

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE DOUTORADO**

**UTILIZAÇÃO DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO ORIUNDOS DAS ATIVIDADES DE
EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DE ESTRADAS**

por

Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena

ORIENTADOR: PROF. HEBER CARLOS FERREIRA, D.S.c.

CO-ORIENTADOR: PROF. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, D.S.c.

TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

Campina Grande

Agosto de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L835u

2008 Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes.

Utilização de cascalhos de perfuração oriundos das atividades de exploração de petróleo em revestimentos asfálticos de estradas / Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena. — Campina Grande, 2008.

142 f. : il.

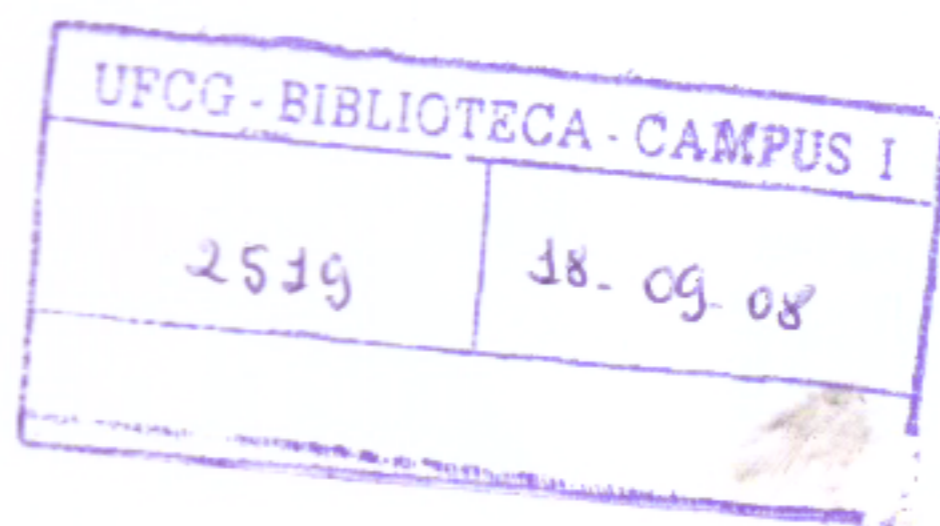
Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira, Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues.

1. Resíduos. 2. Petróleo. 3. Estradas. I. Título.

CDU – .665.775.4(043)

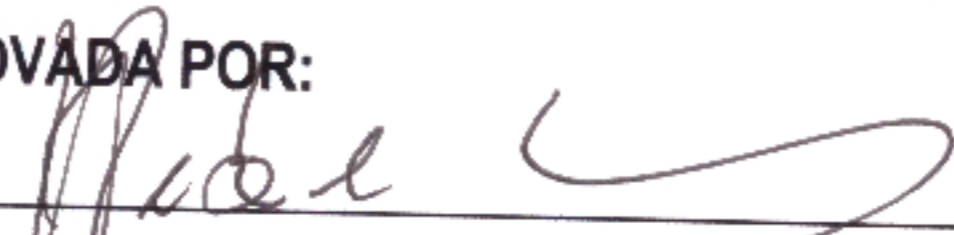


UTILIZAÇÃO DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO ORIUNDOS DAS ATIVIDADES DE
EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DE ESTRADAS

Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena

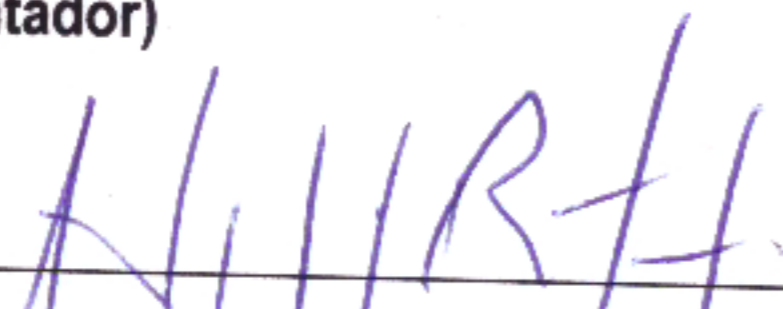
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

APROVADA POR:



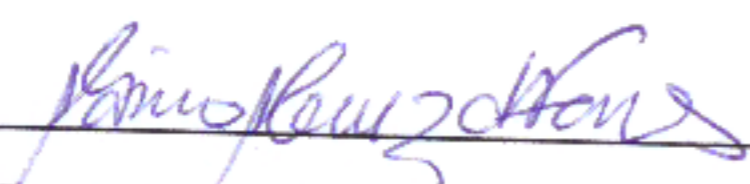
Prof. Heber Carlos Ferreira, D.Sc. (UFCG)

(Orientador)



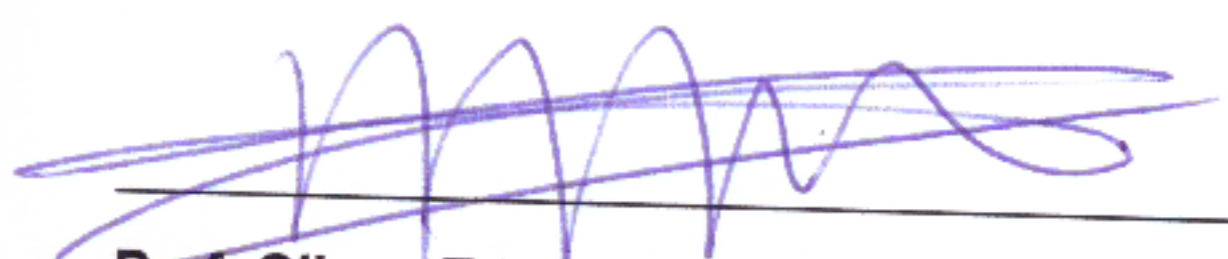
Prof. John Kennedy Guedes Rodrigues, D.Sc. (UFCG)

(Orientador)



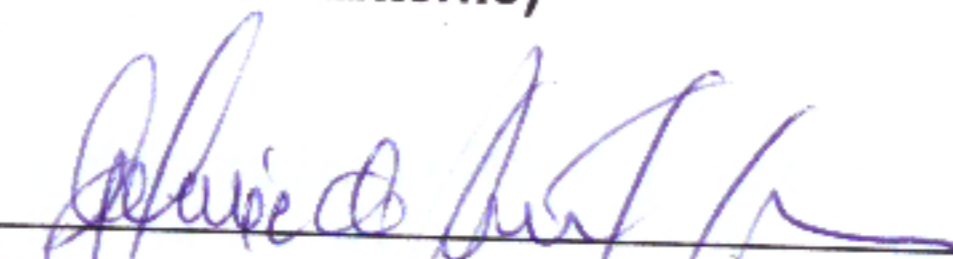
Prof. Márcio Muniz de Farias, PhD (UnB)

(Examinador Externo)



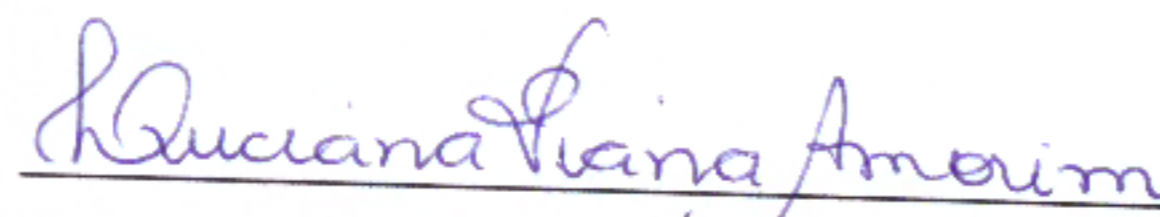
Prof. Gilmar Trindade Araújo, D.Sc. (UFCG)

(Examinador Externo)



Prof. Gelmires Araújo Neves, D.Sc. (UFCG)

(Examinador Interno)



Profa. Luciana Viana Amorim, D.Sc. (UFCG)

(Examinadora Interna)

Campina Grande- PB, 29 de Agosto de 2008

DEDICATÓRIA

*À minha esposa **Nelia**, pelo caminhar, juntos, nas conquistas e dificuldades.*

*A meus pais **Lucena e Analúcia**, pela confiança, e pelo estímulo na busca do conhecimento.*

*Às minhas irmãs **Lêda e Luciana**, e aos demais familiares, pela certeza de que esta conquista é também partilhada com vocês.*

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a quem contribuiu direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho. De forma especial agradeço:

A Deus, por ter-me facultado o dom da vida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande.

Aos meus orientadores Prof. Heber Carlos Ferreira e Prof John Kennedy Guedes Rodrigues, pela orientação, estímulo constante e irrestrito apoio dispensado, fundamentais ao desenvolvimento desta tese.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da UFCG, pelos conhecimentos transmitidos.

A todos os integrantes do PRH-25/ANP, em especial os coordenadores Profa. Wilma Carvalho e posteriormente Prof. Francisco Souza, Pesquisadores Visitantes Prof. Edílson e posteriormente Profa. Luciana Amorim, e funcionários Ana e Anchieta, pelo auxílio e presteza dispensados.

Às empresas PETROBRÁS e AURIZÔNIA PETRÓLEO S.A., pela gentileza em permitir a coleta dos resíduos oleosos.

À Associação Técnico-Científica Ernesto Luís de Oliveira Júnior, ATECEL, pela colaboração e apoio no decorrer da elaboração desta tese.

A todos os colegas do Curso de Doutorado, pois sempre estivemos unidos, visando o bem-estar comum, pela amizade e apoio.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP, pela colaboração financeira, tornando possível a realização do presente trabalho.

Utilização de Cascalhos de Perfuração Oriundos das Atividades de Exploração de Petróleo em Revestimentos Asfálticos de Estradas

Resumo

Em todo o mundo, as operações das indústrias petrolíferas produzem uma quantidade significativa de resíduo oleoso, que por apresentar em sua composição teor de óleo, metais, sais, fenóis dentre outros, requer cuidados específicos. A utilização dos resíduos oleosos (cascalhos de perfuração) em revestimentos de concretos asfálticos de petróleo é uma alternativa a ser considerada, pois, a sua adoção minimizaria o efeito da migração de alguns componentes tóxicos de sua constituição para o lençol freático e os solos que circunvizinham as estradas, tornando-se assim, uma prática ambientalmente mais adequada que a técnica de “roadspreading”. Com esse objetivo foram selecionados resíduos oleosos provenientes da perfuração de poços de petróleo. O resíduo oleoso 1 (poço:4-SES-149A) e o resíduo oleoso 2 (poço:1-POTI-4-RN). Inicialmente foram realizadas caracterizações físicas, mineralógicas e ambientais dos materiais (determinação da massa específica, análise granulométrica, análise química, ATD, ATG, DRX e espectroscopia por absorção atômica) com o objetivo principal de conhecer suas propriedades essenciais para o desenvolvimento da pesquisa. Em seguida, a partir da análise teórica (revisão da literatura) e dos resultados das caracterizações físicas, mineralógicas e ambientais, foram estabelecidos os procedimentos normatizados para a mistura dos materiais e os critérios de aceitação dos resultados obtidos, realizando-se na seqüência a caracterização mecânica (ensaio de viscosidade, penetração, Marshall, resistência à tração por compressão diametral e Lottman). Por fim, foi construído um trecho experimental com o objetivo de verificar a migração ou não de constituintes tóxicos para o entorno do trecho. Os resultados obtidos indicaram que a utilização do resíduo oleoso 1 (*filler*) e o resíduo oleoso 2 (agregado miúdo), em revestimentos asfálticos, obedecendo a limites percentuais, é uma alternativa que deve ser considerada, pois o encapsulamento destes resíduos, em revestimentos asfálticos, não possibilita a lixiviação e contaminação dos solos vicinais pelos constituintes nocivos ao meio-ambiente presentes nos resíduos. Representando assim, uma alternativa para a redução do grave problema ambiental causado pela disposição inadequada dos resíduos oleosos.

Palavras-chave: Resíduo Oleoso, Petróleo, Revestimentos Asfálticos.

Utilization of the Perforation Gravel from the Activities of Petroleum Exploitation in Asphaltic Pavements

Abstract

In the whole world, the operations of the oil industries produce a huge volume of oily residue, which need specific cares due to the presence of oil, metals, salts, phenols and other composites. The alternative utilization of oily residues (perforation gravel) in asphaltic pavements must be considered, once its adoption would minimize the migration effect of the toxic composites to the groundwater and soils that edges the road making this alternative a more suitable one from the environmental point of view, than the roadspreeding one. Aiming this objective, it was selected oily residues from oil drilling wells: the oily residue 1(well:4-SES-149A) and the oily residue 2(well:1-POTI-4-RN). At first, it was realized physical, mineralogic and environmental characterization (specific mass, granulometric analysis, chemic analysis, DTA, TG, XRD and Atomic Absorption Spectroscopy) to discover their mainly properties to the development of this research. Beginning from the bibliographic review and of the results of the referred characterizations, it was possible to establish the normalized proceedings to mix the materials and the acceptance criteria of the achieved results. After these definitions, it was conducted the mechanical characterization essays (viscosity, penetration, Marshall, indirect tensile strength and Lottman). Finally, it was build an experimental pavement aiming to verify the migration of toxic composites to the edges of the pavement. The obtained results indicated that the utilization of the oily residue 1 (filler) and the oily residue 2 (fine aggregate) in asphaltic pavements, obeying to ratio limits is an alternative to be considered, once the encapsulation of these residues doesn't permit the lixiviation and contamination of the vicinal soils by the harmful composites to the environment. It can be concluded that the utilization of the residues can be considered a viable alternative to the minimization of the great environmental impact caused by the inadequate disposal of the oily residues.

Keywords: oily residue, petroleum, asphaltic pavements

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Gerais.....	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Hipótese de Trabalho.....	3
1.4 Objetivos da Pesquisa.....	4
1.4.1 <i>Objetivo Geral</i>	4
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.5 Organização do Trabalho.....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 Revestimentos Asfálticos.....	6
2.1.1 <i>Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)</i>	7
2.1.2 <i>Agregado Mineral</i>	8
2.1.3 <i>Filler – Propriedades e Usos</i>	9
2.1.4 <i>Projeto de Misturas Asfálticas</i>	12
2.1.4.1 Método Marshall.....	13
2.1.4.2 Método Hveem.....	16
2.1.4.3 Metodologia SUPERPAVE.....	16
2.2 Petróleo.....	19
2.2.1 <i>Características do Petróleo</i>	19
2.2.2 <i>Perfuração de Poços de Petróleo</i>	20
2.2.3 <i>Produtos da Perfuração de Poços de Petróleo</i>	21
2.3 Resíduos Industriais.....	25
2.3.1 <i>Reciclagem de Resíduos</i>	25
2.3.2 <i>Classificação dos Resíduos Industriais</i>	26
2.3.3 <i>Minimização da Geração de Resíduos</i>	29
2.3.4 <i>Utilização de Resíduos como Material Alternativo</i>	30
2.4 Resíduos Oleosos da Indústria do Petróleo.....	33
2.4.1 <i>Características dos Resíduos Oleosos</i>	33
2.4.2 <i>Tecnologias de Tratamento Aplicáveis aos Resíduos Oleosos</i>	37

2.4.2.1 Roadspreading.....	37
2.4.2.2 Dilution Burial.....	39
2.4.2.3 Biotratamento.....	40
2.4.2.4 Incineração.....	42
2.4.2.5 Solidificação/Estabilização.....	43
2.4.2.6 Dessorção Térmica.....	44
2.4.2.7 Co-Processamento.....	45
2.5 Considerações Finais sobre a Fundamentação Teórica.....	46
3 ETAPA EXPERIMENTAL.....	48
3.1 Materiais.....	48
3.1.1 Agregados.....	48
3.1.2 Fillers Convencionais.....	49
3.1.3 Resíduos Oleosos.....	49
3.1.4 Cimento Asfáltico de Petróleo.....	51
3.2 Procedimento Experimental.....	52
3.2.1 Caracterização Física e Mineralógica.....	52
3.2.1.1 Determinação da Massa Específica.....	53
3.2.1.2 Análise Granulométrica.....	53
3.2.1.3 Análise Química Convencional.....	53
3.2.1.4 Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG).....	54
3.2.1.5 Difração de Raios-X (DRX).....	54
3.2.1.6 Caracterização Ambiental.....	55
3.2.2 Caracterização Mecânica.....	57
3.2.2.1 Viscosidade Saybolt-Furol.....	57
3.2.2.2 Ensaio de Penetração.....	58
3.2.2.3 Ensaio Marshall.....	58
3.2.2.4 Ensaio de Compressão Diametral.....	59
3.2.2.5 Ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman.....	59
3.2.2.6 Modelo Reduzido.....	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA.....	61
4.1 Agregados.....	61

4.1.1 Massa Específica e Análise Granulométrica.....	61
4.2 Fillers Convencionais.....	63
4.2.1 Massa Específica e Análise Granulométrica.....	63
4.2.2 Análise Química Convencional.....	65
4.3 Resíduo Oleoso 1 (4-SES-149 A).....	65
4.3.1 Massa Específica e Análise Granulométrica.....	65
4.3.2 Análise Química Convencional.....	67
4.3.3 Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG).....	68
4.3.4 Difração de Raios-X.....	68
4.3.5 Caracterização Ambiental.....	69
4.4 Resíduo Oleoso 2 (1-POTI-4-RN).....	71
4.4.1 Massa Específica e Análise Granulométrica.....	71
4.4.2 Análise Química Convencional.....	72
4.4.3 Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG).....	72
4.4.4 Difração de Raios-X.....	74
4.4.5 Caracterização Ambiental.....	77
4.5 Conclusões Parciais.....	79
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	80
5.1 Ensaios com o Mastíque.....	80
5.1.1 Resíduo Oleoso 1 (4-SES-149A).....	80
5.1.1.1 Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol.....	80
5.1.1.2 Ensaio de Penetração.....	82
5.2 Ensaios na Mistura Asfáltica.....	83
5.2.1 Resíduo Oleoso 1 (4-SES-149A)	83
5.2.1.1 Ensaio Marshall.....	83
5.2.1.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	93
5.2.1.3 Ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman.....	97
5.2.2 Resíduo Oleoso 2 (1-POTI-4-RN)	99
5.2.2.1 Ensaio Marshall.....	99
5.2.2.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	102
5.2.2.3 Ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman.....	104
5.3 Modelo Reduzido.....	105

5.4 Conclusões Parciais.....	106
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	109
6.1 Conclusões.....	109
6.2 Sugestões para Futuras Pesquisas.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA.....	119
ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variações do valor da viscosidade cinemática para o CAP 70 (6 P) com os <i>fillers</i> caulim, terra fuller e finos de pó calcário em função do incremento da relação em volume de Filler/CAP70 (PUZINAUSKAS, 1983).....	11
Figura 2 - Relação entre a rigidez e a fração volumétrica máxima de <i>filler</i> (SHASHIDAR & SHENOY, 2002).....	12
Figura 3 - Cascalho de perfuração armazenado em um tanque (MATOS, 2006).....	22
Figura 4 - Roadspreading (FONSECA, 2003).....	37
Figura 5 - Exemplo de estação de dessorção térmica no campo (SOUZA & LIMA, 2002).....	45
Figura 6 - Co-Processamento (MAIA & SILVA, 2006).....	46
Figura 7 - Agregado graúdo – Brita 19 mm.....	48
Figura 8 - Agregado miúdo – Areia de rio.....	49
Figura 9 - Pó calcário – filler convencional.....	49
Figura 10 - Resíduo Oleoso 1 (poço: 4-SES-149A).....	50
Figura 11 - Perfuração do poço 1-POTI-4-RN.....	50
Figura 12 - Mistura homogênea das três formações geológicas do resíduo oleoso 2 (1-POTI-4-RN).....	51
Figura 13 - Equipamentos do ensaio de difração a laser – CILAS 1064.....	53
Figura 14 - Analisador térmico RB 3020.....	54
Figura 15 - Difrátometro de raios-x XRD6000.....	55
Figura 16 - Rotarex – I - 2009- B.....	56
Figura 17 - Equipamento de Espectroscopia por Absorção Atômica - SPECTRO AA 200.....	56
Figura 18 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio Marshall [(a) Compactador Automático (b) Compactador Manual].....	58
Figura 19 - Trecho experimental.....	60
Figura 20 - Distribuição granulométrica – agregados.....	62
Figura 21 - Distribuição dos tamanhos de grãos – cal.....	63
Figura 22 - Distribuição dos tamanhos de grãos – cimento.....	64
Figura 23 - Distribuição dos tamanhos de grãos – pó calcário.....	64
Figura 24 - Distribuição granulométrica – resíduo oleoso 1.....	66

Figura 25 - Distribuição dos tamanhos de grãos – resíduo oleoso 1.....	67
Figura 26 - Curvas de ATD e ATG - resíduo oleoso 1.....	68
Figura 27 - Difratograma do resíduo oleoso 1.....	69
Figura 28 - Distribuição granulométrica – resíduo oleoso 2.....	71
Figura 29 - Curvas de ATD e ATG – Formação Jandaíra.....	73
Figura 30 - Curvas de ATD e ATG – Formação Açú.....	73
Figura 31 - Curvas de ATD e ATG – Embasamento Cristalino.....	74
Figura 32 - Difração de raios-X – Formação Jandaíra.....	75
Figura 33 - Difração de raios-X – Formação Jandaíra (REYES-PÉREZ, 2003).....	75
Figura 34 - Difração de raios-X – Formação Açú.....	76
Figura 35 - Difração de raios-X – Formação Açú (AMORIM, 2007).....	76
Figura 36 - Difração de raios-X – Embasamento Cristalino.....	77
Figura 37 - Viscosidade Saybolt-Furol para o CAP50/70 com os fillers cal, cimento Portland e resíduo em função do incremento da relação filler/CAP50/70 sobre amostra do ensaio.	81
Figura 38 - Viscosidade Saybolt-Furol para o CAP50/70 com os fillers cal, cimento Portland e resíduo da serragem de granito (LIMA, 2003).....	81
Figura 39 - Valores de penetração para mistura CAP50/70 com os fillers cal, cimento Portland, e resíduo em função da relação de filler /volume de CAP.....	82
Figura 40 - Penetração para mistura CAP50/70 com os fillers cal, cimento e resíduo da serragem do granito (LIMA, 2003).....	83
Figura 41 - Corpos-de-prova do Ensaio Marshall.....	83
Figura 42- Parâmetro Fluência - dosagem Marshall utilizando como filler o pó calcário.....	84
Figura 43 - Parâmetro Relação betume vazios - dosagem Marshall utilizando como filler o pó calcário.....	84
Figura 44 - Parâmetro Estabilidade - dosagem Marshall utilizando como filler o pó calcário..	85
Figura 45 - Parâmetro Peso Específico - dosagem Marshall utilizando como filler o pó calcário.....	85
Figura 46 - Parâmetro Vazios - Dosagem Marshall utilizando como filler o pó calcário.....	85
Figura 47 - Parâmetro Fluência - Resultados do ensaio Marshall [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática].....	86
Figura 48 - Parâmetro Relação Betume Vazios - Resultados do ensaio Marshall [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática].....	87
Figura 49 - Parâmetro Peso Específico Aparente - Resultados do ensaio Marshall [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática].....	87

Figura 50 - Parâmetro Vazios - Resultados do ensaio Marshall [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática].....	88
Figura 51 - Parâmetro Estabilidade - Resultados do ensaio Marshall [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática].....	88
Figura 52 - Parâmetro Estabilidade - Ensaio Marshall - Compactação Automática[a] filler caulim (b) filler serragem de granito] (FERNANDES, 2007).....	89
Figura 53 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler cimento [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática].....	90
Figura 54 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler pó calcário [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática].....	91
Figura 55 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler resíduo oleoso [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática]	92
Figura 56 - Resultados do ensaio de resistência a tração por compressão diametral.....	94
Figura 57 Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler cimento.....	95
Figura 58- Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler pó calcário.....	96
Figura 59- Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler resíduo oleoso 1.....	97
Figura 60 - Resultados do ensaio de tração diametral modificada de Lottman.....	98
Figura 61 - Resultados do ensaio de tração diametral modificada de Lottman (FERNANDES,2007).....	98
Figura 62 - Parâmetro Fluência - Resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2.....	99
Figura 63 - Parâmetro Relação Betume Vazios - resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2.....	100
Figura 64 - Parâmetro Peso Específico Aparente - resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2.....	100
Figura 65 - Parâmetro Vazios - resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2.....	100
Figura 66 - Parâmetro Estabilidade - resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2.....	101
Figura 67- Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – resíduo oleoso 2 – parâmetro estabilidade.....	101
Figura 68 - Resultados do ensaio de resistência a tração por compressão diametral – resíduo oleoso 2.....	102
Figura 69 Valor Médio, Variância e Desvio Padrão para a resistência a tração (MPa) – resíduo oleoso 2.....	103
Figura 70 - Resultados do ensaio de tração diametral modificada de Lottman – resíduo oleoso 2.....	105
Figura 71 Análise granulométrica por difração de laser – filler cal.....	121
Figura 72 Análise granulométrica por difração de laser – filler cal.....	122

Figura 73 Análise granulométrica por difração de laser – <i>filler</i> cimento.....	123
Figura 74 Análise granulométrica por difração de laser – <i>filler</i> cimento.....	124
Figura 75 Análise granulométrica por difração de laser – <i>filler</i> pó calcário.....	125
Figura 76 Análise granulométrica por difração de laser – <i>filler</i> pó calcário.....	126
Figura 77 Análise granulométrica por difração de laser – <i>filler</i> resíduo oleoso 1.....	127
Figura 78 Análise granulométrica por difração de laser – <i>filler</i> resíduo oleoso 1.....	128

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Caracterização física e mineralógica.....	52
Fluxograma 2 – Caracterização mecânica.....	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição granulométrica da mistura asfáltica.....	62
Quadro 2 – Espectroscopia por absorção atômica e teor de óleo e graxas – resíduo oleoso 1	70
Quadro 3 – Espectroscopia por absorção atômica e teor de óleo e graxas – resíduo oleoso 2	78
Quadro 4 – Espectroscopia por absorção atômica e teor de óleo e graxas – modelo reduzido.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do DNIT.....	14
Tabela 2 – Características especificadas pelo DNIT.....	15
Tabela 3 - Composição do óleo cru típico.....	19
Tabela 4 - Classificação do petróleo.....	20
Tabela 5 - Análise química de resíduos sólidos de perfuração.....	23
Tabela 6 - Normas para a classificação de resíduos.....	27
Tabela 7 - Aspectos que conferem periculosidade a um resíduo.....	28
Tabela 8 - Principais tipos de resíduos oleosos.....	34
Tabela 9 - Características do cimento asfáltico.....	52
Tabela 10 - Resultados do aparelho analisador de partículas por difração a laser.....	64
Tabela 11 - Composição química dos fillers convencionais.....	65
Tabela 12 - Resultados do aparelho analisador de partículas por difração a laser.....	66
Tabela 13 - Composição química do resíduo oleoso 1.....	67
Tabela 14 - Composição química das amostras do resíduo oleoso 2.....	72
Tabela 15 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler cimento.....	90
Tabela 16 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler pó calcário.....	91
Tabela 17 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler resíduo oleoso 1.....	92
Tabela 18- Resumo da Análise de Variância - Ensaio Marshall – Parâmetro Estabilidade.....	93
Tabela 19 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler cimento.....	94
Tabela 20 Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler pó calcário.....	95
Tabela 21 Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler resíduo oleoso 1.....	96
Tabela 22- Resumo da Análise de Variância – Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	97
Tabela 23- Valor Médio, Variância e Desvio Padrão para estabilidade– resíduo oleoso 2.....	101
Tabela 24- Resumo da Análise de Variância - Ensaio Marshall – Parâmetro Estabilidade.....	102
Tabela 25- Valor Médio, Variância e Desvio Padrão para a resistência a tração (MPa) – resíduo oleoso 2.....	103

Tabela 26 Resumo da Análise de Variância – Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	104
Tabela 27- Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação– <i>filler</i> resíduo oleoso 1	120
Tabela 28- Resultados do Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol.....	130
Tabela 29 Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Manual – <i>filler</i> cimento.....	131
Tabela 30 Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Manual – <i>filler</i> pó calcário.....	132
Tabela 31 Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Manual – <i>filler</i> resíduo oleoso 1.....	133
Tabela 32 Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Automática – <i>filler</i> cimento.....	134
Tabela 33 Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Automática – <i>filler</i> pó calcário.....	135
Tabela 34 Resultados do Ensaio Marshall– Compactação Automática– <i>filler</i> resíduo oleoso 1	136
Tabela 35 Resultados do Ensaio Marshall– Compactação Automática– <i>filler</i> resíduo oleoso 2	137
Tabela 36 Resultados do Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral – <i>filler</i> cimento.....	138
Tabela 37 Resultados do Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral – <i>filler</i> pó calcário.....	139
Tabela 38 Resultados do Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral – <i>filler</i> resíduo oleoso 1.....	140
Tabela 39 Resultados do Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral – resíduo oleoso 2.....	141
Tabela 40 Resultados do Ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman.....	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ϕ_f	Fração Volumétrica de “Filler”.
ϕ_{fmax}	Fração Volumétrica Máxima de “Filler”.
ϕ_m	Fração de Volume Percolável da Matriz.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis.
ATD	Análise Térmica Diferencial.
ATG	Análise Termogravimétrica.
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etil-Benzeno e Xileno.
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo.
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente.
CL	Concentração Letal.
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio.
DQO	Demanda Química de Oxigênio.
DL	Dose Letal.
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.
DNP	Departamento Nacional de Petróleo.
DRX	Difração de Raios-X.
EPA	Environmental Protection Agency.
EUB	Energy and Utilities Board.
E & P	Exploração e Produção.
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo.
LMP	Limites Máximos Permitidos
NBR	Norma Brasileira Registrada.
pH	Potencial Hidrogeniônico.
RO	Resíduo Oleoso.

CAPÍTULO 1

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais

Uma realidade vivida hoje pela humanidade é a convivência com novos hábitos oriundos do processo de industrialização, que em parte facilita as atividades diárias do homem e, em outra, traz conseqüências indesejáveis. Os rejeitos dessas atividades podem não ser úteis para mais nenhum setor, então passam a ter a conotação de resíduo, e o mesmo acontece com o que não serve mais para a indústria. Diante disso, é necessário que o resíduo tenha uma destinação final, onde, o ambiente não seja atingido de maneira destrutiva (FONSECA, 2003).

O estudo de novas tecnologias para o reaproveitamento dos resíduos industriais poderá propiciar o desenvolvimento de novos produtos com conseqüente diminuição do descarte de resíduos e maximização da cadeia produtiva da indústria.

Para o controle da poluição causada por processos industriais, o procedimento mais comum tem sido a adoção de tecnologias de tratamento de resíduos, que representam despesas de investimentos improdutivos suplementares e custos de operação elevados (15 a 20 % do investimento inicial), que aumentam à medida que as instalações envelhecem (MARTINS, 1997). Outra alternativa para a solução deste problema é a adoção de “práticas limpas”. Uma “prática limpa” pode ser a introdução de um novo processo menos poluidor, ou a recuperação da matéria prima perdida e recirculada na fabricação, ou ainda a valorização de um resíduo que poderá dar origem a um subproduto.

Segundo Martins (1997), o interesse da aplicação de “práticas limpas” apresenta-se sob dois aspectos: ambiental e econômico. Do ponto de vista ambiental, as práticas limpas geram menos poluição, podendo mesmo chegar ao nível zero de poluição. Além disto, trazendo maior conhecimento do processo, estas práticas reduzem os riscos ambientais causados por acidentes ou quebras de equipamentos. Do ponto de vista econômico, vai haver uma maior preocupação com os desperdícios, gerando economia de energia e de matérias primas, conduzindo a períodos mais curtos de retorno dos investimentos.

As “práticas limpas” constituem-se então em fatores de inovações tecnológicas, melhorando a produtividade e a qualidade dos produtos, sob o ponto de vista ambiental.

As empresas e instituições de ensino e pesquisa, em conjunto, devem ter como uma de suas finalidades viabilizar a geração de novas tecnologias para o desenvolvimento do reaproveitamento dos resíduos gerados na cadeia produtiva durante o processo de industrialização. Isso poderá propiciar a geração de novos produtos com conseqüente diminuição da geração de resíduos e maximização da cadeia produtiva da indústria.

Em todo o mundo, as atividades de Exploração e Produção (E & P) de petróleo, geram uma quantidade significativa de resíduos oleosos (RO), que por apresentarem em sua composição teores de óleo, metais, sais, fenóis dentre outros, requerem cuidados específicos. Entre os diversos tipos de resíduos gerados encontra-se o “cascalho de perfuração”, resíduo proveniente da perfuração de poços de petróleo e produzido em grande quantidade. Entretanto, essa quantidade pode ser minimizada com o seu aproveitamento em revestimentos asfálticos de estradas.

1.2 - Justificativa

O desenvolvimento traz consigo a problemática da geração de resíduos, pois na busca de uma melhor “qualidade de vida”, tecnologias e matérias-primas são adotadas, sem a preocupação com sua deposição. É necessário um destino ambientalmente correto para estes resíduos, sejam eles classificados como tóxicos ou não. No Brasil, com o advento da lei de crimes ambientais (Lei 6938/1998), que responsabiliza o gerador do resíduo pela sua deposição final, as empresas e os órgãos ambientais têm se esforçado para que sejam empregadas técnicas de gerenciamento e deposição de resíduos adequadas. Entretanto, essa situação ainda é recente e há, efetivamente, pouquíssimas implementações com resultados promissores no Brasil.

As operações das indústrias petrolíferas produzem resíduos industriais de várias composições. Todavia, todos são caracterizados pelo conteúdo de óleo. É unânime a opinião de que é muito prejudicial e desagradável a poluição por óleo; esse problema tem sido estudado continuamente por instituições públicas e privadas (BRAILE & CAVALCANTI, 1993).

Dentre as opções de tratamento/destino final aplicáveis a resíduos oleosos tem-se: *dilution burial* (mistura de solo disponível nas adjacências do local de aplicação, com resíduos ou solo contaminado), *landfarming* (fazendas de lodo), biopilhas, incineração, dessorção térmica, *roadspreading* (espalhamento de resíduo oleoso das atividades de E & P em leito de vias não pavimentadas, misturado ao material argiloso), e solidificação/estabilização (FONSECA, 2003).

A quantidade de cascalhos gerados em uma perfuração de poço de petróleo varia de 45 a 85 m³, dependendo da profundidade do poço. Como exemplo da quantidade de cascalhos que podem ser aproveitados na construção de revestimentos asfálticos faz-se o seguinte cálculo, considerando a utilização de um teor de 2% de cascalhos de perfuração na composição de um revestimento asfáltico de 50 km de extensão, 7m de largura e 0,025

cm de espessura, o total de cascalho utilizado seria de 175m³, tendo uma destinação final, portanto, aproximadamente, o equivalente a perfuração de 3 poços de petróleo.

Logo, a utilização dos cascalhos de perfuração provenientes da perfuração de poços de petróleo como *filler* e/ou agregado miúdo, em revestimentos de concretos asfálticos de petróleo é uma alternativa a ser considerada, pois, a sua adoção minimizaria o efeito da migração de alguns componentes tóxicos de sua constituição para o lençol freático e os solos que circundam as estradas, tornando-se assim, uma prática ambientalmente mais adequada que a técnica de *roadspreading*.

1.3 - Hipótese do Trabalho

Neste trabalho tentou-se verificar a validação da seguinte hipótese: “os cascalhos de perfuração (*resíduos oleosos*) provenientes da perfuração de poços de petróleo podem ser utilizados em revestimentos asfálticos como agregado miúdo e/ou *filler*”.

Para isso, as bases lógicas adotadas foram fundamentadas em Hempel (1981):

“A seqüência lógica de raciocínio necessária à verificação e conseqüentemente aceitação de uma hipótese pode ser o método ou “caminho” a ser adotado para aceitar ou rejeitar uma hipótese em questão”.

Adotou-se, nesse trabalho, o método de inferência indutiva, frequentemente denominado de “o teste da hipótese”, isto é, a formulação de uma hipótese como tentativa de resposta a uma questão em estudo, e submissão da hipótese antagônica – a hipótese nula – à verificação empírica. Com isso, contrariamente ao que acontece na dedução, não se afirma que a conclusão será verdadeira, mesmo tomando como verdadeiras as premissas ou hipóteses auxiliares.

Um enunciado funciona como hipótese quando tomado na qualidade de premissa cujas conseqüências lógicas podem ser examinadas e comparadas com fatos realmente observados. Diz-se que a hipótese está confirmada se é adequadamente sustentada pela evidência empírica. Entretanto, mesmo uma verificação de numerosos casos, com resultados inteiramente favoráveis ou contrários, não estabelece, nem refuta, uma hipótese de forma conclusiva. Fornece apenas um suporte mais ou menos sólido para ela ou para hipótese antagônica em caso de refutação (HEMPEL, 1981).

Do ponto de vista metodológico, a certeza acerca do método adotado encontra-se em concluir que a hipótese levantada poderá ser rejeitada diante dos fatos observados segundo critérios preestabelecidos. Porém,

nenhuma hipótese poderá ser confirmada definitivamente, a menos que a inferência seja feita em função da população e não de uma amostra que se diz representativa.

Portanto, para se confirmar a hipótese formulada, optou-se por refutar a hipótese antagonica ou “nula”. Desta maneira, em caso de rejeição da hipótese antagonica, traz-se para a hipótese formulada um caráter de aceitação, que será válido até que estudos futuros demonstrem o contrário.

1.4 - Objetivos da Pesquisa

1.4.1 - Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento mecânico, físico e mineralógico de misturas asfálticas contendo cascalhos de perfuração (resíduos oleosos – gerados nos processos de perfuração dos poços de extração de petróleo), visando sua aplicação em revestimentos asfálticos de estradas.

1.4.2 - Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- realizar uma caracterização física e mineralógica dos resíduos oleosos e dos materiais convencionais;
- realizar uma caracterização mecânica das misturas CAP (cimento asfáltico de petróleo) + RO (resíduo oleoso) e CAP + RO + agregados;
- analisar o desempenho da mistura in situ, através da construção de um trecho experimental com o monitoramento sobre o meio ambiente;
- atender aos critérios de segurança propostos pela legislação ambiental vigente em relação à periculosidade do material disposto e
- sugerir um método ambientalmente mais adequado para a utilização de resíduos oleosos provenientes das atividades de E & P de petróleo em rodovias.

1.5 - Organização do Trabalho

O texto desta Tese encontra-se em um volume distribuído da seguinte forma.

[Capítulo 1] Introdução, Justificativa, Hipótese de Trabalho, Objetivos da Pesquisa e Organização do Trabalho – são descritos uma visão geral do trabalho com a introdução, justificativa, a hipótese a ser validada ou não, os objetivos a serem alcançados e a forma da organização do trabalho.

[Capítulo 2] Fundamentação Teórica – são discutidos e descritos assuntos relacionados a: revestimentos asfálticos, misturas asfálticas, petróleo, produtos da perfuração de poços de petróleo, resíduos industriais, reciclagem de resíduos, classificação dos resíduos industriais, minimização da geração de resíduos, utilização de resíduos como material alternativo, resíduos oleosos da indústria do petróleo e por fim, técnicas de tratamento aplicáveis aos resíduos oleosos.

[Capítulo 3] Etapa Experimental – são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos, considerados importantes, sobre os procedimentos dos ensaios.

[Capítulo 4] Resultados e Discussão - Caracterização Física e Mineralógica – são apresentados e analisados os resultados obtidos durante a fase de caracterização física e mineralógica.

[Capítulo 5] Resultados e Discussão - Caracterização Mecânica – são apresentados e analisados os resultados obtidos durante a fase de caracterização mecânica.

[Capítulo 6] Conclusões e Sugestões – são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas sobre o tema estudado.

Por fim, estão incluídas as Referências Bibliográficas, onde foram inseridas as referências citadas para a realização do trabalho.

CAPÍTULO 2

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, que foi dividida em quatro etapas. Na primeira etapa, é feita uma revisão sobre revestimentos asfálticos, mostrando principalmente a importância, propriedades e uso dos fillers. Na segunda etapa, é feita uma abordagem geral sobre o petróleo: características, perfuração de poços e produtos da perfuração. Na terceira etapa, é feito um estudo sobre reciclagem dos resíduos e minimização. Na quarta etapa, é feito um levantamento sobre os resíduos oriundos da indústria de petróleo e as tecnologias de tratamento atualmente aplicáveis aos resíduos oleosos.

2.1 - Revestimentos Asfálticos

O revestimento asfáltico é a camada superior do pavimento flexível destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança).

As tensões e deformações induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego estão associadas ao trincamento por fadiga dessa camada. Ela ainda pode apresentar trincamento por envelhecimento do ligante asfáltico, ação climática, etc. Parte de problemas relacionados à deformação permanente e outros defeitos podem ser atribuídos ao revestimento asfáltico. Nos pavimentos flexíveis, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural. Limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento, por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes, é o objetivo da mecânica dos pavimentos.

Os revestimentos asfálticos são constituídos por associação de agregados e de materiais asfálticos, podendo ser classificados de duas maneiras principais: por penetração ou por mistura.

- Por Penetração

Refere-se aos revestimentos asfálticos executados através de uma ou mais aplicações de material asfáltico e de idêntico número de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias

apropriadas (ex: TSS – tratamento superficial simples, TSD – tratamento superficial duplo, TST – tratamento superficial triplo, e Macadame Betuminoso).

- Por Mistura

No revestimento por mistura, o agregado é pré-envolvido com o material asfáltico, antes da compressão. Na usina podem se ter dois tipos de pré-envolvimento: a quente (ex: CBUQ – concreto betuminoso usinado a quente) e a frio (ex: AAUF-areia-asfalto usinada a frio). Quando o pré-envolvimento é feito na pista denomina-se pré-misturado na pista ou *Road Mix*.

O revestimento asfáltico, de maneira geral, é formado pela combinação de CAP e agregado mineral (mistura asfáltica), podendo conter ainda material de enchimento (*filler*), aditivos, etc.

2.1.1 - Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP é uma substância aglutinante escura composta principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular, totalmente solúvel em dissulfeto de carbono. Pode ser utilizado em várias aplicações, como por exemplo, em impermeabilizações de construções civis e, principalmente, em obras de pavimentação (ROBERTS et al., 1998).

Pode ser encontrados em jazidas naturais, na forma de bolsões de asfalto, originado da evaporação das frações mais leves (mais voláteis) do petróleo e aflorado à superfície desde épocas remotas. Atualmente, praticamente toda a produção de CAP resulta da destilação do petróleo em unidades industriais (refinarias). No Brasil, são produzidos pelas Petrobrás cerca de 2 milhões de toneladas de CAP por ano (LEITE, 1999).

A seleção de um CAP envolve a análise das suas características reológicas, físicas e químicas. Historicamente, o parâmetro mais utilizado para classificar CAPs é a sua consistência, que pode ser determinada a partir dos seguintes ensaios: penetração (DNIT-ME 003/99) e viscosidade.

A principal característica do CAP é a susceptibilidade à temperatura, apresentando um comportamento termoplástico, ou seja, quando aquecido apresenta características de um líquido viscoso e a temperatura ambiente torna-se semi-sólido.

O CAP também é dependente do tempo de carregamento. O asfalto apresenta diferentes propriedades, quando uma mesma carga é aplicada em tempos diferentes. Um CAP apresenta menor resistência à deformação permanente no início de sua vida em serviço, quando sua rigidez é menor, sendo afetado também pelas temperaturas elevadas e por veículos trafegando a baixas velocidades (maior tempo de aplicação de carga). Por outro lado, a resistência às trincas por fadiga diminui com o envelhecimento, que aumenta a rigidez e diminui a ductilidade do CAP.

A oxidação é outra característica importante do CAP. Como este é formado por moléculas orgânicas que reagem com o oxigênio do meio ambiente, modificando a estrutura e a composição das moléculas do asfalto. Quando o asfalto reage com o oxigênio, é formada uma estrutura mais dura e rígida, este aspecto é muito importante na seleção e uso do asfalto em regiões quentes e de clima desértico.

São produzidos também os CAPs modificados, objetivando alterar e melhorar as propriedades do asfalto, melhorando o desempenho em longo prazo dos pavimentos. Das diversas propriedades que os modificadores podem afetar, destacam-se a redução da dependência da temperatura, do envelhecimento oxidativo e da susceptibilidade à água das misturas asfálticas.

Aplicações práticas de asfaltos modificados se iniciaram em 1901, quando a *Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute* foi estabelecida na França. A primeira estrada construída com asfalto modificado por borracha ocorreu em 1902, em Cannes. Os asfaltos modificados antes da Segunda Guerra Mundial eram constituídos pela adição de borracha natural, que era o material disponível na época. O principal objetivo em se combinar asfalto com polímeros é inibir a formação de trincas por fadiga e prolongar a vida útil dos pavimentos, além de aumentar a resistência ao acúmulo de deformação permanente a altas temperaturas e a formação de trincas por origem térmica quando submetidos a baixas temperaturas (ZANZOTTO e KENNEPOHL, 1996).

2.1.2 - Agregado Mineral

Agregados são materiais granulosos e inertes que entram na composição de revestimentos asfálticos e que têm por finalidade resistir aos esforços e diminuir a retração do CAP. São classificados como: agregado graúdo ($\emptyset > 4,8$ mm) e agregado miúdo ($\emptyset < 4,8$ mm).

Tem-se utilizado uma larga gama de agregados minerais na produção de misturas asfálticas. Alguns materiais são designados como agregados naturais, pois são simplesmente minerados de depósitos em rios ou de depósitos glaciais e são usados sem processamento adicionais. Agregados processados podem incluir agregados naturais peneirados, lavados e moídos, ou qualquer outro tratamento a fim de melhorar certas propriedades da mistura asfáltica. Entretanto, na maioria dos casos, os agregados são minerados, e o processamento principal consiste de britagem e peneiramento.

Agregado sintético consiste de qualquer material que não é minerado ou extraído e, na maioria dos casos, representa um subproduto industrial. Escória de alto forno é um exemplo. Ocasionalmente, um agregado sintético é introduzido de modo a alterar uma determinada característica da mistura asfáltica. Por exemplo, argilas expandidas de baixa densidade e xisto são usados como componentes para aumentar a resistência à derrapagem do CBUQ (PETROBRÁS, 1996).

Independentemente da fonte, método de processamento, ou mineralogia, espera-se que o agregado seja resistente (duro e durável), e que o esqueleto mineral resista à aplicação de cargas repetidas.

2.1.3 - Filler – Propriedades e Usos

Segundo o DNIT-EM 367 (1997), *filler* é o material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, não plástico, do qual passam, pelo menos, 95% na peneira ABNT nº. 80 (abertura de 0,18mm) e 65% na peneira ABNT nº200 (abertura de 0,075 mm), devendo ser homogêneo, seco e livre de grumos provenientes de agregações de partículas finas.

Santana (1995) sugere uma definição geral para *filler*: é um material finamente dividido constituído de partículas minerais provenientes dos agregados graúdos e/ou miúdos, empregados na mistura asfáltica, ou de outras fontes como é o caso, por exemplo, do pó calcário, cal hidratada, cimento Portland, etc., que se incorpora à mistura asfáltica para melhorar seu desempenho reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, devendo obedecer a especificações próprias onde devem estar incluídos limites para a granulometria e plasticidade.

Sabe-se que o *filler* serve de material de enchimento dos vazios entre agregados graúdos, contribuindo para a diminuição dos vazios da mistura, modificando a trabalhabilidade, a resistência à água e a resistência ao envelhecimento. Em decorrência do pequeno tamanho das partículas e de suas características de superfície, o *filler* age como material ativo, manifestado nas propriedades da interface *filler* - cimento asfáltico. Sua adição aumenta a viscosidade do meio coesivo (resistência à deformação) (MOURÃO, 2003).

Estudos conduzidos por Tayebali *et al. apud* Wesseling (2003) indicam que o aumento da quantidade de *filler* nas misturas asfálticas não compromete o desempenho em termos de deformação permanente. Ao contrário, os resultados do estudo mostram que o aumento da quantidade de alguns tipos de *filler*, dentro de certos limites, tem efeito benéfico em termos de deformação permanente, por aumentar a rigidez do ligante asfáltico.

Entretanto, esse aumento da resistência à deformação proporcionada pela adição de *filler* à mistura asfáltica deve ser tratada com cuidado, pois apesar da afirmação de que quanto maior o teor de *filler* na mistura maior a resistência a deformação, existe um limite máximo de *filler* que pode ser adicionado, visto que ultrapassando-se esse limite a mistura asfáltica torna-se extremamente frágil ou quebradiça.

De acordo com Al-Suhaibani *et al apud* Amaral (2000), o *filler* entra nas misturas asfálticas com a “responsabilidade” de melhorar a estabilidade e a resistência, devido a duas teorias. A primeira é de que suas partículas finas, preenchendo os vazios existentes entre os agregados, aumentam a densidade e a resistência da mistura quando compactada. A outra teoria é que as partículas finas do *filler*, ficando em suspensão no ligante

asfáltico e absorvendo os componentes asfálticos, aumentam a viscosidade do ligante e conseqüentemente a rigidez da mistura, sendo que essas duas situações ocorrem simultaneamente.

O trabalho de Santana (1995) discute dois pontos de vista da influência do tipo de *filler* sobre o asfalto, ou também chamado à influência do mastique (*filler* + CAP): mastique com *filler* total, assim chamado sob ponto de vista de Ruiz; e mastique com o *filler* ativo, assim denominado sob ponto de vista de Puzinauskas (1983).

Segundo Ruiz *apud* Santana (1995), em um mastique bem dosado, todas as partículas do *filler* ficam em suspensão no asfalto, suas partículas não se tocando, formando um mastique homogêneo (*filler* ativo). Segundo Puzinauskas (1983) uma parte do *filler* ainda se porta como um agregado muito fino, suas partículas se tocando, formando um esqueleto mineral, e a outra parte fica em suspensão formando um mastique (*filler* agregado).

Segundo Motta & Leite (2000) a percentagem do material passante na peneira ABNT nº200 (abertura de 0,075 mm - 75 µm), tem vários efeitos na densificação de uma mistura particular de agregados finos e grossos, dependendo da granulometria apresentada pelas partículas abaixo deste diâmetro (75µm), da forma e da natureza das partículas. Abaixo da peneira ABNT nº 200 (abertura de 0,075 mm), tem-se ainda uma parcela de areia fina, a seguir o silte e a argila. A graduação do material, portanto tem efeito no amolecimento ou enrijecimento da mistura.

Se a maior parte do agregado de enchimento que passa na peneira ABNT nº200 (abertura de 0,075 mm - 75 µm) é relativamente grossa (maior que 40µm), a maior parte deste material vai cumprir a função de preencher os vazios, decrescendo assim o índice de vazios e alterando o teor ótimo de ligante. Se o *filler* for ultrafino, com porcentagem significativa do material menor que 20µm, e até com alguma porção menor que 5µm, este material atuará muito mais no próprio ligante, incorporando-se ao cimento asfáltico e compondo um filme de ligante, envolvendo as partículas dos agregados (MOTTA & LEITE, HARRIS & STUART *apud* MOURÃO, 2003).

Como exemplo, o uso da cal hidratada como *filler* possui um efeito mais significativo, em comparação com o cimento ou com o pó de pedra. Isso porque a cal hidratada tem em geral 80% de partículas de tamanho menor ou igual a 20µm; por outro lado o cimento tem uma distribuição muito mais contínua, com diâmetro médio de aproximadamente 60µm, o pó de pedra por sua vez possui graduação mais grossa com grande proporção de partículas maiores que 40µm (MOURÃO, 2003).

Em função desta distribuição granulométrica específica e conseqüente bom desempenho já comprovado na literatura, materiais como o pó calcário e a cal hidratada são geralmente utilizados como referências em estudos comparativos de comportamentos de *fillers*.

Destacam-se algumas das observações feitas por Puzinauskas (1983) sobre os mastiques, onde foram, em experimentos, utilizados quatro diferentes tipos de *fillers* e um só tipo de asfalto (Figura 1):

a) os *fillers* que aumentam a viscosidade são os que mais diminuem a ductilidade;

- b) um aumento na quantidade de *filler* reduz a sensibilidade do mastique à temperatura; e
c) a viscosidade do mastique é mais influenciada pela temperatura que por mudanças na quantidade ou tipo de *filler*.

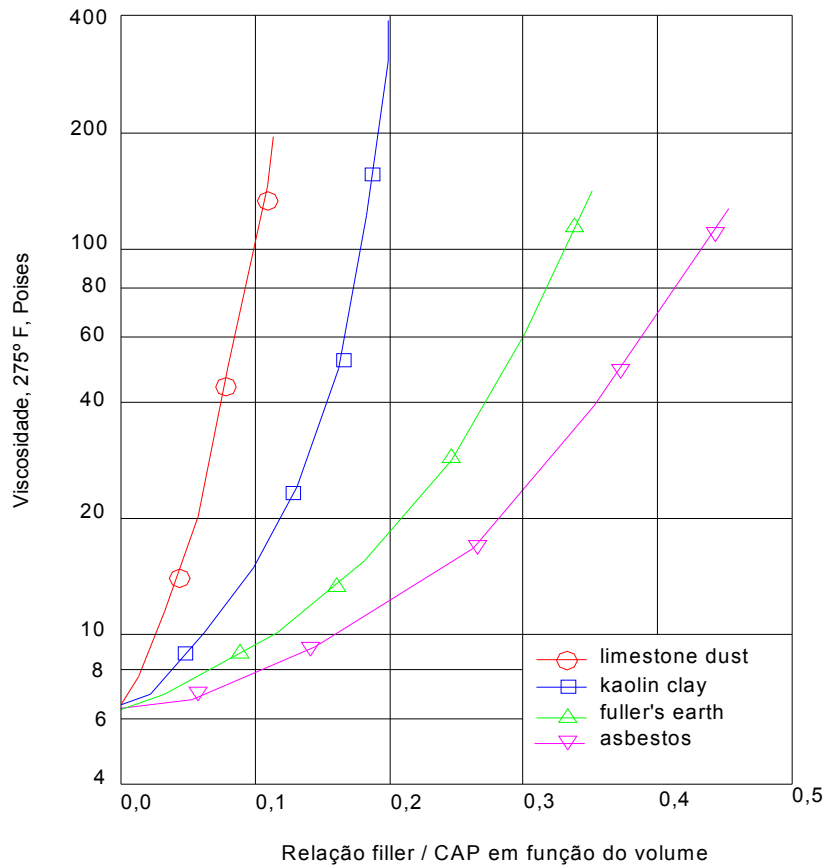


Figura 1 - Variações do valor da viscosidade cinemática para o CAP 70 (6 P) com os *fillers* caulim, terra *fuller* e finos de pó calcário em função do incremento da relação em volume de Filler/CAP70 (PUZINAUSKAS, 1983)

Shashidar & Shenoy (2002), realizaram estudos utilizando modelos micro mecânicos para descrever o comportamento dinâmico do mastique, fazendo uso da teoria da percolação. De acordo com a teoria da percolação, em uma matriz com uma baixa fração volumétrica de *filler*, todas as partículas estão dispersas de modo a formar uma fase contínua. Com uma maior fração volumétrica de *filler* (ϕ_f), há um aumento da probabilidade de as partículas tocarem uma nas outras e o *filler* começar a se tornar percolável. Com esse aumento da fração de *filler*, parte da matriz fica preenchida com aglomerados de partículas que vão diminuindo progressivamente a fração volumétrica da matriz (ϕ_m). Este processo começa a ocorrer quando se atinge um valor crítico da fração volumétrica de *filler* (ϕ_{fpt}), que é chamado de limite de percolação, variando de 0,15 a 0,30. Existe também, um valor limite da fração

volumétrica de *filler* que pode ser adicionado, chamado de fração volumétrica máxima de *filler* ($\phi_{f \max}$). Esse valor pode variar de 0,52 para estruturas cúbicas de partículas esféricas até 0,74 para estruturas hexagonais de partículas esféricas. Portanto, a escolha de uma adequada distribuição granulométrica pode aumentar significativamente o valor de $\phi_{f \max}$. A Figura 2 apresenta a dependência da variável rigidez em função do $\phi_{f \max}$.

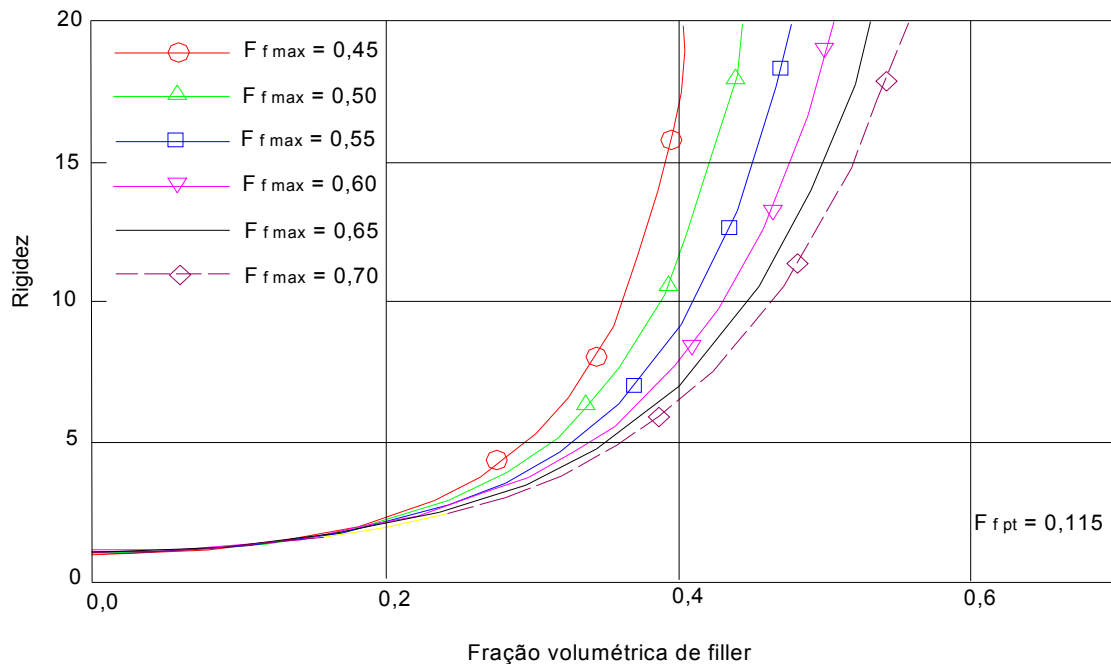


Figura 2 - Relação entre a rigidez e a fração volumétrica máxima de *filler* (SHASHIDAR & SHENOY, 2002)

Shashidar & Shenoy (2002) concluíram então que a aplicação do conceito da teoria da percolação em modelos micro mecânicos faz com que os modelos se ajustem adequadamente aos resultados obtidos experimentalmente. Isto ocorre em função de vários fatores provocados pelo *filler* que influem na rigidez do composto, como: forma das partículas, tamanho médio de partícula, distribuição do tamanho de partículas, grau de aglomeração, etc. Desta maneira, todos esses fatores devem ser considerados em modelos micro mecânicos.

2.1.4 - Projeto de Misturas Asfálticas

Na dosagem da mistura asfáltica podem ser usados vários métodos como, por exemplo: Marshall, Hubbard Field, Triaxial, Hveem, Ruiz e mais recentemente a metodologia SUPERPAVE do programa americano SHRP.

2.1.4.1 - Método Marshall

O método de projeto de mistura Marshall é de longe, o método de dosagem de mistura asfáltica mais largamente usado no mundo. Este método foi desenvolvido por Bruce Marshall do Departamento de Transporte do Estado do Mississippi (EUA), na década de 40. O Corpo de Engenheiros do Exército Americano refinou e acrescentou certas características à abordagem inicial proposta por Marshall e formalizou o método através da ASTM D 1559, *Resistência à Deformação Plástica de Misturas Betuminosas Usando a Aparelhagem Marshall*. O método Marshall se baseia em um experimento laboratorial destinado a dimensionar uma mistura asfáltica através da estabilidade/fluência e densidade/vazios (PETROBRAS, 1996).

Uma das virtudes do método Marshall é o seu cuidado com as propriedades densidade/vazios dos materiais asfálticos. A análise garante que as proporções volumétricas dos constituintes da mistura estão em um nível tal, que se obtém uma mistura asfáltica durável. Outra vantagem do método Marshall é que o equipamento é relativamente barato e portátil, permitindo um controle de qualidade em campo.

No Brasil, o ensaio Marshall tem sido adotado pela maioria dos órgãos rodoviários, talvez pelo fato de que este ensaio apresente uma relativa eficácia nos serviços de pavimentação. O método desenvolvido por Marshall é considerado empírico, ou seja, este ensaio não mede as condições do pavimento em serviço e não considera o clima da região nem as medições de tráfego.

A tentativa de interpretar ensaios empíricos não é uma tarefa fácil, pois significa então a não simulação em laboratório do fenômeno mecânico real tal qual ele acontece no campo, contudo diversos pesquisadores vêm tentando interpretar o significado da estabilidade e da fluência, determinados pelo ensaio Marshall.

Apesar de os equipamentos para a realização do ensaio Marshall, ser padronizados e de existirem normas que apresentem a maneira correta de como se executar este ensaio (DNIT – ME 043/95), os resultados deste ensaio são influenciados por diversos fatores entre os quais podemos destacar: o emprego dos materiais usados para a realização do ensaio, a temperatura de mistura e compactação dos corpos-de-prova, a forma como é realizadas a compactação dos corpos-de-prova, as dimensões dos corpos-de-prova, as características dos equipamentos e as condições operacionais. A seqüência de atividades que compõem o método de dosagem Marshall é apresentada a seguir.

a) Estudo da mistura de agregados

Nesta fase preliminar são determinadas as principais características dos agregados escolhidos como, por exemplo, a massa específica real e aparente dos agregados, a porcentagem de vazios dos agregados e a granulometria.

Conhecidos os materiais e estando de acordo com as especificações, passa-se ao estudo da mistura dos agregados, de modo a atenderem à especificação granulométrica do Concreto Asfáltico, ou seja, os agregados devem ser misturados em proporções de modo a se enquadrarem nas faixas granulométricas pré-estabelecidas (vide especificações para o concreto asfáltico do DNIT, Tabela 1).

b) Determinação do teor ótimo de ligante

Utilizando-se agregados razoavelmente bem graduados, os vazios existentes entre as partículas deverão ser preenchidos com ligantes. O teor de asfalto deve ser progressivamente aumentado de modo a preencher os vazios de ar até que os espaços vazios do agregado mineral estejam cheios ao máximo permitido. Ao se aumentar o teor de ligante (CAP) além de certo ponto, não se conseguirá uma máxima consolidação.

À medida que se varia o teor de ligante, a densidade, a estabilidade, a fluência, a porcentagem de vazios da mistura, a relação betume-vazios também sofrem variação. O teor ótimo de ligante será aquele que satisfizer, ao mesmo tempo, os limites especificados para os vários parâmetros de interesse.

O teor ótimo de ligante pode ser expresso através da porcentagem de asfalto, em peso, em relação à mistura ou através da porcentagem de asfalto, em peso, em relação aos agregados.

Tabela 1 - Especificações do DNIT

Peneira de malha quadrada		% em massa passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	Faixa A	Faixa B	Faixa C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½ "	38,1	95-100	100	-	+/- 7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	+/- 7%
¾"	19,1	60-90	80-100	100	+/- 7%
½"	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		4,0-7,0	4,5-7,5	4,5-9,0	+/- 0,3%
CS2(+) (%)		Camada de ligação	Ligação e rolamento	Camada de Rolamento	

Fonte: DNIT-ES 031/2006

c) Determinação dos parâmetros de interesse e das características Marshall da mistura

No ensaio Marshall o principal aspecto de interesse é a análise de fatores como densidade, vazios, estabilidade e fluência. São moldados corpos-de-prova com teores crescentes de asfalto. As proporções de agregados e *filler* são definidas previamente através de estudo específico. Os corpos-de-prova têm a forma cilíndrica, apresentando aproximadamente 10 cm de diâmetro e 6,35 cm de altura e são compactados com utilização de soquete que age sobre a mistura em um cilindro padronizado.

Após a confecção dos corpos-de-prova podem ser calculados os seguintes parâmetros: peso específico aparente, porcentagem de vazios e relação betume-vazios. Feitos estes cálculos iniciais, os corpos-de-prova são aquecidos até atingirem 60° e submetidos aos ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall. Entende-se por estabilidade como sendo a grandeza que mede a resistência da massa asfáltica à aplicação de carga. Determina a carga máxima que a massa asfáltica pode suportar.

O ensaio de estabilidade Marshall é feito por cisalhamento e não por compressão, pois sendo o concreto asfáltico uma camada de rolamento, o maior esforço solicitante é dado pela ação do tráfego, que é de cisalhamento, devido às cargas horizontais. Normalmente é expresso em kgf.

A fluência é a medida do quanto à massa asfáltica pode deslocar sob ação cisalhante sem se romper. Se uma massa asfáltica se “desloca” muito, acarretará esmagamento da mistura e em conseqüência, ondulação à pista. É inconveniente também que a massa asfáltica “esmague” pouco, pois ao sofrer ação de elevado carregamento, sem capacidade de mover-se, pode trincar.

Ensaio adicionais como: determinação da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de resiliência, podem ser realizados com o intuito de obterem-se mais informações a respeito do comportamento da mistura asfáltica.

Devem ser observados os valores limites para as características especificadas na Tabela 2.

Tabela 2- Características especificadas pelo DNIT

Características	Método de Ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de vazios, (%)	DNIT-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume-vazios	DNIT-ME 043	75-82	65-72
Estabilidade mínima (Kgf), 75 golpes	DNIT-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNIT-ME 138	0,65	0,65

Fonte: DNIT-ES 031/2006

2.1.4.2 - Método Hveem

O procedimento de projeto de mistura Hveem foi desenvolvido por Francis Hveem, engenheiro de Materiais e Pesquisa do Departamento de Transporte (DOT) da Califórnia (EUA). Hveem e colaboradores desenvolveram um procedimento e o refinaram durante um longo período. O procedimento está descrito no ASTM D 1560, *Resistência à deformação e coesão de misturas betuminosas usando o aparato de Hveem*, e ASTM D 1561, *Preparação de corpos-de-prova de mistura betuminosa usando o compactador Califórnia* (ROBERTS et al., 1998).

O método Hveem realiza uma análise de densidade/vazios e estabilidade. Também é determinada a resistência da mistura ao inchamento em água. O método Hveem possui duas vantagens reais. Primeiramente, o método de compactação pulsante em laboratório é visto pelos técnicos como a melhor simulação do adensamento que ocorre com a mistura asfáltica em campo. Segundo, o parâmetro de resistência, a estabilidade Hveem é uma medida direta dos componentes de atrito interno da resistência ao cisalhamento. Este mede a capacidade de um corpo-de-prova resistir a deformação lateral quando uma carga vertical é aplicada.

A desvantagem do procedimento Hveem é que o equipamento, particularmente o compactador e o estabilômetro Hveem, são mais caros que o equipamento Marshall além de serem pouco portáteis. Além disso, algumas importantes propriedades volumétricas de mistura, relacionadas a durabilidade, não são rotineiramente determinadas pelo procedimento Hveem. Alguns técnicos acreditam que o método de determinação do teor de asfalto é muito subjetivo e pode resultar em misturas não duráveis e com baixo teor de asfalto (PETROBRAS, 1996).

2.1.4.3 - Metodologia SUPERPAVE

Em 1987 foi desenvolvido o programa SHRP (Strategic Highway Research Program), que teve como objetivos gerais a elaboração de especificações e a concepção de novos equipamentos para ensaios em cimentos asfálticos e em concretos asfálticos (HMA – Hot Mix Asphalt). Foi então desenvolvido, entre outros, o conjunto de normas e equipamentos denominado “SUPERPAVE” (Superior Performing Asphalt Pavements), com os seguintes objetivos:

- a) desenvolver ensaios e especificações para cimentos asfálticos, entre eles inclui-se, modificados e não modificados;
- b) relacionar as propriedades físicas medidas pelo sistema “SUPERPAVE” e o desempenho em campo dos CAPs;
- c) considerar níveis de temperatura, no projeto de misturas, compatíveis com as que realmente ocorrem na superfície do pavimento durante sua vida útil;
- d) desenvolver ensaios e especificações para eliminar e/ou controlar três tipos específicos de patologias ou defeitos dos “concretos asfálticos”: deformações plásticas (ocorrem tipicamente sob altas temperaturas), trincas por fadiga (ocorrem sob temperaturas intermediárias), e trincas de origem térmicas (que ocorre sob baixas temperaturas);

e) exigir da tecnologia do sistema SUPERPAVE freqüentes atualizações. Alguns ensaios e critérios teriam que ser flexíveis a ponto de serem revisados provavelmente com a implementação de pistas experimentais;

f) exigir do sistema "SUPERPAVE" de ensaios e especificações em cimentos asfálticos as seguinte situações;

- primeira fase, avaliação do CAP desde a origem, transporte, armazenamento e mistura com o agregado;
- segunda fase, simular e avaliar o comportamento dos CAPs quanto ao envelhecimento após a produção e durante a construção do pavimento (envelhecimento a curto prazo); e
- terceira fase, simular e avaliar o comportamento dos CAPs quanto ao envelhecimento durante longos períodos em serviço (5-10 anos).

A partir dos objetivos citados no item anterior foram desenvolvidos os seguintes equipamentos para caracterização e classificação de cimentos asfálticos: *Dynamic Shear Rheometer* (Reômetro de Cisalhamento Dinâmico), *Rotational Viscometer/Rheometer & "Thermose"* (Reômetro e Viscosímetro Rotacional), *Rolling Thin Film Oven* (Estufa de Filme Fino Rotativo), e *Pressure Aging Vessel* (Vaso de Envelhecimento sob Pressão).

Dynamic Shear Rheometer (DSR)

Usado para caracterizar o comportamento viscoso e elástico do cimento asfáltico sob temperaturas semelhantes às de serviço, sejam altas e/ou intermediárias. O equipamento que é genericamente conhecido como "Rheometer", tem sido usado, há vários anos, na indústria de plásticos.

O DSR mede o módulo de elasticidade transversal ou módulo de cisalhamento "G". Pode ser considerado como a resistência total do cimento asfáltico à deformação por cisalhamento, quando submetido a um esforço cortante aplicado de forma repetida. Em síntese, a amostra de cimento asfáltico é intercalada entre um prato fixo e um prato de movimento rotatório. O princípio de operação do ensaio é simples e o procedimento de ensaio é normalizado em AASHTO TP5.

Rotational Viscometer/Rheometer & "Thermose"

Adotado no sistema "SUPERPAVE" para estimar a viscosidade do CAP sob altas temperaturas de construção (acima de 100° C), assegurando-se com isto, que o cimento asfáltico esteja suficientemente fluido no momento da mistura.

Esta forma de medir viscosidade é descrita em detalhes no método ASTM D4402 ou AASHTO TP48, "*Viscosity Determination of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermose Apparatus*". Em síntese, a viscosidade é estimada medindo-se o torque (relacionado com a viscosidade) necessário para manter uma velocidade de rotação constante (20 rpm) de uma haste cilíndrica submersa em uma amostra de CAP a uma temperatura constante.

Rolling Thin Film Oven (RTFO)

Simula na amostra de CAP o envelhecimento durante a produção e a aplicação do Concreto Asfáltico Usinado a Quente (Normas - AASHTO T240 e ASTM D2872).

Pressure Aging Vessel (PAV)

Usado em pesquisas para envelhecimento de produtos. Segundo Roberts et al. (1998), a metodologia foi desenvolvida pelo Dr. D. Y. O. Lee da Universidade do Estado de Iowa para o envelhecimento de CAPs, por longos períodos de tempo (5-10 anos). É atualmente um método padronizado para envelhecimento de produtos de borracha (ASTM D454 e ASTM D572).

Segundo Roberts et al. (1998), a pressão agindo sobre o CAP tem as seguintes vantagens:

- a) perda limitada de voláteis;
- b) o processo oxidativo é acelerado sem recorrer a altas temperaturas;
- c) uma quantia significativa de CAP pode ser envelhecida de uma só vez; e
- d) o ensaio é prático e rotineiro.

Em síntese, para simular o efeito de envelhecimento do CAP, o resíduo do ensaio do RTFO é exposto por 20 horas, a uma pressão de ar (em torno 2070 kPa), e a uma temperatura especificada (90, 100 e 110° C).

Dosagem de Mistura Asfálticas

Para a dosagem de misturas asfálticas, os dois itens principais do sistema SUPERPAVE são os testes de compactação laboratorial e os testes de desempenho. A compactação em laboratório é realizada com o auxílio do Compactador Giratório SUPERPAVE (SGC). Embora este equipamento guarde alguma semelhança com o compactador giratório Texas, este possui funcionamento e características operacionais inteiramente diferentes. Sua principal finalidade é produzir corpos-de-prova. Contudo, através da aquisição de dados durante a compactação com SGC, o projetista é capaz de apreender informações sobre a compatibilidade da mistura asfáltica. O SGC pode ser usado para projetar misturas que não exibam características de pós-compactação pelo tráfego.

O desenvolvimento mais importante obtido a partir do programa de pesquisa em asfalto SHRP foi desenvolver testes baseados em desempenho e modelos de predição de desempenho das misturas asfálticas. A resposta destes testes pode ser usada na previsão detalha do desempenho real do pavimento. Ou seja, os procedimentos de teste e modelos de previsão de desempenho foram desenvolvidos de modo a permitir que o projetista estime a vida útil de uma mistura asfáltica hipotética em termos de passagens do eixo equivalente (*Equivalent Axle Loads*), ou o tempo necessário para atingir certo nível de afundamento de trilha de roda, trincamento por fadiga ou trincamento a baixa temperatura.

Foram desenvolvidos dois novos procedimentos baseados no desempenho, o Superpave *Shear Tester* (SST) e o *Indirect Tensile Tester* (IDT). O resultado destes ensaios é o ponto de partida dos modelos de previsão de desempenho real do pavimento do SUPERPAVE (ex: milímetros de afundamento).

2.2 - Petróleo

2.2.1 - Características do Petróleo

O petróleo é uma substância oleosa constituída basicamente por uma mistura de compostos químicos orgânicos (hidrocarbonetos). No estado líquido, é oleoso, inflamável, menos denso que a água, com odor característico e cor variando entre o preto e o castanho claro. A Tabela 3 apresenta uma análise elementar do petróleo sob a forma de óleo cru típico.

Tabela 3 - Composição do óleo cru típico

Elemento	Porcentagem em massa (%)
hidrogênio	11 – 14
carbono	83 – 87
enxofre	0,06 – 8
nitrogênio	0,11 – 1,7
oxigênio	0,1 – 2
metais	Até 0,3

Fonte: Thomas, 2001

De acordo com as informações contidas na Tabela 3 o carbono é o elemento mais abundante encontrado no petróleo comum podendo chegar a 87%, seguido do hidrogênio com até 14% e do enxofre com até 8%. Em geral, quanto maior a densidade do petróleo, maior será seu teor de enxofre. Os compostos nitrogenados apresentam-se quase que, em sua totalidade, na forma orgânica, encontrados em maiores concentrações nas frações pesadas, assim como os compostos oxigenados, que aparecem na forma de ácidos carboxílicos, fenóis, cresóis, ésteres, amidas, cetonas e benzofuranos.

Os compostos metálicos apresentam-se na forma de sais orgânicos, dissolvidos na água emulsionada no petróleo na forma de compostos organometálicos complexos que tendem a se concentrar nas frações mais pesadas. Além do níquel e do vanádio, encontrados com maior incidência, podem ocorrer no petróleo os metais zinco, ferro, cobre, chumbo, molibdênio, cobalto, arsênico, manganês, cromo e sódio.

Na Tabela 4 está inserida a classificação para o petróleo segundo Thomas (2001).

Tabela 4 - Classificação do petróleo

Classe	Características	Local
Parafínica	Densidade inferior a 0,85, alto ponto de fluidez, teor de resinas e asfaltenos menor que 10%.	A maioria do petróleo produzido no Nordeste brasileiro.
Parafínico-naftênica	Teor de resinas e asfaltenos entre 5 e 15%, baixo teor de enxofre, teor de naftênicos entre 25 e 40%. Densidade e viscosidade maior que os parafínicos.	A maioria dos petróleos produzidos na bacia de Campos no Rio de Janeiro.
Naftênica	Temos aqui um nº pequeno de óleos. Baixo teor de enxofre e se originam da alteração bioquímica de óleos parafínicos e parafínicos-naftênicos.	Alguns óleos da América do Sul, da Rússia e do Mar do Norte.
Aromática intermediária	Possui de 10 a 30% de asfaltenos e resinas e teor de enxofre acima de 1%. Baixo teor de monocromáticos e elevado teor de tiofenos e de dibenzotiofenos, com densidade maior que 0,85.	Alguns óleos do Oriente Médio, África Ocidental, Venezuela, Califórnia, Mediterrâneo.
Aromática-naftênica	Derivados dos óleos parafínicos e parafínico-naftênicos, podendo conter mais de 25% de resinas e asfaltenos, e teor de enxofre entre 0,4 e 1%.	Alguns óleos da África Ocidental.
Aromático-asfáltica	Oriundos da biodegradação avançada em que ocorreria reunião de monocicloalcenos e oxidação. Elevado teor de asfaltenos e resinas, com teor de enxofre variando de 1 a 9% em casos extremos.	Canadá Ocidental, Venezuela e Sul da França.

Fonte: Thomas, 2001

Segundo Fonseca (2003), o petróleo foi a principal fonte mundial de energia do século XX. A produção de cerca de 72 milhões de barris anuais atendia a 40,6% da demanda mundial de energia. No Brasil, o petróleo consumido representa cerca de 34,2% da matriz energética.

2.2.2 - Perfuração de Poços de Petróleo

O petróleo encontra-se na natureza ocupando os vazios de uma rocha porosa chamada rocha reservatório. O poço de petróleo é o elo entre esta rocha e a superfície. Porém, antes de se perfurar um poço de petróleo, várias ações devem ser executadas. Inicialmente, estudos sísmicos e geológicos são efetuados, visando pesquisar entre as formações do subsolo aquelas com potencial para armazenar petróleo (SOUZA & LIMA, 2002).

Feita esta análise e definidos os prováveis pontos a serem explorados, deve ser feita uma análise de campo, nos locais definidos, a fim de se verificar a viabilidade da perfuração. Só então, inicia-se a elaboração do projeto do poço, projeto este que poderá ser definido para um poço vertical, quando o objetivo está exatamente na linha vertical do ponto escolhido na superfície, ou direcional, quando o ponto na superfície deve ser deslocado do ponto ideal em função de algum acidente natural ou não natural (SOUZA & LIMA, 2002)..

Cumpridas as etapas acima, estará definido o local exato da perfuração, além de qual equipamento (sonda de perfuração) deverá ser utilizado, em função da profundidade do poço para alcançar a rocha reservatório.

A perfuração de um poço de petróleo é realizada através de uma sonda. Na perfuração rotativa, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração, que consiste basicamente de comandos (tubos de paredes espessas), tubos intermediários, tubos de perfuração e acessórios da coluna de perfuração (estabilizadores, escareadores e alargadores) (THOMAS, 2001).

Os fragmentos da rocha (cascalhos) são removidos continuamente através de um fluido de perfuração ou lama. O fluido é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção, ou *swivel*, e retorna à superfície através do espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna de perfuração (THOMAS, 2001).

Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço, de diâmetro inferior ao da broca, é descida no poço. O espaço anular entre os tubos de revestimento e as paredes do poço é cimentado com a finalidade de isolar as rochas atravessadas, permitindo então o avanço da perfuração com segurança. Após a operação de cimentação, a nova coluna de perfuração é novamente descida no poço, tendo na sua extremidade, uma nova broca de diâmetro menor do que a do revestimento para o prosseguimento da perfuração (THOMAS, 2001).

2.2.3 - Produtos da Perfuração de Poços de Petróleo

Os principais produtos de uma perfuração de poços de petróleo são: cascalhos de perfuração, metais pesados, sais solúveis e hidrocarbonetos.

Cascalhos de Perfuração

Os fragmentos das rochas cortados pela broca (cascalhos) são carregados pelo fluido de perfuração até as peneiras vibratórias na superfície, onde são separados do fluido e descartados em um dique ou tanque (Figura 3). Por não haver uma remoção total do fluido impregnado nos cascalhos, estes podem conter contaminantes, tais como:

- a) metais pesados;
- b) sais, uma vez que os fluidos, em sua maioria têm sais incorporados como aditivos, cujo objetivo é o de minimizar o inchamento das formações argilosas perfuradas, promovendo a estabilidade do poço;
- c) óleos e graxas;
- d) substâncias que causam demanda bioquímica de oxigênio (DBO);
- e) substâncias que causam demanda química de oxigênio (DQO); e
- f) alcalinizantes.



Figura 3 - Cascalho de perfuração armazenado em um tanque (MATOS, 2006)

Durante os últimos vinte anos, estudos têm sido realizados para avaliar o destino e os efeitos de descarga de cascalho e do fluido de perfuração em ambiente marinho. A principal questão ambiental associada à descarga de cascalhos revestidos de fluido não aquoso (NAF) é o impacto final sobre o ecossistema bêntico marinho. Assim, o destino, a persistência e a biodegradabilidade dos hidrocarbonetos nos cascalhos constituem motivos de preocupação. O grau de distúrbio que afeta os organismos bênticos dependerá de vários fatores, entre eles: as características físicas e químicas das deposições de cascalhos revestidos de NAF, das condições oceanográficas locais, da quantidade de cascalhos descarregados, do tipo de fluido usado, e da concentração de NAF nos cascalhos (MAIRS, 2000).

Metais Pesados

O principal risco para o meio ambiente associado a metais pesados está em suas formas solúveis em água ou trocáveis (SOUZA & LIMA, 2002). Essas formas, entretanto, estão presentes em quantidades mínimas nos

rejeitos sólidos da perfuração, conforme demonstrado por Lemos (1997), utilizando os dados de análise dos cascalhos do poço SG-20, perfurado na Bacia do Recôncavo, Bahia (Tabela 5).

Tabela 5 - Análise química de resíduos sólidos de perfuração

Elemento Analisado	Unidade	Lama à Base de Água	Lama à Base de N-Parafina	Resíduos Sólidos	Listagem 9 - Anexo H (NBR 10004/1987)
cloretos	mg/L	1012	1794	2712	250
óleos e graxas	%	0,045	2,8	0,92	-
alumínio	mg/L	18	<0,048	<0,048	0,20
amônia	mg/L	n. determ.	1,3	1,1	-
arsênico	mg/L	<0,005	<0,005	n. determ.	0,05
bário	mg/L	1,11	0,64	n. determ.	1,00
cádmio	mg/L	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,005
chumbo	mg/L	<0,018	<0,018	<0,018	<0,05
cobre	mg/L	0,085	<0,0067	0,009	1,00
cromo	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02	0,09
fenol	mg/L	n. determ.	n. determ.	n. determ.	0,001
ferro	mg/L	16	0,26	0,99	0,30
manganês	mg/L	0,088	0,088	0,016	0,10
mercúrio	mg/L	<0,0002	<0,0002	n. determ.	0,001
sódio	mg/L	425	624	1073	200
selênio	mg/L	n. determ.	n. determ.	n. determ.	0,01
zinco	mg/L	0,043	0,014	<0,0017	5,00

Fonte: Lemos, 1997

Os metais pesados se acumulam nos organismos e podem causar sérios problemas, como disfunções do sistema nervoso e aumento na incidência de câncer.

Sais Solúveis

Sais solúveis, como cloreto de sódio e cloreto de potássio, fazem parte da composição básica dos fluidos de perfuração de poços de petróleo. A disposição de uma grande concentração desses sais no solo, dissolvidos nos resíduos da perfuração, pode trazer conseqüências graves ao meio ambiente, contaminando recursos hídricos e terras cultiváveis. A presença em quantidades superiores ao recomendado dos cloretos de sódio e potássio no organismo humano pode causar os seguintes malefícios: hipertensão arterial, doenças cardiovasculares, problemas renais e retenção hídrica.

Hidrocarbonetos

Hidrocarbonetos, quando derramados na superfície, penetram em diferentes profundidades, dependendo do tipo de solo. Devido à baixa permeabilidade dos solos argilosos, os hidrocarbonetos não penetram tão profundamente nestes solos, como o fazem em solos arenosos. São compostos formados exclusivamente de carbono e hidrogênio, que também são chamados hidrocarburetos, carboidretos, carbetos, carburetos ou carbonetos de hidrogênio.

Os grupos de hidrocarbonetos constituem as chamadas séries homólogas, em que cada termo (composto orgânico), difere do anterior em um átomo de carbono e dois de hidrogênio. Os termos superiores da série homóloga saturada, de peso molecular mais alto, encontram-se em alguns tipos de petróleo e como elementos constituintes do pinho, da casca de algumas frutas e dos pigmentos das folhas e hortaliças.

Os hidrocarbonetos se classificam de acordo com a proporção dos átomos de carbono e hidrogênio presentes em sua composição química ou índice de saturação dos carbonos. Assim, denominam-se hidrocarbonetos saturados os compostos ricos em hidrogênio (carbonos com ligações simples), enquanto os hidrocarbonetos ditos insaturados (carbonos com duplas ou triplas ligações), apresentam uma razão hidrogênio/carbono inferior e são encontrados principalmente no petróleo e em resinas vegetais.

Os hidrocarbonetos em geral são insolúveis em água, mas se solubilizam prontamente em substâncias orgânicas como o éter e a acetona. Os primeiros termos das séries homólogas são gasosos, enquanto os compostos de maior peso molecular são líquidos ou sólidos. Graças a sua capacidade de decompor-se em dióxido de carbono e vapor d'água, em presença de oxigênio, com desprendimento de grande quantidade de energia, torna-se possível a utilização de vários hidrocarbonetos como combustíveis.

Os hidrocarbonetos saturados, ou parafinas caracterizam-se, sobretudo por tenderem a ser quimicamente inertes. Industrialmente, são empregados no processo de craqueamento (cracking) ou ruptura, a elevadas temperaturas, onde produzem misturas de compostos de estruturas mais simples, saturados ou não. A hidrogenação catalítica dos alcenos é utilizada, em escala industrial, para a produção controlada de moléculas saturadas. Esses compostos são usados ainda como moderadores nucleares e como combustíveis (gás de cozinha, em automóveis etc.).

Os hidrocarbonetos insaturados com duplas ligações têm a capacidade de realizar reações de adição com compostos halogenados e formam importantes derivados orgânicos. Além disso, com a adição de moléculas de alcenos, é possível efetuar a síntese dos polímeros, empregados industrialmente no fabrico de plásticos (polietileno, teflon, poliestireno etc) e de fibras sintéticas para tecidos (orlon, acrilan etc.). Além disso, faz parte da gasolina uma importante mistura de alquenos. Metade da produção de acetileno é utilizada como oxiacetileno, na soldagem e corte

de metais. Os hidrocarbonetos aromáticos, além de bons solventes, são empregados na produção de resinas, corantes, inseticidas, plastificantes e medicamentos.

2.3 - Resíduos Industriais

2.3.1 - Reciclagem de Resíduos

A reciclagem pode ser classificada como primária, secundária ou reaproveitamento. Reciclagem primária pode ser conceituada com sendo um "re-emprego ou uma reutilização de um produto para mesma finalidade que o gerou". Reciclagem secundária pode ser definida como sendo um "re-emprego ou reutilização de um produto para uma finalidade que não a mesma que o gerou". O reaproveitamento de resíduo pode ser entendido, como sendo uma forma de utilizá-lo sem que haja necessidade de submetê-lo a qualquer processo de beneficiamento, tal como britagem ou moagem (LEVY, 1997).

A reciclagem dos resíduos pode ser objeto da ação de profissionais com posições bem diferentes, entre eles podemos destacar:

- o formulador de políticas de gestão ambiental – que deve ser interessado em selecionar quais os resíduos mais importantes, tanto do ponto de vista da quantidade quanto da agressividade ambiental;
- o pesquisador ou o formulador de políticas públicas – que deve buscar dentre os resíduos existentes na sua região, uma alternativa adequada para a produção de um produto específico;
- o gerador de um resíduo específico – que deve buscar alternativas para reciclagem (OLIVEIRA, 2004).

Reciclar qualquer tipo de material, independente do uso que lhe for dado, representa vantagens econômicas, sociais e ambientais, as quais estão abaixo descritas.

Ambientais – o impacto dos resíduos sobre o meio ambiente é significativo, seja na forma de depósitos irregulares, para os quais a administração pública ou órgãos ambientais têm de estabelecer uma rotina de correção, seja na forma de bota foras (área de descarte de material refugado), deixando os gestores públicos reféns de soluções de destinação cada vez mais distantes e de elevados custos. Os benefícios com a reciclagem dos resíduos são vários, não só por diminuir a disposição em locais inadequados como também por ser uma solução viável para minimizar a necessidade de extração de matérias primas em jazidas, o que nem sempre é adequadamente fiscalizado.

Econômicas – reciclar é uma alternativa que pode gerar custos mais baixos quando comparados com os relacionados ao simples descarte dos resíduos. Após estudos, é possível produzir um material alternativo com

características físicas e/ou mecânicas compatíveis com as obtidas quando da utilização de materiais convencionais durante o processo produtivo.

Sociais – é necessário que mídia, agentes da saúde, Organizações Não Governamentais (ONGs) e população, como um todo, conscientizem-se da importância dos produtos reciclados e ecologicamente corretos. Nos casos dos materiais de construção alternativos, este processo de conscientização deveria ser de iniciativa do próprio setor empresarial.

A reciclagem de resíduos para produção de novos materiais segundo ENBRI *apud* Neves (2002) permite: a) redução do volume de extração de matérias-primas; b) conservação de matérias-primas não renováveis; c) redução do consumo de energia; d) menores emissões de poluentes, com o CO₂; e) melhoria da saúde e segurança da população.

A reciclagem e a reutilização de resíduos como novos materiais ultrapassam então o contexto da análise de resistência mecânica e estabilidade dimensional de um novo produto e deve ser inserida em um contexto mais geral de avaliação ambiental. Esta avaliação envolve um melhor conhecimento do produto e conseqüentemente sua caracterização e análise do seu comportamento (CAVALCANTE & CHERIA, 1996).

Segundo Pontes (2000), a reciclagem e o aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção é de fundamental importância para controle e minimização dos problemas ambientais causados pela geração de resíduos de atividades industriais e urbanas. Alguns resíduos apresentam propriedades que permitem a sua utilização em substituição parcial ou total da matéria-prima, utilizada como insumo convencional. O aproveitamento destes resíduos requer uma avaliação dos aspectos econômicos e tecnológicos, bem como, do risco de contaminação ambiental que o uso de matérias com resíduos incorporados poderá ocasionar durante o ciclo de vida do material e após a sua destinação final.

2.3.2 - Classificação dos Resíduos Industriais

A norma NBR 10004 (ABNT, 2004) – Classificação de Resíduos, editada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define resíduo sólido como:

“São considerados resíduos sólidos industriais, os resíduos em estado sólido e semi-sólido que resultam da atividade industrial, incluindo-se os lodos provenientes das instalações de tratamento de águas residuárias, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água”.

A ABNT lançou, em 1987 (revisado em 2004), um conjunto de normas para padronizar, em nível nacional, a classificação de resíduos. Na Tabela 6 apresenta-se a identificação, nome e objetivo de cada uma destas normas.

Tabela 6 - Normas para a classificação de resíduos

Norma	Nome	Objetivo
NBR 10004	Classificação de Resíduos	Classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que estes resíduos possam ter manuseio e destinação adequados.
NBR 10005	Lixiviação de Resíduos	Fixar as condições exigíveis para lixiviação de resíduos tendo em vista a sua classificação
NBR 10006	Solubilização de Resíduos	Fixar as condições exigíveis para diferenciar os resíduos da classe II e III.
NBR 10007	Amostragem de Resíduos	Fixar as condições exigíveis para amostragem, preservação e estocagem de amostras de resíduos sólidos.

Fonte: ABNT, 1987

A classificação dos resíduos está fundamentada nas características reconhecidamente perigosas e nas seguintes listagens de padrões para concentração de poluentes:

Listagem 1 – Resíduos perigosos de fontes não específicas

Listagem 2 – Resíduos perigosos de fontes específicas

Listagem 3 – Constituintes perigosos – base para a relação dos resíduos e produtos das listagens 1 e 2

Listagem 4 – Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos

Listagem 5 – Substâncias agudamente tóxicas

Listagem 6 – Substâncias tóxicas

Listagem 7 – Concentração – limite máximo no extrato obtido no teste de lixiviação

Listagem 8 – Padrões para o teste de solubilização

Listagem 9 – Concentrações máximas de poluentes na massa bruta de resíduos, utilizada pelo Ministério do Meio Ambiente da França para classificação de resíduos

Listagem 10 – Concentração mínima de solvente para caracterizar o resíduo como perigoso

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos podem ser classificados em três classes, a saber:

Resíduos Classe I – Perigosos

Resíduo Perigoso é aquele que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, possa apresentar:

- risco à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças; e
- riscos ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada.

Na Tabela 7, apresentam-se os aspectos que segundo diretrizes estabelecidas pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004) conferem periculosidade a um resíduo.

Tabela 7 - Aspectos que conferem periculosidade a um resíduo

Aspecto	Características
Inflamabilidade	- Ter ponto de fulgor inferior a 60 °C. - Não ser líquido e ser capaz de produzir fogo, quando inflamado, de forma vigorosa e persistente, dificultando a extinção do fogo.
Corrosividade	- Apresentar pH inferior ou igual a 2, ou superior ou igual a 12,5.
Reatividade	- Reagir violentamente ou gerar gases tóxicos quando em contato com a água. - Ser normalmente instável e reagir de forma violenta e imediata, sem detonar. - Ser capaz de produzir, prontamente, reação explosiva ou detonante a 25 °C.
Patogenicidade	- Contiver microorganismos ou se suas toxinas forem capazes de produzir doenças.
Toxicidade	- Possuir quando testada, uma DL ₅₀ (dose letal oral para 50% de uma população de ratos testados) menor que 50mg/kg, ou uma CL ₅₀ (concentração de uma substância, administrada por via respiratória, que acarreta morte de 50% da população exposta) para ratos menor que 2 mg/L, ou ainda, uma DL ₅₀ (dose letal dérmica para 50% de uma população de coelhos testados) menor que 200 mg/kg. - Possuir uma ou mais substâncias constantes da listagem 4 da NBR 10004 - Quando o extrato obtido de amostras representativas do resíduo, segundo a NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos, contiver qualquer um dos contaminantes em concentrações superiores aos valores constantes da listagem 7 da NBR 10004

Resíduos Classe II – Não Inertes

Resíduos Classe II ou Não-Inertes são aqueles que não se enquadram na Classe I (perigosos) ou na Classe III (inertes). Estes resíduos podem ter propriedades tais como combustibilidade, biodegradabilidade, ou solubilidade em água.

Resíduos Classe III – Inertes

Resíduos Classe III ou Inertes são aqueles que, submetidos ao teste de solubilização (NBR 10006/2004) não tenham nenhum dos seus constituintes solubilizados, em concentrações superiores aos padrões definidos na NBR 10004 (ABNT,2004), (Listagem 8 – Padrões para o teste de solubilização).

Segundo Agostini (2002), uma etapa de fundamental importância nos processos de classificação de um resíduo é a fase de amostragem. Para que os resultados de uma análise efetuada em uma amostra possam ter valor, esta tem que representar o mais fielmente possível a composição e as propriedades do resíduo amostrado como um todo. Entende-se por amostragem, o conjunto de operações que conduzem à obtenção de uma pequena porção realmente representativa da composição média do todo.

Quando se trata de um resíduo homogêneo, a amostragem não representa grandes problemas, o mesmo não acontece com resíduos heterogêneos, cujo processo de amostragem é sempre crítico. Os procedimentos a serem adotados em uma campanha de amostragem são descritos pela norma da ABNT NBR 10007 (2004) – Amostragem de Resíduos.

É importante ressaltar que além da fase de amostragem, a fase de acondicionamento da amostra é fundamental para que se obtenham resultados confiáveis. Pois, uma amostra que não seja acondicionada de maneira correta pode vir a sofrer ação de agentes contaminantes, podendo assim ter suas características *in situ* alteradas.

2.3.3 - Minimização da Geração de Resíduos

Um dos principais problemas vivenciados hoje pelas empresas na área de meio ambiente no Brasil, relaciona-se ao gerenciamento dos resíduos industriais. São inclusive, questionadas as condutas das empresas que prestam serviços quanto à disposição de resíduos, uma vez que não apresentam coerência com a realidade observada no setor (ALVES, 1998).

Thiensen (2001) apresenta em seu trabalho uma hierarquia de opções para o gerenciamento adequado de resíduos. O primeiro passo desta hierarquia consiste na adoção de procedimentos que envolvam a minimização dos

resíduos (eliminação, redução na fonte e reciclagem), uma vez que é mais sensato evitar a produção dos resíduos, do que desenvolver extensos programas de tratamento.

A redução/eliminação de resíduos na fonte, adota boas práticas operacionais, ou tecnologias limpas, envolvendo operações de caráter organizacional, tais como treinamento de pessoal, manutenção preventiva e alterações de caráter técnico. Salienta-se que, na maioria das vezes, essas medidas podem ser implantadas de forma rápida e simples, sem necessariamente implicar em investimentos significativos.

A reciclagem de resíduos pode constituir-se, em muitas circunstâncias, em uma alternativa de redução efetiva do custo relacionado com o tratamento ou disposição final de resíduos. O sucesso da reciclagem depende de três possibilidades: a) habilidade de reutilização do resíduo no processo de origem como substituto de algum material, b) habilidade de utilização como matéria-prima interna ou externa à planta, ou ainda, c) habilidade de segregar materiais recuperáveis e valiosos (THIENSEN, 2001).

Segundo Agostini (2002), uma medida de fundamental importância no gerenciamento de resíduos envolve sua segregação dentro das indústrias e nos locais de tratamento ou disposição. Essa prática tem como objetivo básico evitar a mistura de materiais incompatíveis, contribuindo para o aumento da qualidade dos resíduos que possam ser recuperados ou reciclados, além de diminuir o volume a ser tratado e/ou disposto.

Em relação à minimização de resíduos, pode-se afirmar que é de suma importância que seja feita uma completa caracterização do material. Visto que, conhecendo-se todos os constituintes presentes no resíduo, a tomada de decisão a respeito da forma ideal para a reciclagem será facilitada.

2.3.4 - Utilização de Resíduos como Material Alternativo

Tem sido estudada a aplicação de resíduos produzidos em diversos tipos de indústrias para uso como material na construção civil e, em especial, na pavimentação. Além da preocupação com a execução de pavimentos de baixo custo com desempenho satisfatório, procura-se amenizar danos ambientais que ocorrem com a estocagem desses materiais.

Segundo Carneiro et al. (2001) a utilização de resíduos de construção reciclados em várias das camadas dos pavimentos tem-se mostrado viável na base tecnológica existente. Em várias cidades do Brasil e no exterior, tem-se utilizado agregados reciclados em pavimentação e seus resultados satisfatórios vêm demonstrando a boa adequação desse material.

As principais vantagens da utilização dos resíduos sólidos da construção civil em pavimentação, segundo Zordan (1997), são:

- a pavimentação é a forma de reciclagem que exige menor utilização de tecnologia, o que implica em um menor custo do processo;
- a pavimentação permite a utilização de todos os componentes minerais dos resíduos sólidos (concretos, argamassas, materiais cerâmicos, areias, pedras, etc.), sem a necessidade de separação de nenhum deles;
- ocorre uma economia de energia no processo de moagem dos resíduos sólidos (em relação a sua utilização em argamassas), uma vez que parte do material permanece em granulometrias graúdas;
- possibilidade de utilização de maior parcela dos resíduos sólidos produzidos, como o proveniente de demolições e de pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/trituração; e
- maior eficiência do resíduo quando adicionado ao solo, em relação à mesma adição feita com brita. Enquanto na adição de 20% de resíduos sólidos reciclados ao solo gera um aumento de 100% no ISC (índice de suporte Califórnia), na mistura com brita natural, o aumento do ISC só é perceptível com dosagens a partir de 40%.

Segundo Trichês e Kryckyj (1999), o agregado reciclado apresenta propriedades interessantes para utilização na construção de pavimentos. Do ponto de vista geotécnico é considerado um material não plástico, o que permite sua utilização em locais com presença de água, por gerar pouca ou nenhuma lama. Pode, ainda, ser utilizado como redutor de plasticidade, contribuindo, assim, na estabilização dos solos. Apresenta, também, expansibilidade baixa ou nula, ou seja, mesmo sob saturação, não ocorre expansão das camadas compactadas.

Diversos autores vêm desenvolvendo estudos envolvendo a aplicação de resíduos na pavimentação. Motta (2005) analisou em laboratório os aspectos físicos e o comportamento mecânico de agregados reciclados da cidade de São Paulo, a serem utilizados em camadas de base, sub-base ou reforço do subleito de pavimento, em substituição aos materiais convencionais, com enfoque em vias urbanas de baixo volume de tráfego. O estudo envolveu a análise de agregados reciclados in natura, além de sua mistura com 4% de cal ou 4% de cimento Portland, como forma de promover um aumento da resistência. O comportamento mecânico do agregado reciclado foi avaliado pelos ensaios de índice de suporte Califórnia (ISC) com a energia intermediária, resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência.

A autora concluiu que o agregado reciclado analisado é promissor no uso em pavimentação, dadas suas propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, comparáveis com tradicionais materiais estabilizados granulometricamente ou mesmo a brita graduada simples. Complementarmente, a adição de cal ou cimento Portland apresentou-se como excelente alternativa quanto ao requisito de aumento de resistência do material reciclado.

Tanto os valores de ISC como os de módulo de resiliência obtidos dos agregados reciclados naturais ensaiados por Motta (2005) apresentaram ganho de resistência com o tempo. Segundo a autora, isso dá indícios de que houve reação pozolânica por parte das partículas que ainda possuíam potencial reativo.

Guimarães et al. (2004) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de verificar a viabilidade técnica da aplicação de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, do município de Goiânia, em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Na pesquisa foram realizados ensaios laboratoriais baseados no método de

dosagem Marshall, com dois tipos de agregados reciclados (grãos de resíduos de concreto britado – ARC e grãos de resíduos diversos - ARM), e também com um agregado natural de micaxisto.

As dosagens realizadas utilizando agregados reciclados obtidos de resíduos de concreto (ARC) demonstraram que tecnicamente é possível utilizar este tipo de agregado em misturas betuminosas do tipo CBUQ, em revestimentos de pavimentos flexíveis. O teor ótimo de ligante encontrado igual 8% é superior à maioria as dosagens que utilizam agregados naturais, no entanto a utilização de agregados reciclados pode trazer vários benefícios ao meio ambiente, podendo-se destacar a preservação de jazidas, a deposição indiscriminada deste material e o custo que esta deposição causa á maioria das cidades brasileiras.

Leite et al. (2006) realizaram uma comparação de valores de índice de suporte Califórnia (ISC) de agregados reciclados de diferentes origens: usina recicladora do município de São Paulo e usina na cidade de Santo André, região metropolitana de São Paulo. Para efeito comparativo, também foi ensaiada uma amostra de brita graduada simples. Todas as amostras foram compactadas com energia intermediária. As amostras de agregados reciclados compactadas apresentaram valores de ISC da ordem de grandeza da brita graduada simples. O ensaio de ISC realizado após 28 dias de cura apresentou um aumento de 20% no valor do índice sem cura. Segundo os autores, este fato deve-se possivelmente à reação pozolânica de partículas não inertes contidas no material.

Oliveira (2007) estudou o aproveitamento de agregados reciclados em pavimentos flexíveis. Foi construída uma pista experimental com 56 metros de comprimento, sendo as camadas de base e sub-base compostas por dosagens de agregados reciclados mistos e solo argiloso. Durante o monitoramento da pista experimental, na fase de construção e ao longo da ação de aproximadamente três anos de tráfego, os resultados dos ensaios de campo atestaram as boas condições estruturais do pavimento e a viabilidade técnica da aplicação de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis.

Silva (1998) realizou estudos visando uma possível utilização de escória de aciaria misturada com solo argiloso (A-7-6) para emprego em obras de pavimentação e constatou que a mistura pode ser utilizada em camadas do pavimento.

Gonçalves *et al.* (1986) estudaram a utilização da cinza volante em misturas com solos arenosos. Executaram um trecho experimental com base composta de solo arenoso, cinza volante e cal, onde foi verificado um comportamento satisfatório.

Bodi *et al.* (1995) estudaram a utilização de entulho de construção civil na pavimentação com a finalidade de estabilização de solos, concluindo que obedecendo a limites percentuais o entulho pode ser utilizado com esta finalidade.

Pesquisa realizada por Motta & Freire (1995), sobre o aproveitamento econômico dos resíduos da serragem de granito das empresas do município de Guarulhos, mostrou que é possível produzir um novo produto cerâmico, de boa qualidade, com custo inferior aos tradicionais.

O trabalho desenvolvido por Sobrinho (1998) apud Silva (1998) evidencia a possibilidade de utilização dos resíduos provenientes do processamento de granitos e mármore na produção de argamassas alternativas para o uso na construção civil.

Novaes (2001) com base nos dados de caracterização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas verificou seu uso como material de enchimento, *filler*, nos concretos asfálticos usinados à quente (CBUQ). Através de comparações de parâmetros obtidos a partir da realização de ensaios Marshall com materiais de uso corrente, cal e cimento Portland, concluiu que a sua utilização, como *filler*, proporciona um comportamento mecânico satisfatório a mistura asfáltica, podendo ser usada como revestimento em pavimentos flexíveis sem que seja necessário um aumento no teor de cimento asfáltico.

Neves (2002) avaliou a potencialidade do uso de resíduos oriundos do beneficiamento da serragem de granitos das indústrias da Paraíba, Pernambuco e Ceará, visando sua aplicação como matéria-prima cerâmica. Os resultados obtidos evidenciaram que os resíduos estudados apresentaram caracterização física e mineralógica adequados para uso como matéria-prima cerâmica alternativa para uso em cerâmica vermelha, para fabricação de blocos maciços, blocos furados e telhas e em revestimentos cerâmicos e grés sanitário.

Em todas as pesquisas evidencia-se que a utilização de resíduos como material alternativo minimizará os impactos ambientais causados por sua deposição no meio ambiente, além de poder vir indicar o uso e agregar valor a um material, atualmente visto como sem valor econômico.

Gradativamente, tem-se aumentado o uso de resíduos como *filler* em revestimentos asfálticos. Pneu moído e vidro são dois dos mais conhecidos resíduos que foram, com algum sucesso, incorporados em revestimentos asfálticos. Em alguns casos, resíduos podem ser usados para incrementar certas características desejáveis no concreto asfáltico, em outros casos, basta que o problema ambiental de despejo de resíduo seja resolvido, não importando que haja ganho de propriedades no CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente). Entretanto, espera-se que não ocorra perda de propriedades pela necessidade de se dar uma destinação final a um resíduo (REZENDE, 1999).

2.4 - Resíduos Oleosos da Indústria do Petróleo

2.4.1 - Características dos Resíduos Oleosos

Em todo o mundo, as atividades de Exploração e Produção (E & P) de petróleo, geram uma quantidade significativa de resíduo oleoso (RO), que por apresentarem em sua composição teor de óleo, metais, sais, fenóis dentre outros, requer cuidados específicos. Na Tabela 8, apresentam-se, por operações geradoras (perfuração, produção, manutenção), os principais tipos de resíduos oleosos.

Tabela 8 – Principais tipos de resíduos oleosos

Tipo de Resíduo Oleoso	Operação Geradora	Características
Resíduo fundo de tanque	Produção	Resultante do acúmulo de partículas sólidas provenientes das formações, que se depositam no fundo de tanques de estocagem ou de tratamento prévio de fluidos.
Lodo de caixa separadora água / óleo	Produção	Resultante da limpeza de sistemas separadores água – óleo.
Filtros de água produzida	Produção	Constituídos por materiais como brita, areia e carvão ativado, que após sua perda de produtividade como meio filtrante no tratamento da água produzida, são periodicamente descartados.
Areias e detritos de fundo de coluna de produção	Manutenção	Gerados nos processos de manutenção e melhoria da produtividade dos poços quando da retirada de sólidos acumulados no fundo de colunas de produção.
Parafinas	Manutenção	Resultantes de procedimentos de limpeza de hidrocarbonetos parafínicos acumulados em paredes internas de tubulações em geral.
Solo contaminado	Perfuração, produção e manutenção	Resultantes da perfuração de poços de petróleo e dos procedimentos de limpeza de derrames de óleo sobre solos.

Fonte: Fonseca, 2003

Em trabalho de biorremediação de solo contaminado com óleo cru, Rizzo & Santos (2002) relatam a pequena aplicabilidade da técnica de biorremediação in situ de óleo cru e argila. Isto devido à recalcitrância dos hidrocarbonetos de petróleo, atribuída à forte interação entre os argilominerais e o resíduo de óleo cru, associada à baixa oxigenação e disponibilidade de nutrientes.

Segundo Braile & Cavalcanti (1993), a salmoura proveniente da produção de petróleo representa um problema no que se refere a sua destinação final. A quantidade de salmoura em certos campos petrolíferos é aproximadamente 3,3 vezes a quantidade de petróleo bombeado e em sua composição existem 32,5 % de sólidos totais e 20% de cloretos. A menos que exista nas redondezas um curso d'água de grande porte, para que a

salmoura seja eliminada após a remoção do óleo, poderá causar problemas sérios de poluição. O destino final econômico da salmoura permanece um problema. Contudo é comum adotarem-se as seguintes providências:

- armazenagem em lagoas para evaporação e infiltração; deve-se tomar especial cuidado, pois poderá causar contaminação do lençol freático;
- recarga das camadas profundas por bombeamento, muitas vezes como artifício para aumentar a produção de óleo; e
- lançamento no subsolo.

Juvonen *et al.* (2000) estudaram a descontaminação de um resíduo oleoso de refinaria, tratado em compostagem, utilizando testes de toxicidade. Houve um decréscimo dos hidrocarbonetos durante o período de compostagem. A maioria dos voláteis como compostos de benzeno, tolueno, etil-benzeno e xileno (BTEX), desapareceram durante o primeiro mês. A concentração de metais pesados aumentou entre 18 e 39 %, exceto o cobre. Os autores consideram que esse incremento pode ser em função do decréscimo da matéria orgânica, pois se deu na mesma magnitude. A taxa de crescimento do teor de metais pesados foi igual à taxa de decréscimo da matéria orgânica.

Tristão *et al.* (2001) caracterizam resíduos de caixa de separação água e óleo, gerados em atividades de E & P, visando destiná-los a indústria cimenteira. Foram determinados os teores de cinzas, análise elementar orgânica (CHN), enxofre e ensaio de metais na massa bruta. Os autores observaram que dentre os parâmetros analisados, apenas o cromo ultrapassou os limites máximos permitidos (LMP) constantes na listagem número 9 da NBR 10004 (2004).

Garcia *et al. apud* Fonseca (2003) realizaram um estudo de classificação segundo NBR 10004 (2004), de amostras de resíduos oleosos oriundos de limpeza de separadores e de áreas poluídas por derrames de óleo, provenientes das atividades de E & P no norte do Estado do Espírito Santo. As amostras de resíduo oleoso foram classificadas como não inflamáveis. Dos ensaios de solubilização foram verificados vários constituintes em concentrações superiores ao limite máximo permitido, conforme listagem 8 da NBR 10004 (2004). Desta forma, esses resíduos foram classificados como não inertes (Classe II).

Em relação ao teste de lixiviação, todos os constituintes do resíduo oleoso analisados por Garcia *et al. apud* Fonseca (2003) apresentaram concentrações inferiores aos LMP, segundo listagem da NBR 10004 (2004), indicando em princípio, tratar-se de resíduos não tóxicos. Os resultados de análise em massa bruta demonstraram que nenhum metal pesado encontrava-se em concentração superior ao limite estabelecido pela norma de resíduos, confirmando tratar-se de resíduo não-inerte (Classe II). Contudo, os resultados do parâmetro óleos e graxas apontaram concentrações de até 39% o que classificaria esses resíduos como perigosos (Classe I), quando comparados com o limite de 5% estabelecido pela NBR 10004 (2004).

No trabalho realizado por Neder (1998) *apud* Fonseca (2003), a autora aplicou a tecnologia de solidificação/estabilização em resíduos oleosos de atividades de E & P de petróleo, utilizando argilas modificadas. A autora concluiu que o resíduo pode ser caracterizado como perigoso, uma vez que os valores das concentrações de óleos e graxas encontrados no extrato lixiviado, quando comparados com os parâmetros da legislação, foram observados acima do estabelecido.

Fonseca (2003) apresenta uma caracterização e classificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, utilizado em estradas de terra. Segundo a NBR 10004 (2004), sob o aspecto toxicidade, foi caracterizado como tóxico, uma vez que 89 % das concentrações observadas para o parâmetro óleos e graxas ultrapassaram o limite de 5% em massa, estabelecido por essa norma. De acordo com as características apresentadas, o RO foi classificado como resíduo Classe I ou perigoso. Quanto aos aspectos de inerticidade em amostras de RO analisadas, detectou-se característica de não inerte para os parâmetros bário, cádmio, chumbo, cromo, alumínio, ferro, manganês, sódio, cloretos, nitratos e fenóis.

Dados de caracterização e classificação de resíduos oleosos foram obtidos por Faé *et al.* (2002), através de análises realizadas no Laboratório de Saneamento da Universidade Federal do Espírito Santo, em nove amostras do resíduo oleoso bruto (in natura) gerado naquela região. Os resultados das análises efetuadas no resíduo oleoso bruto, em seu extrato lixiviado e solubilizado, indicaram que oito amostras foram classificadas como perigosas (Classe I), para o parâmetro óleo e graxas, com teor médio de 11,5% (o limite máximo permitido pela NBR 10004 (2004) é de 5%), e uma como não inerte (Classe II), para os parâmetros bário, cádmio, chumbo, bromo, alumínio, ferro, manganês, sódio, cloretos, nitratos e fenóis. As análises efetuadas em amostras do resíduo já aplicado na via não pavimentada indicaram que o mesmo foi classificado como não inerte (Classe II), para os parâmetros bário, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, alumínio, ferro, manganês e sódio, e não perigoso quanto ao teor óleo e graxas cuja média foi de 0,77% em peso.

Cordeiro (2007) avaliou o processo de estabilização química e solidificação, com o uso do resíduo oleoso gerado nas atividades de exploração e produção de petróleo, em solo para uso em camadas de bases e ou sub-bases de pavimentos rodoviários. Em relação à classificação dos materiais quanto a toxicidade e inerticidade segundo a ABNT NBR 10004 (2004), o solo, o resíduo oleoso e a mistura classificam-se como "Resíduo Classe II". Os resultados obtidos para os constituintes químicos da mistura solo-resíduo-cal (Resíduo oleoso = 25%; teor de cal = 9,0%) foram inferiores aos obtidos individualmente para o solo e para o resíduo oleoso. Esta redução deve-se ao processo de estabilização química e solidificação que resultou em um melhor encapsulamento dos referidos constituintes.

Portanto, é importante notar que em geral, resíduos oriundos das indústrias de E & P de petróleo, independentemente de fonte geradora, representam em sua maioria riscos para a saúde pública e meio ambiente. Ressaltando-se assim, a importância de que os resíduos tenham uma destinação final ambientalmente adequada.

2.4.2 - Tecnologias de Tratamento Aplicáveis aos Resíduos Oleosos

Dentre as opções de tratamento/destino final aplicáveis atualmente a resíduos oleosos tem-se: *roadspreading*, *dilution burial*, biotratamento, incineração, solidificação/estabilização, dessorção térmica e co-processamento.

2.4.2.1 - Roadspreading

A tecnologia de *roadspreading* consiste basicamente no espalhamento do resíduo oleoso das atividades de E & P em leito de estradas, misturado ao material argiloso. Na região norte do Estado do Espírito Santo, vem sendo utilizada uma técnica de aplicação de resíduo oleoso proveniente das atividades de E & P de petróleo, misturado à argila, em estradas de terra semelhante à tecnologia de *roadspreading* (Figura 4). O procedimento de misturar o resíduo oleoso à argila vem sendo aplicado nos últimos cinco anos em áreas próximas às atividades da Petrobras. As estradas que recebem o resíduo oleoso como pavimento são aquelas onde ocorre o tráfego de carretas com escoamento de óleo produzido na região (FONSECA, 2003).

Entretanto, segundo Fonseca (2003), alguns problemas vêm sendo detectados na técnica utilizada pela Petrobras de aplicar resíduo oleoso em leito de estradas de terra, entre eles:

- ausência de segregação dos resíduos e sua caracterização específica; e
- ausência de monitoramento da região, principalmente de material do leito das estradas pavimentadas com o RO e seu entorno, incluindo águas subterrâneas e superficiais.



Figura 4 - Roadspreading (FONSECA, 2003)

No Canadá o *Alberta Energy and Utilities Board* (EUB), através da formação de uma força tarefa, analisou a questão da utilização do resíduo oleoso em manutenção de estradas e, após extensas e rigorosas pesquisas e opiniões, emitiu, em 28/05/99, o documento *Informational Letter* IL 99-2, contendo as recomendações para o uso ambientalmente seguro do resíduo oleoso em manutenção de estradas pelo sistema de *roadspreading* (ARIDE, 2003).

A primeira preocupação levantada refere-se aos limites de concentração de alguns compostos presentes no resíduo oleoso, como por exemplo: cloretos (sal), que não devem ultrapassar 3.000 mg/kg (3.000 ppm) e hidrocarbonetos (óleos), cujo teor não deve ultrapassar 5%. Outras condições referem-se ao controle dos limites de contaminantes, tais como, teor de água, benzeno e metais pesados.

Devido à variedade de propriedade dos solos nativos, e outras características geográficas, nem todas as estradas são adequadas para receber esse tipo de resíduo em sua manutenção. A empresa proprietária do resíduo e a que vai executar os serviços são responsáveis pela análise cuidadosa dessas condições (ARIDE, 2003).

Os critérios básicos recomendados pelo EUB (1999), para aplicação da tecnologia de *roadspreading* são os seguintes:

Características do resíduo e sua aplicação na estrada:

- a concentração de cloretos não deve ultrapassar 3.000 mg/kg (3.000 ppm);
- a concentração de óleo cru presente no resíduo não deve ser superior a 5% em peso, com densidade maior ou igual a 0,920 g/cm³;
- o ponto de fulgor do resíduo deve ser maior que 61°C;
- o resíduo deve ser empregado na estrada na proporção máxima de 1 parte de resíduo para 3 partes ou mais do material total empregado na manutenção da estrada (material escarificado, argila e o próprio resíduo), o que representa 25% de resíduo, em peso do material total;
- o resíduo deve ser armazenado de forma a minimizar sua contaminação com a água e de facilitar sua amostragem;
- deve-se evitar a contaminação do resíduo por hidrocarbonetos halogenados, produtos químicos perigosos, óleos refinados ou lubrificantes, fluidos de perfuração, ou outros materiais deletérios;
- o resíduo deve ser analisado quanto aos teores de metais e benzeno, tolueno etilbenzeno e xileno (BTEX), adequando-os, quando possível, aos teores permitidos pela legislação local para descarte;
- o resíduo oleoso deve ser segregado de outros resíduos e materiais inadequados para aplicação em estrada;
- não se deve adicionar novos lotes de resíduos a pilhas que já tenham sido amostradas para análise;
- a incorporação não deve ser efetuada em dias de chuva; e

- depois de ser levado para a via não pavimentada, a incorporação do resíduo deve ser feita no mesmo dia, para se evitar problemas de contaminação do meio ambiente caso ocorra chuva a noite.

Características da estrada

- a condutividade elétrica do solo não deve exceder a 2 dS/m, para assegurar que não há excesso de sal;
- a via não pavimentada deve ser do tipo argilosa, para atender aos critérios exigidos para estradas de terra duráveis (índice de plasticidade mínimo de 15%, limite de liquidez mínimo de 30% e fração mínima de argila de 20%, condições que devem ocorrer até uma profundidade mínima de 1,60m abaixo da base da camada do resíduo aplicado);
- a adequabilidade do tipo de solo deve ser avaliada no local e confirmada por análises de laboratório; e
- poços de monitoramento devem ser distanciados de 200m, um do outro, a uma profundidade de 1,60m. Se a condutividade elétrica ou o teor de argila do solo mudar as características, este ponto deve ser demarcado e daí em diante o resíduo não deverá ser aplicado, até que se restaurem as condições anteriores.

Devem ser observadas as seguintes restrições para a incorporação do resíduo oleoso;

- a estrada de terra deve estar distante no mínimo 30 m horizontalmente da marca mais elevada de qualquer superfície de corpo de água. Vias não pavimentadas que apresentem a possibilidade de entrar em contato com qualquer fonte de água não podem receber o resíduo em sua pavimentação pois agravaria o risco de contaminação;
- devem-se selecionar estradas que estejam situadas a mais de 100m de qualquer fonte de água; e
- o resíduo não deve ser incorporado a menos de 30m de bueiros instalados ao longo da estrada.

2.4.2.2 - Dilution Burial

Técnica que busca reduzir os contaminantes para os níveis aceitáveis, através da mistura de solo disponível nas adjacências do local de aplicação, com resíduos ou solo contaminado. Geralmente, a mistura é enterrada em trincheiras com pelo menos 1,5 m de solo não contaminado cobrindo o solo misturado ao resíduo. A redução dos níveis dos constituintes ocorre através da diluição e a alteração química dos constituintes.

Para essa técnica os limites para carga de sal são menos exigentes e a área necessária para tratamento menor. Tem grande aplicação para terras agricultáveis, uma vez que as raízes não penetrarão as áreas remediadas,

pois, como foi mencionado anteriormente, haverá uma camada de solo de 1,5 m de solo não contaminado na superfície. A profundidade do lençol freático para a aplicação dessa tecnologia é crítica e deve estar a pelo menos 6 m abaixo da superfície do solo (SOUZA & LIMA, 2002). O fundo da trincheira deve estar 1,5 m acima da água subterrânea e o topo da mistura do resíduo pelo menos 1,5 m abaixo da superfície do solo. Nestes termos, a trincheira deve ser cavada com uma espessura mínima de cerca de 3 m.

Segundo Garcia & Vaqueiro (2001), após um estudo efetuado do uso desta técnica nos cascalhos gerados na perfuração de um poço de petróleo na Bahia, ficou constatado que o aterro com diluição aplica-se de forma eficaz, desde que o solo receptor não tenha umidade superior a 50%. Nesse estudo, o volume de cascalho contaminado gerado foi de 63 m³.

2.4.2.3 - Biotratamento

Alguns compostos orgânicos presentes em resíduos de E & P podem ser biodegradados para dióxido de carbono e água em processos biológicos naturais. Entretanto, a biodegradação natural de contaminantes tende a uma taxa limitada em razão dos processos biológicos. Os processos de biotratamento mais utilizados são: biopilhas e *landfarming*.

O sistema de biopilhas é, geralmente, desenvolvido em escala industrial. Os resíduos sólidos oleosos são colocados em pilhas ou células, que propiciam condições ideais para que mediante processos de biodegradação, as concentrações de poluentes orgânicos presentes no resíduo sejam reduzidas.

A utilização desta técnica requer a mistura de resíduos oleosos com agentes estruturantes (casca de arroz, palha, serra-pilha, entre outros). As taxas de biodegradação podem ser estimuladas pelo controle de umidade, oxigênio, temperatura, nutrientes e pH das pilhas de resíduos.

As biopilhas são normalmente dispostas em locais impermeabilizados com mantas para reduzir os riscos de migração de lixiviados para o ambiente de subsuperfície não contaminado. No processo estático, o oxigênio é fornecido por meio de uma rede de tubos perfurados e conectados a uma bomba de vácuo. Outra maneira de fornecer o oxigênio é através de reviramento periódico da pilha. Em alguns casos, faz-se necessária, a construção de um sistema de coleta de lixiviados para o seu tratamento (AGOSTINI, 2002).

Freqüentemente, as pilhas são recobertas por mantas impermeáveis, minimizando a perda de poluentes, principalmente compostos voláteis. Em condições otimizadas, o tratamento dos resíduos pelo sistema de biopilhas dura em torno de 3 a 6 meses.

O *landfarming* (ou fazendas de lodo) é um sistema de tratamento, que através das propriedades físicas e químicas do solo e da intensa atividade microbiana deste meio, procura promover em condições controladas de pH, umidade e nutrientes, a biodegradação, destoxificação, transformação e imobilização dos contaminantes presentes nos resíduos sólidos oleosos.

Os resíduos oleosos são incorporados ao solo de uma célula de *landfarming*, nos primeiros 45 cm de profundidade, sendo homogeneizados e aerados periodicamente através de aragem. Quando o nível de tratamento desejado é atingido, mais resíduos são adicionados e homogeneizados. O solo remanescente da célula serve como inóculo de culturas microbianas já adaptadas para a degradação do resíduo, o que reduz o tempo de tratamento biológico (AGOSTINI, 2002).

A técnica de *landfarming*, para ser aplicada aos rejeitos da perfuração de poços de petróleo, requer cuidados especiais quanto ao monitoramento da área utilizada. Os resíduos, como já visto anteriormente, possuem outros contaminantes além do óleo (sais e metais), que podem, por lixiviação, vir a contaminar o solo. Em locais com alto índice pluviométrico, o problema se agrava, com a possibilidade de contaminação do lençol freático. Dois outros pontos a serem analisados são: o tempo necessário à biodegradação do óleo e a extensão de terreno necessário à disposição dos cascalhos, que variarão em função da quantidade de rejeitos aplicados sobre o solo (SOUZA & LIMA, 2002).

A efetividade do *landfarming* depende, portanto, de parâmetros que podem ser agrupados em três categorias (EPA, 2000):

- características do solo;
- características dos constituintes a serem tratados; e
- condições climáticas.

A textura do solo afeta sua permeabilidade, seu teor de umidade e sua densidade. Para assegurar que a adição de oxigênio, a distribuição de nutrientes e o teor de umidade do solo possam ser mantidos dentro de variações efetivas, deve-se considerar a textura do solo. Por exemplo, solos que tendem a se aglutinar (solos argilosos), são difíceis de serem aerados. Existem dificuldades também em se uniformizar a distribuição de nutrientes através desses solos. Eles retêm água por períodos prolongados após eventos de precipitação (ARIDE, 2003).

A composição do resíduo a ser tratado também deve ser considerada, caso contrário poderá haver contaminação atmosférica (se o resíduo for constituído de componentes voláteis), ou decréscimo na eficiência do tratamento, caso haja componentes tóxicos que possam matar os microorganismos.

As condições climáticas interferem no processo pela ação dos ventos, que podem provocar erosão, e pela incidência de chuvas, que pode aumentar o teor de água do substrato, prejudicando assim a eficiência do processo.

Portanto, algumas vantagens e limitações do processo de “landfarming” devem ser mencionadas (EPA, 2000):

Vantagens

- relativamente simples de projetar e implantar;
- tempo reduzido para tratamento (normalmente de 6 meses a 2 anos sob condições ótimas);
- custo competitivo – US\$30-60/t em solos contaminados; e
- efetivo para constituintes orgânicos com baixas taxas de biodegradação.

Limitações

- reduções maiores que 95% nas concentrações, e concentrações de constituintes menores que 0,1 ppm são difíceis de serem alcançadas;
- pode não ser efetivo quando as concentrações dos constituintes são elevadas (maiores que 50.000 ppm de hidrocarbonetos totais);
- presença de concentrações significativas de metais pesados (maiores que 2.500 ppm), pode inibir o crescimento microbiológico;
- constituintes voláteis tendem a evaporar ao invés de biodegradar durante o tratamento;
- uma área muito grande para tratamento é requerida;
- geração de poeira e vapor durante a aeração podem causar preocupações quanto à qualidade do ar; e
- pode exigir impermeabilização do solo para evitar lixiviação.

2.4.2.4 - Incineração

A incineração usa combustão para converter resíduo em material menos volumoso. Ela pode ser praticada para combustão em fossas, embora o grau de combustão obtida em incinerador comercial possui tempo de retenção controlado, opções de temperatura e turbulência dentro da câmara do incinerador otimizado. Esses incineradores

são sempre preparados com equipamento de controle de poluição de ar para remover produtos de combustão incompleta.

Todas as instalações de incineração deverão dispor de uma autorização. Esta licença, emitida por uma autoridade competente, especifica as categorias e as quantidades de resíduos perigosos e não-perigosos que podem ser tratados, a capacidade de incineração da instalação e os procedimentos de amostragem e medição que vão ser utilizados.

Após a incineração, os resíduos sólidos remanescentes do processo devem ser bem gerenciados. Quando compostos orgânicos são incinerados, há um aumento na concentração dos metais. São requeridas estabilizações para prevenção de liberação por lixiviação de compostos nocivos ao ambiente.

As emissões gasosas de compostos químicos decorrentes da incineração fizeram com que se tornasse uma das tecnologias de tratamento de resíduos mais combatidas pelos ambientalistas.

2.4.2.5 - Solidificação/Estabilização

Com a elevação dos impactos ambientais, criar soluções para o controle da poluição industrial tem-se tornado uma constante para os pesquisadores e especialistas de diversas áreas. Bom exemplo é a técnica de encapsular resíduos inorgânicos. O encapsulamento, que pode ser obtido com auxílio de técnicas de estabilização química e solidificação, é um estágio de pré-tratamento pelo quais os constituintes perigosos de um resíduo são transformados e mantidos em suas formas menos solúveis ou tóxicas confinados em cápsulas, partículas ou blocos.

As transformações ocorrem via reações químicas que fixam elementos, ou compostos tóxicos, em polímeros impermeáveis ou cristais estáveis, chamados encapsulantes. Assim estabilizados, ficam menos agressivos ao meio ambiente (CORDEIRO, 2007).

A estabilização consiste de um método envolvendo processos químicos, através dos quais os constituintes perigosos de um resíduo são transformados e mantidos nas formas menos solúveis ou menos tóxicas. Já a solidificação, é um processo com adição de material, que gera uma massa sólida monolítica de resíduo tratado, melhorando sua integridade estrutural e características físicas.

Segundo Wiles (1987), a tecnologia de encapsulamento (solidificação/ estabilização) é um tratamento que visa:

- a) melhorar as características físicas e de manuseio de um resíduo;
- b) diminuir a superfície de exposição, através da qual possa ocorrer perda ou transferência de contaminantes;

- c) limitar a solubilidade ou “detoxificar” qualquer constituinte presente no resíduo;
- d) minimizar a taxa de migração de contaminantes para o meio ambiente; e
- e) reduzir o nível de toxicidade.

A solidificação/estabilização não é uma forma de tratamento que se justifique para qualquer tipo de resíduo. A decisão técnica e econômica para a escolha desta tecnologia deve ser embasada em dados sobre a quantidade, composição química e propriedades físicas, localização e problemas de disposição associados a um resíduo específico. Resíduos classificados como Perigosos (ou Classe I) e gerados em grandes quantidades são os que comumente justificam esse tipo de tratamento. Os resíduos perigosos considerados tradicionalmente adequados para o tratamento por solidificação/estabilização têm sido os seguintes (AGOSTINI, 2002):

- resíduos contendo íons metálicos ou semi-metals;
- resíduos oleosos e à base de solventes, tais como solventes usados, fundo de tanques de destilação e resíduos de refinarias;
- resíduos aquosos contendo 1% a 20% ou mais de substâncias orgânicas (emulsões), solúveis ou insolúveis, listadas como perigosas pela legislação;
- resíduos aquosos contendo 1% a 20% ou mais de substâncias orgânicas (emulsões), solúveis ou insolúveis, não listadas como perigosas pela legislação, a não ser por suas características de ignitabilidade, e
- resíduos aquosos contendo baixos teores de poluentes orgânicos listados como perigosos – menos de 1% e, usualmente na faixa de 10 a 1000 mg/L (exemplo: pentaclorofenol ou bifenilas oplicloradas).

Ressalta-se que a tecnologia de solidificação/estabilização até o início da década de 90 era considerada imprópria para resíduos com altos teores de constituintes orgânicos. Contudo, o desenvolvimento de novos aglomerantes permitiu o tratamento de uma ampla variedade de compostos orgânicos. Por exemplo, resíduos com 10 a 20% de conteúdo orgânico não eram, até então, recomendados para as tecnologias de solidificação/estabilização disponíveis, uma vez que os compostos orgânicos interferem nos processos físico-químicos, que são importantes na pega e endurecimento do cimento e conseqüente fixação dos constituintes do resíduo (AGOSTINI, 2002).

2.4.2.6 - Dessorção Térmica

A técnica de dessorção térmica (Figura 5) utiliza indiretamente o poder calorífico dos contaminantes presentes nos resíduos oleosos para remover os compostos orgânicos voláteis. São utilizadas baixas temperaturas (150°C a 400°C) para promover a volatilização dos gases, que podem ser recirculados ou tratados. Esse processo é

utilizado, principalmente, para a remoção de hidrocarbonetos de solos contaminados, obtendo-se melhores resultados em solos de textura arenosa ou grossa.

A técnica da dessorção térmica emprega um processo que não opera em sistema fechado, ou seja, há emissão de poluentes para a atmosfera, provenientes do combustível utilizado para o aquecimento indireto dos rejeitos, na primeira fase do processo. A remoção de óleo é eficiente, entretanto outros contaminantes, como metais e sais, ainda permanecerão nos cascalhos, exigindo ainda cuidados especiais na disposição desses rejeitos. A conjugação com outra técnica ou reutilização na indústria cimenteira seria uma solução complementar possível (SOUZA & LIMA, 2002).



Figura 5 - Exemplo de estação de dessorção térmica no campo (SOUZA & LIMA, 2002)

2.4.2.7 - Co-Processamento

Uma destinação final que vem sendo utilizada atualmente é a do co-processamento, que é uma técnica de destruição térmica do resíduo a alta temperatura em fornos de fabricação de clínquer (Figura 6). Para a utilização dessa técnica é necessário se obter o licenciamento prévio, junto aos órgãos ambientais competentes.

A vantagem dessa técnica é que ela proporciona o aproveitamento do conteúdo energético e/ou fração mineral do resíduo, sem a geração de novos resíduos, contribuindo assim, para a economia de combustíveis no processo, e de matérias primas não renováveis (ARIDE, 2003).



Figura 6 - Co-Processamento (MAIA & SILVA, 2006)

2.5 - Considerações Finais da Fundamentação Teórica

Em resumo, processos tecnológicos apresentam inúmeras possibilidades de tratamento e recuperação de resíduos, antes de serem dispostos no meio ambiente. E, em alguns casos, vários componentes valiosos recuperados podem vir a compensar economicamente os custos de tais processos, além de evitar a poluição (SOUZA & LIMA, 2002).

Portanto, fazendo-se uma análise criteriosa das técnicas atualmente existentes para tratamento/destinação final de resíduos oleosos, pode-se afirmar que:

- a técnica de *roadspreading* exige um acompanhamento bastante rigoroso tanto na fase de projeto quanto na fase de execução e durante a utilização da estrada, pois existe o risco de lixiviação dos contaminantes presentes no resíduo para os solos vicinais e lençol freático existente nas imediações da estrada;
- as técnicas de *dilution burial* e biotratamento possuem a desvantagem de necessitarem uma grande área, na qual os resíduos serão incorporados. Ou seja, representa um gasto extra e significativo a aquisição destas áreas, além de que podem também possibilitar a lixiviação dos seus componentes;
- a técnica de incineração é a menos recomendada em virtude da grande emissão de poluentes para a atmosfera. Já a técnica de solidificação/estabilização apesar de possuir aspectos positivos, tem a desvantagem de ser uma alternativa que aumenta a quantidade de material a ser dada uma destinação final, visto que o resíduo é misturado a uma matriz encapsulante. Além do que, a eficiência deste encapsulamento diminui com o passar do tempo;
- a técnica de dessorção térmica, como visto, não pode ser utilizada separadamente, o que a torna desta maneira uma alternativa apenas complementar. A técnica de co-processamento exige um grande investimento para a sua aplicação e necessita um rigoroso controle ambiental para a sua utilização.

Isto comprova o fato de que não existe uma técnica atualmente aceita de maneira incontestável, o que corrobora a importância de novas pesquisas de destinação final para os resíduos, como a apresentada neste trabalho, de incorporação do resíduo ao revestimento asfáltico.

O destino final a ser dado a esses resíduos é, atualmente, uma preocupação constante para as empresas que extraem petróleo, uma vez que, quase sempre, não existem aterros industriais disponíveis nas proximidades. Além disso, as distâncias envolvidas e os custos referentes a transporte para armazenagem em aterros industriais ou outros tipos de tratamento são muito altos, sem considerar que esse tipo de destinação final vem sendo reduzido no esforço de converter resíduo em matéria prima, tudo isso visando o fortalecimento de modelos de desenvolvimento sustentável (ARIDE, 2003).

Na tomada de decisão sobre qual técnica de disposição final dos resíduos da perfuração terrestres de poços de petróleo será empregada, necessariamente deverá haver uma conjugação dos fatores econômicos e técnicos. Nem sempre a melhor técnica do ponto de vista ambiental será a ideal se os custos envolvidos no projeto, instalação e operação forem inviáveis. Analogamente, o melhor projeto, do ponto de vista econômico, poderá não atender as exigências ambientais. E vários fatores têm influência nesta decisão, tais como: capacidade de investimentos, situação geográfica do local de implantação do projeto, condições meteorológicas locais, legislação ambiental aplicável na região, comunidades próximas, etc.

O ineditismo da proposta deste trabalho (utilização do cascalho de perfuração em revestimentos asfálticos), tem como principal vantagem a conjugação dos fatores econômicos e técnicos, visto que o resíduo não necessita de nenhum tipo de tratamento antes de sua aplicação. Entretanto, existe a limitação da falta de dados para comparação dos resultados na literatura por se tratar de um estudo pioneiro.

CAPÍTULO 3

3 - ETAPA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os detalhes relativos aos materiais e métodos utilizados no decorrer desta pesquisa. Os métodos de ensaio e normas da ABNT, DNIT, etc. serão apenas citados e descritos de maneira sucinta. Os métodos não constantes na normalização serão descritos detalhadamente. Em qualquer dos casos, modificações eventuais nos métodos de ensaio serão detalhadas.

3.1 - Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram: agregados (gráudo e miúdo), *fillers* convencionais (cal, cimento Portland e pó calcário), resíduos oleosos e o cimento asfáltico de petróleo (CAP).

3.1.1 - Agregados

Foram utilizados dois agregados gráudos, tipo granítico, designado como comercial, (DNIT – ME 081/1995), apresentando um diâmetro máximo de 19,1 mm (Figura 7), e 12 mm, disponibilizados pelo 3º Batalhão de Engenharia e Construção (BEC).

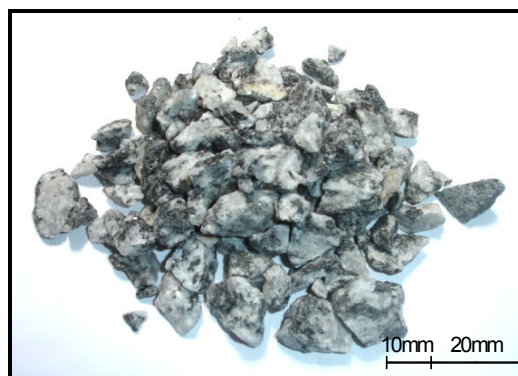


Figura 7 - Agregado gráudo – Brita 19 mm

O agregado miúdo utilizado é a areia do rio Paraíba, do tipo quartzosa (DNIT – ME 084/1995), (Figura 8).

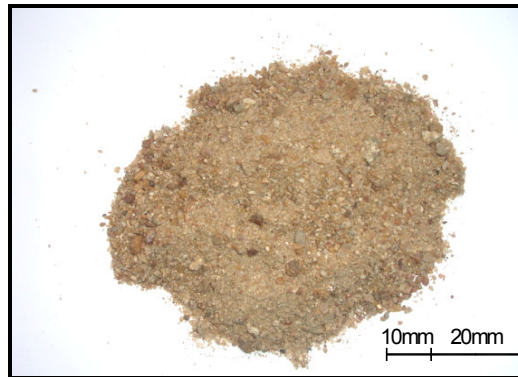


Figura 8 - Agregado miúdo – Areia de rio

3.1.2 - *Fillers Convencionais*

A cal hidratada utilizada é da marca Megão e possui massa específica de 2,450 g/cm³.

O cimento utilizado nesta pesquisa é do tipo Portland (CP II-Z 32 – Zebu), com massa específica de 3,080 g/cm³.

O pó calcário utilizado nesta pesquisa foi disponibilizado pelo 3º Batalhão de Engenharia e Construção (BEC), e possui massa específica de 2,830 g/cm³ (Figura 9).



Figura 9 – Pó calcário – *filler* convencional

3.1.3 - *Resíduos Oleosos*

O resíduo oleoso 1 (Figura 10) foi fornecido pela Petrobras, proveniente da perfuração de um poço de petróleo *offshore* no Estado de Sergipe (poço: 4-SES-149A - profundidade de 3068m). Na perfuração do poço foi utilizado fluido de perfuração à base de parafina.



Figura 10 - Resíduo oleoso 1 (poço: 4-SES-149A)

O resíduo oleoso 2 foi fornecido pela empresa de perfuração Aurizônia, proveniente da perfuração de um poço de petróleo *onshore* no Estado do Rio Grande do Norte (poço: 1-POTI-4-RN – profundidade de 800m). Na perfuração do poço (Figura 11), foi utilizado fluido de perfuração à base água.

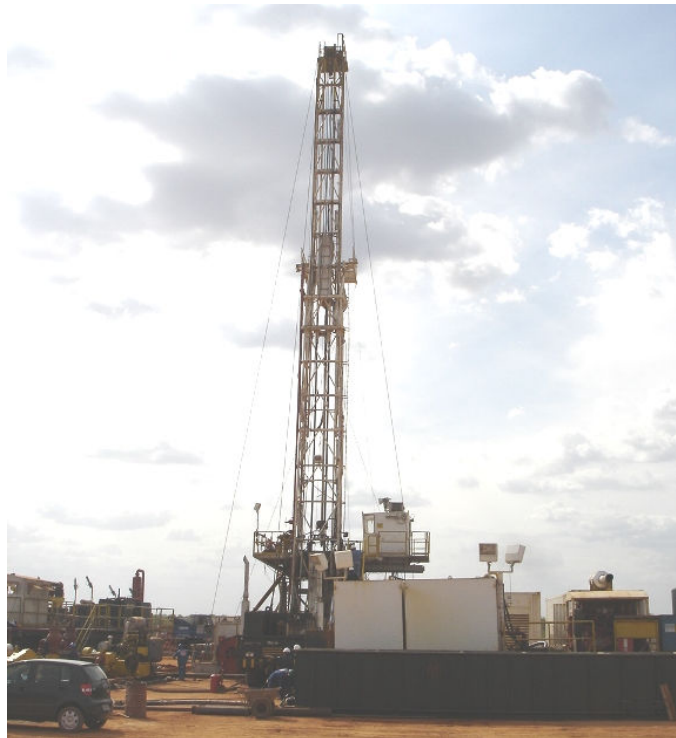


Figura 11 – Sonda de perfuração do poço 1-POTI-4-RN

Para o resíduo oleoso 2, foram coletadas amostras em 3 profundidades diferentes, de modo que cada amostra é originária das seguintes formações geológicas: Formação Jandaíra, Formação Açú e Embasamento

Cristalino. Em virtude da semelhança granulométrica existente entre as três amostras do resíduo oleoso 2 (Jandaíra, Açú e Embasamento Cristalino), optou-se por realizar uma mistura homogênea das amostras para realização dos ensaios asfálticos (Figura 12).

A Formação Jandaíra ocorre em todo domínio da Bacia Potiguar. Caracteriza-se por carbonatos marinhos de águas rasas e agitadas de idade Turoniana a Santoniana. Na porção a oeste do rio Açú predomina, em superfície, o caráter calcífero dos calcários dessa formação ao passo que a leste predominam dolomitos. Cresce também em direção a leste a participação de clásticos finos nos sedimentos carbonáticos. Os sedimentos carbonatados da Formação Jandaíra são concordantes com os folhelhos e siltitos da Formação Açú Superior, sendo o contato gradativo (WATERLOO, 2004).

A Formação Açú de idade cretácica, aflora numa faixa que circunda a Bacia Potiguar, entre as rochas do Embasamento e os sedimentos da Formação Jandaíra, sendo recoberta na área em que aflora, em pequenas áreas isoladas, pelos aluviões dos rios Jaguaribe, Apodi, do Carmo, Piranhas e Cabugi. É caracterizada por rochas do tipo arenitos, conglomerados, com intercalações de siltitos, argilitos e folhelhos, formando solos bastante arenosos inconsolidados (WATERLOO, 2004).

As rochas do Embasamento Cristalino pré-cambriano fazem parte dos Granitóides Brasileiros. As rochas são em sua maioria gnáissico-migmatíticas (WATERLOO, 2004).



Figura 12 – Mistura homogênea das três formações geológicas do resíduo oleoso 2 (1-POTI-4-RN)

3.1.4 - Cimento Asfáltico de Petróleo

O CAP usado na pesquisa foi do tipo 50/70 (penetração 100g, 5s a 25°C) cujas especificações estão de acordo com o DNP (Departamento Nacional de Petróleo) e a ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis), os quais definem parâmetros de aceitação e classificação. A Tabela 9 apresenta dados característicos do CAP.

Tabela 9 - Características do cimento asfáltico

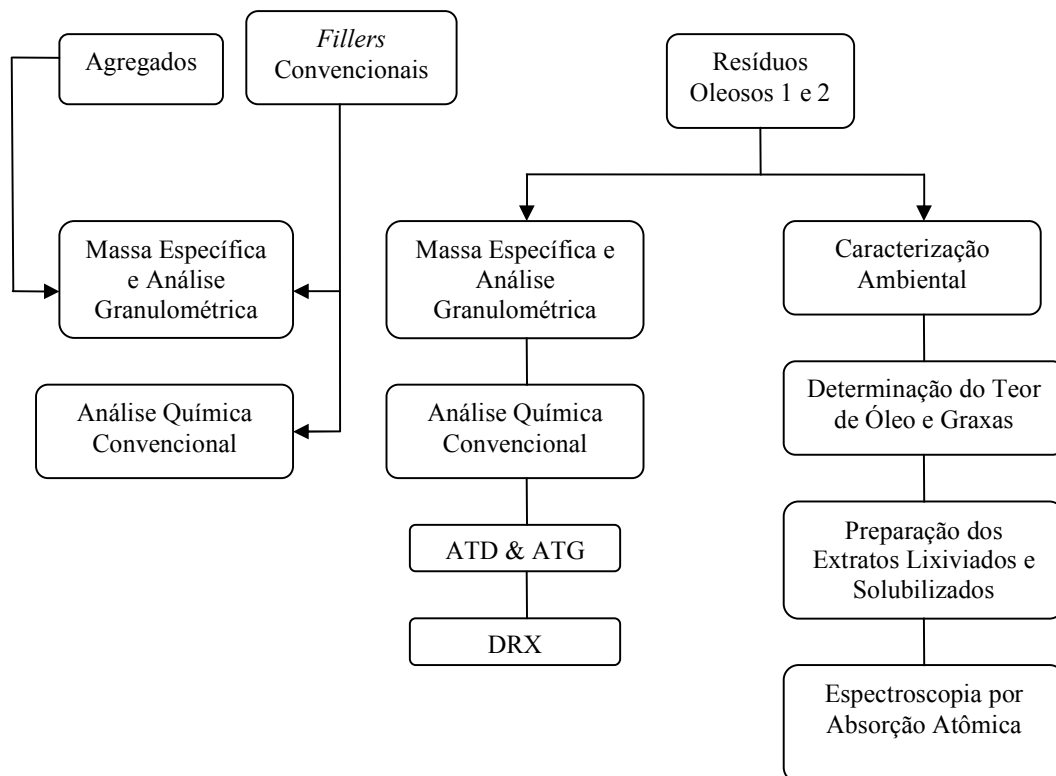
Ensaio	Valor
Penetração (100g, 5s a 25° C)	50-70
Ponto de Fulgor (°C, mínimo)	295
Densidade (g/cm ³)	1,020
Viscosidade Saybolt Furol (135° C, s)	320

3.2 - Procedimento Experimental

Com o intuito de se avaliar a utilização dos resíduos oleosos em revestimentos asfálticos, foi realizada separadamente a caracterização física e mineralógica dos resíduos e dos materiais convencionais. Posteriormente, foi realizada a mistura dos materiais e respectiva dosagem. Por fim, foi realizada uma caracterização mecânica completa da mistura asfáltica e avaliação do seu desempenho.

3.2.1 - Caracterização Física e Mineralógica

O Fluxograma 1 apresenta os ensaios realizados da caracterização física e mineralógica.



Fluxograma 1 - Caracterização física e mineralógica

3.2.1.1 - Determinação da Massa Específica

A massa específica aparente dos agregados e dos resíduos oleosos foi determinada utilizando-se a norma NBR 6508 (ABNT, 1984).

3.2.1.2 - Análise Granulométrica

A distribuição dos tamanhos de grãos dos agregados, *fillers* convencionais e resíduos oleosos, foram determinados a partir da realização do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação NBR 7181 (ABNT, 1984). Posteriormente, optou-se por realizar a análise granulométrica por difração de laser (Figura 13) para os *fillers* convencionais e resíduo oleoso 1, em função da confiabilidade de resultados que esse método proporciona.

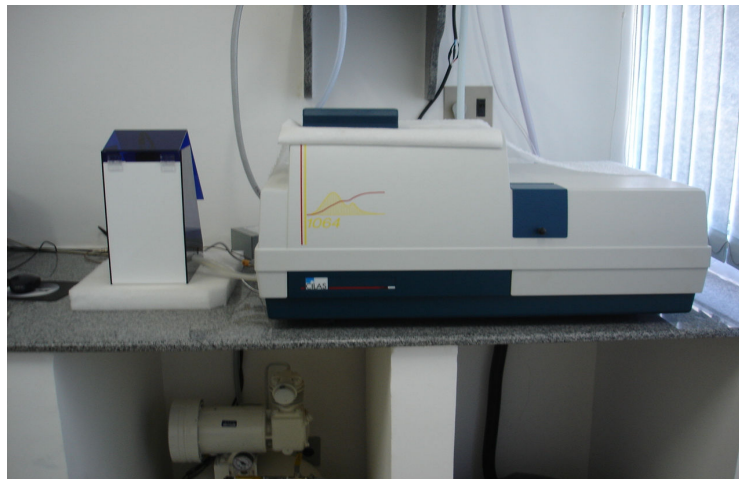


Figura 13 - Equipamentos do ensaio de difração a laser – CILAS 1064

A análise granulométrica por difração de laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associado com um processo de medida óptica através de difração de laser. Nesse método, é combinada a relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho de partículas.

3.2.1.3 - Análise Química Convencional

A análise química fornece dados fundamentais de grande utilidade industrial e científica, apesar de não permitir uma avaliação completa da composição mineralógica e das propriedades físico-químicas.

As amostras dos materiais (*fillers* convencionais e resíduos oleosos) foram submetidas à análise química, segundo técnicas clássicas e instrumentais no Laboratório de Análise Minerais do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (LAM, 2000).

Nesta pesquisa as determinações de: perda ao rubro, SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_4 e resíduos insolúveis foram analisadas.

3.2.1.4 - Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG)

As análises termogravimétrica (ATG) e termodiferencial (ATD), são úteis para indicar as faixas de temperaturas onde ocorrem as perdas de massas e as temperaturas em que ocorrem transformações endo e exotérmicas. As curvas térmicas dos materiais (resíduos oleosos) foram obtidas através de um sistema de Análises Térmicas Modelo RB-3020 da BP Engenharia (Figura 14), com razão de aquecimento $12,5^\circ\text{C}/\text{min}$. A temperatura máxima para ambos os ensaios foi de 1000°C e o padrão utilizado na ATD foi óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.



Figura 14 – Analisador térmico RB 3020

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

3.2.1.5 - Difração de Raios-X

Os resíduos oleosos foram passados em peneira ABNT nº200 (0,075 mm) e acondicionados em porta amostra de vidro para análise por difração de raios-x, em equipamento XRD 6000 da Shimadzu (Figura 15). A radiação foi $\text{K}\alpha$ do Cu (40kV/30mA); a velocidade do goniômetro foi de $2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ$.

As análises de difração de raios-x foram realizadas no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – PB.



Figura 15 – Difratometro de raios-x XRD6000

3.2.1.6 - Caracterização Ambiental

Para que um resíduo seja disposto adequadamente é necessário que sua composição química seja determinada segundo os procedimentos sugeridos na NBR 10004 (ABNT, 2004). Esta norma estabelece os critérios adotados para a classificação dos resíduos quanto aos seus riscos potenciais para o meio ambiente e à saúde pública. Portanto, com o objetivo de classificar ambientalmente os resíduos oleosos foram utilizados os seguintes procedimentos: determinação do teor de óleo e graxas, preparação dos extratos lixiviados e solubilizados e espectroscopia por absorção atômica.

a) Determinação do Teor de Óleo e Graxas

Foi realizada a separação das frações orgânica e inorgânica, e determinação do teor de óleo e graxas de acordo com a norma DNIT – ME 053 utilizando como solvente o éter de petróleo. O equipamento utilizado foi o Rotarex – I - 2009- B (Figura 16).

Para o resíduo oleoso 2 não foi necessária a extração de óleo, visto que o mesmo não estava contaminado com óleo. Em geral, o cascalho de perfuração é classificado como resíduo oleoso, uma vez que possui contaminação por óleo ou pelo fluido de perfuração à base de óleo. Entretanto, no resíduo oleoso 2, observou-se que não ocorreu “contaminação” por óleo e foi utilizado fluido de perfuração à base água .



Figura 16 – Rotarex – I - 2009- B

b) preparação dos extratos lixiviados e solubilizados

Foram preparados os extratos lixiviados e solubilizados de acordo com as normas NBR 10005 e NBR 10006 (ABNT, 2004), visando à caracterização e classificação dos resíduos segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004).

c) espectroscopia por absorção atômica

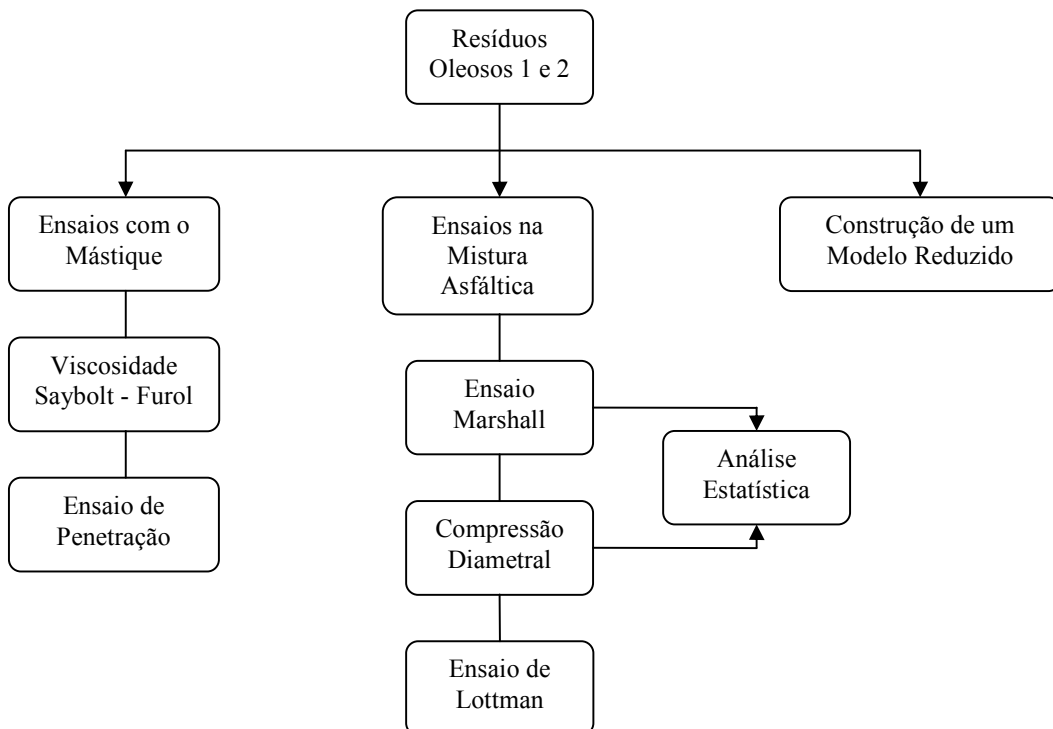
A Figura 17 apresenta o equipamento de Espectroscopia por Absorção Atômica utilizado para obtenção dos constituintes químicos contidos nos extratos lixiviado e solubilizado dos resíduos oleosos.



Figura 17 – Equipamento de Espectroscopia por Absorção Atômica - SPECTRO AA 200

3.2.2 - Caracterização Mecânica

O Fluxograma 2 apresenta os ensaios realizados da caracterização mecânica. O estudo da interação dos *fillers* com o CAP foi realizado com a análise dos resultados obtidos com o auxílio dos ensaios de Penetração e de Viscosidade (ensaios com o mástique). Já o estudo da interação *fillers*, CAP e agregados foi realizado com a análise dos resultados obtidos dos ensaios Marshall, Compressão Diametral e Lottman (ensaios na mistura asfáltica).



Fluxograma 2 - Caracterização mecânica

3.2.2.1 - Viscosidade Saybolt-Furol

Os ensaios de viscosidade Saybolt-Furol (ABNT – IBP/P-MB-517) foram realizados no mástique com a fração fina do resíduo oleoso no estado natural e obedeceram as seguintes etapas: Primeira Etapa – determinação da viscosidade da mistura de CAP + cal, variando o teor da cal em 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 15%, 20% e 30% (duas repetições para cada teor). Segunda Etapa – determinação da viscosidade da mistura de CAP + cimento, variando o teor de cimento em 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% (duas repetições para cada teor). Terceira Etapa – determinação da viscosidade da mistura de CAP + RO, variando o teor do resíduo em 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 15%, 20% e 30% (duas repetições para cada teor).

A escolha dos teores utilizados foi baseada a partir do estudo realizado por Puzinauskas (1983).

3.2.2.2 - Ensaio de Penetração

Os ensaios de penetração (DNIT-ME 003/99) foram realizados segundo as etapas: Primeira Etapa - penetração do cimento asfáltico de petróleo (CAP); Segunda Etapa – penetração da mistura de CAP + cal, variando o teor de cal em 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de acordo com o volume das cápsulas; Terceira Etapa – penetração da mistura de CAP + cimento, variando o teor de cimento em 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de acordo com o volume das cápsulas; Quarta Etapa - penetração da mistura de CAP + RO, variando o teor de RO em 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de acordo com o volume das cápsulas.

3.2.2.3 - Ensaio Marshall

O ensaio Marshall (DNIT – ME 043/95) foi realizado nas seguintes etapas: Primeira Etapa – Mistura CAP + agregados + pó calcário: variando o teor de pó de 2 a 5%; Segunda Etapa – Mistura CAP + agregados + cimento: variando o teor de cimento de 2 a 5%; Terceira Etapa - Mistura CAP + agregados + RO, variando o teor de RO de 2 a 5%. O ensaio Marshall foi realizado utilizando-se dois processos de compactação: compactação manual e compactação automática (Figura 18).

Apresentam-se também, os valores do desvio padrão, variância e erro padrão assim como, a análise dos fatores (tipo de compactação, tipo de filler e teor de filler) sobre a estabilidade (kgf), visando identificar os fatores e interações mais significativas. Foi realizada a análise de variância (ANOVA) com os resultados dos ensaios Marshall. A partir do teste F de Snedecor e do teste p, verificou-se a significância (95%) dos efeitos dos fatores e as interações dos fatores nas variáveis dependentes.



(a)



(b)

Figura 18 – Equipamentos utilizados para realização do ensaio Marshall

[(a) Compactador Automático (b) Compactador Manual]

3.2.2.4 - Ensaio de Compressão Diametral

O ensaio de Compressão Diametral (DNIT – ME 138/94) foi realizado nas seguintes etapas: Primeira Etapa – Mistura CAP + agregados + pó calcário: variando o teor de pó de 2 a 5%; Segunda Etapa – Mistura CAP + agregados + cimento: variando o teor de cimento de 2 a 5%; Terceira Etapa - Mistura CAP + agregados + RO, variando o teor de RO de 2 a 5%.

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) com os resultados dos ensaios de Resistência a Tração por Compressão Diametral. A partir do teste F de Snedecor e do teste p, verificou-se a significância (95%) dos efeitos dos fatores e as interações dos fatores nas variáveis dependentes.

3.2.2.5 - Ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman

O ensaio de Lottman (ASTHO T 283-02) foi realizado nas seguintes etapas: Primeira Etapa – Mistura CAP + agregados + pó calcário: variando o teor de pó de 2 a 5%; Segunda Etapa – Mistura CAP + agregados + cimento: variando o teor de cimento de 2 a 5%; Terceira Etapa - Mistura CAP + agregados + RO, variando o teor de RO de 2 a 5%.

3.2.2.6 – Modelo Reduzido

Com a finalidade de monitorar o impacto ambiental causado pela utilização de resíduos oleosos em revestimentos asfálticos foi construído um modelo reduzido (data da construção: 03/11/07), de revestimento asfáltico de 0,03 m de espessura sobre uma camada de 0,2m de areia contidos em uma caixa de madeira (1m x 1m x 0,3m) (Figura 19). Foram realizados 12 orifícios ao redor da caixa onde foram inseridos canos de PVC, para facilitar o procedimento de coleta do líquido resultante da aspersão de água destilada no revestimento asfáltico do trecho experimental.

Para o líquido coletado (data da coleta: 03/07/08), foram preparados extratos lixiviados e solubilizados de acordo com a NBR 10005 e NBR 10006 (ABNT, 2004), visando à caracterização e classificação do líquido segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) a partir do equipamento de Espectroscopia por Absorção Atômica.



(a)



(b)

Figura 19 – Trecho experimental

CAPÍTULO 4

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA

4.1 - Agregados

4.1.1 - *Massa Específica e Análise granulométrica*

Os agregados graúdos, diâmetros máximos de 12 mm e 19,1 mm, apresentam massa específica aparente de 2,656 g/cm³ e 2,651 g/cm³, respectivamente. O agregado miúdo utilizado, areia do tipo quartzosa, apresenta um diâmetro máximo de 4,75 mm, massa específica aparente de 2,631 g/cm³, e equivalente de areia igual a 95%.

A Figura 20 apresenta as curvas de distribuição granulométrica dos agregados (granulometria por peneiramento NBR 7181, ABNT, 1984). Os resultados encontrados são fundamentais para a realização das dosagens experimentais da mistura asfáltica.

O Quadro 1 apresenta os valores da distribuição granulométrica dos agregados e as porcentagens que foram definidas para mistura asfáltica, enquadrando a mistura na Faixa B do DNIT-ES 031/2006 (Tabela 1 – capítulo 2). Portanto, os ensaios asfálticos foram realizados partindo-se da seguinte composição inicial: 24% de brita 19 mm, 34% de brita 12 mm, 39 % de areia e 3 % de filler. Quando foi necessário variar o teor de filler em 2,3,4 e 5%, a diferença foi compensada diminuindo-se ou aumentando-se a porcentagem de areia presente na mistura.

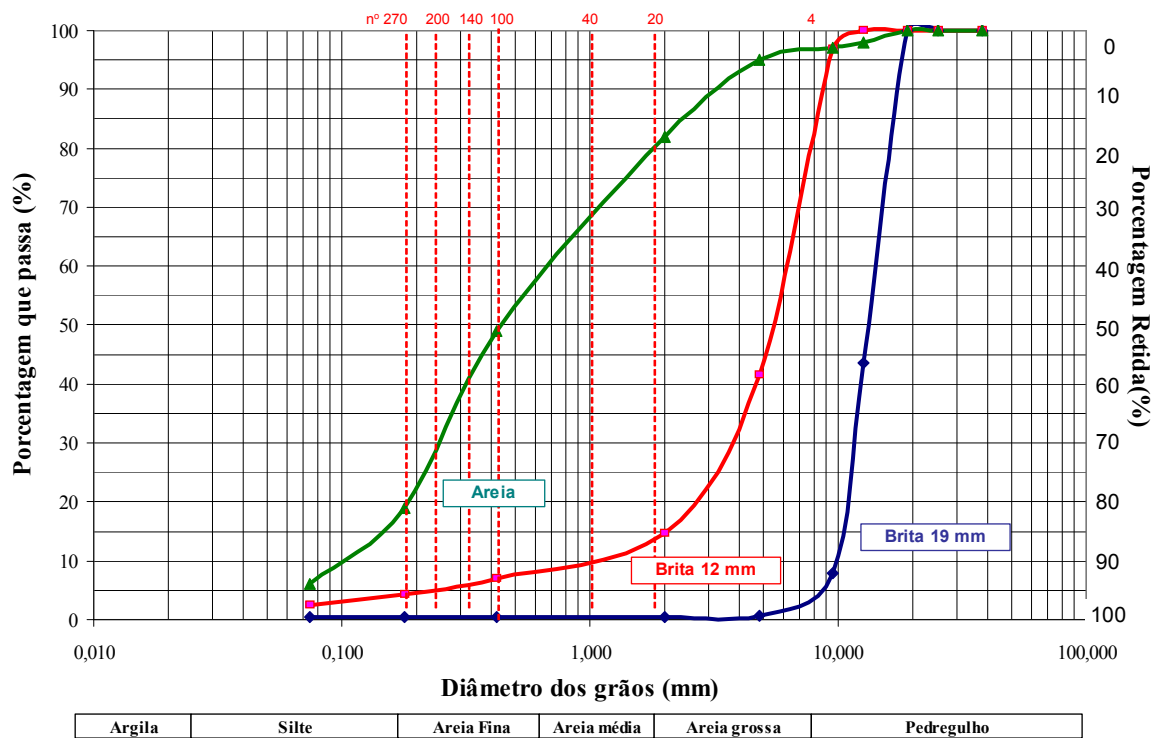


Figura 20 – Distribuição granulométrica – agregados

Quadro 1 – Composição granulométrica da mistura asfáltica

PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO									ESPECIFICAÇÃO – Faixa B	
	BRITA 19		BRITA 12		AREIA		FILLER		COMBIN. RESULT.		
	TOTAL	24%	TOTAL	34%	TOTAL	39,0%	TOTAL	3%		PT. MED.	LIMITES
1	100,00	24,00	100,00	34,00	100,00	39,00	100,00	3,00	100,00	-	-
1/2"	100,00	24,00	100,00	34,00	100,00	39,00	100,00	3,00	100,00	-	-
3/4"	100,00	24,00	100,00	34,00	100,00	39,00	100,00	3,00	100,00	100	100
1/2"	43,54	10,45	100,00	34,00	98,00	38,22	100,00	3,00	85,67	92,5	85-100
3/8"	7,81	1,87	96,82	32,92	97,00	37,83	100,00	3,00	75,62	87,5	75-100
Nº 4	0,61	0,15	41,47	14,10	95,00	37,05	100,00	3,00	54,30	67,5	50-85
Nº 10	0,54	0,13	14,72	5,00	82,00	31,98	100,00	3,00	40,11	52,5	30-75
Nº 40	0,52	0,12	7,07	2,40	49,00	19,11	100,00	3,00	24,64	27,5	15-40
Nº 80	0,48	0,12	4,20	1,43	19,00	7,41	100,00	3,00	11,95	19	08-30
Nº 200	0,37	0,09	2,44	0,83	6,00	2,34	100,00	3,00	6,26	7,5	5-10

4.2 - Fillers Convencionais

4.2.1 - Massa Específica e Análise granulométrica

As curvas granulométricas da cal, cimento e pó calcário estão apresentadas nas Figuras 21, 22 e 23, e de forma resumida na Tabela 10. Pode-se notar que a cal e o cimento apresentam distribuições granulométricas bastante similares, ou seja, a diferença de comportamento provocada na interação *filler*-CAP por estes materiais dependerá essencialmente de suas respectivas composições químicas.

Segundo Mourão (2003), a cal hidratada tem em geral 80% de partículas de tamanho menor ou igual a 20 μm , portanto, o valor do diâmetro médio encontrado de 19,23 μm está de acordo com a literatura. É importante destacar que apesar de o cimento possuir o menor valor de diâmetro médio (14,39 μm), quando usado como *filler* geralmente possui desempenho inferior ao *filler* pó calcário em virtude da pouca presença de SiO_2 em sua composição (MOURÃO, 2003).

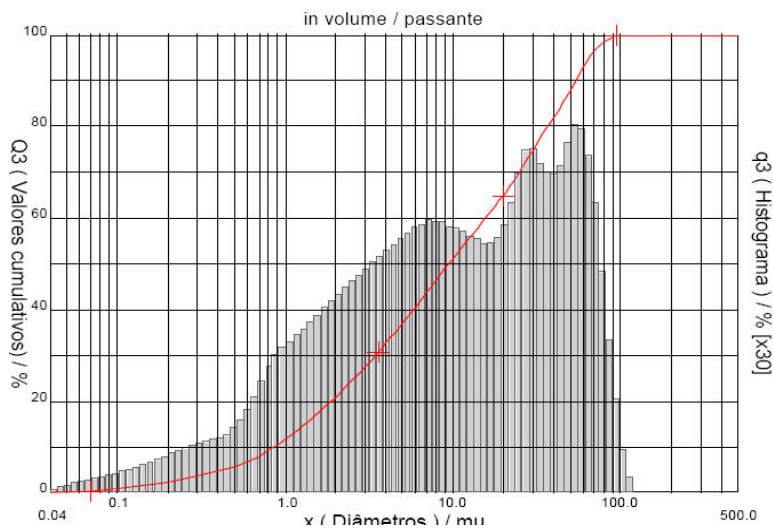


Figura 21 - Distribuição dos tamanhos de grãos – cal

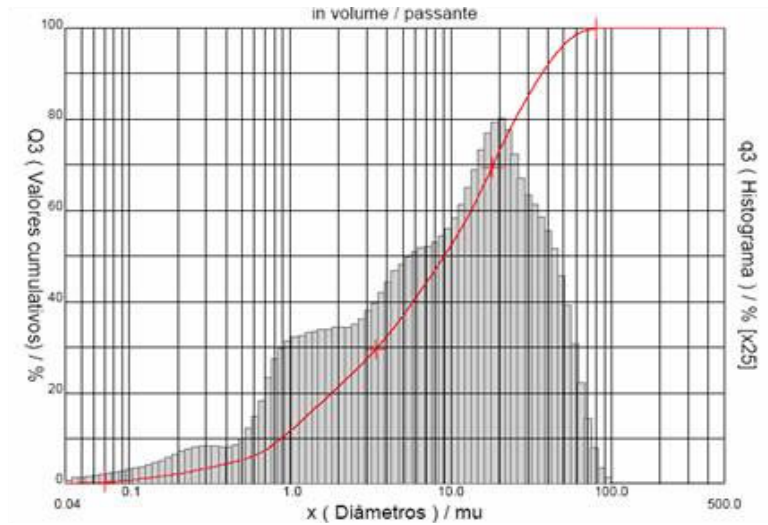


Figura 22 - Distribuição dos tamanhos de grãos – cimento

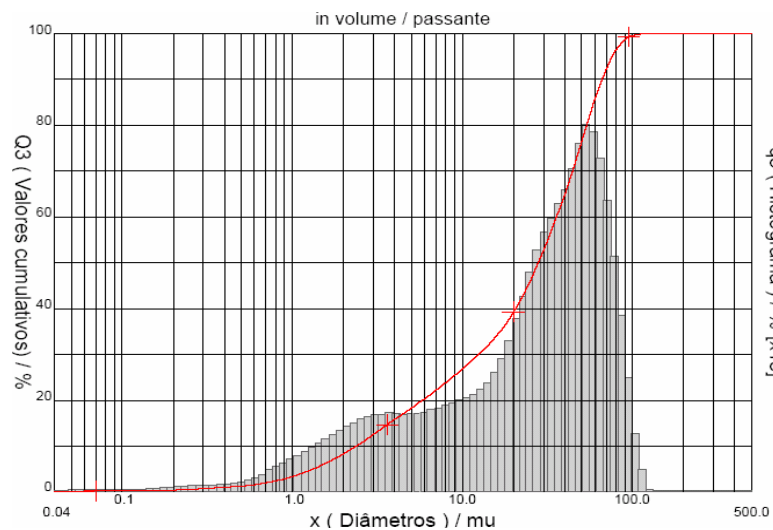


Figura 23 - Distribuição dos tamanhos de grãos – pó calcário

Tabela 10 – Resultados do aparelho analisador de partículas por difração a laser

	Fillers Convencionais		
	Cal	Cimento	Pó Calcário
diâmetro a 10% (μm)	0,86	0,88	2,38
diâmetro a 50% (μm)	9,42	9,09	27,95
diâmetro a 90% (μm)	53,78	36,76	66,13
diâmetro médio (μm)	19,23	14,39	31,39

4.2.2 - Análise Química Convencional

As composições químicas da cal, cimento e pó calcário são apresentadas na Tabela 11. A cal apresentou perda ao rubro de 24,07%, e teor de CaO de 44,56% como verificado por Amorim *et al.* (1999). O cimento apresentou teor de CaO de 49,00% , e teor de SiO₂ de 15,04%, como já era esperado, vide Ferraz (1994). Já o pó calcário, apresentou elevado teor de CaO (40,40%) e perda ao rubro de 10,13%. A elevada presença de óxido de silício e óxido de cálcio, principalmente no pó calcário, indica um material que possui afinidade com os materiais tradicionais (agregados graúdo e miúdo), possibilitando assim um melhor desempenho da mistura asfáltica.

Tabela 11 - Composição química dos fillers convencionais

Componente	Porcentagem (%)		
	Cal	Cimento	Pó Calcário
PR (perda ao rubro)	24,07	5,99	10,13
SiO ₂ (óxido de silício)	3,81	15,04	20,08
RI (resíduo insolúvel)	1,32	3,40	27,32
Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	Traços	1,91	Traços
Al ₂ O ₃ (óxido de alumínio)	Traços	8,00	0,50
CaO (óxido de cálcio)	44,56	49,00	40,40
MgO (óxido de magnésio)	25,91	7,05	Traços
Na ₂ O (óxido de sódio)	Traços	0,03	0,11
K ₂ O (óxido de potássio)	Traços	0,88	0,84

4.3 - Resíduo Oleoso 1 (4-SES-149A)

4.3.1 - Massa Específica e Análise Granulométrica

A massa específica aparente obtida da fração inorgânica do resíduo oleoso 1 foi de 2,603 g/cm³. A Figura 24 apresenta a distribuição granulométrica, obtida a partir do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação (NBR 7181, ABNT, 1984).

A análise da fração inorgânica do resíduo oleoso 1 indica que o material possui granulometria aceitável para ser utilizado como *filler* (92% do material passa na peneira ABNT n°200 - abertura de 0,075 mm).

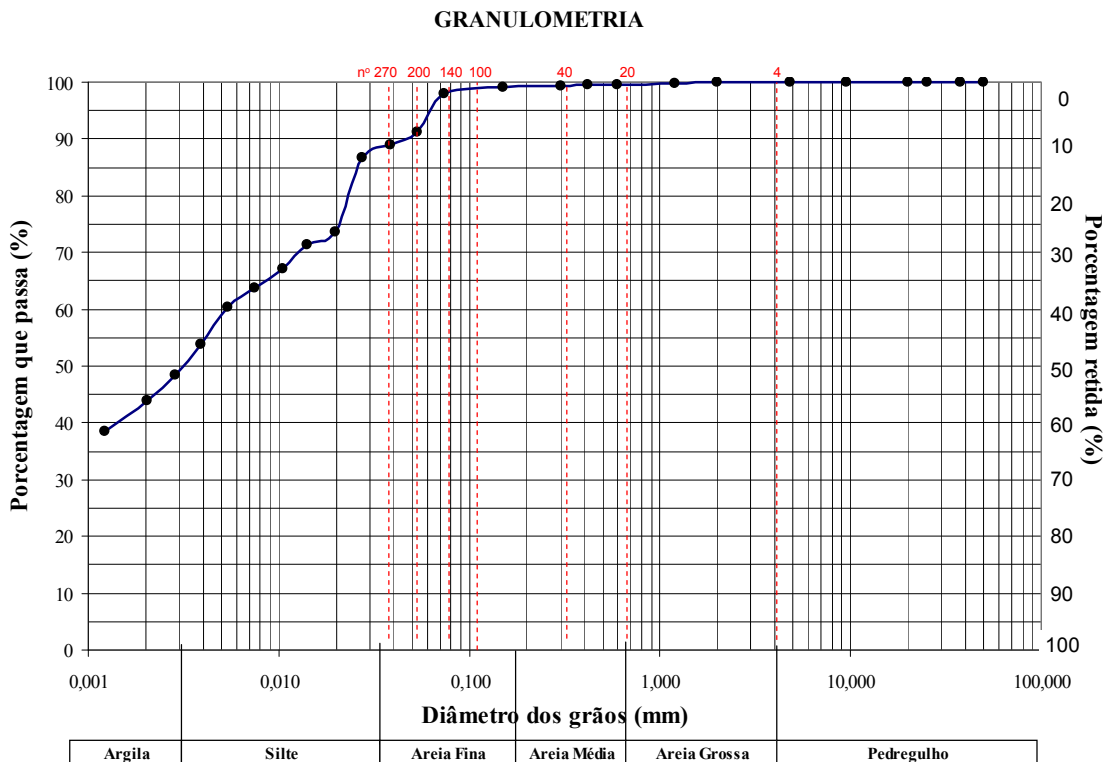


Figura 24 - Distribuição granulométrica – resíduo oleoso 1

A caracterização física do resíduo, realizada a partir da distribuição dos tamanhos das partículas, obtida com o aparelho analisador de partículas por difração a laser sem a utilização de defloculante, encontra-se na Figura 25 e na Tabela 12. Pode-se notar que o resíduo oleoso 1 possui uma porcentagem significativa do material menor que 20 μ m, e até com alguma porção menor que 5 μ m, ou seja, este material provavelmente atuará muito mais no próprio ligante, incorporando-se ao cimento asfáltico e compondo um filme de ligante, envolvendo as partículas de agregados. Isto indica um material que proporciona um aumento significativo na resistência da mistura asfáltica.

Tabela 12 – Resultados do aparelho analisador de partículas por difração a laser

	diâmetro a 10%	diâmetro a 50%	diâmetro a 90%	diâmetro médio
	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(μ m)
Resíduo Oleoso 1	0,95	4,39	16,58	6,83

Comparando-se o diâmetro médio do resíduo oleoso 1 (6,83 μ m), com o dos *fillers* convencionais (19,23 μ m - cal, 14,39 μ m - cimento e 31,39 μ m - pó calcário), nota-se que o valor do diâmetro médio do resíduo oleoso é consideravelmente menor. Isto implica em um maior interação do *filler* resíduo oleoso 1 com o ligante asfáltico,

conseqüentemente um maior ganho de resistência nos ensaios de caracterização mecânica, corroborando assim com o verificado por Mourão (2003).

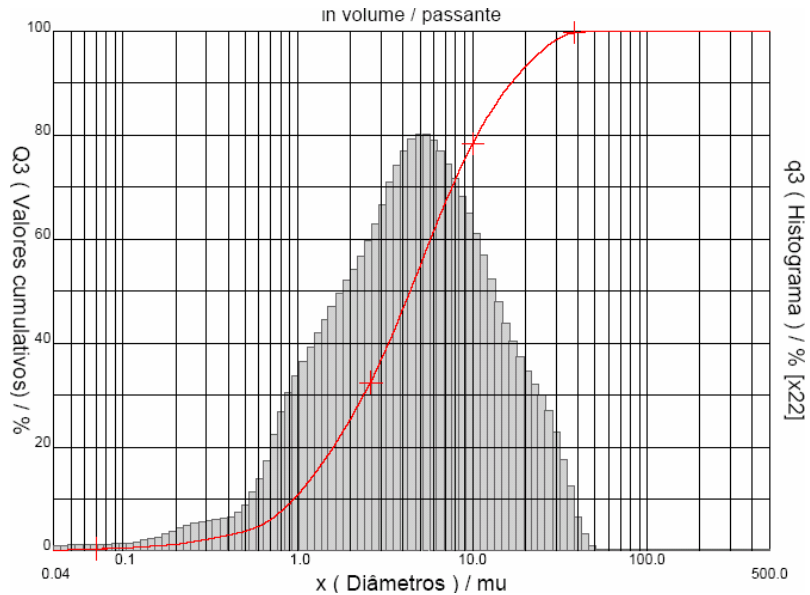


Figura 25 - Distribuição dos tamanhos de grãos – resíduo oleoso 1

4.3.2 - Análise Química Convencional

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos a partir da análise química do resíduo oleoso 1. Os resultados evidenciam a presença de um complexo sílico aluminoso, cujos componentes cristalinos serão bem identificados na DRX.

Tabela 13 - Composição química do resíduo oleoso 1

Componente	Porcentagem (%)
PR (perda ao rubro)	8,95
SiO ₂ (óxido de silício)	52,72
RI (resíduo insolúvel)	2,92
Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	5,20
Al ₂ O ₃ (óxido de alumínio)	22,30
CaO (óxido de cálcio)	1,40
MgO (óxido de magnésio)	2,42
Na ₂ O (óxido de sódio)	0,74
K ₂ O (óxido de potássio)	1,69
SO ₄ (sulfatos)	Traços

4.3.3 - Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG)

A Figura 26 apresenta os resultados da ATD e ATG do resíduo oleoso 1. Na ATG ocorreu uma perda de massa de 2,32% entre 25 e 285°C e 7,52% entre 285 e 897°C. Totalizando uma perda de massa de 10,16%. Nota-se que a perda de massa encontrada está aproximada à perda ao rubro (8,95%) encontrada na análise química.

Já a partir da análise da curva de ATD, podem-se chegar às seguintes conclusões:

- 1) entre 30 e 200°C perda de água livre – pico endotérmico;
- 2) entre 200°C e 320°C perda de água adsorvida – pico endotérmico;
- 3) entre 320°C e 400°C decomposição do éster e da parafina – pico endotérmico;
- 4) entre 400°C e 500°C banda exotérmica – combustão do éster e da parafina;
- 4) entre 500°C e 605°C perda de hidroxilas da caulinita – pico endotérmico;
- 5) entre 605°C e 700°C combustão de matéria orgânica na forma de grafite – pico exotérmico.

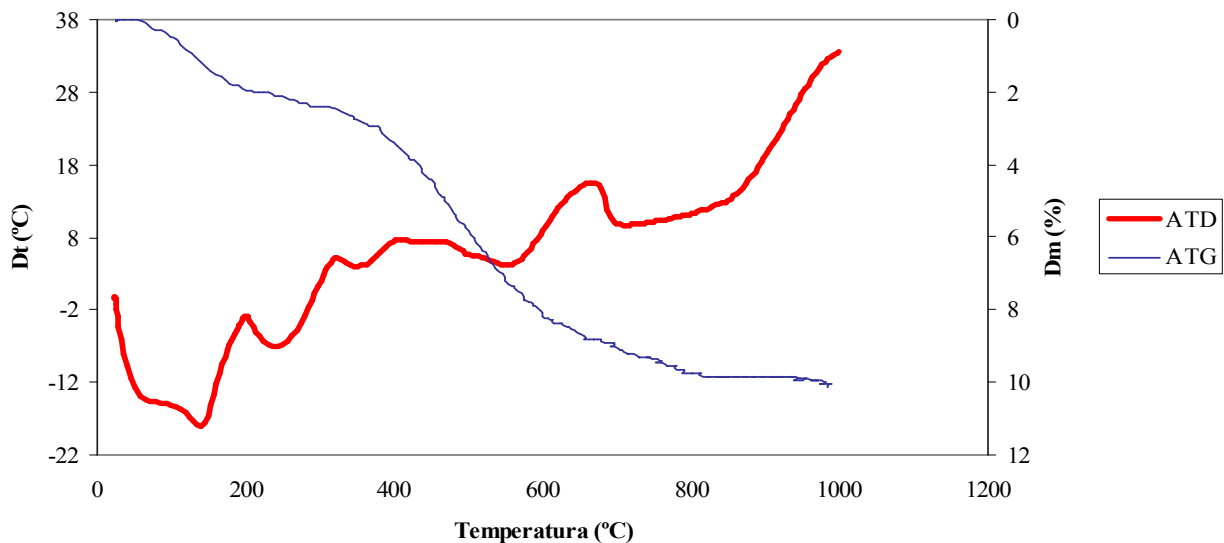


Figura 26 - Curvas de ATD e ATG - resíduo oleoso 1

4.3.4 - Difração de Raios-X (DRX)

A Figura 27 apresenta o difratograma do resíduo oleoso 1. A partir de sua análise pôde-se concluir que se trata de substância composta essencialmente por quartzo, com pequenas quantidades de mica e caulinita. A elevada presença de quartzo no difratograma está de acordo com o elevado teor de óxido de silício encontrado na análise química (52,72%). Quando comparado os resultados do resíduo oleoso 1 com os dos *fillers* tradicionais (apresentados anteriormente), em razão do resíduo oleoso 1 possuir uma maior quantidade de óxido de silício em

sua composição, espera-se que o resíduo proporcione um maior ganho de resistência na mistura asfáltica quando comparado aos *fillers* tradicionais (cimento e pó calcário).

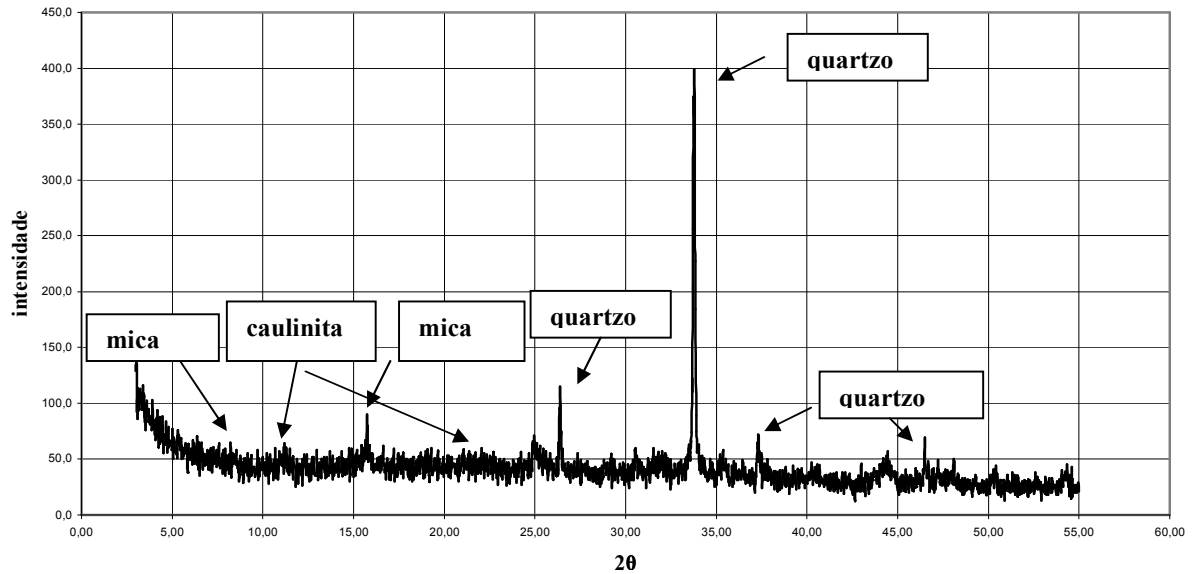


Figura 27 – Difratograma do resíduo oleoso 1

4.3.5 - Caracterização Ambiental

Os valores observados a partir da espectroscopia por absorção atômica e da determinação do teor de óleo e graxas, foram confrontados com os limites máximos permitidos (LMP) estabelecidos pela norma NBR 10004 (2004).

O Quadro 2 apresenta as concentrações observadas para os parâmetros analisados. Pode-se notar que, quanto ao aspecto de inerticidade, observou-se que o resíduo apresenta característica de não inerte para os parâmetros cádmio e chumbo, visto que, para o extrato solubilizado, os valores obtidos estão acima do limite máximo permitido pela norma.

Quanto ao aspecto toxicidade, mesmo o resíduo apresentando concentrações inferiores ao limite estabelecido pela norma para os metais cádmio, chumbo e cromo no extrato lixiviado, o mesmo é classificado como tóxico, uma vez que o teor de óleo e graxas ultrapassa o limite de 5% em massa, estabelecido pela norma.

Portanto, de acordo com as características apresentadas, o resíduo oleoso 1 foi classificado como resíduo Classe I ou perigoso.

Quadro 2 – Espectroscopia por absorção atômica e teor de óleo e graxas – resíduo oleoso 1

	Parâmetro	Limites Máximos Permitidos	Resultado
Solubilização (mg/L)	cádmio	0,005	0,300
	chumbo	0,05	0,544
	chromo	0,05	<LD ²
	sulfetos	Sem padrão	Não detectado
	cobre	1	Não detectado
	ferro	0,3	Não detectado
	manganês	0,1	Não detectado
	sódio	200	Não detectado
	zinco	5	Não detectado
	cloretos	Sem padrão	Não detectado
Lixiviação (mg/L)	cádmio	0,5	0,118
	chumbo	5	0,154
	chromo	5	<LD ²
	sulfetos	Sem padrão	571,11
	cobre	Sem padrão	<LD ¹
	ferro	Sem padrão	0,038
	manganês	Sem padrão	0,682
	sódio	Sem padrão	0
	zinco	Sem padrão	0,047
	cloretos	Sem padrão	84
Óleo e Graxas (%)	óleo e graxas	5	5,7

<LD¹: Abaixo do Limite de detecção do aparelho: 0,01 mg L-1

<LD²: Abaixo do Limite de detecção do aparelho: 0,02 mg L-1

4.4 - Resíduo Oleoso 2 (1-POTI-4-RN)

4.4.1 - Massa Específica e Análise Granulométrica

A massa específica aparente obtida foi de 2,383 g/cm³. A Figura 28 apresenta a distribuição granulométrica da mistura das três amostras do resíduo oleoso 2 (Jandaíra, Açú e Embasamento Cristalino), obtidos a partir do ensaio de granulometria por peneiramento (NBR 7181, ABNT, 1984).

Pode-se notar que a mistura realizada com as três amostras do resíduo oleoso, apresenta um comportamento granulométrico semelhante ao de um agregado miúdo (areia). Em função da granulometria, o resíduo oleoso 2 não pode ser utilizado como *filler*, visto que não atende à exigência do DNIT de no mínimo 65% do material passar na peneira ABNT n°200 (abertura de 0,075 mm). Desta maneira, o resíduo oleoso 2 será utilizado como agregado miúdo, não sendo, portanto, realizados os Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol e de Penetração para este resíduo.

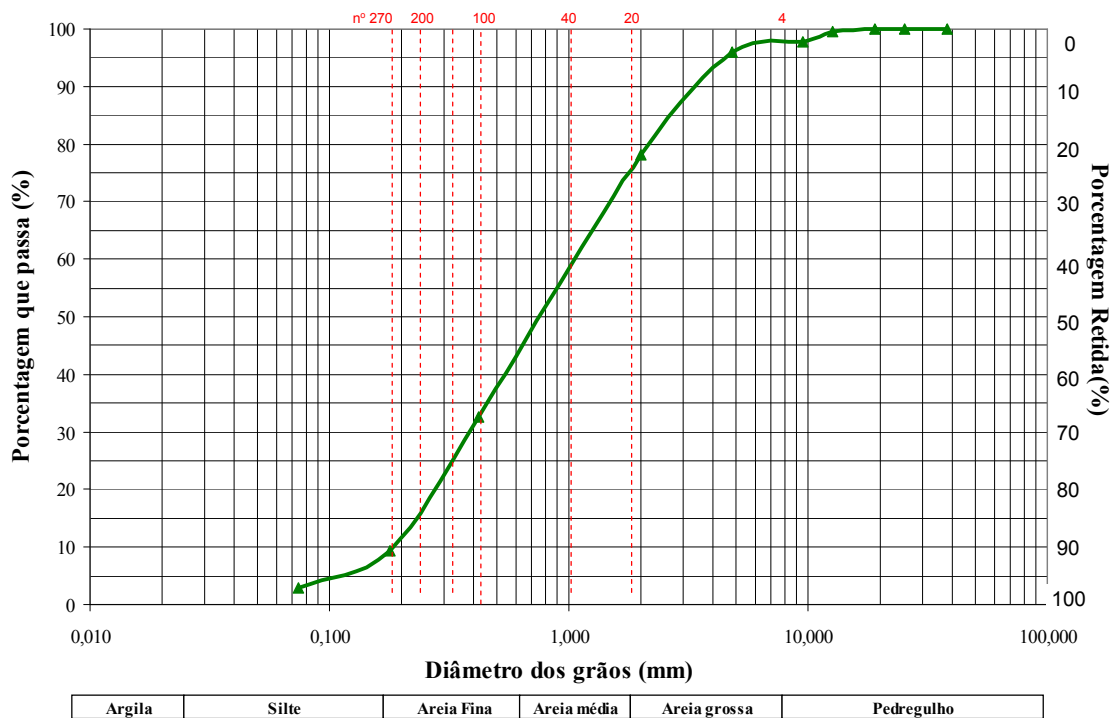


Figura 28 – Distribuição granulométrica – resíduo oleoso 2

4.4.2 - Análise Química Convencional

As composições químicas das três amostras do resíduo oleoso 2 são apresentadas na Tabela 14. A amostra da Formação Jandaíra apresentou perda ao rubro de 37,34%, e teor de CaO de 42,00%. A amostra da Formação Açú apresentou teor de CaO de 2,80% , e elevado teor de SiO₂ de 75,76%. Já a amostra do Embasamento Cristalino apresentou teor de SiO₂ (33,34%) e perda ao rubro de 20,07%.

Nota-se que a significativa presença de sílica nas análises químicas das três amostras, corrobora a decisão de utilizá-las como agregado miúdo (areia), nas misturas asfálticas.

Tabela 14 - Composição química das amostras do resíduo oleoso 2

Componente	Porcentagem (%)		
	Jandaíra	Açú	Embasamento
PR (perda ao rubro)	37,34	3,15	20,07
SiO ₂ (óxido de silício)	9,62	75,76	33,34
RI (resíduo insolúvel)	2,16	9,84	6,76
Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	1,99	1,75	1,87
Al ₂ O ₃ (óxido de alumínio)	4,25	2,85	5,55
CaO (óxido de cálcio)	42,00	2,80	19,04
MgO (óxido de magnésio)	1,20	Traços	5,23
Na ₂ O (óxido de sódio)	0,06	0,14	0,15
K ₂ O (óxido de potássio)	0,30	2,19	1,37

4.4.3 - Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG)

A Figura 29 apresenta os resultados da ATD e ATG para o resíduo 2 (1-POTI-4-RN) proveniente da Formação Jandaíra. Na ATG ocorreu uma perda de massa contínua de 34% (similar à perda ao rubro encontrada = 37,34 %). Já a partir da análise da curva de ATD, podem-se chegar as seguintes conclusões:

- 1) entre 30 e 200°C perda de água livre e adsorvida – pico endotérmico;
- 2) entre 870°C e 980°C perda de CaCO₃ – pico endotérmico.

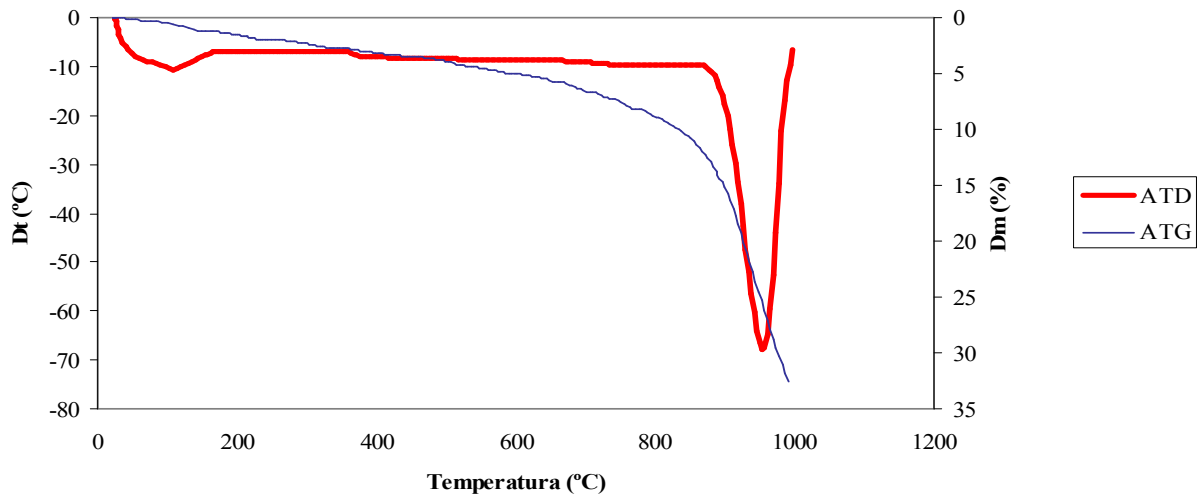


Figura 29 - Curvas de ATD e ATG – Formação Jandaíra

A Figura 30 apresenta os resultados da ATD e ATG para o resíduo 1-POTI-4-RN proveniente da Formação Açú. Na ATG ocorreu uma perda de massa de 3,5% entre 25°C e 208°C, e de 8% entre 280°C e 1000°C. Totalizando uma perda de massa de 11,5% . Já a partir da análise da curva de ATD, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- 1) entre 30 e 200°C perda de água livre – pico endotérmico;
- 2) entre 200°C e 400° combustão de matéria orgânica - exotérmico;
- 3) em 573°C transformação do quartzo alfa para o quartzo beta – pico endotérmico.

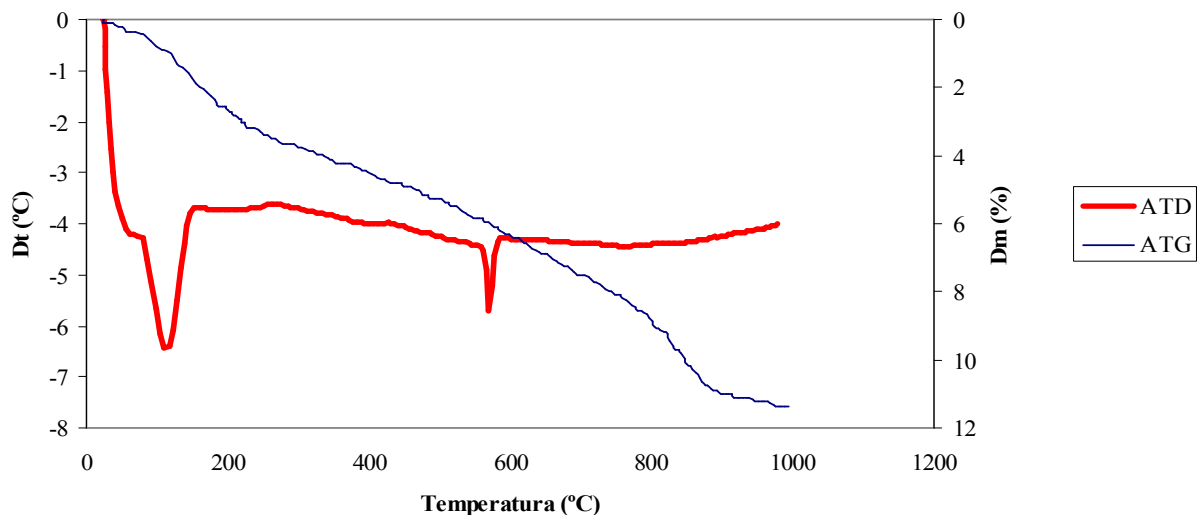


Figura 30 - Curvas de ATD e ATG – Formação Açú

A Figura 31 apresenta os resultados da ATD e ATG para o resíduo 2 (1-POTI-4-RN) proveniente da formação Embasamento Cristalino. Na ATG ocorreu uma perda de massa de 5% entre 25°C e 300°C, e de 18% entre 300°C e 1000°C. Totalizando uma perda de massa de 23% (similar à perda ao rubro = 20,07%) . Para a curva de ATD, podem-se chegar as seguintes conclusões:

- 1) entre 30 e 200°C perda de água livre – pico endotérmico;
- 2) entre 200°C e 400° combustão de matéria orgânica – banda exotérmica;
- 3) em 573°C transformação do quartzo alfa para o quartzo beta – pico endotérmico;
- 4) entre 770°C e 830°C perda de $MgCO_3$ – pico endotérmico;
- 5) entre 830°C e 900°C perda de $CaCO_3$ – pico endotérmico.

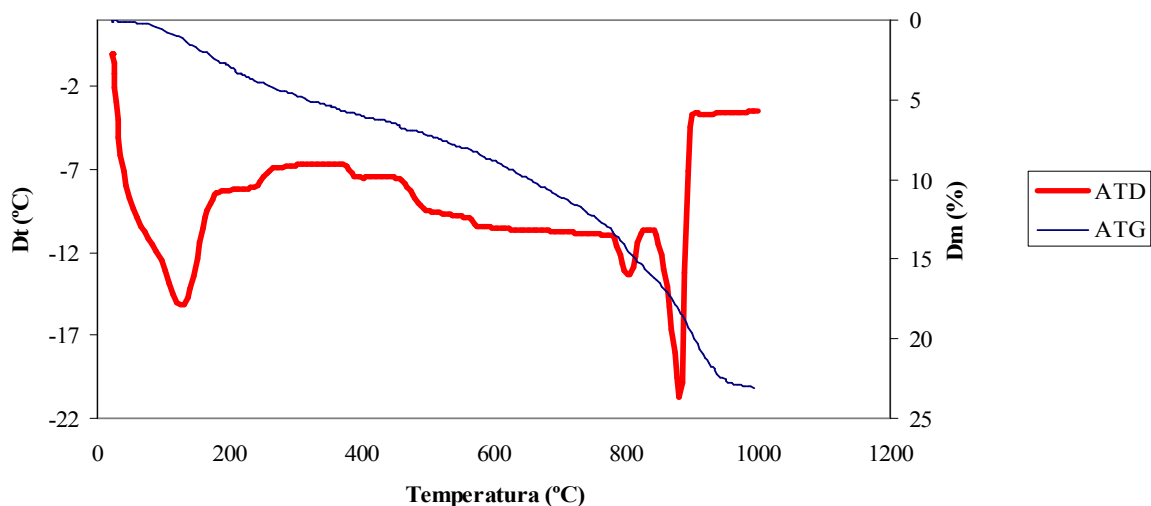


Figura 31 - Curvas de ATD e ATG – Embasamento Cristalino

4.4.4 - Difração de Raios-X

A Figura 32 apresenta a DRX da Formação Jandaíra. Através de sua análise pôde-se concluir que se trata de substância composta essencialmente por calcita, com pequenas quantidades de quartzo. Pode-se notar que o resultado está consoante com o encontrado na literatura, vide Reyes-Pérez (2003) (Figura 33), pois os picos característicos do mineral quartzo e da calcita ocorrem aproximadamente no mesmo ângulo 2θ .

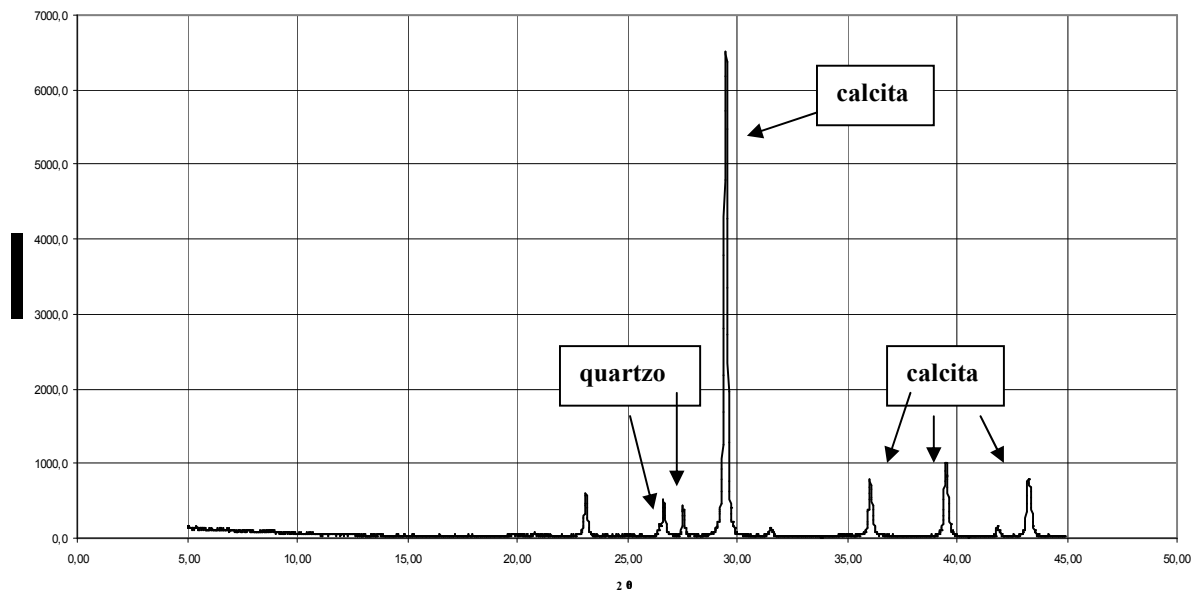


Figura 32 - Difração de raios-X – Formação Jandaíra

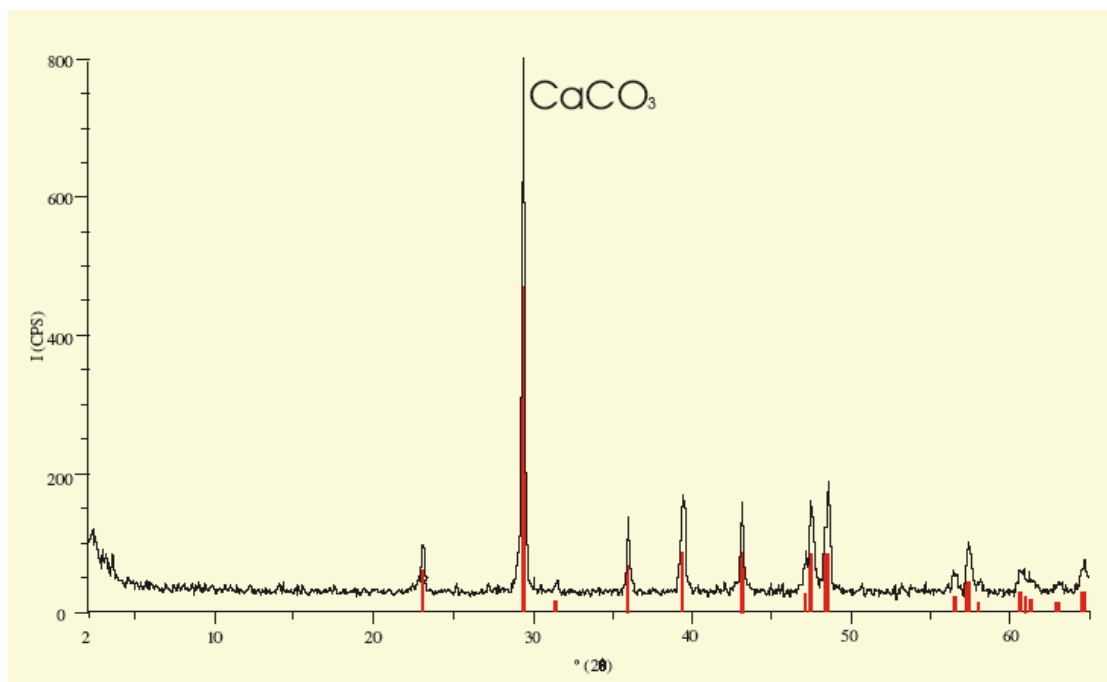


Figura 33 - Difração de raios-X – Formação Jandaíra (REYES-PÉREZ, 2003)

A Figura 34 apresenta a DRX da Formação Açú. Através de sua análise pôde-se concluir que se trata de substância composta essencialmente por quartzo, com pequenas quantidades de calcita. Pode-se notar que o resultado está consoante com o encontrado na literatura, vide Amorim (2007) (Figura 35), pois os picos característicos do mineral quartzo ocorrem aproximadamente no mesmo ângulo 2θ .

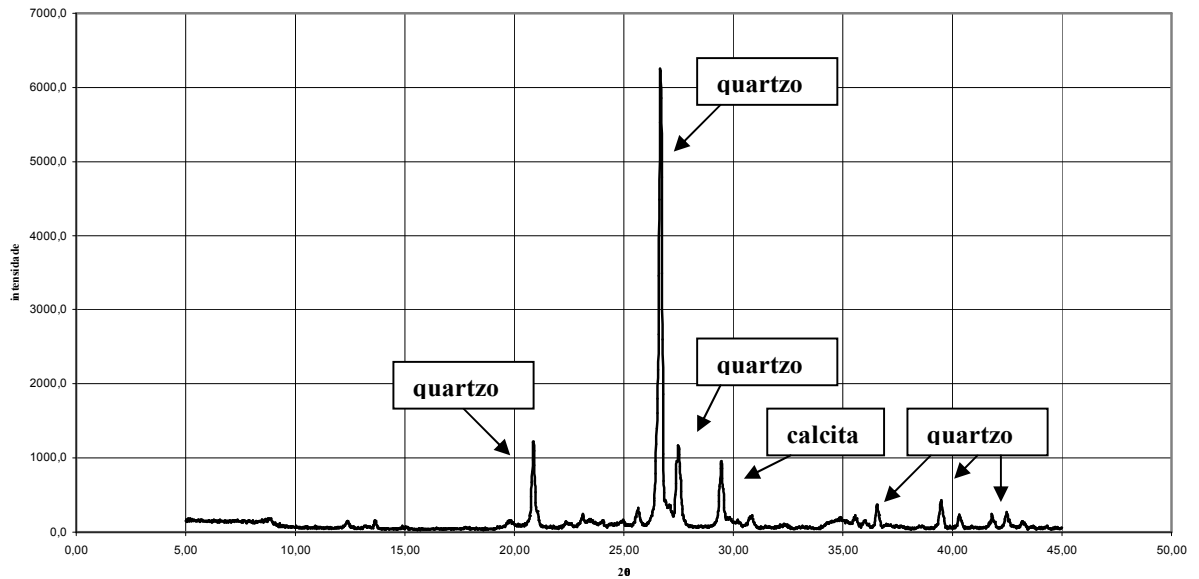


Figura 34 - Difração de raios-X – Formação Açú

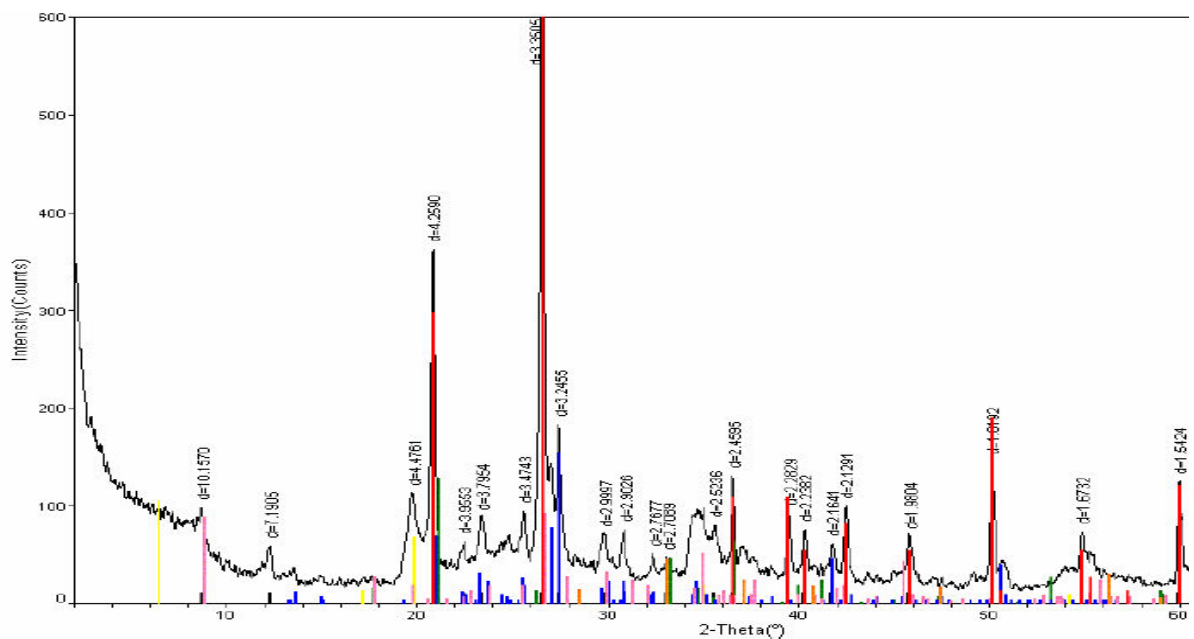


Figura 35 - Difração de raios-X – Formação Açú (AMORIM, 2007)

A Figura 36 apresenta a DRX do Embasamento Cristalino. Através de sua análise pode-se concluir que se trata de substância composta por quartzo e calcita, com pequenas quantidades de magnesita e mica.

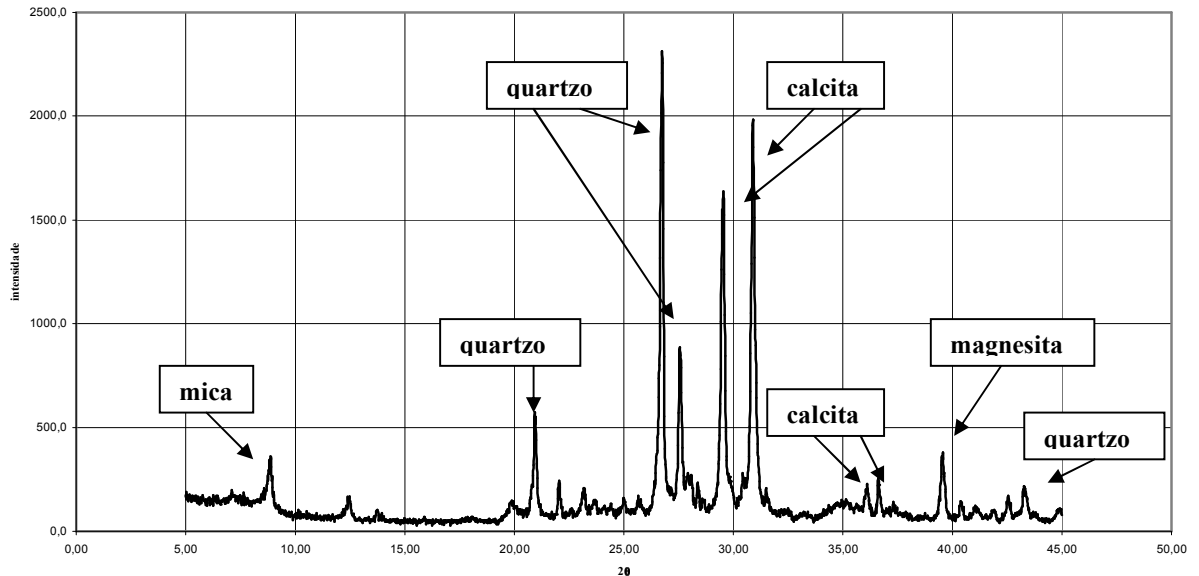


Figura 36 - Difração de raios-X – Embasamento Cristalino

A caracterização realizada para as três amostras do resíduo oleoso 2, está consoante com a apresentada por Waterloo (2004) para a Formação Jandaíra, Formação Açú e Embasamento Cristalino. Os principais elementos encontrados nas curvas de ATD e DRX das amostras analisadas são característicos das formações acima citadas.

É importante ressaltar também, que os principais elementos encontrados - calcita, e quartzo (Jandaíra) quartzo e calcita (Açú) e quartzo, calcita, magnesita e mica (Embasamento Cristalino) - possuem a característica de poderem fazer parte da mistura asfáltica. Visto que, podem substituir o material tradicional: agregado miúdo (areia). Isso se torna possível em razão da afinidade existente entre esses elementos e os materiais tradicionais. A incorporação do resíduo então, não traz prejuízo ao desempenho da mistura asfáltica quanto aos parâmetros de resistência e durabilidade.

4.4.5 - Caracterização Ambiental

Os valores observados a partir da espectroscopia por absorção atômica e da determinação do teor de óleo e graxas, foram confrontados com os limites máximos permitidos (LMP) estabelecidos pela norma NBR 10004 (2004).

O Quadro 3 apresenta as concentrações observadas para os parâmetros analisados para a mistura realizada com as três amostras do resíduo oleoso 2 (Formação Jandaíra, Açú e Embasamento Cristalino) . Pode-se notar que, quanto ao aspecto de inerticidade, observou-se que o resíduo apresenta característica de não inerte para

o parâmetro ferro, visto que, para o extrato solubilizado, o valor obtido está acima do limite máximo permitido pela norma.

Quanto ao aspecto toxicidade, o resíduo apresentou concentrações inferiores ao limite estabelecido pela norma para os metais cádmio, chumbo e cromo no extrato lixiviado, portanto, o mesmo é classificado como não tóxico. Logo, de acordo com as características apresentadas, o resíduo oleoso 2 classifica-se como não perigoso e não inerte, ou seja, Resíduo Classe II, ou seja, é um resíduo que não pode ser descartado sem um tratamento prévio pois apresenta propriedades como biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Quadro 3 – Espectroscopia por absorção atômica e teor de óleo e graxas–resíduo oleoso 2

	Parâmetro	Limites Máximos Permitidos	Resultado
Solubilização (mg/L)	cádmio	0,005	0,0021
	chumbo	0,05	0,011
	cromo	0,05	<LD ²
	sulfetos	Sem padrão	Não detectado
	cobre	1	Não detectado
	ferro	0,3	0,39
	manganês	0,1	Não detectado
	sódio	200	Não detectado
	zinco	5	Não detectado
	cloretos	Sem padrão	Não detectado
Lixiviação (mg/L)	cádmio	0,5	0,045
	chumbo	5	0,018
	cromo	5	<LD ²
	sulfetos	Sem padrão	820,11
	cobre	Sem padrão	<LD ¹
	ferro	Sem padrão	23
	manganês	Sem padrão	0,088
	sódio	Sem padrão	425
	zinco	Sem padrão	0,045
	cloretos	Sem padrão	1012
Óleo e Graxas (%)	óleo e graxas	5	-

<LD¹: Abaixo do Limite de detecção do aparelho: 0,01 mg L-1

<LD²: Abaixo do Limite de detecção do aparelho: 0,02 mg L-1

4.5 - Conclusões Parciais

De acordo com as análises dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com o resíduo oleoso 1 (4-SES-149A) algumas considerações podem ser efetuadas, tais como:

- a análise da fração inorgânica do resíduo oleoso indica que o material possui granulometria aceitável para ser utilizado como *filler* (92% do material passa na peneira ABNT nº200 - abertura de 0,075 mm);
- a fração inorgânica do resíduo é um silicato composto principalmente por quartzo, possuindo pequenas quantidades de mica e de caulinita; e
- de acordo com os padrões da NBR 10004 (2004), o resíduo foi caracterizado como tóxico e não inerte, sendo classificado como de Classe I ou perigoso;

Para o resíduo oleoso 2 (1-POTI-4-RN), tem-se as seguintes conclusões:

- a análise granulométrica do resíduo oleoso 2 indica que o material possui granulometria aceitável para ser utilizado como agregado miúdo (areia) na composição da mistura asfáltica;
- a fração inorgânica do resíduo oriundo da Formação Jandaíra é composta essencialmente por calcita, com pequenas quantidades de quartzo;
- a fração inorgânica do resíduo oriundo da Formação Açú é composta essencialmente por quartzo, com pequenas quantidades de calcita;
- a fração inorgânica do resíduo oriundo do Embasamento Cristalino é composta por quartzo e calcita, com pequenas quantidades de magnesita e mica; e
- de acordo com os padrões da NBR 10004 (2004), o resíduo foi caracterizado como não perigoso e não inerte, ou seja, Resíduo Classe II.

CAPÍTULO 5

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

5.1 - Ensaio com o Mastique

5.1.1 - Resíduo Oleoso 1 (4-SES-149A)

5.1.1.1 - Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol

A Figura 37 apresenta os resultados do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol para mistura CAP com os *fillers* cal, cimento Portland e resíduo em função da variação em relação ao volume de CAP.

Os valores de viscosidade Saybolt-Furol das misturas ensaiadas (CAP + *fillers*) apresentaram tendências crescentes segundo um modelo polinomial quadrático. Puzinauskas (1983) observou estes mesmos incrementos para viscosidade cinemática. Essas tendências indicam que o incremento de *filler* causa um aumento nas propriedades de rigidez do CAP.

O *filler* resíduo apresenta um comportamento mediano em comparação ao comportamento dos *fillers* cal e cimento Portland. Esse bom comportamento do *filler* resíduo indica que existe uma interação benéfica entre ele e o CAP.

Lima (2003) realizou um estudo de viscosidade Saybolt-Furol comparando o resíduo da serragem do granito com a cal e o cimento. Pelos resultados mostrados na Figura 38, pode-se notar a semelhança nos resultados obtidos, com o *filler* cal obtendo um desempenho superior ao *filler* cimento, corroborando assim os resultados obtidos na Figura 37.

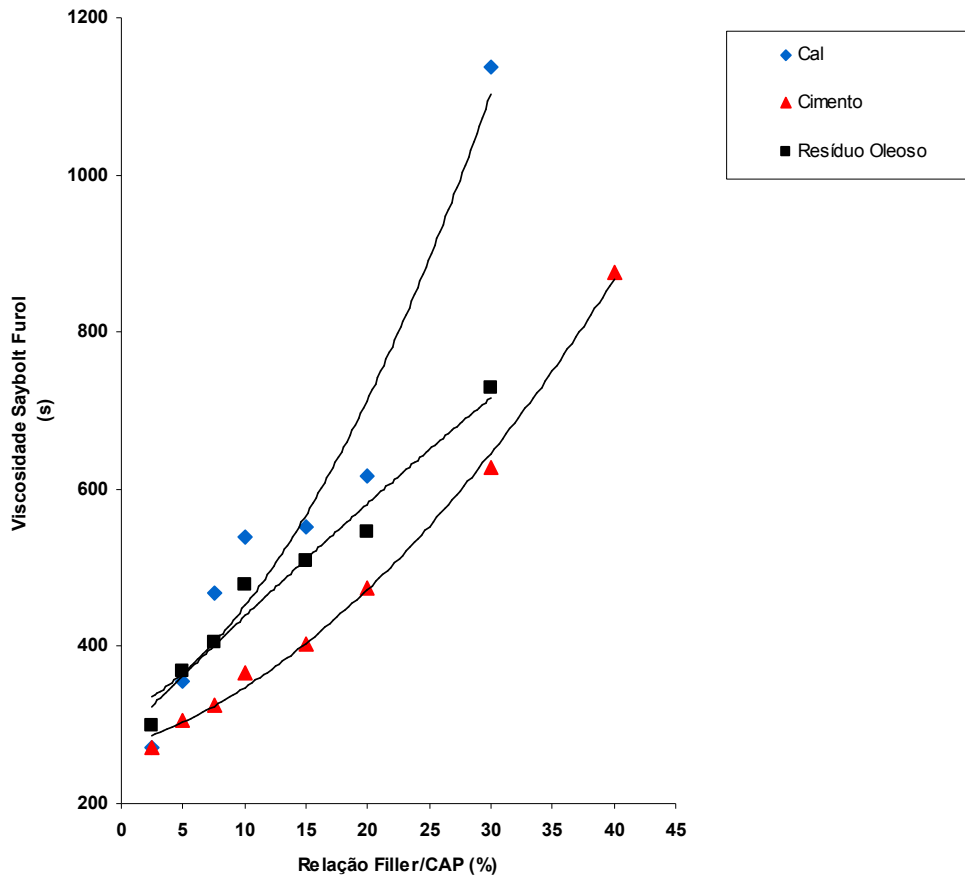


Figura 37 - Viscosidade Saybolt-Furol para o CAP50/70 com os fillers cal, cimento Portland e resíduo em função do incremento da relação filler/CAP50/70 sobre amostra do ensaio

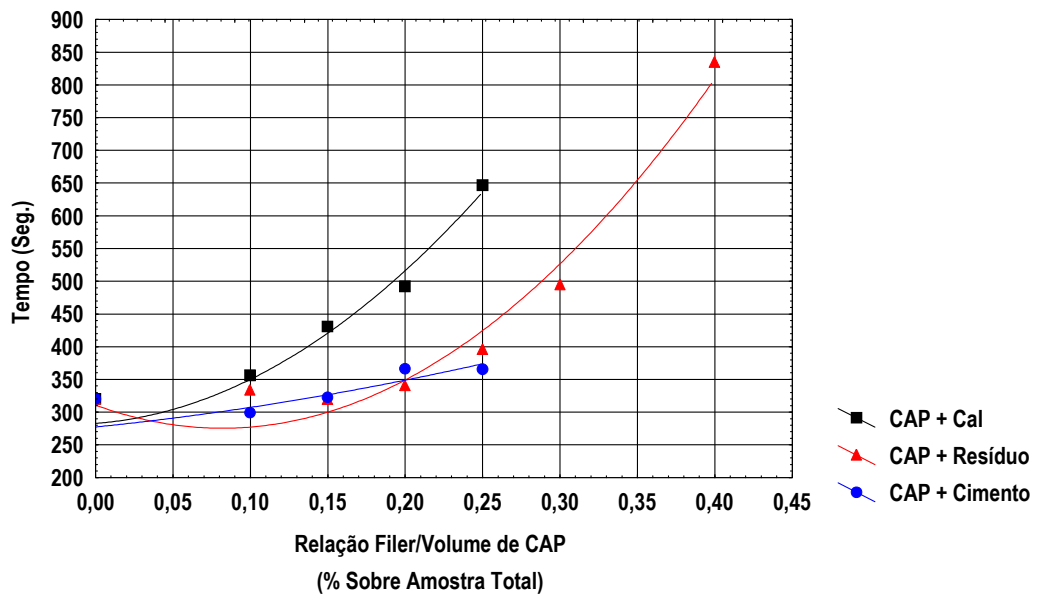


Figura 38 - Viscosidade Saybolt-Furol para o CAP50/70 com os fillers cal, cimento Portland e resíduo da serragem de granito (LIMA, 2003)

5.1.1.2 - Ensaio de Penetração

A Figura 39 apresenta as variações do valor da penetração (100g, 5 s, 0,1 mm) para mistura CAP com os fillers cal, cimento Portland, e RO em função da variação em relação ao volume de CAP sobre amostra total utilizada na execução do ensaio (DNIT – ME 003/1999).

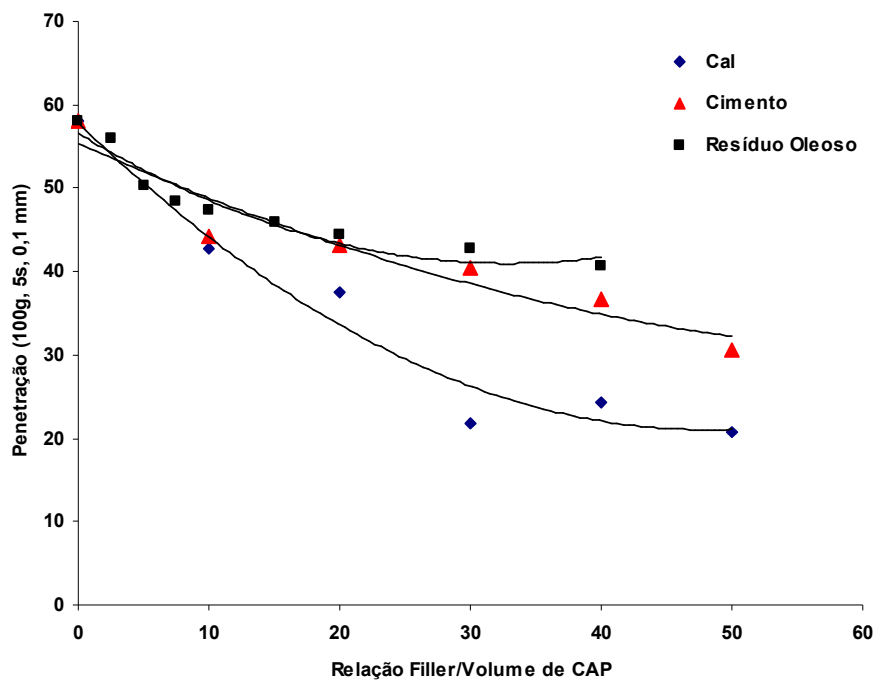


Figura 39 - Valores de penetração para mistura CAP50/70 com os fillers cal, cimento Portland, e resíduo em função da relação de filler /volume de CAP

Os valores de penetração das misturas ensaiadas (CAP + fillers) apresentaram tendências decrescentes. Essas tendências, observadas também por Puzinauskas (1983), indicam que o incremento de filler causa uma diminuição de penetração, o que é interpretado pelo autor como sendo um aumento na sua viscosidade.

As inferências acima descritas indicam que o valor máximo de filler em uma mistura asfáltica deve ser estimado, não apenas pelos parâmetros obtidos a partir do ensaio Marshall, e sim em conjunto com uma análise mais específica sobre o efeito do filler nas propriedades de rigidez do CAP.

Comportamento semelhante foi encontrado por Lima (2003) (Figura 40). O filler cal e o filler cimento também apresentaram uma tendência decrescente, com o resíduo da serragem de granito obtendo um desempenho intermediário.

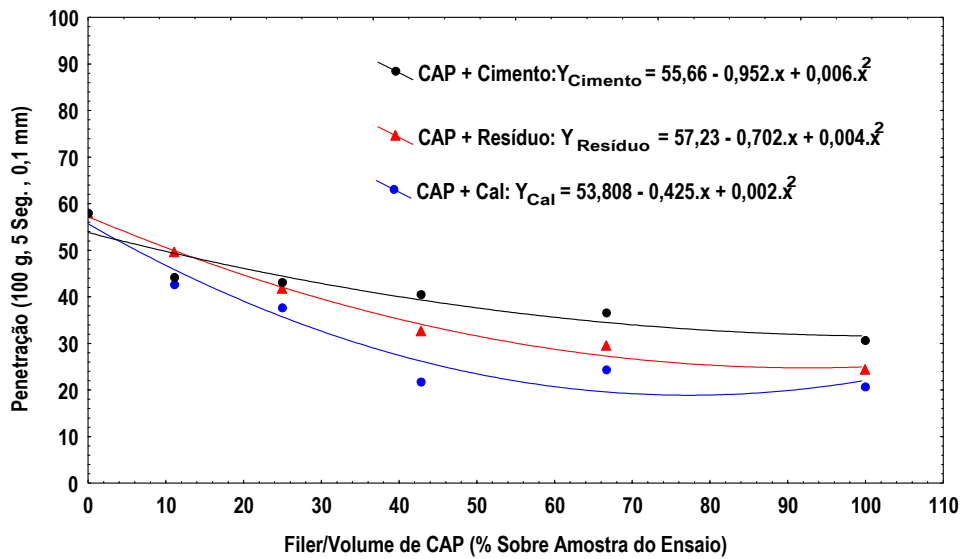


Figura 40 - Penetração para mistura CAP50/70 com os fillers cal, cimento e resíduo da serragem do granito (LIMA, 2003).

5.2 - Ensaio na Mistura Asfáltica

5.2.1 - Resíduo oleoso 1 (4-SES-149A)

5.2.1.1 - Ensaio Marshall

Dosagem Marshall

Nesta fase realizou-se uma bateria de ensaios que forneceram subsídios para análise do comportamento do material alvo da pesquisa. Para tanto, foram confeccionados 15 corpos de prova (Figura 41), rompidos na prensa Marshall, sendo 3 para cada teor de CAP utilizado e tendo como filler o pó calcário. Esta fase tem como objetivo fundamental, indicar qual o teor de CAP ideal para o prosseguimento dos experimentos. Trabalhou-se com 24% da brita de 19 mm, 34% da brita de 12 mm, 39% de areia e 3% de filler.



Figura 41 - Corpos-de-prova do Ensaio Marshall

As Figuras 42, 43, 44, 45 e 46 apresenta os resultados obtidos da Dosagem Marshall utilizando como filler o pó calcário. Pode-se notar que o teor de cimento asfáltico de 4,2% é o que apresenta os melhores resultados de acordo com as especificações da norma DNIT-ES 31 (2006), para os seguintes parâmetros: fluência = 4,68 mm (especificação: 3 a 5), relação betume vazios = 75,88 % (especificação: 75 a 82), estabilidade = 645,31 kgf (especificação > 500 kgf), vazios = 3,03 % (especificação: 3 a 5) e peso específico aparente = 2,41 kg/m³. Portanto, o teor de cimento asfáltico de 4,2% foi o escolhido para a realização dos ensaios Marshall da Fase 2.

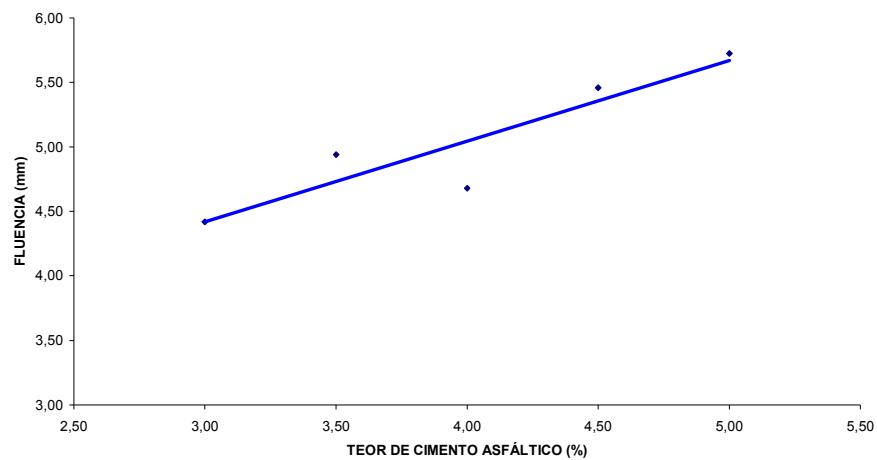


Figura 42 - Parâmetro Fluência - dosagem Marshall utilizando como *filler* o pó calcário

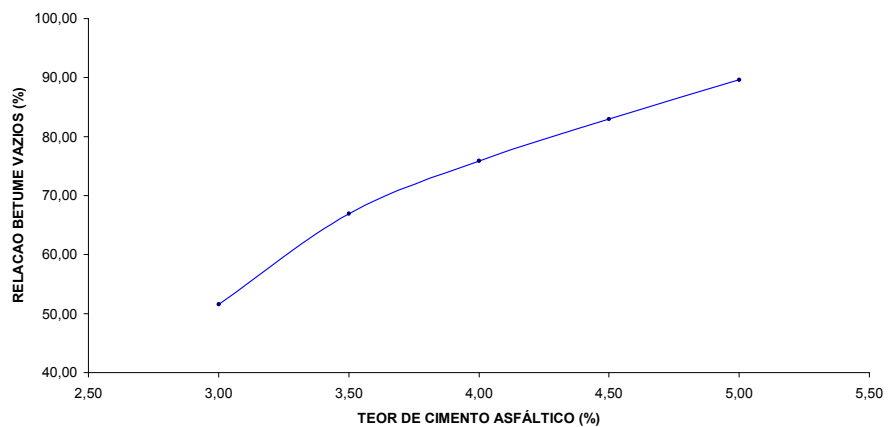


Figura 43 - Parâmetro Relação betume vazios - dosagem Marshall utilizando como *filler* o pó calcário

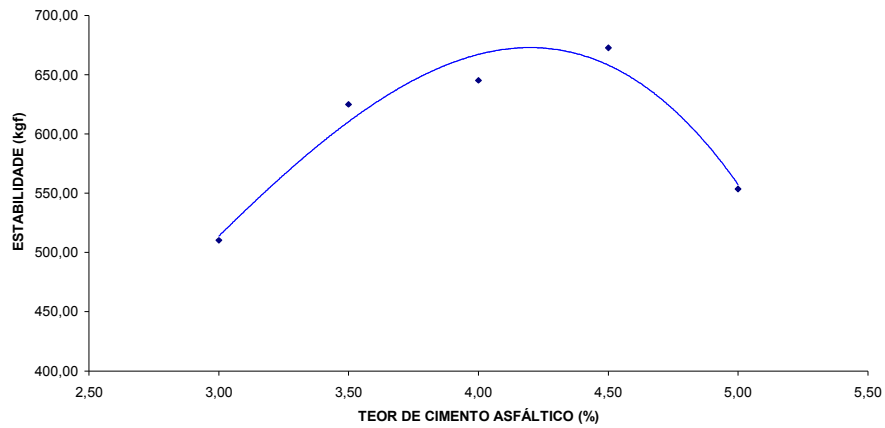


Figura 44 - Parâmetro Estabilidade - dosagem Marshall utilizando como *filler* o pó calcário

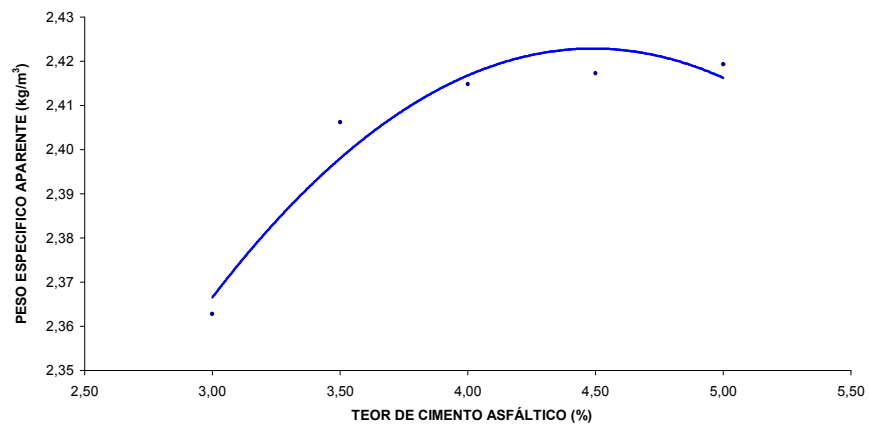


Figura 45 - Parâmetro Peso Específico - dosagem Marshall utilizando como *filler* o pó calcário

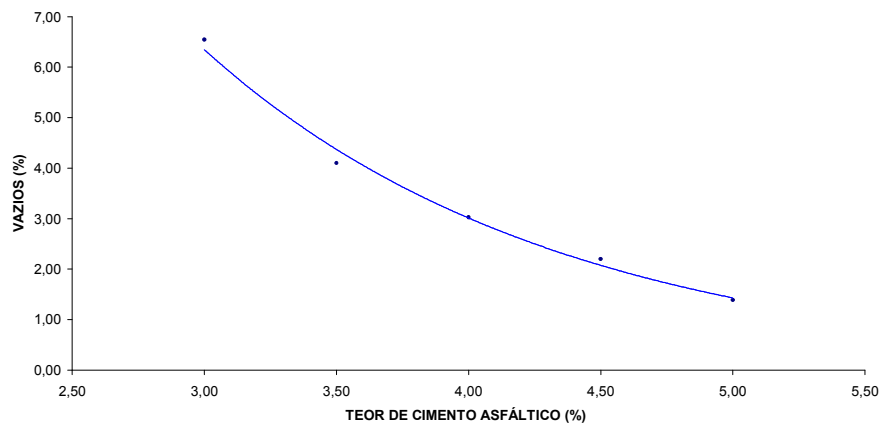


Figura 46 - Parâmetro Vazios - Dosagem Marshall utilizando como *filler* o pó calcário

Variação do Teor de *Filler* e seus Efeitos

Com o objetivo de verificar o comportamento da mistura asfáltica com a variação do teor de *filler*, foram confeccionados 72 corpos de prova (36 para a compactação manual e 36 para a compactação automática), variando-se o teor de *filler* em 2, 3, 4, e 5%.

Observa-se nas Figuras 47, 48, 49, 50 e 51 os resultados dos ensaios Marshall correspondentes a Fase 2 do experimento.

No parâmetro fluência – compactação manual - se observa uma semelhança no comportamento do pó calcário e do resíduo oleoso 1, e para todos os teores analisados de *filler*, o resíduo oleoso 1 se enquadrou na faixa exigida. Na compactação automática, o resíduo oleoso 1 não se enquadrou na faixa exigida (3 a 5 mm) para o teor de 3%. Existem diferenças em termos de valores absolutos, comparando-se os gráficos de compactação manual e automática para o parâmetro fluência, entretanto, o comportamento da curva para o *filler* resíduo oleoso 1 é semelhante, diminuindo o valor para o teor de 3% e apresentando uma tendência crescente para os teores de 4 e 5% (Figura 47).

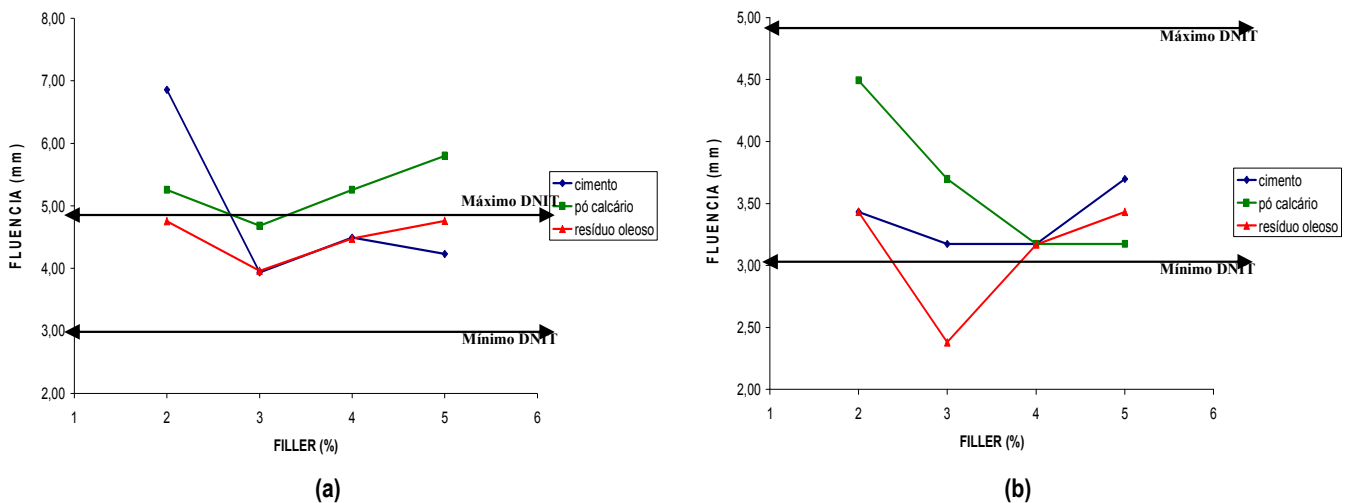


Figura 47 - Parâmetro Fluência - Resultados do ensaio Marshall [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática]

Na relação betume vazios – compactação manual e compactação automática - o *filler* resíduo oleoso 1 se enquadrou na faixa exigida (75 a 82), com os teores de 2%, 3% e 4% (manual) e 3%, 4% e 5% (automática), o *filler* pó calcário com os teores de 3%, 4% e 5%, e o *filler* cimento com os teores de 4% e 5%. Neste caso, os resultados obtidos e o comportamento das curvas são bastante semelhantes para a compactação manual e compactação automática, podendo-se afirmar, portanto, que este parâmetro independe do processo de compactação do corpo de prova (Figura 48).

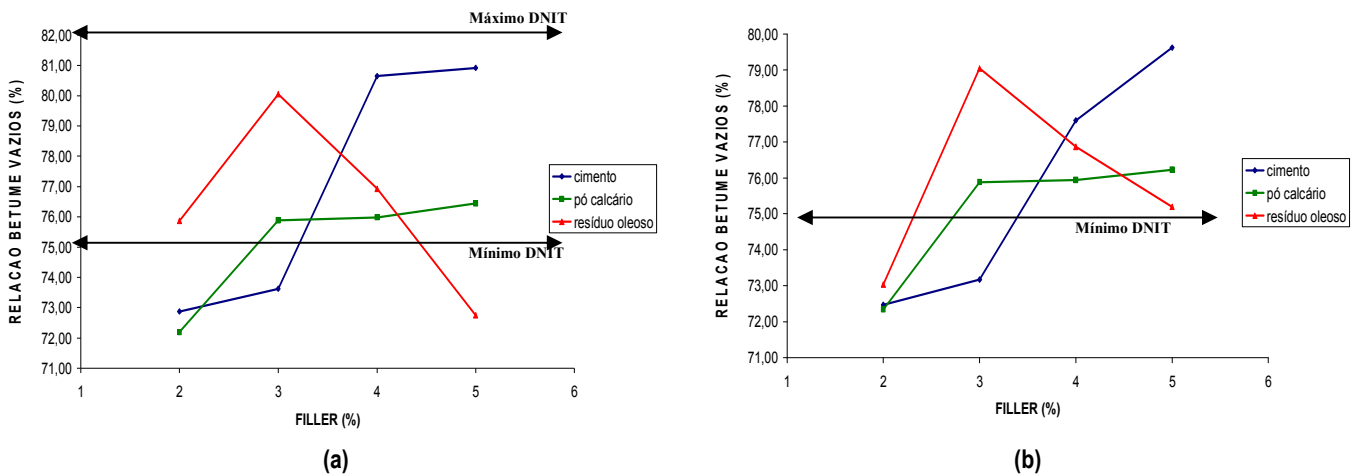


Figura 48 - Parâmetro Relação Betume Vazios - Resultados do ensaio Marshall [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática]

Nos parâmetros peso específico aparente (Figura 49) e % de vazios (Figura 50) – compactação manual e automática - o *filler* resíduo oleoso apresenta um comportamento semelhante aos *fillers* cimento e pó calcário para os teores de 2% e 3%, e diferenciado para os teores de 4% e 5%. Em termos de comportamento das curvas, tanto para o parâmetro peso específico aparente como o parâmetro % de vazios, as curvas apresentam comportamentos similares para a compactação manual e compactação automática.

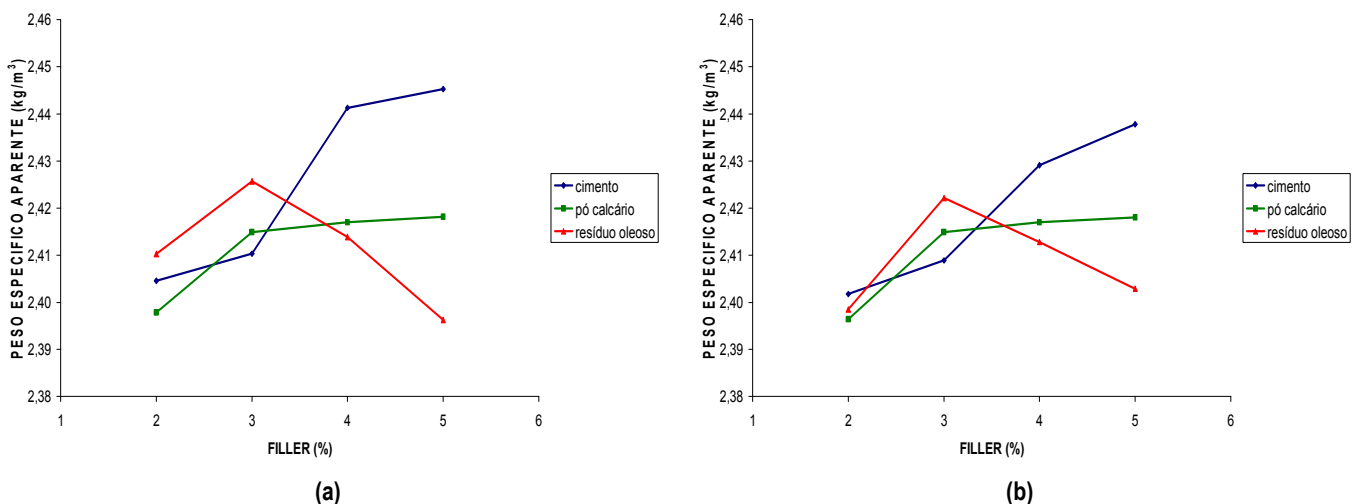


Figura 49 - Parâmetro Peso Específico Aparente - Resultados do ensaio Marshall [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática]

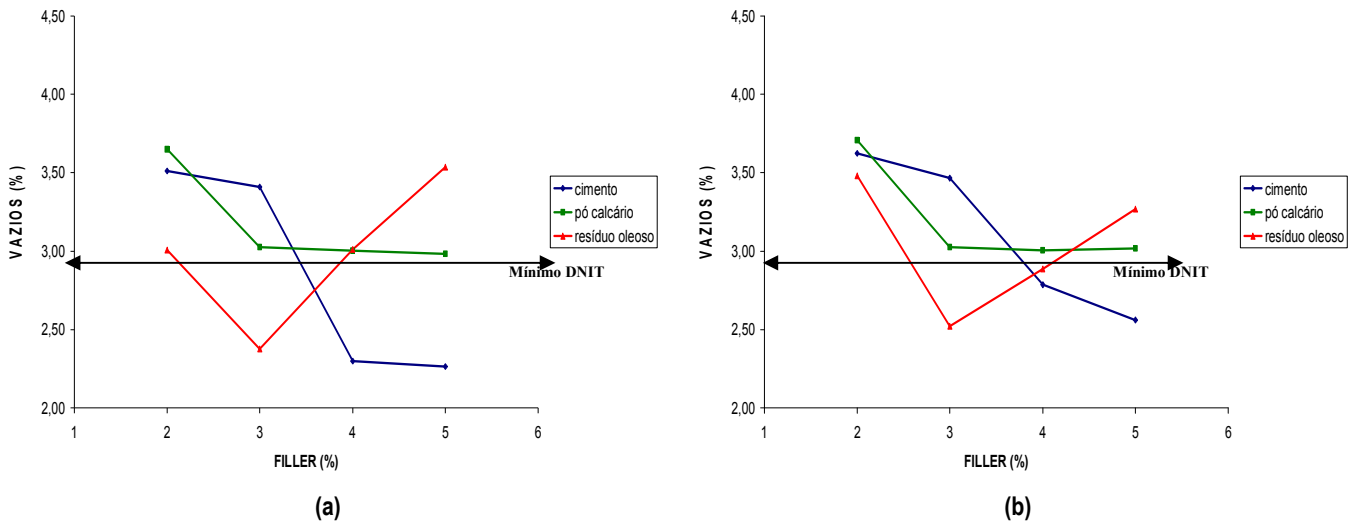


Figura 50 - Parâmetro Vazios - Resultados do ensaio Marshall [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática]

Pode-se notar para o parâmetro estabilidade – compactação manual - que a utilização do resíduo oleoso como “filler” apresenta um comportamento semelhante ao do pó calcário, tendo ambos, apresentado resultados bem superiores quando comparados a utilização do cimento Portland como filler. Entre todos os teores analisados (2%, 3%, 4% e 5%), o filler resíduo oleoso ultrapassou a estabilidade mínima exigida no teor de 4%, e alcançou também a maior estabilidade da pesquisa (674,86 kgf). Já na compactação automática todos os teores dos três fillers analisados ficaram acima do limite mínimo exigido pelo DNIT (Figura 51).

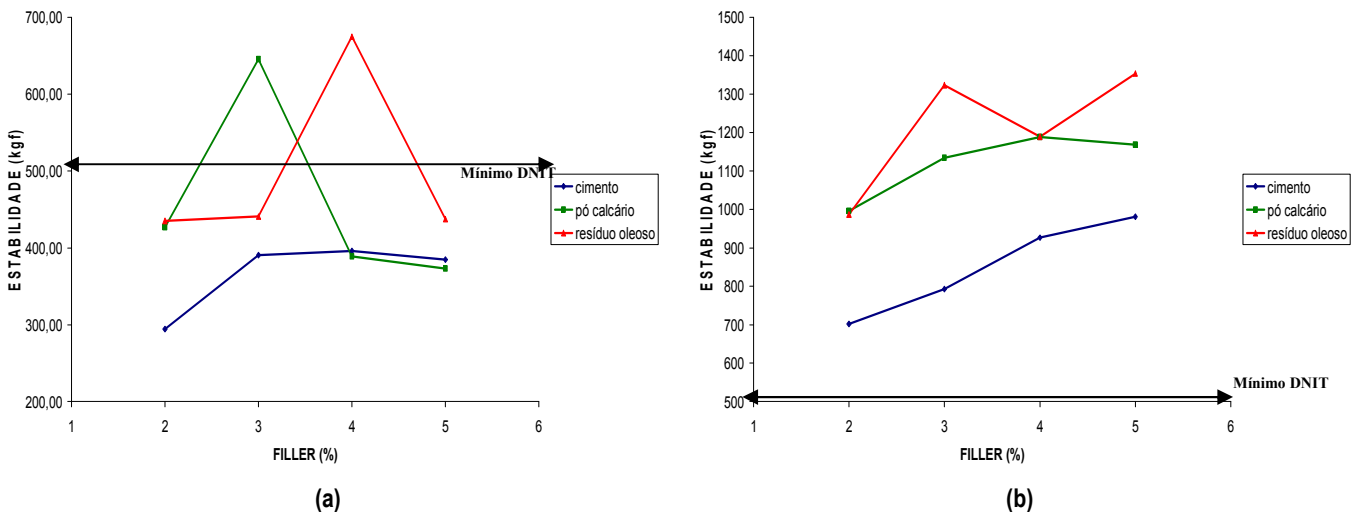
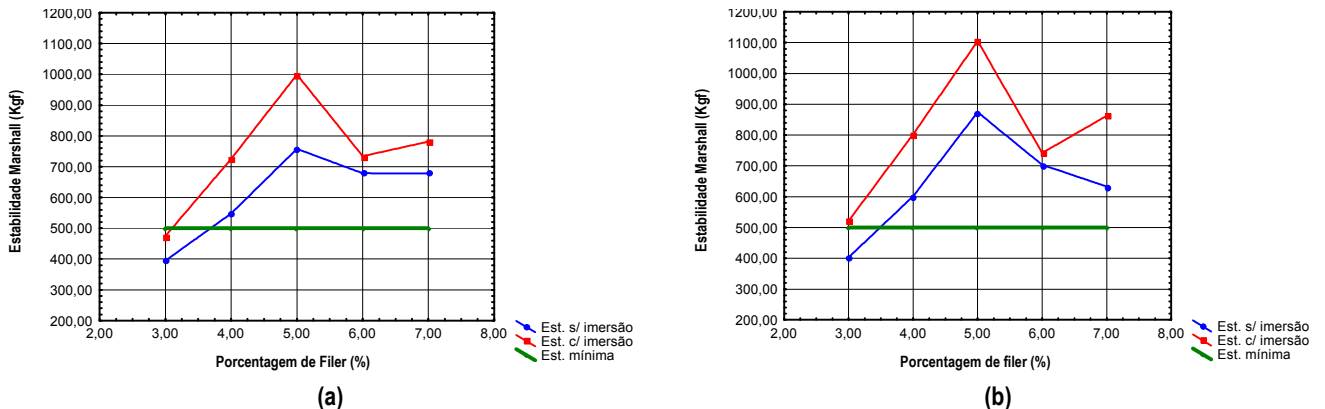


Figura 51 - Parâmetro Estabilidade - Resultados do ensaio Marshall [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática]

Pode-se notar que o parâmetro estabilidade é o que mais sofre influência do processo de compactação, como exemplo tem que, para a compactação manual o maior valor de estabilidade alcançado foi de 674,86 kgf (teor de 4% *filler* resíduo oleoso), já para a compactação automática o maior valor encontrado foi de 1353,80 kgf (teor de 5% *filler* resíduo oleoso), resultado cerca de 2 vezes superior.

A Figura 52 apresenta os resultados obtidos por Fernandes (2007) para o parâmetro estabilidade – compactação automática – para os *fillers* caulim e serragem de granito. Pode-se notar a presença de pontos de inflexão nos teores de 5 e 6% (com imersão). Já no resultado do resíduo oleoso 1 apresentado na Figura 49 b, nota-se que os pontos de inflexão ocorreram nos teores de 3 e 4% (com imersão). Este fato pode ser atribuído a um menor diâmetro médio do tamanho de grãos do *filler* resíduo oleoso (6,83 μm), quando comparado com os *fillers* caulim (diâmetro médio de 8 μm) e serragem de granito (diâmetro médio de 9,5 μm).



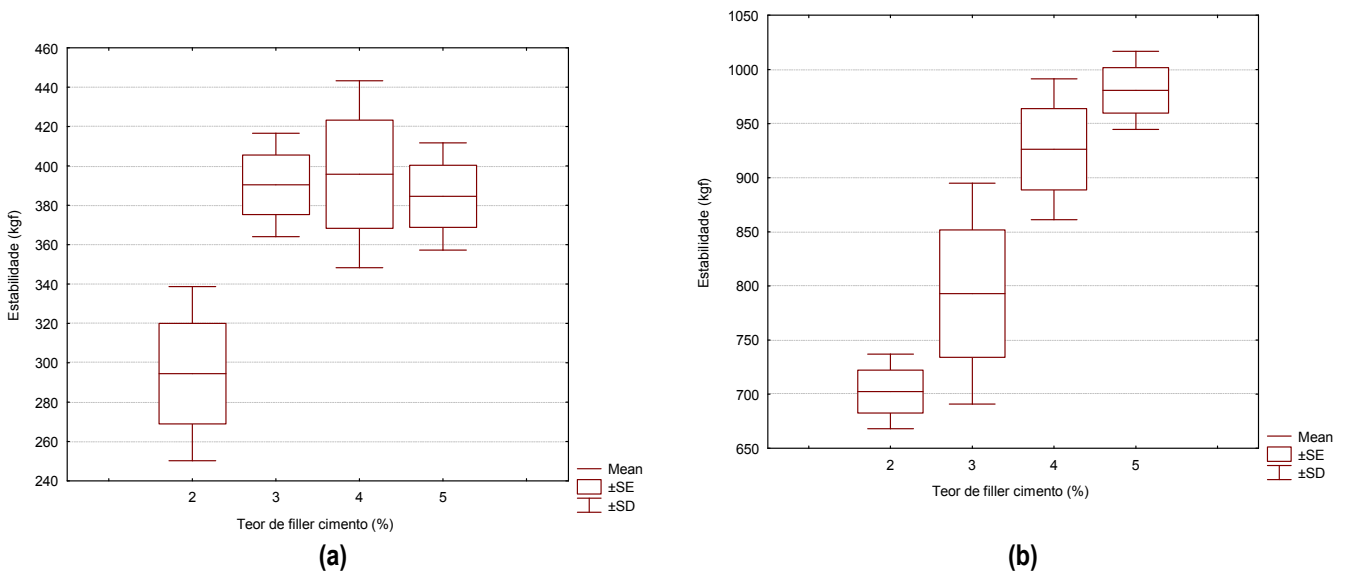
(a) (b)
Figura 52 - Parâmetro Estabilidade - Ensaio Marshall – Compactação Automática
[(a) *filler* caulim (b) *filler* serragem de granito] (FERNANDES, 2007)

Pode-se afirmar, portanto, a partir dos resultados obtidos, que o parâmetro estabilidade é o mais sensível ao processo de compactação do corpo de prova, já os parâmetros: relação betume vazios, peso específico aparente e % de vazios, são os que menos sofrem influências. Para os teores analisados na compactação manual o teor de *filler* resíduo oleoso que atendem as especificações do DNIT é o de 4%. Já para a compactação automática os teores de 4 e 5% de *filler* resíduo oleoso 1 atendem as especificações, sendo o de 5% o que apresentou os melhores resultados.

A Tabela 15 e a Figura 53 apresentam os valores da média, variância e desvio padrão para o parâmetro estabilidade (kgf), compactação manual e automática, utilizando como *filler* o cimento. Pode-se notar que o desvio padrão na compactação manual foi menor quando comparado com a compactação automática. Na compactação manual o menor desvio padrão encontrado foi para o teor de 3% e na automática para o teor de 2%.

Tabela 15 – Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler cimento

		Estabilidade (kgf)					
	% de filler	Valor	Mediana	Valor	Valor	Variância	Desvio
		Médio		mínimo	máximo		padrão
Compactação manual	2	294,51	309,04	244,85	329,64	1955,48	44,23
	3	390,39	380,16	370,84	420,17	686,85	26,21
	4	395,84	392,14	350,24	445,13	2261,28	47,55
	5	384,58	370,45	367,28	416,01	743,48	27,26
Compactação automática	2	702,45	705,71	666,51	735,12	1184,88	34,42
	3	792,84	735,12	732,87	910,53	10388,98	101,93
	4	926,28	900,52	878,06	1000,27	4231,85	65,05
	5	980,63	990,57	940,54	1010,79	1307,65	36,16

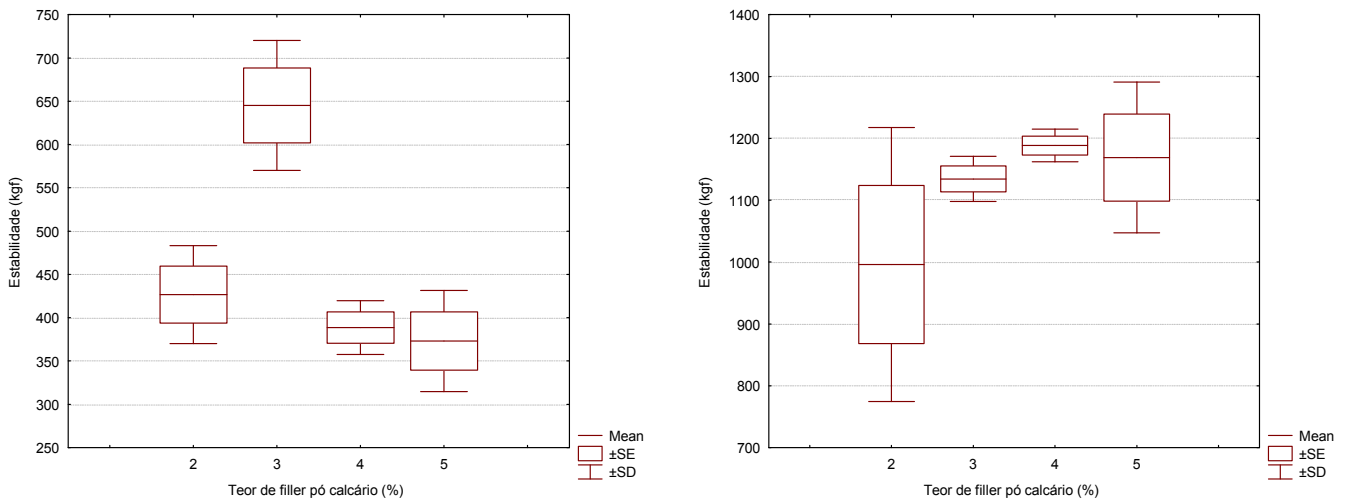


(a) (b)
 Figura 53 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler cimento
 [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática]

A Tabela 16 e a Figura 54 apresentam os valores da média, variância e desvio padrão para o parâmetro estabilidade (kgf), compactação manual e automática, utilizando como *filler* o pó calcário. Tanto na compactação manual quanto na automática o menor desvio padrão encontrado foi para o teor de 4%.

Tabela 16 – Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – *filler* pó calcário

		Estabilidade (kgf)					
% de filler	Valor Médio	Mediana	Valor		Variância	Desvio padrão	
			mínimo	máximo			
Compactação manual	2	426,71	432,65	367,28	480,19	3214,05	56,69
	3	645,31	610,25	594,30	731,38	5620,18	74,97
	4	388,67	374,41	367,28	424,33	966,33	31,08
	5	373,12	360,16	322,41	436,81	3398,27	58,29
Compactação automática	2	996,16	1124,02	740,43	1124,02	49047,02	221,46
	3	1134,40	1145,56	1093,69	1163,94	1327,04	36,43
	4	1188,58	1179,25	1168,02	1218,46	701,20	26,48
	5	1168,98	1104,31	1093,08	1309,53	14848,88	121,85



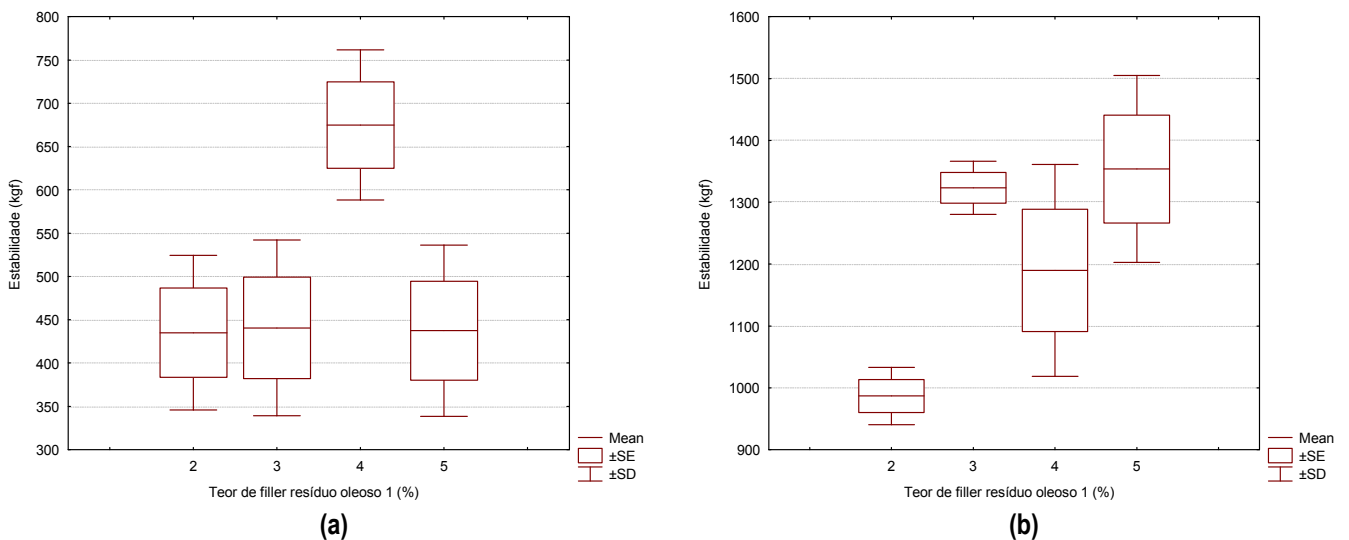
(a) (b)
 Figura 54 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – *filler* pó calcário
 [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática]

A Tabela 17 e a Figura 55 apresentam os valores da média, variância e desvio padrão para o parâmetro estabilidade (kgf), compactação manual e automática, utilizando como filler o resíduo oleoso 1. Na compactação manual o menor desvio padrão encontrado foi para o teor de 4% e na automática para o teor de 3%.

É importante destacar que o *filler* resíduo oleoso foi o que obteve um comportamento mais uniforme na variação do desvio padrão na compactação manual. Entretanto, esse mesmo comportamento não se observou na compactação automática, pois, o desvio padrão foi pequeno para os teores de 2 e 3% e elevado para os teores de 4 e 5%.

Tabela 17 – Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler resíduo oleoso 1

		Estabilidade (kgf)					
	% de filler	Valor	Mediana	Valor	Valor	Variância	Desvio
		Médio		mínimo	máximo		padrão
Compactação manual	2	434,96	432,65	346,87	525,36	7968,51	89,26
	3	440,57	499,21	323,30	499,21	10315,10	101,56
	4	674,86	706,03	576,87	741,68	7519,91	86,72
	5	437,41	489,70	323,30	499,21	9787,67	98,93
Compactação automática	2	986,73	990,57	938,41	1031,21	2164,46	46,53
	3	1323,38	1309,64	1289,01	1371,51	1843,22	42,93
	4	1189,70	1166,39	1031,21	1371,51	29358,52	171,34
	5	1353,78	1371,51	1194,57	1495,25	22838,59	151,12



(a) **(b)**
Figura 55 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler resíduo oleoso 1
[(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática]

Os resultados da análise da variância são apresentados na Tabela 18 para o parâmetro estabilidade (kgf). Foram considerados os seguintes fatores: tipo de compactação (A), tipo de filler (B) e teor de filler (C). Pode-se notar na Tabela 18, que todos os fatores: tipo de compactação, tipo de filler e teor de filler, e suas interações, influenciam significativamente na estabilidade (kgf), com exceção apenas da interação tipo de filler x teor de filler.

Corroborando assim afirmação anterior de que o parâmetro estabilidade é o mais sensível ao processo de compactação do corpo-de-prova

Tabela 18 – Resumo da Análise de Variância - Ensaio Marshall – Parâmetro Estabilidade

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Teste p
Tipo de compactação (A)	6950841	1	6950841	861,321*	0,000000*
Tipo de Filler (B)	785164	2	392582	48,647*	0,000000*
Teor de Filler (C)	296960	3	98987	12,266*	0,000004*
(AB)	177781	2	88890	11,015*	0,000116*
(AC)	158951	3	52984	6,566*	0,000826*
(BC)	100708	6	16785	2,080	0,073055
(ABC)	197976	6	32996	4,089*	0,002162*
Erro	387359	48	8070		

Significância de 5%*

5.2.1.2 - Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Na Figura 56 estão lançados em gráfico os resultados obtidos no ensaio de resistência a tração por compressão diametral com os corpos-de-prova moldados com os *fillers* cimento, pó calcário e resíduo oleoso 1. Neste ensaio foram moldados os corpos-de-prova utilizando a mesma proporção de materiais do ensaio Marshall, variando-se os teores de *filler* de 2%, 3%, 4% e 5%.

Pode-se notar que todos os teores e tipos de *fillers* utilizados forneceram valores de resistência à tração por compressão diametral superiores ao mínimo exigido pelo DNIT (0,65 MPa). O *filler* pó calcário apresentou os melhores resultados, já o *filler* cimento, novamente, forneceu os menores valores de resistência. Notam-se também tendências crescentes de resistência de acordo com o aumento dos teores de *fillers* pó calcário e resíduo oleoso, entretanto, o *filler* cimento apresenta uma tendência decrescente a partir do teor de 3%. A similaridade de comportamento entre os resultados obtidos pelo resíduo oleoso 1 e o pó calcário, tanto no Ensaio Marshall como no Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral pode ser explicada pelo fato de ambos *fillers* possuírem um teor de SiO₂ considerável, em suas composições químicas (pó calcário – 20,08 % de SiO₂ e resíduo oleoso 1 – 52,72% de SiO₂).

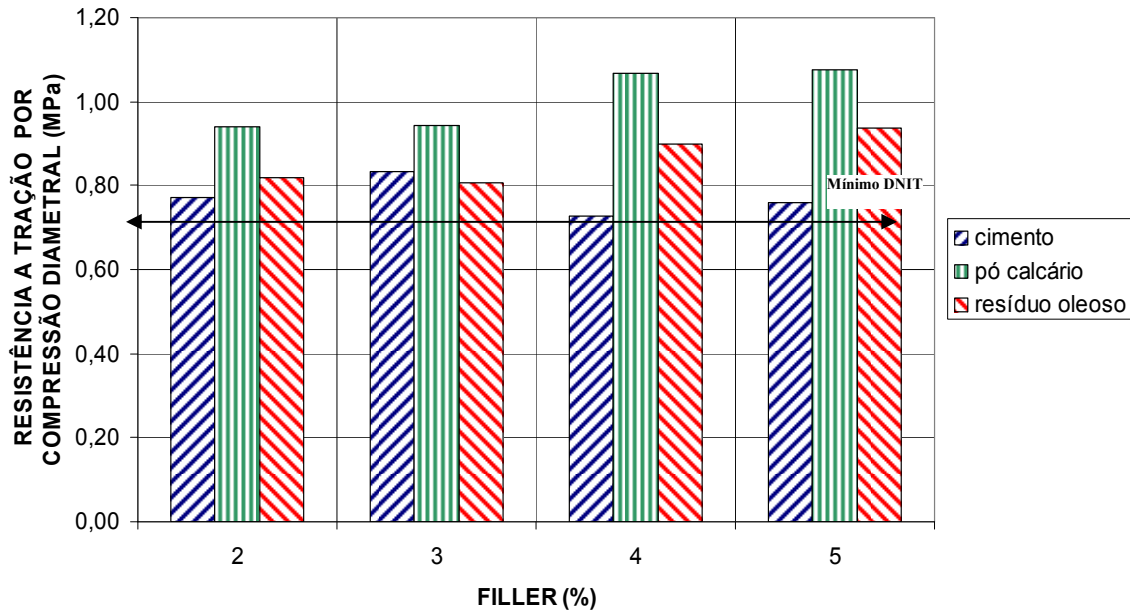


Figura 56 - Resultados do ensaio de resistência a tração por compressão diametral

A Tabela 19 e a Figura 57 apresentam os valores da média, variância e desvio padrão para o parâmetro resistência a tração por compressão diametral (MPa), compactação automática, utilizando como *filler* o cimento. O menor desvio padrão encontrado foi para o teor de 3%.

Tabela 19 – Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – *filler* cimento

Resistência a Tração por Compressão Diametral (MPa)						
% de filler	Valor Médio	Mediana	Valor mínimo	Valor máximo	Variância	Desvio padrão
2	0,772	0,758	0,749	0,808	0,0009	0,031
3	0,834	0,831	0,821	0,851	0,0002	0,015
4	0,728	0,754	0,628	0,801	0,0079	0,089
5	0,761	0,772	0,728	0,782	0,0008	0,028

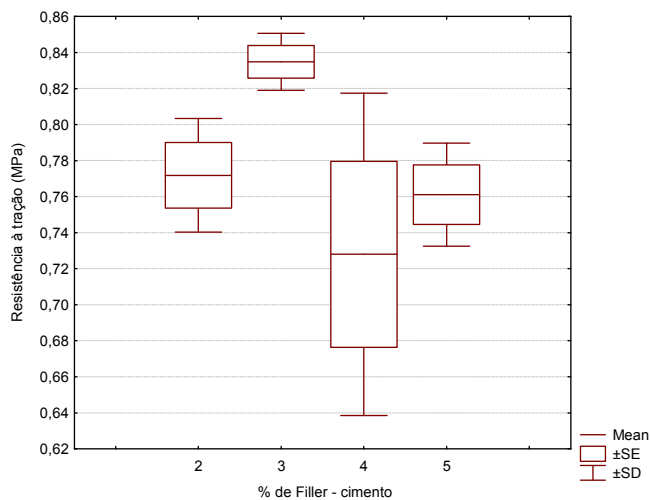


Figura 57 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler cimento

A Tabela 20 e a Figura 58 apresentam os valores da média, variância e desvio padrão para o parâmetro resistência a tração por compressão diametral (MPa), compactação automática, utilizando como *filler* o pó calcário. O menor desvio padrão encontrado foi para o teor de 2%.

Tabela 20 – Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler pó calcário

Resistência a Tração por Compressão Diametral (MPa)						
% de filler	Valor Médio	Mediana	Valor mínimo	Valor máximo	Variância	Desvio padrão
2	0,941	0,934	0,923	0,963	0,0004	0,021
3	0,943	0,951	0,883	0,994	0,0032	0,056
4	1,068	1,089	0,995	1,120	0,0042	0,065
5	1,077	1,063	1,053	1,116	0,0011	0,034

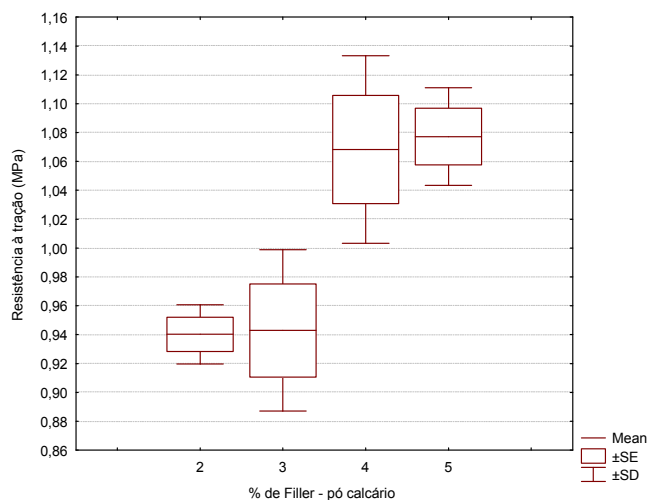


Figura 58 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – *filler* pó calcário

A Tabela 21 e a Figura 59 apresentam os valores da média, variância e desvio padrão para o parâmetro resistência a tração por compressão diametral (MPa), compactação automática, utilizando como *filler* o resíduo oleoso 1. O menor desvio padrão encontrado foi para o teor de 4%.

Neste caso, também se pode destacar que o *filler* resíduo oleoso 1 foi o que apresentou um comportamento mais uniforme na variação do desvio padrão, quando comparado aos *fillers* cimento e pó calcário.

Tabela 21 – Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – *filler* resíduo oleoso 1

Resistência a Tração por Compressão Diametral (MPa)						
% de filler	Valor Médio	Mediana	Valor mínimo	Valor máximo	Variância	Desvio padrão
2	0,819	0,843	0,769	0,846	0,0019	0,043
3	0,806	0,776	0,770	0,872	0,0032	0,057
4	0,899	0,909	0,864	0,924	0,0009	0,031
5	0,937	0,945	0,883	0,982	0,0024	0,049

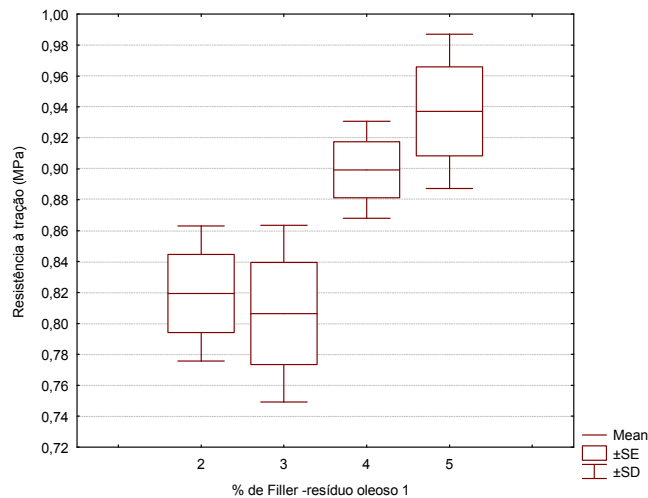


Figura 59 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão – filler resíduo oleoso 1

Os resultados da análise da variância são apresentados na Tabelas 22 para o parâmetro resistência a tração por compressão diametral (MPa). Foram considerados os seguintes fatores: tipo de filler e teor de filler. Nota-se que o fator tipo de *filler* influencia significativamente na resistência a tração por compressão diametral, entretanto, o fator teor de *filler* não possui essa propriedade.

Tabela 22 – Resumo da Análise de Variância – Resistência a Tração por Compressão Diametral

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Teste p
Tipo de Filler	0,33136	2	0,16568	39,937*	3,49E-09*
Teor de Filler	0,03621	3	0,01207	2,910	5,07E-02
Erro	0,12445	30	0,00415		

Significância de 5%*

5.2.1.3 - Ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman

Na Figura 60 estão lançados em gráfico os resultados obtidos no ensaio de tração diametral modificada de Lottman com os corpos-de-prova moldados com os *fillers* cimento, pó calcário e resíduo oleoso 1. Neste ensaio foram moldados os corpos-de-prova utilizando a mesma proporção de materiais do ensaio Marshall, variando-se os teores de *filler* de 2%, 3%, 4% e 5%.

Os resultados do ensaio de Lottman, para os teores de 2, 3 e 5% do *filler* pó calcário, 2, 4 e 5% do *filler* cimento, e 2, 4 e 5% do *filler* resíduo oleoso 1 estão acima do limite mínimo preconizado pela metodologia SUPERPAVE (mínimo de 80%).

É importante destacar que o teor de 3% foi o que apresentou o menor resultado para o *filler* resíduo oleoso 1, fato este já observado nos parâmetros fluência (Figura 47), % de vazios (Figura 50) e resistência a tração por

compressão diametral (Figura 56). Estas observações podem indicar que no teor de 3%, provavelmente, está acontecendo uma transição do comportamento do *filler* na mistura asfáltica de material de enchimento, para material, que além de preencher vazios, interage quimicamente com o CAP.

Em contrapartida, os teores de 2 e 5% foram os que apresentaram os melhores resultados. Fernandes (2007) também observou o melhor desempenho do teor de 5% de *filler* na realização do ensaio de Lottman com os *fillers* caulim e serragem de granito (Figura 61).

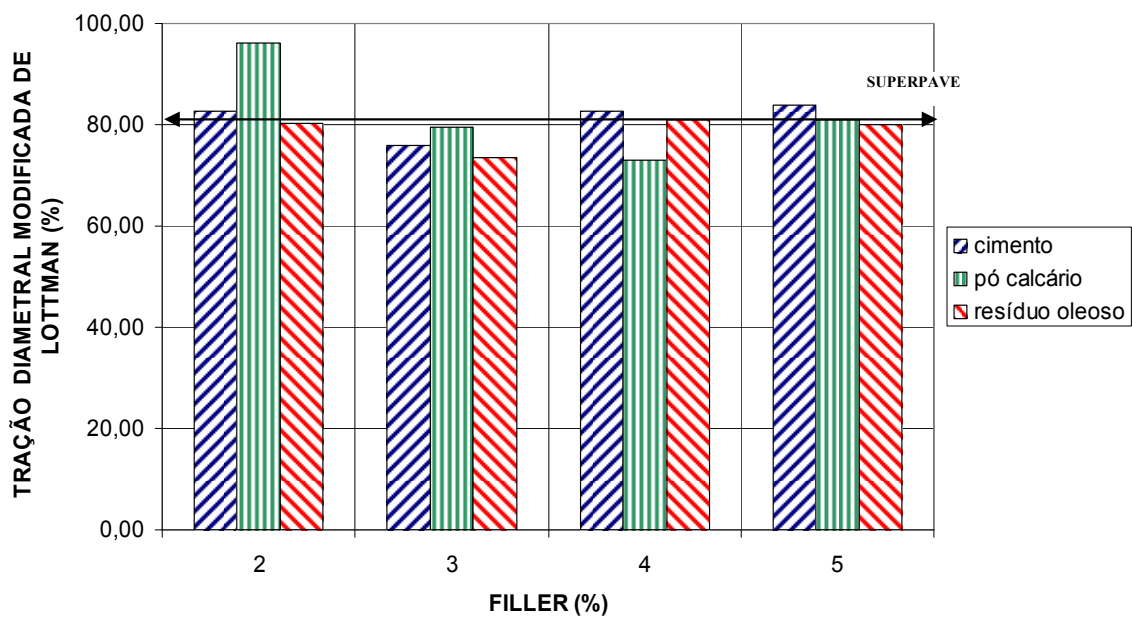


Figura 60 - Resultados do ensaio de tração diametral modificada de Lottman

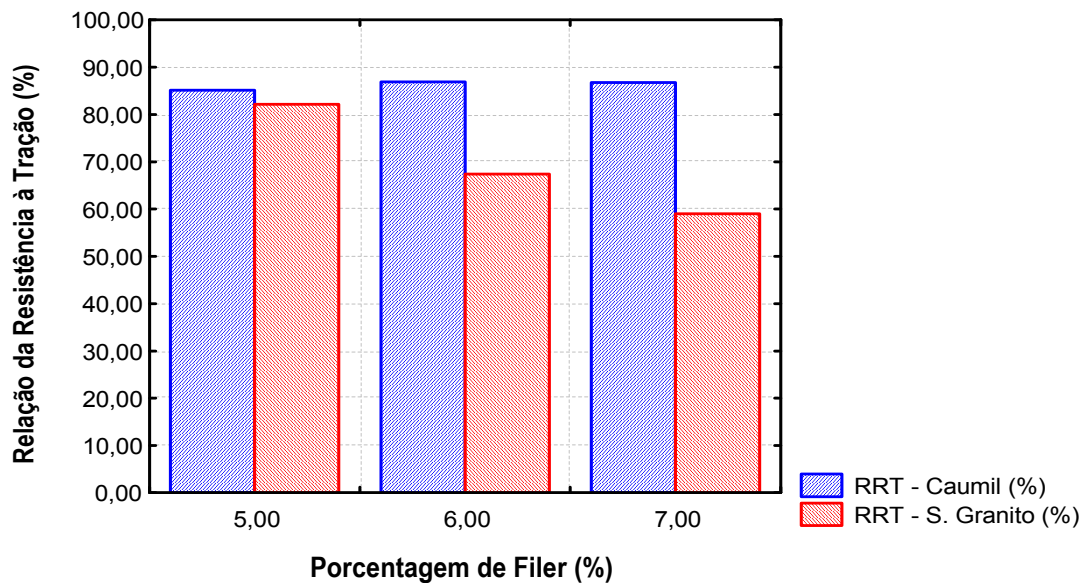


Figura 61 - Resultados do ensaio de tração diametral modificada de Lottman (FERNANDES, 2007)

5.2.2 - Resíduo oleoso 2 (1-POTI-4-RN)

5.2.2.1 - Ensaio Marshall

Variação do Teor de Resíduo e seus Efeitos

Com o objetivo de verificar o comportamento da mistura asfáltica com a variação do teor do resíduo oleoso 2, foram confeccionados 12 corpos de prova (compactação automática), variando-se o teor de resíduo em 2, 3, 4, e 5%. Neste caso, em função de sua granulometria, o resíduo oleoso 2 fez parte da composição da mistura como agregado miúdo e o *filler* utilizado foi o pó calcário.

Observa-se nas Figuras 62, 63, 64, 65 e 66 os resultados dos ensaios Marshall. Pode-se notar um comportamento semelhante nos resultados obtidos para os parâmetros: relação betume vazios, estabilidade, peso específico aparente e %vazios, quando comparados aos resultados anteriores do item 5.2.1.1 (nos quais o resíduo oleoso 2 não estava presente na composição do agregado miúdo). É importante destacar o aumento do valor da estabilidade máxima alcançada com a introdução do resíduo oleoso 2 na composição da mistura de 1189 kgf para 1881 kgf. Esse aumento pode ser explicado pelo fato do resíduo oleoso 2 possuir uma granulometria melhor graduada que a granulometria da areia quartzosa, contribuindo assim para a diminuição da % de vazios na mistura asfáltica.

Entretanto, apesar dos excelentes resultados obtidos, em função da faixa exigida do DNIT, para essa composição da mistura apenas a que possui um teor de 5% de resíduo oleoso 2 pode ser utilizada.

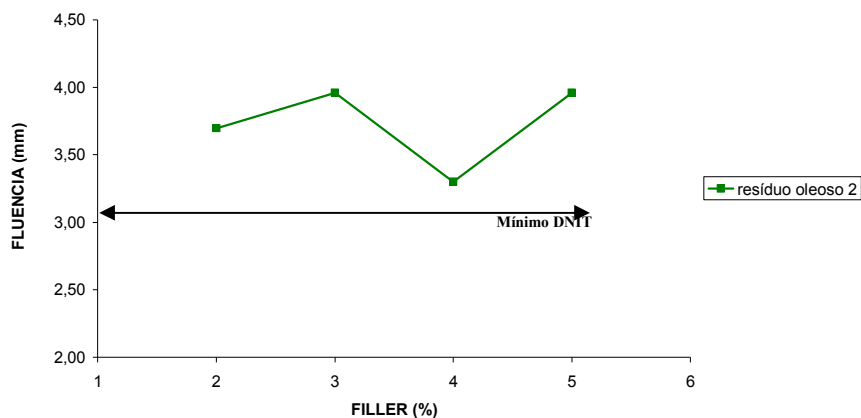


Figura 62 - Parâmetro Fluência - Resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2

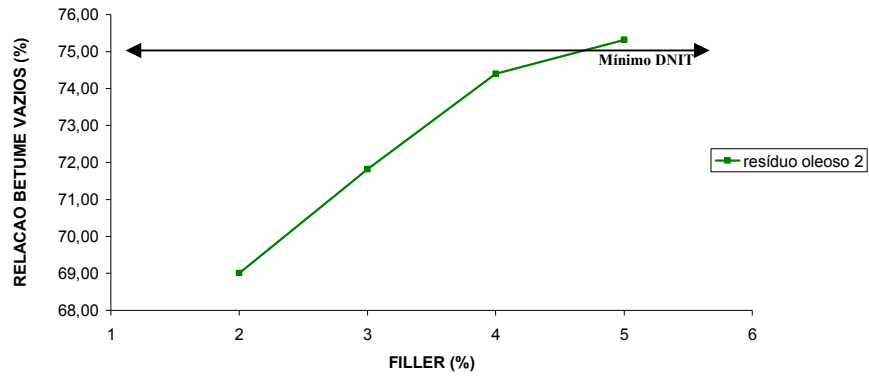


Figura 63 - Parâmetro Relação Betume Vazios - resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2

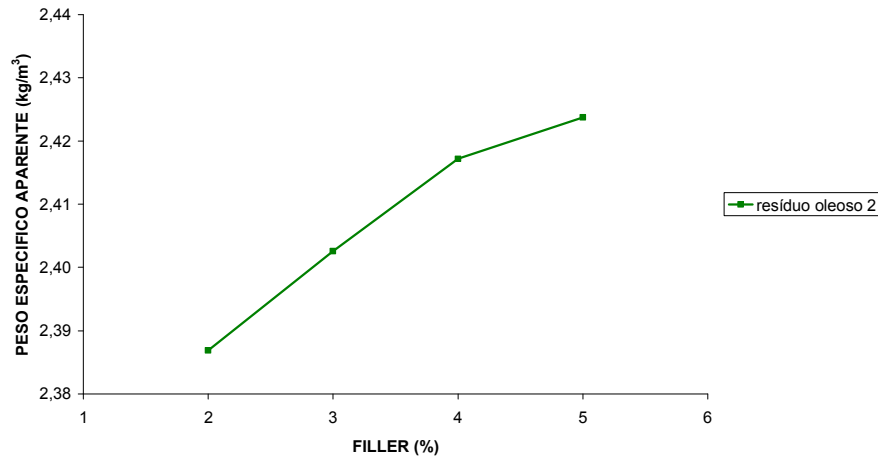


Figura 64 - Parâmetro Peso Específico Aparente - resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2

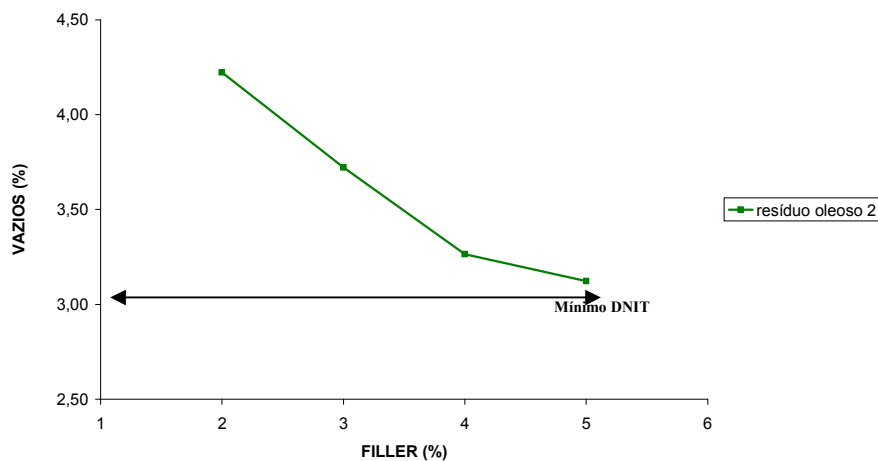


Figura 65 - Parâmetro Vazios - resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2

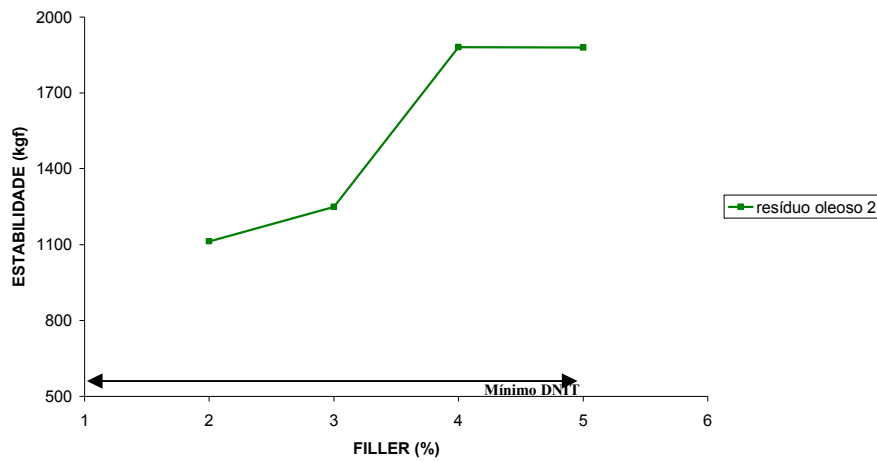


Figura 66 - Parâmetro Estabilidade - resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2

A Tabela 23 e a Figura 67 apresentam os valores da média, variância e desvio padrão para o parâmetro estabilidade (kgf), compactação automática, utilizando como agregado miúdo o resíduo oleoso 2. O menor desvio padrão encontrado foi para o teor de 3%.

Tabela 23 – Valor Médio, Variância e Desvio Padrão para a estabilidade (kgf) – resíduo oleoso 2

% de filler	Estabilidade (kgf)					Desvio padrão
	Valor Médio	Mediana	Valor mínimo	Valor máximo	Variância	
2	1113,08	1030,59	980,46	1328,18	35328,47	187,96
3	1248,97	1280,76	1153,73	1312,43	7054,57	83,99
4	1881,12	1897,46	1787,77	1958,13	7456,29	86,35
5	1879,56	1892,93	1495,25	2250,49	142728,7	377,79

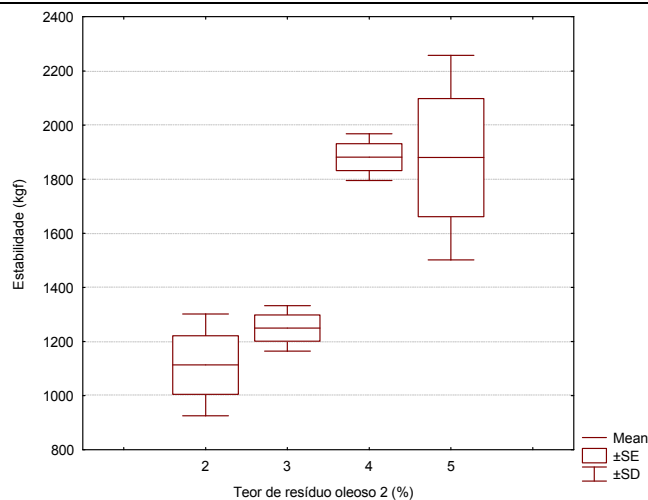


Figura 67 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão para a estabilidade (kgf) – resíduo oleoso 2

Os resultados da análise da variância são apresentados na Tabela 24 para o parâmetro estabilidade (kgf). Foi considerado o seguinte fator: teor de resíduo. Pode-se notar que o fator teor de resíduo, influencia significativamente na estabilidade (kgf), resultado, portanto, semelhante, ao obtido com o resíduo oleoso 1.

Tabela 24 – Resumo da Análise de Variância - Ensaio Marshall – Parâmetro Estabilidade

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Teste p
Teor de resíduo	1494823	3	498274	10,3501*	0,003963*
Erro	385136	8	48142		

Significância de 5%*

5.2.2.2 - Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Na Figura 68 estão lançados em gráfico os resultados obtidos no ensaio de resistência a tração por compressão diametral com os corpos-de-prova moldados com o filler pó calcário e o resíduo oleoso 2 atuando como agregado miúdo. Neste ensaio foram moldados os corpos-de-prova utilizando a mesma proporção de materiais do ensaio Marshall, variando-se os teores de resíduo de 2%, 3%, 4% e 5%.

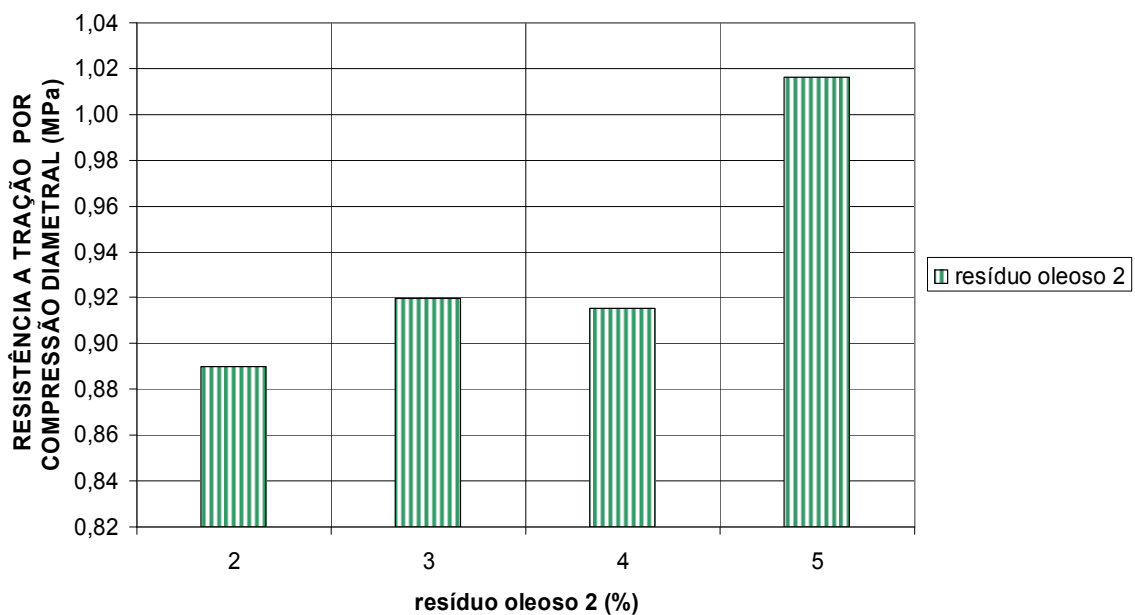


Figura 68 - Resultados do ensaio de resistência a tração por compressão diametral – resíduo oleoso 2

Pode-se notar que para todos os teores analisados, o valor da resistência a compressão diametral ficou acima do limite mínimo exigido pelo DNIT (0,65 MPa). Entretanto, pode-se destacar que a presença do resíduo oleoso 2 na mistura asfáltica diferentemente do que ocorreu no parâmetro estabilidade do ensaio Marshall, não proporcionou mudanças significativas quando comparado ao mostrado na Figura 56 (*filler* pó calcário). Desta maneira, pode-se inferir que a % de vazios não influencia significativamente o valor da resistência a tração por compressão diametral.

A Tabela 25 e a Figura 69 apresentam os valores da média, variância e desvio padrão para o parâmetro resistência a tração por compressão diametral (MPa), compactação automática, utilizando o resíduo oleoso 2 como agregado miudo. O menor desvio padrão encontrado foi para o teor de 4%.

Tabela 25 – Valor Médio, Variância e Desvio Padrão para a resistência a tração (MPa) – resíduo oleoso 2

Resistência a Tração por Compressão Diametral (MPa)						
% de filler	Valor Médio	Mediana	Valor mínimo	Valor máximo	Variância	Desvio padrão
2	0,890	0,916	0,809	0,945	0,0051	0,071
3	0,920	0,991	0,774	0,996	0,0160	0,126
4	0,915	0,898	0,896	0,951	0,0009	0,031
5	1,016	1,043	0,952	1,051	0,0030	0,055

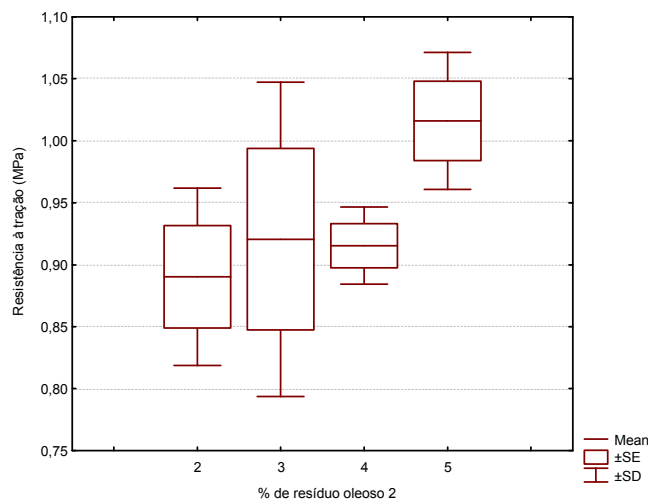


Figura 69 - Valor Médio, Variância e Desvio Padrão para a resistência a tração (MPa) – resíduo oleoso 2

O que se pode concluir das observações da variação do desvio padrão da estabilidade (kgf) e da resistência a tração por compressão diametral (MPa), é que o desvio padrão não sofre influência do tipo e do teor de material utilizado. Provavelmente, a explicação da variação do desvio padrão pode estar relacionada ao processo de mistura dos componentes do asfalto: brita, areia, CAP e *filler*.

Os resultados da análise da variância são apresentados na Tabela 26 para o parâmetro resistência a tração por compressão diametral (MPa). Foi considerado o seguinte fator: teor de resíduo.

Pode-se notar que o fator teor de resíduo não influencia significativamente na resistência a tração por compressão diametral (MPa), fato semelhante já foi observado na Tabela 22.

Tabela 26 – Resumo da Análise de Variância – Resistência a Tração por Compressão Diametral

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Teste p
Teor de resíduo	0,02748	3	0,00916	1,454	0,298161
Erro	0,05041	8	0,00630		

Significância de 5%*

5.2.2.3 - Ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman

Na Figura 70 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de tração diametral modificada de Lottman com os corpos-de-prova moldados com o *filler* pó calcário e o resíduo oleoso 2 atuando como agregado miúdo. Neste ensaio foram moldados os corpos-de-prova utilizando a mesma proporção de materiais do ensaio Marshall, variando-se os teores de resíduo de 2%, 3%, 4% e 5%.

Os resultados do ensaio de Lottman, para os teores de 2 e 5% do resíduo oleoso 2 estão acima do limite mínimo preconizado pela metodologia SUPERPAVE (mínimo de 80%). Nota-se também uma tendência decrescente entre os teores de 2 à 4% e crescente entre 4 e 5%, fato semelhante ao observado na Figura 60 quando da utilização do *filler* pó calcário sem o resíduo oleoso 2 atuando como agregado miúdo. Desta maneira, pode-se inferir que a adição do resíduo oleoso 2 à mistura asfáltica não proporcionou modificações significativas nos resultados obtidos pelo ensaio de Lottman.

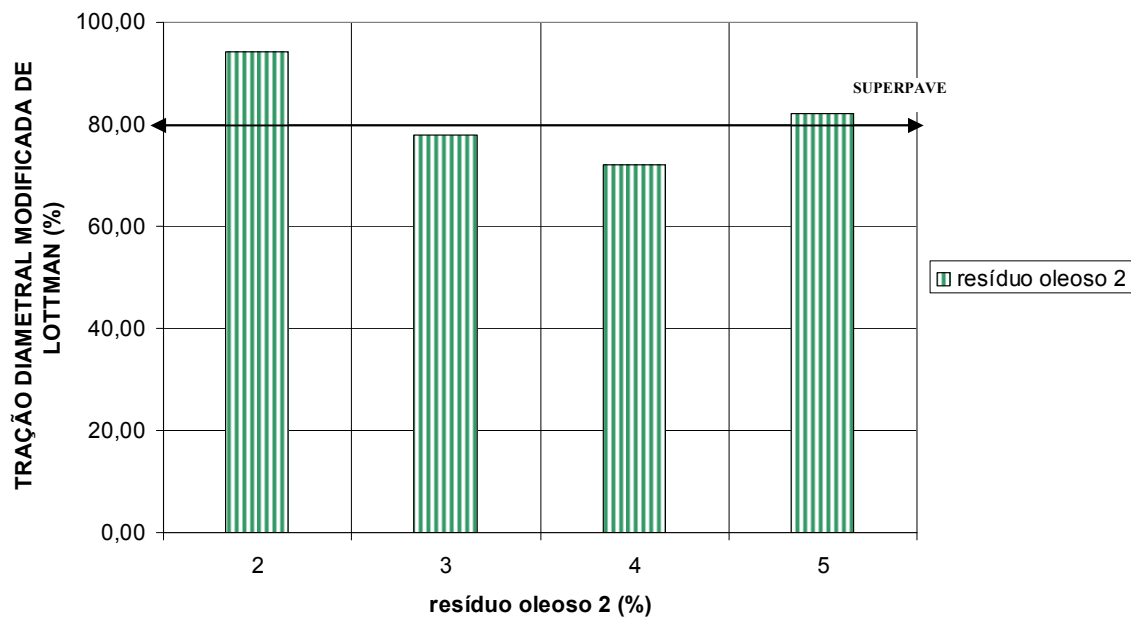


Figura 70 - Resultados do ensaio de tração diametral modificada de Lottman – resíduo oleoso 2

5.3 – Modelo Reduzido

O modelo reduzido de revestimento asfáltico possui a seguinte composição: 24% de brita de 19 mm, 34% de brita de 12 mm, 32% de areia, 5% de agregado miúdo resíduo oleoso 2 e 5% de *filler* resíduo oleoso 1.

No período de 03/11/07 a 03/07/08 o modelo reduzido ficou ao ar livre, em contato direto com as variações de temperatura e clima. Nesse período ocorreu uma precipitação pluviométrica total de 660,9 mm. Na data de 03/07/08 o trecho experimental foi irrigado com água destilada e em seguida foi realizada a coleta do líquido que escoou pelos orifícios instalados na caixa de madeira.

Foi realizada a espectroscopia por absorção atômica com os extratos lixiviados e solubilizados do líquido coletado. O Quadro 4 apresenta as concentrações observadas para os parâmetros analisados. Pode-se notar que todas as concentrações estão abaixo do limite máximo permitido pela norma, dessa forma o líquido foi classificado como resíduo Classe III ou inerte, ou seja, não representa perigo para o meio-ambiente. Este resultado comprova a assertiva de que, a utilização de resíduos oleosos em revestimento asfálticos de estradas representa uma alternativa ambientalmente adequada, de destinação final do resíduo oleoso (cascalho de perfuração).

Quadro 4 – Espectroscopia por absorção atômica e teor de óleo e graxas – modelo reduzido

	Parâmetro	Limites Máximos Permitidos	Resultado
Solubilização (mg/L)	cádmio	0,005	Não detectado
	chumbo	0,05	Não detectado
	cromo	0,05	Não detectado
	sulfetos	Sem padrão	Não detectado
	cobre	1	Não detectado
	ferro	0,3	0,09
	manganês	0,1	Não detectado
	sódio	200	39,09
	zinco	5	Não detectado
	cloretos	Sem padrão	1,35
Lixiviação (mg/L)	cádmio	0,5	Não detectado
	chumbo	5	Não detectado
	cromo	5	Não detectado
	sulfetos	Sem padrão	Não detectado
	cobre	Sem padrão	Não detectado
	ferro	Sem padrão	0,88
	manganês	Sem padrão	Não detectado
	sódio	Sem padrão	16,00
	zinco	Sem padrão	Não detectado
	cloretos	Sem padrão	0,70
Óleo e Graxas (%)	óleo e graxas	5	Não detectado

5.4 - Conclusões Parciais

De acordo com as análises dos resultados obtidos através dos ensaios realizados com o resíduo oleoso 1 (4-SES-149A) algumas considerações podem ser efetuadas, tais como:

- os ensaios de viscosidade e penetração do resíduo apontam para um comportamento como *filler* aceitável, já que os resultados obtidos se encontram em uma faixa localizada entre os valores obtidos com a cal e com o cimento Portland (dois tipos de *fillers* comumente utilizados);

- a estabilidade Marshall mínima (compactação manual), preconizada pelo DNIT, foi alcançada para os *fillers* pó calcário e resíduo oleoso, sendo que, a mistura que tem como *filler* o resíduo oleoso apresentou um valor maior de estabilidade;
- os resultados do ensaio Marshall (compactação manual), indicaram que para a mistura estudada, o teor ideal de *filler* resíduo oleoso que pode ser incorporado na composição do material asfáltico é de 4%;
- a estabilidade Marshall mínima (compactação automática), preconizada pelo DNIT, foi alcançada para os três *fillers* (pó calcário, cimento e resíduo oleoso), sendo que, a mistura que tem como *filler* o resíduo oleoso apresentou um valor maior de estabilidade;
- os resultados do ensaio Marshall (compactação automática), indicaram que para a mistura estudada, o teor ideal de *filler* resíduo oleoso que pode ser incorporado na composição do material asfáltico pode ser de 4 ou 5%;
- a Resistência a Tração por Compressão Diametral mínima, preconizada pelo DNIT, foi alcançada para os três *fillers* (pó calcário, cimento e resíduo oleoso), sendo que, a mistura que tem como *filler* o resíduo oleoso apresentou resultados superiores aos apresentados pelo *filler* cimento;
- os resultados da análise da variância indicam que os fatores: tipo de compactação, tipo de *filler* e teor de *filler*, influenciam significativamente na estabilidade (kgf), enquanto o fator tipo de *filler* influencia significativamente na resistência a tração por compressão diametral; e
- os resultados do ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman, indicaram que para a mistura estudada, o teor ideal de *filler* resíduo oleoso que pode ser incorporado na composição do material asfáltico pode ser de 2, 4 ou 5%.

Para o resíduo oleoso 2 (1-POTI-4-RN), tem-se as seguintes conclusões:

- os resultados do ensaio Marshall (compactação automática), indicaram que para a mistura estudada, o teor ideal de *filler* resíduo oleoso que pode ser incorporado na composição do material asfáltico é de 5%;
- a Resistência a Tração por Compressão Diametral mínima, preconizada pelo DNIT, foi alcançada para todos os teores analisados: 2, 3, 4 e 5%;
- os resultados da análise da variância indicam que o fator teor de resíduo, influencia significativamente na estabilidade (kgf); e
- os resultados do ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman, indicaram que para a mistura estudada, o teor ideal de *filler* resíduo oleoso que pode ser incorporado na composição do material asfáltico pode ser de 2 ou 5%.

Para o modelo reduzido tem-se a seguinte conclusão:

- o líquido coletado foi classificado como resíduo Classe III ou inerte, ou seja, não representa perigo para o meio-ambiente.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões

Para o resíduo oleoso 1 (1 –SES-149A), pode-se afirmar que:

- a caracterização física e mineralógica do resíduo oleoso 1, indica, principalmente, que é um material com granulometria aceitável para ser usado como *filler* (92% do material passa na peneira ABNT nº200) , é um silicato de alumínio composto principalmente por quartzo e foi classificado com de Classe I ou perigoso (tóxico e não inerte); e
- a caracterização mecânica para a mistura asfáltica estudada, indica que os teores ideais de resíduo oleoso 1 que podem ser utilizados são de 4 ou 5%.

Para o resíduo oleoso 2 (1 –POTI-4-RN), pode-se afirmar que:

- a caracterização física e mineralógica do resíduo oleoso 2, indica, principalmente, que é um material com granulometria aceitável para ser usado como agregado miúdo;
- foi classificado como não perigoso e não inerte, ou seja, resíduo Classe II; e
- a caracterização mecânica para a mistura asfáltica estudada, indica que o teor ideal de resíduo oleoso 2 que pode ser utilizado é de 5%.

Para o modelo reduzido, pode-se afirmar que:

- o monitoramento ambiental do modelo reduzido, indica que o resíduo oleoso 1 e o resíduo oleoso 2 podem ser incorporados em revestimentos asfálticos de estradas sem representar riscos ao meio-ambiente.

Logo, as evidências da pesquisa, baseadas em ensaios de laboratório (que simulam o comportamento do material no campo), e no monitoramento do modelo reduzido, são de que os resíduos oleosos (cascalhos de perfuração) estudados, obedecendo a limites percentuais, podem ser utilizados em revestimentos asfálticos de estradas, validando assim a hipótese apresentada “os cascalhos de perfuração provenientes da perfuração de poços

de petróleo podem ser utilizados em revestimentos asfálticos como agregado miúdo e/ou filler". O resíduo oleoso 1, inclusive, apresentou em todos os ensaios realizados, melhoria nas propriedades da mistura asfáltica quando comparado ao *filler* cimento Portland. O resíduo oleoso 2 também apresentou melhoria nas propriedades da mistura asfáltica, em virtude de possuir uma granulometria mais uniforme que a granulometria da areia quartzosa, contribuindo assim para a diminuição da % de vazios na mistura asfáltica.

O resíduo oleoso 1 (Classe I ou perigoso) e o resíduo oleoso 2 (Classe II ou não inerte) não podem ser descartados aleatoriamente no meio-ambiente sem um tratamento prévio. O encapsulamento destes resíduos em revestimentos asfálticos não possibilita a lixiviação e contaminação dos solos vicinais pelos constituintes nocivos ao meio-ambiente presentes nos resíduos. Este fato, foi comprovado com os resultados obtidos a partir do monitoramento do modelo reduzido, construído com uma camada de revestimento asfáltico que continha em sua composição 5% de resíduo oleoso 1 e 5% de resíduo oleoso 2.

Portanto, a utilização de resíduos oleosos (especificamente o cascalho de perfuração), em revestimentos asfálticos representa uma alternativa para a redução do grave problema ambiental causado pela disposição inadequada no meio-ambiente. Ainda existem obstáculos ao emprego dessa tecnologia, como por exemplo, a grande variedade de resíduos oleosos existentes (tipos e composições). Mas à medida que trabalhos de pesquisa apresentarem resultados sobre a viabilidade técnica e a indústria petrolífera se conscientizar do elevado custo ambiental da disposição inadequada de resíduos oleosos, certamente o uso destes resíduos em revestimentos asfálticos se disseminará.

6.2 Sugestões para Futuras Pesquisas

A pesquisa realizada utilizando o resíduo oleoso (cascalho de perfuração) gerado nas atividades de Exploração de Petróleo deve ser vista como um estudo inicial para outras pesquisas que envolvam o aperfeiçoamento das atividades propostas.

Com isso, sugere-se:

- em razão do ineditismo da proposta apresentada, a realização de novas pesquisas utilizando o cascalho de perfuração em revestimentos asfálticos, com novos teores de composição da mistura asfáltica;
- realização de ensaios de Módulo de Resiliência, e da metodologia SUPERPAVE, com o intuito de ampliar o conhecimento sobre o comportamento do cascalho de perfuração em misturas asfálticas;
- monitoramento prolongado de um trecho experimental de revestimento asfáltico com cascalho de perfuração, com o intuito de observar o comportamento da mistura asfáltica envelhecida pelo tempo e carregamento;
- o estudo do aproveitamento dos cascalhos de perfuração em outros ramos da construção civil;
- uma análise econômica da proposta de utilização do cascalho de perfuração e revestimentos asfálticos;
- utilização de resíduo oleosos de diferentes origens e composições em revestimentos asfálticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINI, R. M. **Solidificação/Estabilização de resíduos sólidos oleosos de atividades de exploração e produção de óleo e gás em matrizes de cimento**, 2002 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

AMARAL, S. C. **Estudo de misturas asfálticas densas com agregados do estado do pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**, 2000. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos.

AMORIM, C. L., **Estudo do efeito das interações água-argila no inchamento de argilominerais através da difração de raios-X**, 2007. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

AMORIM, L. V., PEREIRA, A.S.G., NEVES, G.A., FERREIRA, H.C. Reciclagem de rejeitos da construção civil para uso em argamassas de baixo custo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, n. 2, vol.3, p. 222-228, 1999.

ARIDE, S. **Uso do resíduo oleoso das atividades de extração de petróleo em manutenção de estradas: um enfoque econômico e ambiental**, 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Lixiviação de resíduos: procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006: Solubilização de resíduos: procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo: análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **P-MB- 517: Determinação da viscosidade Saybolt-Furoil de materiais betuminosos a alta temperatura.** Rio de Janeiro, 1971.

BODI, J., BRITO F., ALMEIDA, S. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29, 1995, Cuiabá. **Anais da 29ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv.** Cuiabá , 1995, vol 3.

BRAILE, P. M. & CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais.** São Paulo: CETESB, 1993.

BUZATTI, D. J. **A cal usada como filer no CBUQ: enfoque mecanístico e de custo.** Belo Horizonte, 2000.

CAVALCANTE, J.R. & CHERIA, F.M. Ensaio de avaliação para controle ambiental de materiais com resíduos incorporados. In: RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COM MATÉRIAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. **Anais Reciclagem e Reutilização de Resíduos com Materiais de Construção Civil.** São Paulo, 1996, p. 31-37.

CARNEIRO, A.P., BURGOS, P.C., ALBERTE, E.P.V. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. In: RECICLAGEM DE ENTULHO PARA PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO – PROJETO ENTULHO BOM, 2001, Salvador. **Editora da Universidade Federal da Bahia - EDUFBA.** Salvador, 2001, p. 188-227.

CORDEIRO, J. F. S. **Estabilização química e Solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários,** 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT – ES 31/2004: Pavimentação: Concreto Betuminoso.** Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT – EM 367/97: Especificação de Material: material de enchimento para misturas betuminosas.** Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT – ME 003/99: Material betuminoso: determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT – ME 043/99: Misturas betuminosas a quente: ensaio marshall.** Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT – ME 053/94: Método de Ensaio: misturas betuminosas: percentagem de betume.** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT – ME 081/95: Agregado graúdo: determinação de densidade real.** Rio de Janeiro, 1995

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT – ME 084/95: Agregado miúdo – determinação de densidade real.** Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT – ME 138/94: Misturas asfálticas: determinação da resistência a tração pro compressão diametral.** Rio de Janeiro, 1994.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Profile of the oil and gas extraction industry**, Notebook Project Oil and Gas Extraction, Sector Notebook Project, 2000.

ENERGY AND UTILITIES BOARD. **Use of produced sand in road construction-executive summary.** Alberta, 1999.

FAÉ, M.I., BRAGA, F.S., BICALHO, K.V., SILVA, M.G. **Viabilidade técnica, ambiental e econômica da aplicação da areia oleosa em estradas vicinais e artefatos de concreto.** Relatório de Projeto cooperativo do Plano Nacional de Ciência e Tecnologia do Setor de Petróleo e Gás Natural – CTPETRO, Vitória, 2002.

FERNANDES, M. W. Q. **Utilização de resíduos sólidos no estudo da susceptibilidade do concreto asfáltico à presença d'água**, 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FERRAZ, R. L. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais**, 1994. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

FONSECA, M. H. G. P. **Estudo do resíduo oleoso das atividades de exploração e produção de petróleo na manutenção de estradas de terra: enfoque ambiental**, 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

GARCIA, R. L. P., VAQUEIRO, R. L. C. **Viabilidade da aplicação das tecnologias landtreatment, dilution burial e roadspreading para disposição/remediação de cascalho de perfuração na UN-BA**, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, Rio de Janeiro, 2001.

GONÇALVES, J. V., MAZONI, S. A., SCHMIDT, L. A. Solo estabilizado com cinza volante e cal, uma experiência no Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 21, 1986, Florianópolis. **Anais da 21ª Reunião Anual de Pavimentação ABPv**, Florianópolis, 1986, vol 1.

GUIMARÃES, R.C., RIBEIRO, H.C., CASTRO, C.H., REZENDE, L.R. Estudo da aplicação de resíduos sólidos da construção civil em revestimento asfáltico. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17, 2004, Rio de Janeiro. **17º Encontro de Asfalto**, IBP, Rio de Janeiro, 2004.

HEMPEL, C. G. **Filosofia da ciência natural**.: Zahar, Rio de Janeiro, 1981

JUVONEN, R., MARTIKAINEN, E.,SCHULTZ,E., JOUTTI,A., AHTIAINEN,J.& LEHTOKARI, M. A battery of toxicity tests as indicators or decontamination in composting oily waste. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Finlândia, n. 47, p 156-166. 2000.

LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS. **Métodos para análise química**. Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, 2000.

LEITE, L.F.M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**, 1999. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LEITE, F.C., BERNUCCI, L.L.B., MOTTA, R.S., MOURA, E., ABDU, M.R. Comparação de valores de índice de suporte Califórnia de agregados reciclados de resíduo sólido da construção civil. In: 13ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2006, Maceió. **Anais da 13ª Reunião de Pavimentação Urbana**, ABPv, Maceió, 2006.

LEMOS, F. A. C. **Tratamento e destinação final de resíduos de fluidos de perfuração de poços de petróleo**, 1997. Monografia (Especialização) - Universidade Católica de Salvador, Salvador.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concreto**, 1997. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LIMA, F.C.A.A **Resíduo proveniente do corte de rochas ornamentais:uma alternativa de utilização**, 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MAIA, M.F., SILVA, R. **Alternativa para destinação final dos resíduos**. Palestra proferida no Workshop: Atividades de Perfuração e Produção de Petróleo, patrocinado pela Aurizônia Petróleo S.A. & Ambipetro, Natal, 2006.

MAIRS, H., SMITH, J., MELTON, R., PASMORE, J., MARUCA, S. **Efeitos Ambientais dos Cascalhos Associados a Fluidos Não-aquosos: Fundamentos Técnicos- Minuta**. Compilado pelo Instituto Brasileiro de Petróleo - IBP, 2000.

MATOS, R.M.D. **Indústria do Petróleo**. Palestra proferida no Workshop: Atividades de Perfuração e Produção de Petróleo, patrocinado pela Aurizônia Petróleo S.A. & Ambipetro, Natal, 2006.

MARTINS, G. B. H. **Práticas limpas aplicadas às indústrias têxteis de Santa Catarina**, 1997. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. LTC Editora S.A. Rio de Janeiro, 2003.

MOTTA, J. F. e FREIRE Potencialidades para o aproveitamento econômico do resíduo de granito. **Rochas de Qualidade, Granitos Mármore e Pedras Ornamentais**. EMC Editores Associados Ltda, São Paulo,edição 123, p. 98-108, 1995.

MOTTA, L. M. G., LEITE, L. F. M. Efeito do filler nas características mecânicas das misturas asfálticas. In: CONGRESSO PAN-AMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE, 11, 2000, Gramado. **Anais do 11º Congresso Pan-americano de Engenharia de Trânsito e Transporte**, Gramado, 2000. p 1007-1017.

MOTTA, R.S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas asfálticas de alto Desempenho SMA**, 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NEDER, L. T.C. **Tratamento de resíduos industriais perigosos: tecnologia de encapsulamento por complexos argilominerais -CAMs**, 1998. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

NEVES, G. A. **Reciclagem de resíduos da serragem de granitos para uso como matéria prima cerâmica**, 2002. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**, 2000. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos.

OLIVEIRA, D. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de blocos de concreto produzidos com a utilização de entulho da construção civil**, 2004. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

OLIVEIRA, J. C. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis**, 2007. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília.

PETROBRÁS. **Princípios do projeto e análise Superpave de misturas asfálticas**. Petrobrás Distribuidora S. A.: Rio de Janeiro, 1996.

PONTES, I.F. **Aproveitamento de finos gerados nas serragens de mármore e granitos**, 2000. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PUZINAUSKAS, V. P. **Filler in asphalt mixtures**. Asphalt Institute, 1983.

REYES-PÉREZ, Y. A. **Caracterização da Geometria. de Depósitos Sedimentares na Borda Sudoeste da. Bacia Potiguar**, 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

REZENDE, L.R. **Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis**, 2003. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília.

RIZZO, A. C. L., & SANTOS, R. ET AL. Bioremediation of crude oil contaminated soil, In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 4, 2002, Rio de Janeiro. **Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics**, Rio de Janeiro, 2002.

ROBERTS, F.L., KANDHAL, P.S., BROWN, E.R., LEE, D-Y, KENNEDY, T.W. **Hot Mix asphalt materials: mixture design and construction**. NAPA Educational Foudation, Maryland, 1998.

SANTANA, H. Considerações sobre os nebulosos conceitos e definição de filler em misturas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29, 1995, Cuiabá. **Anais da 29ª Reunião Anual de Pavimentação**, Cuiabá, 1995. vol.1.

SHASHIDHAR, N., SHENOY, A. On using micromechanical models to describe dynamic mechanical behavior of asphalt mastics. **Mechanics of Materials, Elsevier Science LTD**. Estados Unidos, p. 657-669. 2002.

SILVA, S. A. C. **Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito: estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassa de assentamento e de tijolos de solo-cimento**, 1998. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Espírito Santo, Vitória.

SOUZA, J.N., **Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados à quente**, 2001. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

SOUZA, P. J. B, LIMA, V. L. **Avaliação das técnicas de disposição de rejeitos da perfuração terrestre de poços de petróleo**, 2002. Monografia (Especialização) – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

THIENSEN, M.P. Metodologia de minimização aplicada no gerenciamento de resíduos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. **Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, João Pessoa, 2001.

THOMAS, J.E. **Fundamentos da Engenharia do Petróleo**. Editora Interciência: Rio de Janeiro, 2001.

TRICHÊS, G., KRYCKYJ, P.R. Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 1999, São José dos Campos. **Anais do Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental**, São José dos Campos, 1999.

TRISTÃO, M.L.B Caracterização química de resíduos de E & P para destinação em cimenteiras. In: SEMINÁRIO SOBRE PROTEÇÃO AMBIENTAL NA EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO, 2001, Rio de Janeiro. **Anais do Seminário Sobre Proteção Ambiental na Exploração e Produção de Petróleo**, Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro, 2001.

WATERLOO HYDROGEOLOGIC INC. **Projeto água subterrânea no Nordeste do Brasil: modelamento matemático da área de recarga do aquífero Açú – relatório final**, Natal, 2004.

WESSELING, D. H., SPECHT, L. P., CERATTI, J. A. P. Estudo laboratorial do comportamento de misturas em concreto asfáltico com diferentes tipos de fílers. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 34, 2003, Campinas. **Anais da 34ª Reunião Anual de Pavimentação**, Campinas, 2003, p 307-321.

WILES, C.C. Review of solidification/stabilization technology. **Journal of Hazardous Materials**. Estados Unidos, vol.14, 1987.

ZANZOTTO, L., e KENNEPOHL, G.J. Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization or scrap tires in asphalt. **Transportation Research Record**. Estados Unidos, 1530, p 51-58, 1996.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregados, na confecção do concreto**, 1997. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

ANEXO A

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA

GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO							REGISTRO			
NBR - 7181/84 ATECEL							Nº			
INTERESSADO:	Adriano Lucena		RODOVIA:				TRECHO:			
POÇO:	4 - SES - 149A		LADO:				ESTACA:			
PROFUNDIDADE:	3068 m		OPERAÇÃO:				CÁLCULO:			
ENCARREGADO:			VISTO:				DATA:			
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE HIGROSCÓPICA							RESUMO DA GRANULOMETRIA (%)			
Cap.	Pbh	Pbs	Tara	Pss	Pa	h (%)	Pedregulho (> 4,8):			
17	50,77	48,59	20,99	27,60	2,18	7,90	Areia Grossa (4,8 a 0,84):			
3	49,51	47,58	21,98	25,60	1,93	7,54	Areia Média (0,84 a 0,25):			
DADOS						h _{média} :	7,72			
Ms - Massa Total da Amostra Seca					500,00		Silte + Argila (< 0,05):			
Mt - Massa da Amostra Seca ao Ar					500,00		Total:			
Mg - Massa do Material Seco, retida na 2,0					0,00		Retido entre 2,0 e 0,074:			
Mh - Massa Úmida do Material p/ Peneiramento Fino ou Sedimentação					70,00		Argila (< 0,005):			
N = % do Mat. que passa na de 2,00 m					100		100,00		h _{hig.} do mat. passa 2,00 mm : 7,72	
							Mas. Esp. dos Grãos do Solo(): 2,603			
GRANULOMETRIA										
PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL						PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL				
malha (mm)	Material Retido		% passa da amostra total (Qg)		malha (mm)	Material Retido		% passando da amostra total (Qf)		
	Massa(g)	Mi (g)				Massa(g)	Mi (g)			
50,0	0,00	0,00	100,00		1,2	0,11	0,11	99,8		
38,0	0,00	0,00	100,00		0,6	0,11	0,22	99,7		
25,4	0,00	0,00	100,00		0,42	0,14	0,36	99,4		
19,1	0,00	0,00	100,00		0,3	0,04	0,40	99,4		
9,5	0,00	0,00	100,00		0,15	0,23	0,63	99,0		
4,8	0,00	0,00	100,00		0,074	0,75	1,38	97,9		
2,0	0,00	0,00	100,00							
Lavar na #2,0 mm			Sedimentação: g			Lavar na 0,074 mm				
Cáp. nº:	Proveta nº:		Cáp. nº:		Densímetro nº:			Cáp. nº:		
SEDIMENTAÇÃO										
Data	Hora		Tempo	L	Temperat.	Ld	a	Diâmetro	Amostra	
	Observada		Decorrido		°C			(mm)	Total (Qs)	
#####	08:52:30		0,5	1,044	29	1,0025	9,00	0,054	91,19	
#####	08:53		1,0	1,043	29	1,0025	9,20	0,038	88,99	
#####	08:54		2,0	1,042	29	1,0025	9,40	0,027	86,79	
#####	08:56		4,0	1,036	29	1,0025	9,80	0,020	73,61	
#####	09:00		8,0	1,035	29	1,0025	10,00	0,014	71,41	
#####	09:07		15,0	1,033	29	1,0025	10,40	0,011	67,02	
#####	09:22		30,0	1,032	29	1,0025	10,60	0,008	63,72	
#####	09:52		60,0	1,030	29	1,0025	11,00	0,005	60,42	
#####	10:52		120,0	1,027	29	1,0025	11,60	0,004	53,83	
#####	12:52		240,0	1,024	30	1,002	12,20	0,003	48,34	
#####	16:52		480,0	1,023	29	1,0025	12,60	0,002	43,95	
#####	08:52:30		1440,0	1,020	29	1,0025	13,00	0,001	38,45	

Tabela 27 – Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação – filler resíduo oleoso 1



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA
 CILAS 1064 Líquido



Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : Cal	Ultrassom : 60 s
Type produit : Argilla	Concentração : 132
Client : UFCG	Diâmetro a 10% : 0.86 mu
Comentários : Macel	Diâmetro a 50% : 9.42 mu
Líquido : Água	Diâmetro a 90% : 53.78 mu
Agente dispersante : Nenhum	Diâmetro médio : 19.23 mu
Operador : Heber	Fraunhofer
Empresa : UFCG	Densidade/Fator : -----
Localização : Campina Grande - PB	Superfície específica : -----
Data : 16/05/2006 Hora : 09:44:20	Diluição automática : Não / Não
Índice med. : 545	Medida/Limp. : 60/60/3
	SOP : Argilla

valores cumulados característicos em volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.04	0.42	0.87	2.35	3.71	4.86	5.87	6.93	8.07	9.30
q3	0.01	0.05	0.09	0.16	0.25	0.30	0.34	0.43	0.55	0.69
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	10.53	11.71	12.82	13.88	14.88	15.84	17.65	19.34	20.91	22.38
q3	0.78	0.84	0.87	0.91	0.93	0.97	1.01	1.07	1.11	1.15
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	23.77	25.08	26.32	27.50	28.63	29.71	30.74	31.73	32.69	34.05
q3	1.19	1.22	1.25	1.28	1.31	1.33	1.35	1.37	1.40	1.41
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	35.35	36.98	38.14	39.25	40.66	42.31	43.86	45.30	46.64	47.90
q3	1.44	1.46	1.49	1.51	1.53	1.54	1.56	1.56	1.55	1.55
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	49.07	51.21	53.13	54.86	56.43	57.87	59.19	60.42	61.59	62.71
q3	1.53	1.52	1.51	1.49	1.47	1.45	1.43	1.42	1.44	1.46
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	63.79	64.85	65.90	66.95	67.99	70.10	73.09	74.90	76.53	78.03
q3	1.49	1.54	1.61	1.69	1.75	1.89	1.97	1.96	1.89	1.85
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	79.43	80.74	82.01	83.83	85.02	87.95	89.59	91.13	92.98	94.20
q3	1.83	1.81	1.85	1.88	1.96	2.08	2.10	2.09	2.00	1.87
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	95.28	96.75	97.65	98.49	99.09	99.49	99.73	99.88	100.00	100.00
q3	1.74	1.50	1.23	0.97	0.74	0.52	0.33	0.22	0.08	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Figura 72 – Análise granulométrica por difração de laser – filler cal



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes



Ref da amostra	: Cimento_adriano	Ultrassom	: 60	s
Type product	: Argila	Concentração	: 138	
Client	: UFOP	Diâmetro a 10%	: 0.88	mu
Comentários	: Calibrado	Diâmetro a 50%	: 9.09	mu
Líquido	: Água	Diâmetro a 90%	: 36.76	mu
Agente dispersante	: Nenhum	Diâmetro médio	: 14.39	mu
Operator	: Romualdo	Fraunhofer		
Empresa	: UFOP	Densidade/Fator	-----	
Localização	: Campina Grande - PB	Superfície específica	-----	
Data : 28/03/2007	Hora : 08:11:29	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 952	Medida/Limp.	: 60/60/3	
		SOP	: Argila	

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.06	0.40	0.78	2.11	3.43	4.41	5.22	6.19	7.37	8.81
q3	0.02	0.05	0.08	0.14	0.24	0.26	0.27	0.40	0.57	0.81
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	10.27	11.66	12.95	14.14	15.25	16.28	18.17	19.85	21.37	22.74
q3	0.93	0.99	1.01	1.02	1.04	1.04	1.06	1.07	1.08	1.08
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	24.00	25.19	26.32	27.41	28.47	29.49	30.49	31.47	32.42	33.82
q3	1.09	1.11	1.14	1.18	1.23	1.26	1.31	1.35	1.39	1.45
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	35.16	36.86	38.08	39.25	40.73	42.47	44.09	45.62	47.06	48.44
q3	1.49	1.53	1.57	1.59	1.61	1.63	1.64	1.66	1.67	1.71
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	49.77	52.29	54.69	56.99	59.23	61.40	63.52	65.57	67.56	69.46
q3	1.74	1.79	1.89	1.98	2.10	2.19	2.30	2.38	2.46	2.49
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	71.28	73.01	74.63	76.14	77.54	80.01	83.14	84.95	86.61	88.12
q3	2.52	2.53	2.49	2.43	2.36	2.22	2.07	1.97	1.93	1.87
x	35.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	89.51	90.78	91.95	93.50	94.40	96.28	97.16	97.87	98.58	98.99
q3	1.82	1.76	1.71	1.61	1.48	1.34	1.13	0.97	0.77	0.63
x	65.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	99.29	99.64	99.80	99.91	99.97	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.48	0.36	0.22	0.13	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Figura 74 – Análise granulométrica por difração de laser – filler cimento



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1084 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes



Ref da amostra	: Calcarão_adiirano	Ultrassom	: 60	s
Type produit	: Argila	Concentração	: 159	
Client	: UFGG	Diâmetro a 10%	: 2.38	mu
Comentários	: Calibrado	Diâmetro a 50%	: 27.95	mu
Líquido	: Água	Diâmetro a 90%	: 66.13	mu
Agente dispersante	: Nenhum	Diâmetro médio	: 31.39	mu
Operador	: Romualdo	Fraunhofer		
Empresa	: UFGG	Densidade/Fator	_____	
Localização	: Campina Grande - PB	Superfície específica	_____	
Data : 28/03/2007	Hora : 09:06:39	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 653	Medida/Limp.	: 60/60/3	
		SOP : Argila		

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.03	0.11	0.17	0.40	0.69	0.95	1.21	1.52	1.90	2.35
q3	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.06	0.08	0.11	0.17	0.23
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	2.83	3.33	3.83	4.34	4.84	5.35	6.35	7.33	8.29	9.21
q3	0.27	0.32	0.35	0.40	0.42	0.46	0.50	0.55	0.61	0.65
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	10.10	10.95	11.75	12.52	13.24	13.92	14.57	15.18	15.76	16.57
q3	0.69	0.72	0.73	0.75	0.75	0.76	0.77	0.76	0.76	0.75
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	17.32	18.26	18.91	19.54	20.33	21.28	22.17	23.03	23.84	24.62
q3	0.75	0.76	0.75	0.77	0.77	0.80	0.81	0.84	0.85	0.87
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	25.37	26.79	28.11	29.37	30.58	31.77	32.95	34.15	35.37	36.62
q3	0.88	0.91	0.93	0.98	1.02	1.08	1.15	1.25	1.35	1.47
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	37.89	39.20	40.53	41.87	43.23	45.97	50.06	52.71	55.28	57.78
q3	1.58	1.72	1.84	1.94	2.05	2.22	2.43	2.59	2.68	2.78
x	35.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	60.22	62.58	64.90	68.32	70.57	76.11	79.23	82.12	85.58	87.88
q3	2.88	2.94	3.05	3.19	3.34	3.54	3.61	3.54	3.38	3.18
x	65.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	89.92	92.78	94.61	95.42	97.75	98.69	99.28	99.66	100.00	100.00
q3	2.96	2.64	2.25	1.89	1.48	1.11	0.74	0.50	0.20	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	260.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Figura 76 – Análise granulométrica por difração de laser – filler pó calcário



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes



Ref da amostra	: Resíduo_oleoso	Ultrassom	: 60	s
Type produit	: Argila	Concentração	: 153	
Client	: UFOG	Diâmetro a 10%	: 0.95	mu
Comentários	: Calibrado	Diâmetro a 50%	: 4.39	mu
Líquido	: Água	Diâmetro a 90%	: 16.58	mu
Agente dispersante	: Nenhum	Diâmetro médio	: 6.83	mu
Operador	: Romualdo	Fraunhofer		
Empresa	: UFOG	Densidade/Fator	-----	
Localização	: Campina Grande - PB	Superfície específica	-----	
Data	: 28/03/2007	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 654	Medida/Limp.	: 60/60/3	
		SOP	: Argila	

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.10	0.33	0.51	1.23	2.15	2.96	3.73	4.72	5.97	7.51
q3	0.03	0.03	0.04	0.08	0.18	0.22	0.27	0.42	0.63	0.89
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	9.15	10.81	12.44	14.04	15.60	17.11	20.02	22.77	25.37	27.82
q3	1.08	1.22	1.33	1.43	1.51	1.58	1.69	1.81	1.91	1.99
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	30.17	32.43	34.62	36.75	38.84	40.87	42.84	44.75	46.59	49.25
q3	2.10	2.19	2.29	2.40	2.51	2.60	2.67	2.74	2.78	2.85
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	51.76	54.88	57.06	59.10	61.53	64.50	67.09	69.42	71.55	73.48
q3	2.89	2.90	2.90	2.87	2.85	2.78	2.71	2.62	2.56	2.47
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	75.25	78.35	80.97	83.19	85.07	86.69	88.10	89.35	90.45	91.45
q3	2.40	2.28	2.13	1.98	1.82	1.70	1.59	1.50	1.41	1.36
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	92.35	93.17	93.92	94.60	95.24	95.37	97.72	98.40	98.92	99.32
q3	1.29	1.24	1.19	1.13	1.12	1.05	0.92	0.76	0.63	0.51
x	35.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	99.60	99.77	99.88	99.97	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.38	0.24	0.17	0.10	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	65.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Figura 78 – Análise granulométrica por difração de laser – filler resíduo oleoso 1

ANEXO B

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Porcentagem	Viscosidade Saybolt-Furoi											
	Cal			Cimento			Resíduo Oleoso 1					
	Tempo (s)	Média (s)		Tempo (s)	Média (s)		Tempo (s)	Média (s)		Tempo (s)	Média (s)	
2,5	244	299	271,5	272	272	272,0	297	302	299,5			
5,0	349	360	354,5	304	306	305,0	371	366	368,5			
7,5	465	472	468,5	326	326	326,0	409	402	405,5			
10,0	540	540	540,0	366	366	366,0	480	476	478			
15,0	542	562	552,0	403	403	403,0	508	508	508			
20,0	602	631	616,5	474	474	474,0	545	545	545			
30,0	1114	1161	1137,5	620	636	628,0	665	792	728,5			
40,0	x	x	x	866	886	876,0	x	x	x			

Tabela 28 – Resultados do Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furoi

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																			
ATECEL Filler (cimento)																			
COMPACTAÇÃO MANUAL																			
CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA	
	a	b		d	e		f	g	h	i	j	k	l	m		n	o		p
1	4	1172,3	683,6	488,7	2,40	2,49	9,41	86,85	3,74	13,15	71,54	3,74	160	316,96	1,04	329,64	4,76		
2	2%	1186,7	694,3	492,4	2,41	2,49	9,45	87,26	3,29	12,74	74,17	3,29	150	297,15	1,04	309,04	7,9		
3	filler	1181,5	690,2	491,3	2,40	2,49	9,43	87,07	3,50	12,93	72,93	3,50	120	237,72	1,03	244,85	7,9		
M	4,00				2,40	2,49					72,88	3,51				294,51	6,85		
4	4	1189	699,4	489,6	2,43	2,50	9,52	87,80	2,68	12,20	78,04	2,68	180	356,58	1,04	370,84	4,68		
5	3%	1196	699,3	496,7	2,41	2,50	9,44	87,05	3,51	12,95	72,92	3,51	190	376,39	1,01	380,15	3,17		
6	filler	1176,4	685,1	491,3	2,39	2,50	9,39	86,57	4,04	13,43	69,90	4,04	210	416,01	1,01	420,17	3,96		
M	4,00				2,41	2,50					73,62	3,41				390,39	3,94		
7	4	1172,1	691,2	480,9	2,44	2,50	9,56	87,98	2,46	12,02	79,55	2,46	210	416,01	1,07	445,13	4,76		
8	4%	1180,5	697,1	483,4	2,44	2,50	9,58	88,16	2,27	11,84	80,87	2,27	185	366,49	1,07	392,14	4,76		
9	filler	1180,4	697,5	482,9	2,44	2,50	9,59	88,24	2,17	11,76	81,52	2,17	170	336,77	1,04	350,24	3,96		
M	4,00				2,44	2,50					80,64	2,30				395,84	4,49		
10	4	1173,5	694,2	479,3	2,45	2,50	9,60	88,26	2,14	11,74	81,79	2,14	200	396,20	1,05	416,01	3,96		
11	5%	1160,1	686,2	473,9	2,45	2,50	9,60	88,25	2,15	11,75	81,68	2,15	170	336,77	1,1	370,45	4,76		
12	filler	1184,8	699,1	485,7	2,44	2,50	9,57	87,94	2,50	12,06	79,30	2,50	180	356,58	1,03	367,28	3,96		
M	4,00				2,45	2,50					80,92	2,26				384,58	4,23		

Tabela 29- Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Manual - filler cimento

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																			
ATECEL Filler (pó calcário)																			
COMPACTAÇÃO MANUAL																			
CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECÍFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA	
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEOR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORREÇÃO		TOTAL
	POK	POK	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	
	PESO DE DE MIST.	PESO DE MIST.	g	g	cm ³	d/f	-	-	-	100+J	100-J	1/1*100	-	-	Kg	USAR TABELA	Kg	mm	
	AGREG																		
1	4	4	1182,6	687,7	494,9	2,39	2,49	9,37	86,65	3,98	13,35	70,18	3,98	240	475,44	1,01	480,19	5,5	
2	2%	4	1171,9	680,6	491,3	2,39	2,49	9,35	86,49	4,15	13,51	69,25	4,15	180	356,58	1,03	367,28	5,5	
3	filler	4	1189	697,4	491,6	2,42	2,49	9,48	87,70	2,81	12,30	77,12	2,81	210	416,01	1,04	432,65	4,76	
M	4,00					2,40	2,49					72,18	3,65				426,71	5,25	
310																			
4	4	4	1194,5	696,5	498,0	2,40	2,49	9,41	86,91	3,68	13,09	71,88	3,68	300	594,3	1	594,30	4,68	
5	3%	4	1194,7	701,4	493,3	2,42	2,49	9,50	87,76	2,75	12,24	77,57	2,75	355	703,3	1,04	731,39	4,68	
6	filler	4	1197,1	703,3	493,8	2,42	2,49	9,51	87,84	2,65	12,16	78,20	2,65	305	604,2	1,01	610,25	4,68	
M	4,00					2,41	2,49					75,88	3,03				645,31	4,68	
310																			
7	4	4	1183,7	694,8	488,9	2,42	2,49	9,49	87,67	2,84	12,33	76,99	2,84	210	416,01	1,02	424,33	4,76	
8	4%	4	1173	685,3	487,7	2,41	2,49	9,43	87,09	3,48	12,91	73,06	3,48	180	356,58	1,03	367,28	5,5	
9	filler	4	1189,3	698,8	490,5	2,42	2,49	9,51	87,80	2,70	12,20	77,91	2,70	180	356,58	1,05	374,41	5,5	
M	4,00					2,42	2,49					75,99	3,00				388,67	5,25	
310																			
10	4	4	1184,6	688,4	496,2	2,39	2,49	9,36	86,39	4,25	13,61	68,79	4,25	180	356,58	1,01	360,15	4,76	
11	5%	4	1179,3	695,8	483,5	2,44	2,49	9,57	88,31	2,13	11,69	81,81	2,13	210	416,01	1,05	436,81	7,14	
12	filler	4	1181,7	695	486,7	2,43	2,49	9,52	87,91	2,57	12,09	78,73	2,57	155	307,06	1,05	322,41	5,5	
M	4,00					2,42	2,49					76,44	2,98				373,12	5,80	

Tabela 30 – Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Manual - filler pó calcário

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																			
ATECEL Filler (resíduo oleoso 1)																			
COMPACTAÇÃO MANUAL																			
CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECÍFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA	
	a	b		d	e		g	h	i	j	k	l	m	n		o	p		q
	POK	POK	NO AR	NA ÁGUA	APAR.	TEOR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL							
	DE	DE	g	g	d/f	-	-	100+J	100-J	100-J	1/1*100	-	-	-	USAR TABELA	Kg	mm		
	AGREG	MIST.																	
1	4	6,26	1175	687	488,0	2,41	2,49	87,45	3,11	12,55	75,24	3,11	260	515,06	1,02	525,36	4,76		
2	4	6,23	1179,2	690	489,2	2,41	2,49	87,55	3,00	12,45	75,91	3,00	170	336,77	1,03	346,87	5,55		
3	4	6,20	1185,3	694	491,3	2,41	2,49	87,62	2,91	12,38	76,45	2,91	210	416,01	1,04	432,65	3,96		
M	4,00					2,41	2,49				75,87	3,01				434,96	4,76		
4	4	6,26	1187,2	696	491,2	2,42	2,48	87,79	2,73	12,21	77,64	2,73	160	316,96	1,02	323,30	3,96		
5	3	6,13	1177,7	694	483,7	2,43	2,48	88,44	2,01	11,56	82,60	2,01	240	475,44	1,05	499,21	3,96		
6	4	6,16	1184,3	696	488,3	2,43	2,48	88,10	2,39	11,90	79,91	2,39	240	475,44	1,05	499,21	3,96		
M	4,00					2,43	2,48				80,05	2,38				440,57	3,96		
7	4	6,20	1183	693,4	489,6	2,42	2,48	87,78	2,75	12,22	77,52	2,75	360	713,16	1,04	741,69	4,76		
8	4	6,18	1181	690,5	490,5	2,41	2,48	87,47	3,09	12,53	75,34	3,09	280	554,68	1,04	576,87	4,76		
9	4	6,06	1175	686,5	488,5	2,41	2,48	87,38	3,19	12,62	74,74	3,19	330	653,73	1,08	706,03	3,9		
M	4,00					2,41	2,48				75,87	3,01				674,86	4,47		
10	4	6,13	1173,3	684,8	488,5	2,40	2,48	87,27	3,31	12,73	73,99	3,31	240	475,44	1,05	499,21	4,76		
11	5	6,23	1189	694,9	494,1	2,41	2,48	87,43	3,13	12,57	75,10	3,13	240	475,44	1,03	489,70	4,76		
12	4	6,28	1189,1	689,6	499,5	2,38	2,48	86,50	4,17	13,50	69,14	4,17	160	316,96	1,02	323,30	4,76		
M	4,00					2,40	2,48				72,74	3,54				437,40	4,76		

Tabela 31 – Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Manual - filler resíduo oleoso 1

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																			
ATECEL Filler (cimento)																			
COMPACTAÇÃO AUTOMÁTICA																			
CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECÍFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA	
	a	b		d	e		f	g	h	i	j	k	l	m		n	o		p
	POK	POK	NO AR	NA ÁGUA	cm ³	APAR.	TEOR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORREÇÃO	CORREGIDA	s	
	DE	DE	g	g	cm ³	d/f	-	-	-	100+J	100-J	1/1*100	-	-	Kg	USAR TABELA	Kg	mm	
	AGREG	MIST.																	
1	4	4	1188,1	688	500,1	2,38	2,49	9,32	86,01	4,67	13,99	66,62	4,67	360	735,12	0,96	705,72	3,17	
2	2%	4	1184,5	692	492,5	2,41	2,49	9,43	87,08	3,49	12,92	72,99	3,49	340	694,28	0,96	666,51	3,96	
3	filler	4	1188	698	490,0	2,42	2,49	9,51	87,78	2,71	12,22	77,81	2,71	375	765,75	0,96	735,12	3,17	
M	4,00					2,40	2,49					72,47	3,62				702,45	3,43	
4	4	4	1184,6	693	491,6	2,41	2,50	9,45	87,12	3,43	12,88	73,34	3,43	375	765,75	0,96	735,12	3,175	
5	3%	4	1193,3	698,9	494,4	2,41	2,50	9,47	87,26	3,28	12,74	74,29	3,28	370	755,54	0,97	732,87	3,175	
6	filler	4	1185,1	692	493,1	2,40	2,50	9,42	86,89	3,69	13,11	71,88	3,69	455	929,11	0,98	910,53	3,175	
M	4,00					2,41	2,50					73,17	3,47				792,84	3,18	
7	4	4	1172,1	691,2	480,9	2,44	2,50	9,56	87,98	2,46	12,02	79,55	2,46	430	878,06	1	878,06	3,175	
8	4%	4	1189,6	695	494,6	2,41	2,50	9,43	86,83	3,74	13,17	71,59	3,74	450	918,90	0,98	900,52	3,175	
9	filler	4	1181,1	698	483,1	2,44	2,50	9,59	88,26	2,16	11,74	81,64	2,16	485	990,37	1,01	1000,27	3,175	
M	4,00					2,43	2,50					77,59	2,79				926,29	3,18	
10	4	4	1183	690	493,0	2,40	2,50	9,41	86,50	4,09	13,50	69,72	4,09	470	959,74	0,98	940,55	3,96	
11	5%	4	1186,5	700	486,5	2,44	2,50	9,56	87,92	2,52	12,08	79,16	2,52	495	1010,79	0,98	990,57	3,96	
12	filler	4	1191,4	710	481,4	2,47	2,50	9,71	89,22	1,08	10,78	90,00	1,08	500	1021,00	0,99	1010,79	3,175	
M	4,00					2,44	2,50					79,62	2,56				980,64	3,70	

Tabela 32 – Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Automática - filler cimento

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																			
ATECEL Filler (pó calcário)																			
COMPACTAÇÃO AUTOMÁTICA																			
CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECÍFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA	
	a	b		d	e		f	g	h	i	j	k	l	m		n	o		p
	POK	POK	NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEOR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORREÇÃO	CORREGIDA		
	PESO DE MIST.	PESO DE MIST.	g	g	cm ³	d/f	-	-	-	100+J	100-J	1/1*100	-	-	Kg	USAR TABELA	Kg	mm	
	AGREG																		
1	4	4	1170,2	687,7	482,5	2,43	2,49	9,51	87,94	2,55	12,06	78,88	2,55	370	755,54	0,98	740,43	4,76	
2	2%	4	1184,3	680,6	503,7	2,35	2,49	9,22	85,26	5,52	14,74	62,54	5,52	545	1112,89	1,01	1124,02	4,76	
3	filler	4	1171,6	686	485,6	2,41	2,49	9,46	87,49	3,05	12,51	75,61	3,05	545	1112,89	1,01	1124,02	3,96	
M	4,00					2,40	2,49					72,34	3,71				996,16	4,49	
310																			
4	4	4	1194,5	696,5	498,0	2,40	2,49	9,41	86,91	3,68	13,09	71,88	3,68	570	1163,9	1	1163,94	3,96	
5	3%	4	1194,7	701,4	493,3	2,42	2,49	9,50	87,76	2,75	12,24	77,57	2,75	550	1123,1	1,02	1145,56	3,175	
6	filler	4	1197,1	703,3	493,8	2,42	2,49	9,51	87,84	2,65	12,16	78,20	2,65	520	1061,8	1,03	1093,70	3,96	
M	4,00					2,41	2,49					75,88	3,03				1134,40	3,70	
315																			
7	4	4	1153,8	675	478,8	2,41	2,49	9,45	87,26	3,29	12,74	74,16	3,29	525	1072,05	1,1	1179,26	3,175	
8	4%	4	1165,9	684	481,9	2,42	2,49	9,49	87,60	2,91	12,40	76,54	2,91	550	1123,10	1,04	1168,02	3,175	
9	filler	4	1189,3	698,2	491,1	2,42	2,49	9,50	87,69	2,81	12,31	77,14	2,81	585	1194,57	1,02	1218,46	3,175	
M	4,00					2,42	2,49					75,94	3,01				1188,58	3,18	
320																			
10	4	4	1169,5	685	484,5	2,41	2,49	9,47	87,35	3,19	12,65	74,82	3,19	605	1235,41	1,06	1309,53	3,175	
11	5%	4	1155	683	472,0	2,45	2,49	9,60	88,55	1,85	11,45	83,81	1,85	505	1031,21	1,06	1093,08	3,175	
12	filler	4	1169,8	681	488,8	2,39	2,49	9,39	86,60	4,01	13,40	70,05	4,01	520	1061,84	1,04	1104,31	3,175	
M	4,00					2,42	2,49					76,22	3,02				1168,98	3,18	

Tabela 33 – Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Automática - filler pó calcário

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																			
ATECEL Filler (resíduo oleoso 1)																			
COMPACTAÇÃO AUTOMÁTICA																			
CORPO DE PROVA - %	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECÍFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA	
	a	b		d	e		f	g	h	i	j	k	l	m		n	o		p
	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm ³	df	-	-	-	100-t	100-j	1/L*100	-	-	Kg	USAR TABELA	Kg	mm	
1	4	6,30	1182,5	687	495,5	2,39	2,49	9,36	86,68	3,96	13,32	70,24	3,96	455	929,11	1,01	938,40	3,96	
2	2% de	4	6,30	1181,9	690	491,9	2,40	2,49	9,42	87,27	3,31	12,73	74,00	500	1021,00	1,01	1031,21	3,17	
3	filler	4	6,43	1187,5	694	493,5	2,41	2,49	9,44	87,40	3,17	12,60	74,87	495	1010,79	0,98	990,57	3,17	
M	4,00					2,40	2,49					73,04	3,48				986,73	3,43	
4		4	6,31	1184,3	696	488,3	2,43	2,48	9,51	88,10	2,39	11,90	79,91	665	1357,93	1,01	1371,51	2,38	
5	3% de	4	6,30	1180,9	694	486,9	2,43	2,48	9,51	88,10	2,39	11,90	79,91	635	1296,67	1,01	1309,64	2,38	
6	filler	4	6,30	1188,5	696,5	492,0	2,42	2,48	9,47	87,75	2,78	12,25	77,30	625	1276,25	1,01	1289,01	2,38	
M	4,00					2,42	2,48					79,04	2,52				1323,39	2,38	
7		4	6,30	1183	688,4	494,6	2,39	2,48	9,38	86,89	3,73	13,11	71,55	500	1021,00	1,01	1031,21	3,17	
8	4% de	4	6,26	1186	694,2	491,8	2,41	2,48	9,46	87,61	2,94	12,39	76,30	560	1143,52	1,02	1166,39	3,17	
9	filler	4	6,30	1190	701,3	488,7	2,44	2,48	9,55	88,46	1,99	11,54	82,74	665	1357,93	1,01	1371,51	3,17	
M	4,00					2,41	2,48					76,86	2,89				1189,70	3,17	
10		4	6,36	1180,4	683,4	497,0	2,38	2,48	9,31	86,30	4,39	13,70	67,96	585	1194,57	1	1194,57	3,17	
11	5% de	4	6,30	1181,1	685	496,1	2,38	2,48	9,34	86,50	4,16	13,50	69,18	725	1480,45	1,01	1495,25	3,17	
12	filler	4	6,30	1182,3	700,3	482,0	2,45	2,48	9,62	89,12	1,26	10,88	88,45	665	1357,93	1,01	1371,51	3,96	
M	4,00					2,40	2,48					75,20	3,27				1353,78	3,43	

Tabela 34 – Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Automática - filler resíduo oleoso 1

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																				
ATECEL (agrado miúdo -resíduo oleoso 2)																				
COMPACTAÇÃO AUTOMÁTICA																				
CORPO DE PROVA - %	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECÍFICO			VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.		ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		c	d		e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	
	POA	POB		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEOR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET.	VAZIOS	TOTAL			LIDA	CORREÇÃO	CORREGIDA
	AGREG	DE MIST.	cm	g	g	cm ³	d/f	-	-	-	100-i-j	100-i-j	100-j	1/L*100	-	-	Kg	USAR TABELA	Kg	mm
1	4		6,44	1193,6	690,1	503,5	2,37	2,49	9,30	85,83	4,87	14,17	65,60	4,87	515	1051,63	0,98	1030,60	3,17	
2	2%		6,39	1187,3	690,2	497,1	2,39	2,49	9,37	86,48	4,16	13,52	69,26	4,16	485	990,37	0,99	980,47	3,96	
3	ro2		6,39	1179,4	688,3	491,1	2,40	2,49	9,42	86,95	3,63	13,05	72,16	3,63	657	1341,59	0,99	1328,18	3,96	
M	4,00						2,39	2,49					69,01	4,22				1113,08	3,70	
4			6,25	1182,6	689,3	493,3	2,40	2,50	9,40	86,67	3,93	13,33	70,52	3,93	624	1274,21	1,03	1312,43	3,96	
5	3%		6,37	1187,8	690,4	497,4	2,39	2,50	9,36	86,33	4,30	13,67	68,52	4,30	565	1153,73	1	1153,73	3,96	
6	ro2		6,32	1184	695,2	488,8	2,42	2,50	9,50	87,57	2,93	12,43	76,42	2,93	621	1268,08	1,01	1280,76	3,96	
M	4,00						2,40	2,50					71,82	3,72				1248,98	3,96	
7			6,25	1176,8	689,2	487,6	2,41	2,50	9,46	87,12	3,41	12,88	73,50	3,41	931	1901,10	1,03	1958,14	3,96	
8	4%		6,24	1178,1	690,4	487,7	2,42	2,50	9,47	87,20	3,32	12,80	74,02	3,32	911	1860,26	1,02	1897,47	3,17	
9	ro2		6,23	1180,2	693	487,2	2,42	2,50	9,50	87,45	3,05	12,55	75,68	3,05	850	1735,70	1,03	1787,77	2,77	
M	4,00						2,42	2,50					74,40	3,26				1881,12	3,30	
10			6,21	1174,8	692,2	482,6	2,43	2,50	9,55	87,75	2,70	12,25	77,96	2,70	1070	2184,94	1,03	2250,49	3,96	
11	5%		6,24	1185,5	694,3	491,2	2,41	2,50	9,46	87,00	3,53	13,00	72,82	3,53	900	1837,80	1,03	1892,93	3,96	
12	ro2		6,29	1184,3	695,6	488,7	2,42	2,50	9,50	87,36	3,14	12,64	75,18	3,14	725	1480,45	1,01	1495,25	3,96	
M	4,00						2,42	2,50					75,32	3,12				1879,56	3,96	

Tabela 35 – Resultados do Ensaio Marshall – Compactação Automática – resíduo oleoso 2

Ensaio de resistência a Tração por Compressão Diametral - filler cimento						
% de filler	h (cm)	d (cm)	leitura kgf	leitura kgf corrigida	r.tração (kgf/cm2)	r.tração (Mpa)
2% de filler	6,51	10,2	390	796,38	7,635	0,749
	6,56	10,11	420	857,64	8,232	0,808
	6,56	10,13	395	806,59	7,727	0,758
média	6,54	10,15		820,20	7,865	0,772
3% de filler	6,5	10,16	425	867,85	8,366	0,821
	6,5	10,15	430	878,06	8,473	0,831
	6,43	10,13	435	888,27	8,682	0,852
média	6,48	10,15		878,06	8,506	0,835
4% de filler	6,6	10,13	420	857,64	8,166	0,801
	7	10,15	420	857,64	7,685	0,754
	7	10,15	350	714,7	6,404	0,628
média	6,87	10,14		809,99	7,403	0,727
5% de filler	6,9	10,15	400	816,8	7,425	0,729
	6,9	10,16	430	878,06	7,974	0,783
	6,83	10,16	420	857,64	7,868	0,772
média	6,88	10,16		850,83	7,755	0,761

Tabela 36 – Resultados do Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral – filler cimento

Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral - filler pó calcário						
% de filler	h (cm)	d (cm)	leitura kgf corrigida	kgf	r.tração (kgf/cm ²)	r.tração (Mpa)
2% de filler	1	6,4	10,13	475	969,95	9,524
	2	6,3	10,2	485	990,37	9,812
	3	6,4	10,15	470	959,74	9,406
média		6,37	10,16	973,35	9,580	0,940
3% de filler	4	6,25	10,16	495	1010,79	10,134
	5	6,33	10,15	445	908,69	9,004
	6	6,28	10,15	475	969,95	9,687
média		6,29	10,15	963,14	9,606	0,943
4% de filler	7	6,16	10,13	548	1119,016	11,416
	8	6,25	10,15	495	1010,79	10,144
	9	6,21	10,15	538	1098,596	11,096
média		6,21	10,14	1076,13	10,882	1,068
5% de filler	10	6,16	10,13	520	1061,84	10,833
	11	6,06	10,15	538	1098,596	11,370
	12	6,28	10,13	525	1072,05	10,728
média		6,17	10,14	1077,50	10,974	1,077

Tabela 37 – Resultados do Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral – filler pó calcário

Ensaio de resistência a Tração por Compressão Diametral - filler resíduo oleoso 1						
% de filler	h (cm)	d (cm)	leitura kgf	corrigida kgf	r. tração (kgf/cm ²)	r. tração (Mpa)
2% de filler	6,96	10,11	465	949,53	8,591	0,843
	6,9	10,16	465	949,53	8,623	0,846
	6,96	10,13	425	867,85	7,836	0,769
média	6,94	10,13		922,30	8,349	0,819
3% de filler	7,03	10,13	430	878,06	7,849	0,770
	6,93	10,13	480	980,16	8,889	0,872
	6,96	10,15	430	878,06	7,913	0,777
média	6,97	10,14		912,09	8,215	0,806
4% de filler	6,8	10,15	500	1021	9,417	0,924
	6,4	10,08	460	939,32	9,269	0,910
	6,4	10,15	440	898,48	8,805	0,864
média	6,53	10,13		952,93	9,169	0,900
5% de filler	6,3	10,1	490	1000,58	10,011	0,982
	6,26	10,13	470	959,74	9,635	0,946
	6,4	10,15	450	918,9	9,005	0,884
média	6,32	10,13		959,74	9,547	0,937

Tabela 38- Resultados do Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral – filler resíduo oleoso 1

Ensaio de resistência a Tração por Compressão Diametral - resíduo oleoso 2						
% de filler	h (cm)	d (cm)	leitura kgf	leitura kgf corrigida	r.tração (kgf/cm2)	r.tração (Mpa)
1	6,493	10,196	420	857,64	8,247	0,809
2	6,426	10,186	485	990,37	9,632	0,945
3	6,473	10,176	473	965,866	9,335	0,916
média	6,46	10,19		937,96	9,069	0,890
4	6,396	10,193	509	1039,378	10,149	0,996
5	6,4	10,153	505	1031,21	10,103	0,991
6	6,466	10,193	400	816,8	7,890	0,774
média	6,42	10,18		962,46	9,375	0,920
7	6,33	10,17	480	980,16	9,693	0,951
8	6,28	10,2	450	918,9	9,132	0,896
9	6,283	10,166	450	918,9	9,159	0,899
média	6,30	10,18		939,32	9,329	0,915
10	6,306	10,193	530	1082,26	10,719	1,052
11	6,3	10,206	480	980,16	9,705	0,952
12	6,316	10,14	524	1070,008	10,636	1,044
média	6,31	10,18		1044,14	10,353	1,016

Tabela 39– Resultados do Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral – resíduo oleoso 2

Ensaio de Tração diametral Modificada de Lottman				
% de filler ou agregado miúdo	Rtc/Rts (%)			
	pó calcário	cimento	resíduo oleoso 1	resíduo oleoso 2
2	96,15	82,76	80,30	94,30
3	79,41	75,86	73,53	78,01
4	72,97	82,74	90,95	72,10
5	80,69	83,82	80,10	82,23

Tabela 40– Resultados do Ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman