6	17,306	16,743	17,840	0,435

O Gráfico 4.12 apresenta a variação dos vazios do agregado mineral nas misturas.



**GRÁFICO 4.12** Variação dos vazios do agregado mineral nas misturas

Observa-se que os vazios do agregado mineral tendem a aumentar com a adição de lodo *in natura*. Os valores médios estão dentro das especificações. No entanto, observa-se que alguns corpos de prova com 4,5% de lodo *in natura* apresentam valores inferiores ao especificado. Verifica-se ainda que esta mistura é a que apresenta maior dispersão dos resultados.

#### 4.6.1.4 Relação betume vazios

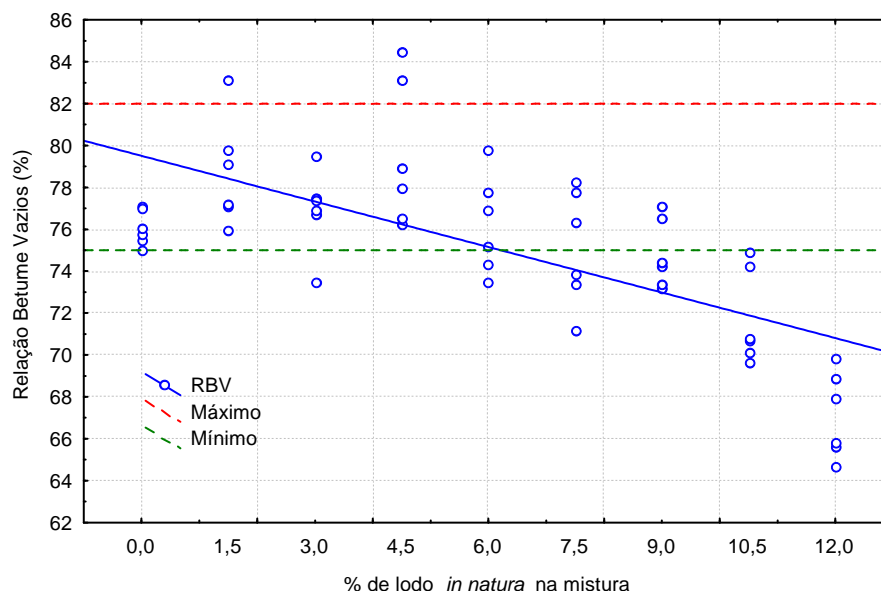
A Tabela 4.11 apresenta a variação dos valores médios da RBV nas misturas à medida que lodo *in natura* é adicionado.

**TABELA 4.11** Variação média da relação betume vazios nas misturas

% LODO <i>IN NATURA</i>	N	RBV (%)	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO-PADRÃO
0	6	76,070	74,997	77,150	0,871
1,5	6	78,719	75,951	83,158	2,580
3	6	76,932	73,459	79,533	1,972
4,5	6	79,541	76,214	84,466	3,472
6	6	76,261	73,503	79,802	2,350
7,5	6	75,140	71,194	78,249	2,774
9	6	74,815	73,165	77,097	1,641

<b>10,5</b>	6	71,750	69,677	74,940	2,247
<b>12</b>	6	67,149	64,679	69,838	2,044

O Gráfico 4.13 apresenta a variação da RBV nas misturas.



**GRÁFICO 4.13** Variação da relação betume vazios em função da porcentagem de lodo *in natura*

Observa-se que à medida que o lodo é adicionado à mistura, a RBV tende a decrescer. Isto ocorre devido ao aumento do volume de vazios das misturas, já que a porcentagem de betume foi constante.

Os resultados médios mostram que as misturas com até 7,5% de lodo *in natura* (mistura 06) encontram-se dentro dos limites estabelecidos pelo DNIT. As misturas 07, 08 e 09 não se enquadram nas especificações.

## 4.6.2 Resultados da caracterização mecânica

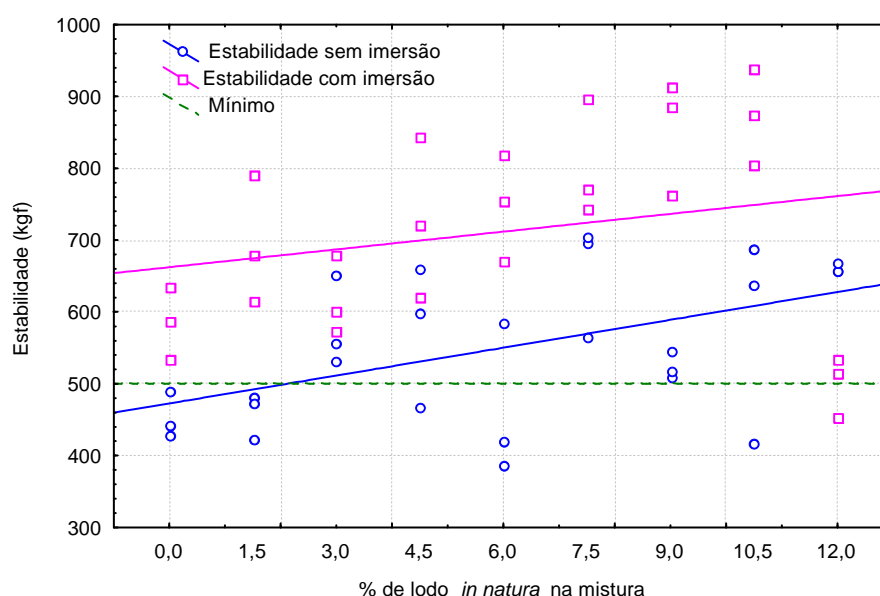
### 4.6.2.1 Estabilidade

A Tabela 4.12 apresenta os valores médios da variação da estabilidade, com condicionamento em estufa e com condicionamento em banho-maria (imersa), das misturas à medida que foi adicionado lodo.

TABELA 4.12 Variação média das estabilidades nas misturas

% LODO <i>IN</i> <i>NATURA</i>	N	ESTABILIDADE EM ESTUFA (kgf)	DESVIO- PADRÃO	ESTABILIDADE IMERSA (kgf)	DESVIO- PADRÃO
0	3	453,00	31,922	585,46	51,126
1,5	3	458,78	32,845	695,24	88,363
3	3	580,15	62,695	617,61	55,912
4,5	3	575,01	98,547	728,39	111,824
6	3	464,42	105,366	748,25	74,040
7,5	3	655,24	79,347	803,31	81,021
9	3	524,18	19,983	853,92	80,167
10,5	3	580,72	145,023	872,76	67,584
12	3	660,32	5,791	501,10	41,178

O Gráfico 4.14 apresenta a variação das estabilidades com e sem imersão em função do acréscimo de lodo *in natura* às misturas.



**GRÁFICO 4.14** Variação das estabilidades em função da porcentagem de lodo *in natura* e do tipo de condicionamento dado

Observa-se que à medida que o lodo *in natura* é adicionado à mistura, a estabilidade tende a crescer. Isto ocorre devido ao incremento de *filler* que o lodo *in natura* proporciona a mistura. A adição de *filler* torna a mistura mais rígida, pois o mesmo proporciona o aumento da viscosidade do CAP.

A Tabela 4.13 apresenta a variação percentual de *filler* nas misturas devido ao acréscimo de lodo.

**TABELA 4.13** Variação do *filler* total da mistura, em função da porcentagem de lodo adicionada

MISTURAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
% total de <i>filler</i> na mistura	3,68	3,74	3,80	3,86	3,92	3,98	4,04	4,10	4,16
% de <i>filler</i> do lodo <i>in natura</i>	0	0,09	0,17	0,26	0,35	0,44	0,52	0,61	0,70
% de lodo <i>in natura</i> na mistura	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12

A variação da estabilidade em função da porcentagem de lodo *in natura* apresenta-se crescente tanto para as misturas testadas com condicionamento em estufa, quanto para as testadas com condicionamento em banho-maria.

No entanto, observa-se ainda que a mistura com 12% de lodo *in natura* é influenciada pelo tipo de condicionamento dado. Ou seja, os corpos de prova com condicionamento em estufa tendem a ter estabilidades maiores que os corpos de prova com condicionamento em banho-maria. Sendo assim, não se aconselha empregos de teores superiores a 12% de lodo *in natura*.

#### 4.6.3 Relação de resistência à tração (RRT)

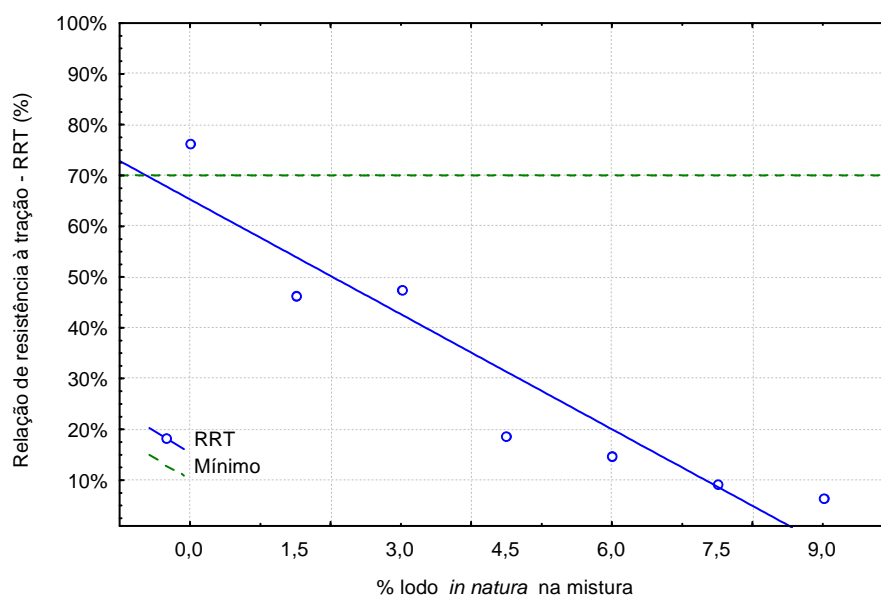
A Tabela 4.14 apresenta os valores da resistência a tração por compressão diametral para os corpos de prova condicionados a 25°C (Grupo 1) e os corpos de prova condicionados no ciclo de saturação, resfriamento e aquecimento (Grupo 2). Apresenta-se os valores da relação de resistência a tração das misturas à medida que o lodo *in natura* é adicionado.

**TABELA 4.14** Variação da resistência à tração por compressão diametral e da relação de resistência a tração das misturas com lodo *in natura*

MISTURAS	% LODO <i>IN NATURA</i>	GRUPO	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)	RELAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (%)
1	0	1	0,462	76,45
		2	0,353	
2	1,5	1	0,450	46,29
		2	0,208	
3	3	1	0,395	47,45
		2	0,187	

4	4,5	1	0,385	18,67
		2	0,072	
5	6	1	0,413	15,00
		2	0,062	
6	7,5	1	0,429	9,22
		2	0,040	
7	9	1	0,409	6,40
		2	0,026	

O Gráfico 4.15 apresenta os resultados da variação da RRT nas misturas à medida que é adicionado lodo *in natura*.



**GRÁFICO 4.15** Variação da RRT em função da porcentagem de lodo *in natura*

Observa-se que somente a mistura convencional atinge ao mínimo recomendado ( $RRT=0,70$ ). No entanto, esta análise permite avaliar preliminarmente o comportamento das misturas. Sendo assim, observa-se que à medida que o lodo *in natura* é adicionado às misturas, a RRT tende a diminuir. Ou seja, a adição de lodo compromete a adesividade das misturas.

## 4.7 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DO EXPERIMENTO 02

### 4.7.1 Resultados da caracterização volumétrica

#### 4.7.1.1 Massa específica aparente

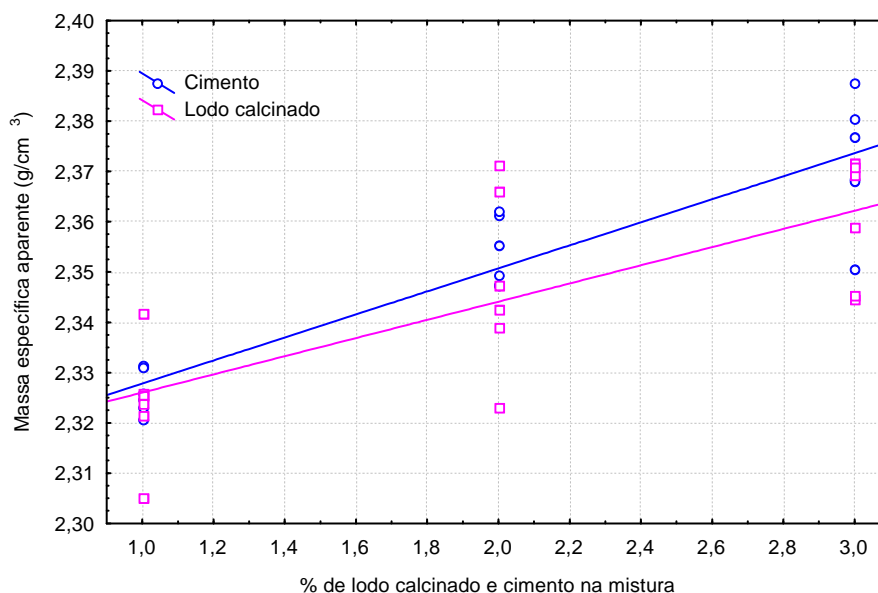
A Tabela 4.15 apresenta a variação da massa específica aparente das misturas do Experimento 02.



**TABELA 4.15** Variação média da massa específica aparente com o acréscimo de lodo calcinado e cimento as misturas

MISTURAS		N	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO-PADRÃO
Cimento	1 %	6	2,326	2,321	2,332	0,004
	2%	6	2,354	2,347	2,362	0,007
	3%	6	2,372	2,351	2,388	0,013
Lodo calcinado	1 %	6	2,324	2,305	2,342	0,012
	2%	6	2,349	2,323	2,371	0,018
	3%	6	2,360	2,345	2,372	0,013

O Gráfico 4.16 apresenta a variação das massas específicas das misturas em função do percentual de lodo calcinado e cimento adicionado as misturas.



**GRÁFICO 4.16** Variação da massa específica das misturas em função da porcentagem de lodo calcinado e cimento

Observa-se que à medida que o lodo calcinado e o cimento são adicionados às misturas, a massa específica das mesmas tende a aumentar. As massas específicas das misturas com lodo calcinado tendem há ser um pouco maiores que as das misturas com as mesmas proporções de cimento.

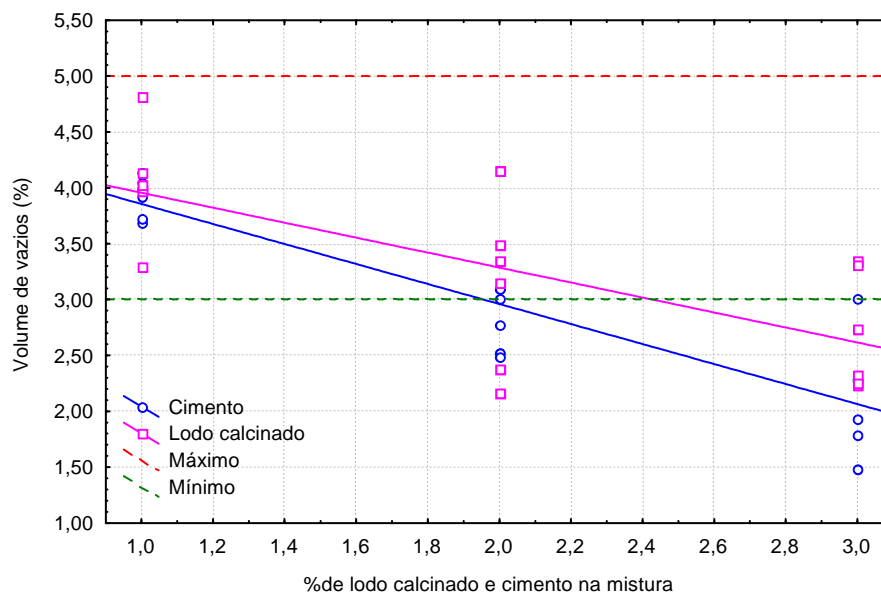
## 4.7.1.2 Volume de vazios

A Tabela 4.16 apresenta os valores das densidades máximas teóricas de cada mistura e a variação do volume de vazios com o acréscimo de lodo calcinado e cimento.

**TABELA 4.16** Variação média do volume de vazios das misturas com o acréscimo de lodo calcinado e cimento

MISTURAS	N	DMT	VOLUME DE VAZIOS (%)	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO-PADRÃO	
<b>Cimento</b>	1 %	6	2,421	3,920	3,698	4,144	0,180
	2%	6	2,422	2,831	2,485	3,098	0,280
	3%	6	2,424	2,130	1,478	3,006	0,528
<b>Lodo calcinado</b>	1 %	6	2,422	4,042	3,303	4,823	0,485
	2%	6	2,424	3,114	2,165	4,157	0,739
	3%	6	2,426	2,702	2,230	3,344	0,519

O Gráfico 4.17 representa a variação dos vazios devido ao acréscimo gradativo de lodo calcinado e cimento às misturas.



**GRÁFICO 4.17** Variação do volume de vazios das misturas em função da porcentagem de lodo calcinado e cimento

Os resultados apresentados indicam que à medida que o lodo calcinado e o cimento são adicionados às misturas, a DMT tende a aumentar. As DMTs das

misturas com lodo calcinado são maiores que as com cimento, para uma mesma proporção.

Observa-se que à medida que o lodo calcinado e o cimento são adicionados às misturas, o volume de vazios tende a diminuir.

As misturas com cimento apresentam menor volume de vazios que às misturas com as mesmas proporções de lodo calcinado. Ou seja, o material que apresenta partículas com maior diâmetro tende a preencher melhor os vazios das misturas.

Para as condições ensaiadas, as misturas com 1% e 2% de lodo calcinado e 1% de cimento atendem as especificações. As misturas com 1% de cimento e 1% de lodo calcinado são as que apresentam o volume de vazios médio próximo do valor ideal de projeto, que é de 4%.

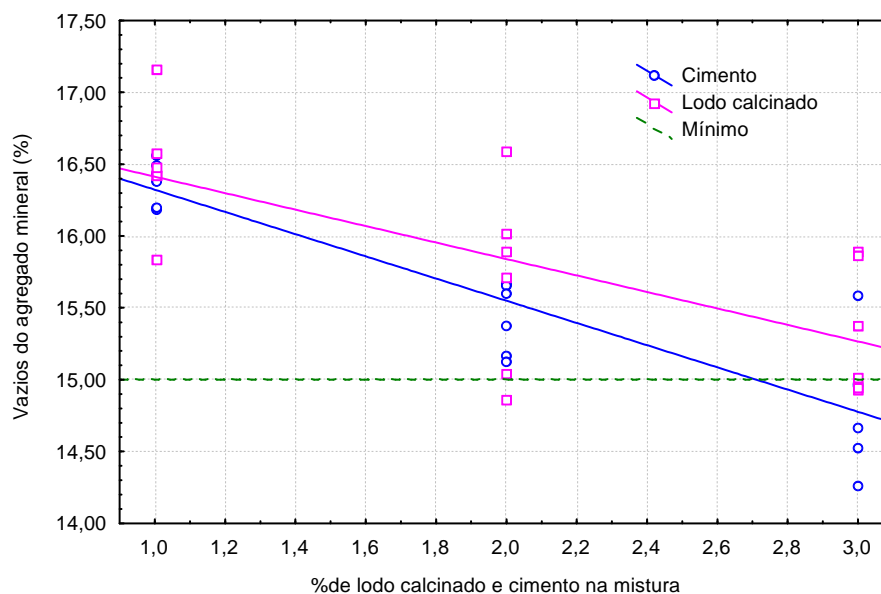
#### 4.7.1.3 Vazios do agregado mineral

A Tabela 4.17 apresenta a variação dos vazios do agregado mineral nas misturas.

**TABELA 4.17** Variação média dos vazios do agregado mineral nas misturas

MISTURAS		N	VAZIOS DO AGREGADO MINERAL (%)	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO-PADRÃO
<b>Cimento</b>	1 %	6	16,378	16,185	16,573	0,157
	2%	6	15,436	15,136	15,669	0,243
	3%	6	14,833	14,266	15,596	0,460
<b>Lodo calcinado</b>	1 %	6	16,488	15,845	17,168	0,422
	2%	6	15,690	14,864	16,597	0,643
	3%	6	15,342	14,930	15,900	0,451

O Gráfico 4.18 apresenta a variação dos vazios do agregado mineral nas misturas.



**GRÁFICO 4.18** Variação dos vazios do agregado mineral nas misturas

Observa-se que os vazios do agregado mineral tendem a diminuir à medida que as porcentagens de lodo calcinado e cimento aumentam na mistura. As misturas com lodo calcinado apresentam maior porcentagem de vazios do agregado mineral que as misturas com as mesmas proporções de cimento. Todas as misturas apresentam VAM dentro das especificações, com exceção da mistura 3C.

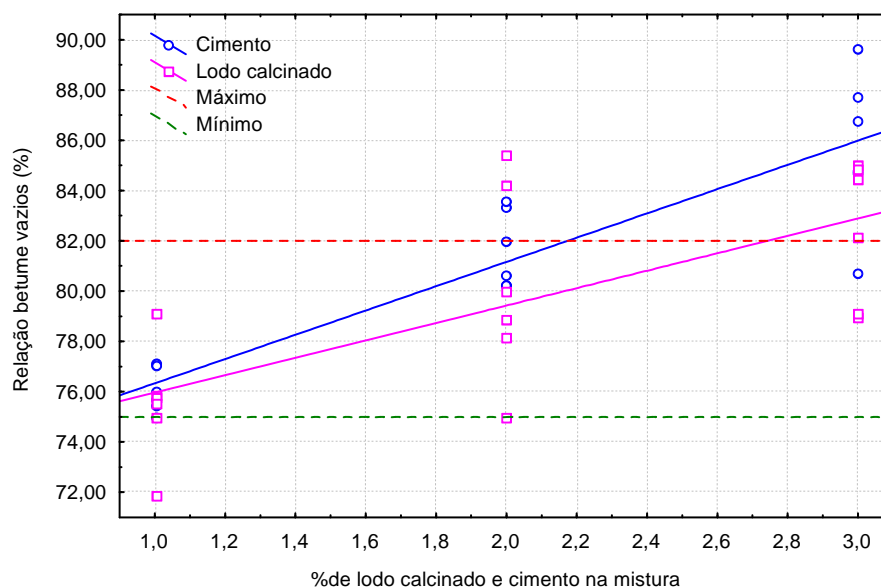
#### 4.7.1.4 Relação betume vazios

A Tabela 4.18 apresenta a variação da RBV nas misturas.

**TABELA 4.18** Variação média da relação betume vazios nas misturas

MISTURAS	N	RELAÇÃO BETUME VAZIOS (%)	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO- PADRÃO
<b>Cimento</b>	1 %	76,070	74,997	77,150	0,871
	2%	81,683	80,228	83,583	1,529
	3%	85,721	80,724	89,637	3,077
<b>Lodo calcinado</b>	1 %	75,533	71,904	79,152	2,312
	2%	80,285	74,955	85,435	3,914
	3%	82,455	78,971	85,066	2,837

O Gráfico 4.19 apresenta a variação da RBV nas misturas.



**GRÁFICO 4.19** Variação da relação betume vazios em função da porcentagem de lodo calcinado e cimento

Observa-se que à medida que o lodo calcinado e o cimento são adicionados às misturas, a RBV tende a aumentar. Isto ocorre devido à redução do volume de vazios das misturas, já que a porcentagem de betume é constante.

Os valores médios das RBV do lodo são menores que as do cimento nas mesmas proporções. Observa-se que somente as misturas com até 2% de adição de lodo e cimento ficam dentro nos limites especificados. As misturas 3L e 3C não atendem as especificações.

#### 4.7.2 Resultados da caracterização mecânica

##### 4.7.2.1 Estabilidade

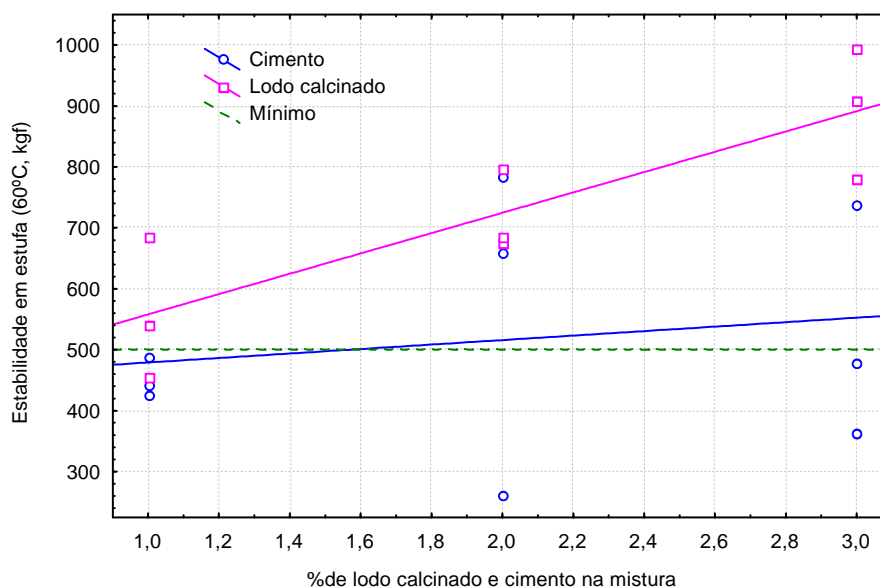
Os resultados da Tabela 4.19 apresentam a variação da estabilidade dos corpos de prova com condicionamento em estufa e em banho-maria (imersa).

**TABELA 4.19** Variação média das estabilidades nas misturas

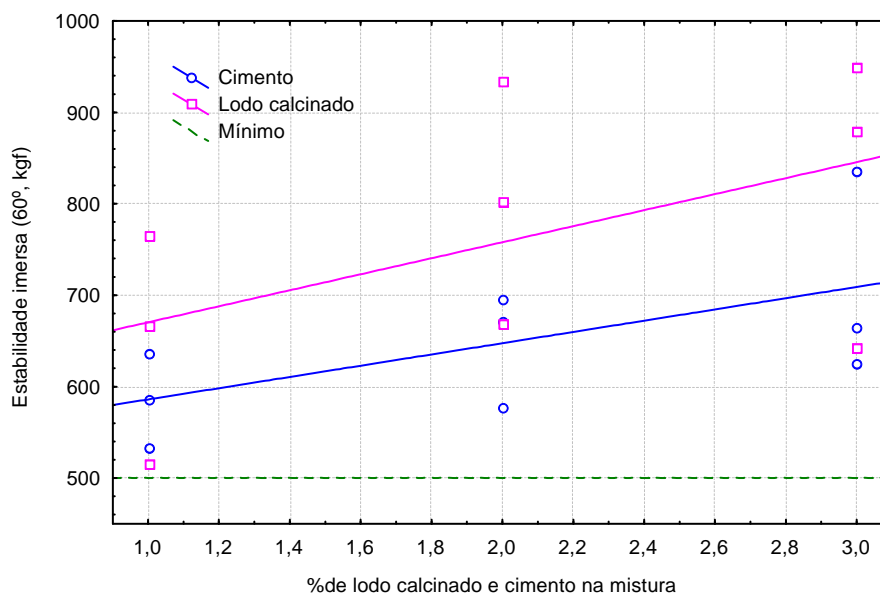
MISTURAS	N	ESTABILIDADE EM ESTUFA (kgf)	DESVIO-PADRÃO	ESTABILIDADE IMERSA (kgf)	DESVIO-PADRÃO	
Cimento	1 %	3	453,00	31,921	585,47	51,126
	2%	3	568,07	272,444	648,44	61,840
	3%	3	526,52	193,117	708,50	112,654

<b>Lodo calcinado</b>	1 %	3	561,25	115,88	648,62	125,814
	2%	3	718,25	67,604	801,35	132,62
	3%	3	894,76	108,089	823,85	159,832

Os Gráficos 4.20 e 4.21 apresentam a variação das estabilidades com e sem imersão em função do acréscimo de lodo calcinado e cimento.



**GRÁFICO 4.20** Variação da estabilidade em estufa nas misturas



**GRÁFICO 4.21** Variação da estabilidade imersa nas misturas

Observa-se que à medida que o lodo calcinado e o cimento são adicionados às misturas, as estabilidades tendem a crescer, isto ocorre por causa do incremento

de *filler* às misturas. A Tabela 4.20 apresenta a variação do *filler* nas misturas devido ao incremento de cimento e lodo calcinado.

**TABELA 4.20** Variação do *filler* nas misturas

MISTURAS		% FILLER NA MISTURA	% DE CIMENTO E LODO CALCINADO
Cimento	1%	3,68	0,97
	2%	4,49	1,93
	3%	5,30	2,90
Lodo calcinado	1%	3,70	0,98
	2%	4,53	1,97
	3%	5,35	2,95

A variação das estabilidades para os dois materiais apresenta-se crescente tanto para as misturas testadas com condicionamento em estufa, quanto para as testadas com condicionamento em banho-maria. Observa-se que a mistura 1C não atende as especificações, como já havia sido apresentado no item 4.4.

As misturas com lodo calcinado apresentam melhor desempenho, quanto à estabilidade, do que as misturas com as mesmas proporções de cimento. Possivelmente há maior proporção de partículas de *filler* aditivo no lodo calcinado do que no cimento.

#### 4.7.3 Relação de resistência à tração (RRT)

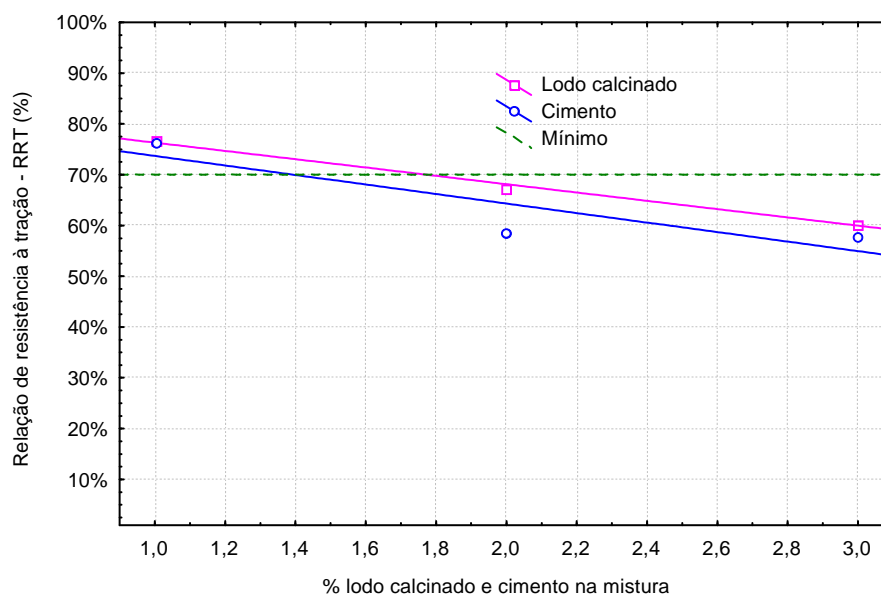
A Tabela 4.21 apresenta os valores das relações de resistência a tração para as misturas do Experimento 02.

**TABELA 4.21** Variação da resistência a tração por compressão diametral e da relação de resistência a tração das misturas com lodo calcinado e cimento

MISTURAS		GRUPO	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)	RELAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (%)
Cimento	1%	1	0,462	76,45
		2	0,353	
	2%	1	0,471	58,78
		2	0,277	
	3%	1	0,485	57,73
		2	0,280	

<b>Lodo calcinado</b>	1%	1	0,450	76,66
		2	0,345	
	2%	1	0,454	67,44
		2	0,306	
	3%	1	0,433	60,30
		2	0,261	

O Gráfico 4.22 apresenta os resultados da variação da RRT.



**GRÁFICO 4.22** Variação da RRT em função da porcentagem de lodo calcinado e cimento

Somente as misturas 1C (convencional) e 1L atingem ao mínimo recomendado ( $RRT=0,70$ ). No entanto, a mistura 2L obteve um valor próximo ao limite.

À medida que o lodo calcinado e cimento são adicionados às misturas, as RRTs tendem a diminuir. Observa-se um decréscimo do volume de vazios das mesmas que devem diminuir os danos causados pela umidade.

No entanto, o resultado apresentado tem comportamento contrário. Neste caso, a adição de *filler* a mistura possivelmente excede a concentração volumétrica crítica do sistema *filler*-betume. Quando isto ocorre, as partículas de *filler* tendem a se aglomerar, diminuindo os vazios preenchidos com betume, até chegar praticamente a se tocarem, tendendo a formar um masticque excessivamente frágil. Isto acarreta um comportamento quebradiço da mistura diante das solicitações de carga e das variações de temperatura.

O lodo calcinado apresenta melhor desempenho do que o cimento.



#### 4.8 AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO RISCO AMBIENTAL

A Tabela 4.22 apresenta as análises químicas dos lixiviados das misturas 1L e 1C.

**TABELA 4.22** Análise química do lixiviado das misturas com lodo calcinado e cimento

<b>DETERMINAÇÕES</b>	<b>MISTURA 3L (mg/l)</b>	<b>MISTURA 3C (mg/l)</b>	<b>LIMITES (mg/l)</b>
<b>Cádmio (Cd)</b>	0,010	0,016	0,5
<b>Chumbo (Pb)</b>	0,058	0,120	1,0
<b>Cromo (Cr)</b>	0,000	0,000	5,0

De acordo com esta análise preliminar nenhuma das amostras ensaiadas proporciona risco ambiental, pois os valores encontrados dos metais que representam periculosidade encontram-se abaixo dos limites estabelecidos na NBR 10.004.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

1. Para a composição granulométrica utilizada e com o teor de betume adotado, a mistura com até 7,5% de lodo *in natura* atendem as especificações do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – DNIT. Sendo que, a mistura que apresenta melhor desempenho mecânico e volumétrico é a mistura com 7,5% de lodo *in natura*.
2. Observa-se que a estabilidade da mistura com 12% de lodo *in natura* é influenciada pelo tipo de condicionamento dado aos corpos de prova, para a dosagem adotada.
3. A análise preliminar da susceptibilidade das misturas à umidade indica que todas as misturas com lodo *in natura* não apresentam desempenho satisfatório, sendo assim, a durabilidade das mesmas é influenciada pela umidade. No entanto, estas misturas poderiam ser aplicadas em regiões áridas e semi-áridas.
4. A adição de lodo *in natura* as misturas apresenta como principais características:
  - Comprometimento da adesividade das misturas, representada pela diminuição do valor da relação de resistência à tração;
  - Aumento da estabilidade. Observa-se que a condição de condicionamento dos corpos de prova não influencia o comportamento das misturas;
  - Aumento do volume de vazios das misturas, que implica no aumento dos vazios do agregado mineral e na diminuição da relação betume vazios.
5. A análise de distribuição das partículas de lodo calcinado por difração a laser confirma que ele pode ser considerado um *filler*, pois apresenta 98,28% de suas partículas com diâmetro inferior a 75  $\mu\text{m}$ .
6. As misturas com lodo calcinado apresentam o mesmo comportamento das misturas com cimento. As misturas com 1% e 2% de lodo calcinado e a mistura com 1% de cimento atendem as especificações do DNIT. Sendo que a mistura com 1% de lodo calcinado é a que apresenta melhor desempenho volumétrico e mecânico.
7. As misturas com lodo calcinado apresentam menor susceptibilidade à umidade, quando comparadas às misturas com cimento.
8. Em relação à adição de lodo calcinado e cimento às misturas, observa-se:

- A diminuição do volume de vazios das misturas, que implica no decréscimo dos vazios do agregado mineral e no aumento da relação betume vazios;
  - Aumento da estabilidade;
  - Decréscimo da relação de resistência à tração.
9. Os resultados das análises químicas realizadas tanto nos resíduos quanto nos corpos de prova, indicam, de forma preliminar, que o uso dos mesmos não representa risco ambiental. No entanto, é necessária uma análise mais detalhada que confirme este resultado.

## CAPÍTULO 6: RECOMENDAÇÕES

Para estudos futuros, este trabalho recomenda:

- Empregar uma mistura convencional mais simples, com menor quantidade de agregados envolvidos e apenas um tipo de *filler*;
- Avaliar o comportamento das misturas com porcentagens inferiores a 1,5% de lodo *in natura*;
- Fazer a dosagem de ligante ideal para cada mistura e avaliar o comportamento das mesmas;
- Avaliar a influência da adição de lodo calcinado na viscosidade das misturas;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDIGUERI, D. R.; PARENTE, E. B.; SOARES, J. B. Estudo da aplicabilidade de solo contaminado com petróleo como material para revestimento de vias de baixo volume de tráfego. In: XVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: XVIII ANPET, 2004.

AL SAYED, M. H.; MADANY, I. M.; BUALI A. R. M. Use of sewage sludge ash in asphalt paving mixes in hot regions. In: **Construction and Building Materials**, vol. 9, p. 19 – 23, 1995.

ALLEMAN, J. E. & BERMAN, N. A. Constructive sludge management: Biobrick. **Journal of Environmental Engineering**, v.110, Nº. 2, April, 1984.

American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. T 283-02. **Resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage**. Colorado Procedure L 5109, 1994.

ANDREOLI, C. V. *et al.* Avaliação de parâmetros para secagem e desinfecção do lodo de esgoto em condições artificiais (estufa). In: IX SIMPOSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000. **Anais...** Porto Seguro, 2000.

ANDREOLI, C. V. & FERNANDES, F. Aspectos Metodológicos. In: **Reciclagem de Biossólidos: Transformando Problemas em Soluções**. Curitiba. Sanepar, Finep, 1999. p. 21 - 35.

ANDREOLI, C. V. & PEGORINI, E. S. Gestão pública do uso agrícola do lodo de esgoto. In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O. A. **Impactos ambientais do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna, São Paulo: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. 281 - 312p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 7809. **ÍNDICE DE FORMA DE AGREGADO GRAÚDO PELO MÉTODO DO PAQUÍMETRO**. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. – ABNT. NBR 10.004. **RESÍDUOS SÓLIDOS: Classificação**. Rio de Janeiro, 2004a.

\_\_\_\_\_. – ABNT. NBR 10.005. **PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DE EXTRATO LIXIVIADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. Rio de Janeiro, 2004b.

\_\_\_\_\_. – ABNT. NBR 10.006. **PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DE EXTRATO SOLUBILIZADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. Rio de Janeiro, 2004c.

ATLAS, R. M. Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons: na nvironmental Perspective. **Microbiological Reviews**. p. 180 - 209, March. 1981.

BONET, Ivan Ideraldo. **Valorização Do Resíduo Areia de Fundição (RAF)**. Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q. Florianópolis: UFSC, 2002. 142 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Rio de Janeiro: COPPE – UFRJ, 2004. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004, 135 p.

CARNEIRO, Pedro Henrique. **Efeito da adição de lodo ao inoculo de reator anaeróbio híbrido sólido-líquido tratando fração orgânica de resíduos sólidos urbanos**. São Carlos: EESC, 2005. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CAVALCANTE, V. T. F. & SOARES, J. B. O efeito do tipo e do teor de filler nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. In: 33ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: 33ª RAPv, 2001.

COELHO, V. Consideração sobre o Método Marshall. In: 26ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1992, Aracaju. **Anais...** Aracaju: 26ª RAPv, 1992.

Companhia de águas e esgotos do Rio Grande do Norte – CAERN . **Dados do Sistema de Águas e Esgotos**. Natal: Governo do Rio Grande do Norte. Disponível em: [www.caern.com.br/informestecnicos/dados.html](http://www.caern.com.br/informestecnicos/dados.html) Acesso em: 19 de Janeiro de 2006.

COSTA, H. R. & FERREIRA, C. F. Introdução de Lodos Industriais Contendo Metais Pesados em Tijolos Cerâmicos. **Revista Engenharia Sanitária**, p. 352 - 354. Rio de Janeiro, 1986.

Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – DNIT. DNER - ME 078/1994. **Agregado graúdo**: Adesividade ao ligante betuminoso – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994a. 03 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 079/1994. **Agregado**: Adesividade ao ligante betuminoso – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994b. 04 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 080/1994. **Solos**: Análise granulométrica por peneiramento – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994c. 04 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 082/1994. **Solos**: Determinação do limite de plasticidade – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994d. 03 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 093/1994. **Solos**: Determinação da densidade real – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994e. 04 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 117/1994. **Misturas betuminosas**: Determinação da densidade aparente – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994f. 04 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 122/1994. **Solos:** Determinação do limite de liquidez – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994g. 07 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 043/1995. **Misturas betuminosas a quente:** Ensaio Marshall – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1995. 11 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 054/1997. **Equivalente de areia** – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1997a. 10 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 195/1997. **Agregados:** Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1997b. 06 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 035/1998. **Agregados:** Determinação da abrasão Los Angeles – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1998a. 06 p.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 194/1998. **Agregados:** Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1998b. 04 p.

\_\_\_\_\_. DNIT - ES 031/2006. **Pavimentos Flexíveis:** Concreto asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2006a. 14 p.

\_\_\_\_\_. **Manual de Pavimentação.** 3ª Ed. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR. Pub. 719. Rio de Janeiro, 2006b. 274 p.

FAVONI, C. *et al.* Ceramic processing of municipal sewage sludge (MSS) and steelworks slags (SS). **Ceramics international**, v. 31, N° 5, p. 697 - 702 , 2005.

FERREIRA, A. C, ANDREOLI, C.V. & JÜRGENSEN, D. Produção e Caracterização dos Biossólidos. In: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Uso e Manejo do lodo de esgoto na agricultura.** Rio de Janeiro; PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 1999, p.16 - 25.

FONTES, Cintia Maria Ariani. **Potencialidades da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento portland.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2003. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

FRANKEL, Benjamin B. Pavimentação. In: \_\_\_\_\_. **Engenharia Rodoviária.** Editora Guanabara Dois S.A. Rio de Janeiro, 1980. Cap. 8, p. 269 - 307.

FURLAN, A. P. *et al.* Influência de características dos agregados na susceptibilidade a dano por umidade de misturas asfálticas. In: 17º ENCONTRO DE ASFALTO, 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2004.

GEYER, André Luiz Bortolacci. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto.** Porto Alegre: UFRGS, 2001. 238 p. Tese

(Doutorado) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

HASSAN, H. F. Recycling of municipal solid waste incinerator ash in hot-mix asphalt concrete. In: **Constriction and Building Materials**, Nº 19, p. 91-98, 2005.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Mapa do Saneamento**. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em: 15 de Dezembro de 2005.

LIMA, E. P. C. *et al.* Estudo da termoresistência de ovos de helmintos, coliformes termotolerantes e Escherichia coli. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005. **Anais...** Campo Grande, 2005.

LIMA, Francisco Célio de Araújo Assunção. **Resíduo proveniente do corte de rochas ornamentais: Uma alternativa de utilização**. Campina Grande: UFCG, 2003. 80 p. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2003.

MENESES, Carla Gracy Ribeiro. **Caracterização físico-química e biológica dos resíduos de sistemas tipo tanque séptico-sumidouro da cidade de Natal**. Natal: UFRN, 2001. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001.

MONZÓ, J. *et al.* Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 26, Nº 9, p. 1389 - 1398, 1996.

MOURÃO, Fabrício Augusto Lago. **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA**. Rio de Janeiro: COPPE – UFRJ, 2003. 151 p. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

PENDRYS, J. P. Biodegration of Asphalt Cement – 20 by Aerobic Bactéria. **Applied and Enverionmental Microbiology**. p. 1357 - 1362, June. 1989.

PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias**. (Processo Úmido e Seco). Fortaleza: UFC, 2004. 166 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.

PINHEIRO, J. H. M.; SOARES, J. B.; LEITE, L. F. M. Caracterização de misturas asfálticas com borracha produzidas pelos processos úmido e seco. In: XVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: XVII ANPET, 2003.

SANTOS, Ailton Dias dos. **Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003. 265 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia da Construção Civil. São Paulo, 2003.



SENÇO, Wlastermiler. Construção dos Pavimentos. In: \_\_\_\_\_. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Editora Pini. São Paulo, 2001. v. 2, Cap. 4, p. 1 - 444.

SOUZA, Joselito Novaes (2001). **Utilização do Resíduo Proveniente da Serragem de Rochas Graníticas como Material de Enchimento em Concretos Asfálticos Usinados à Quente**. Campina Grande:UFCG, 2001. 114 p. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande.

SOUZA NETO, Pedro Nogueira de. **Utilização do resíduo com origem no processamento do caulim como filler em misturas asfálticas**. Campina Grande: UFCG, 2004. Dissertação (Mestrado) – Programa Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2004.

SOUZA NETO, P. N. *et al.* Utilização do resíduo com origem no processamento do caulim como filler em misturas asfálticas. In: 35ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 35ª RAPv, 2004.

Unidade de Refino, Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste – LUBNOR. Caracterização do CAP 50/70 aplicado na pavimentação da BR101/RN061 – Trecho entre Ponta Negra e Arês. Fevereiro, 2006.

VASCONCELOS, Kamilla Lima. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias**. Fortaleza: UFC, 2004. 132 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.

ZENG, M. & KSAIBATI, K. Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures containing bottom ash. In: 82<sup>nd</sup> ANNUAL MEETING OF TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2002, Washigton D. C. **Anal ...** Washigton D. C.: 82<sup>nd</sup> TRB, 2002.