

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MISTURAS
BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE LODOS DE ETA E DE
ETE**

JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTINEZ

ORIENTADOR: JOSE CAMAPUM DE CARVALHO, Ph.D
**CO-ORIENTADORA: LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIRÊDO
LOPES LUCENA, DSc**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G. DM – 243/2014

BRASÍLIA / DF: AGOSTO DE 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MISTURAS
BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE LODOS DE ETA E DE
ETE**

JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTINEZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

JOSE CAMAPUM DE CARVALHO, Ph.D (UnB)
(ORIENTADOR)

LÊDA CHRISTIANE DE F.L. LUCENA, D.Sc. (UFCG)
(CO-ORIENTADORA)

LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI, D.Sc. (UFRGS)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 5 de agosto de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

MARTINEZ, JUAN GABRIEL B.

Avaliação de desempenho de misturas betuminosas com adição de lodos de ETA e de ETE [Distrito Federal] 2014

Xiv, 97 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotécnica, 2014)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil

1. Lodos de ETA e ETE

2. Misturas Betuminosas

3. Propriedades Mecânicas

4. Pavimentos flexíveis

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARTINEZ, J.G. (2014). Avaliação de desempenho de Misturas Betuminosas com adição de lodos de ETA e de ETE. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-243/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Juan Gabriel Bastidas Martinez

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação de desempenho de Misturas Betuminosas com adição de Lodos de ETA e de ETE

GRAU / ANO: Mestre / 2014.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Juan Gabriel Bastidas Martínez

jbastidasmartinez@gmail.com

San Juan de Pasto/Nariño – Colombia.

DEDICATÓRIA

A meus pais Gloria e Oliver, minha irmãs Sara e Nasly, pelo amor, compressão e apoio em todos os momento da minha vida
A minha amada Thaís e a minha sogra Helena que me deram apoio quando mais precisava.

AGRADECIMENTOS

- À Deus, pelo dom da vida e sabedoria para realizar este trabalho.
- Ao professor Márcio Muniz de Farias, e a sua esposa, a professora Yaeko, pela ajuda nos momentos difíceis desta dissertação e pelo apoio, incentivo, orientação em todo o mestrado.
- Ao meu orientador, professor José Camapum, pelos dois anos de convivência.
- A minha co-orientadora, professora Lêda Christiane de F.L. Lucena, pela motivação, ajuda e disposição absoluta em todo momento.
- Aos professores do curso de engenharia civil, especialmente da área de Geotecnia: Hérnan Eduardo Martínez Carvajal, Gregório Luís Silva Araújo, Luís Fernando e Renato Pinto da Cunha.
- À Universidade de Brasília, ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e ao CNPq e pelo apoio financeiro e material.
- Ao laboratório de Infralab por ter sido cenário da realização deste trabalho. Ao técnico, o senhor Gilson agradeço pela grande ajuda.
- Ao laboratório de Química da Universidade de Brasília pela realização dos ensaios, em especial ao Anderson Mendonça.
- À CAESB, pelo fornecimento das amostras dos resíduos lodos e pela informação estatística sobre sua disposição no Distrito Federal.
- À CENTRO OESTE ASFALTOS, pelo fornecimento das amostras do cimento asfáltico.
- A meus colegas que ajudaram com os materiais e explicação dos ensaios, Ferney Quiñones, Alejandra Gomez, Claudia Gomez e Marcus Vinicius.
- A todos os colegas de mestrado pela amizade e conversas esclarecedoras durante esta pesquisa e em especial a Ivone, Jaime, Julian, Robinson, David, Tatiana, Anita, Maria Paz, Carolina Ruiz, Estefânia, Carolina Lopez, Rosa, Walter, Wilber, Eduardo e Marcelo.
- À todas as pessoas que foram necessárias a realização desta etapa na minha vida.

AValiação de desempenho de misturas betuminosas com adição de lodos de ETA e de ETE

RESUMO

As Estações de Tratamento de Água (ETA) e de Esgoto (ETE) geram como subprodutos de sua operação uma grande quantidade de lodo, que é considerado resíduo sólido pela ABNT 10.004/2004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas). A disposição final dos resíduos, sem um adequado gerenciamento, pode resultar em danos aos seres humanos e ao meio ambiente constituindo-se em passivo ambiental a evitar. Este trabalho teve como finalidade verificar a possibilidade de utilização dos referidos resíduos em concreto betuminoso usinado a quente proporcionando a sua melhoria de comportamento, sem levar em conta nessa fase inicial os custos diretos do tratamento e nem do passivo ambiental. Para possibilitar a incorporação dos resíduos lodos de ETA e de ETE no Concreto Asfáltico utilizou-se um moinho mecânico a fim de tornar o material passante pela peneira número 200. Os resíduos foram adicionados à misturas de duas formas: i) via úmida; ii) via seca. Na primeira, se colocaram em várias temperaturas de secagem (200°C, 300°C, 500°C, 800°C e seco ao ar) ao ligante asfáltico, já no segundo caso, realizando secagem a 175 °C para logo ser adicionado ao agregado miúdo. A interação ligante-lodos foi avaliada por meio dos ensaios de massa específica, consistência e perda de massa ou variação RTFOT. Os lodos de ETA calcinados a 500°C apresentaram melhoria nas propriedades mecânicas e de adesividade. Já os lodos de ETE, secos à temperatura de aquecimento do ligante, e adicionados sobre o agregado miúdo apresentaram incrementos nas propriedades mecânicas. O estudo permitiu concluir que a utilização dos lodos de ETA e de ETE no concreto betuminoso para fins de construção rodoviária é viável quanto aos aspectos técnico e ambiental, sendo que pesquisas futuras serão importantes para um maior entendimento do comportamento dessas misturas e validação das conclusões a que se chegou.

PERFORMANCE EVALUATION OF BITUMINOUS MIXTURES WITH ADDITION OF SLUDGE WATER AND SEWAGE SLUDGE

ABSTRACT

Water Treatment Stations (WTS) and Sewage Treatment Stations (STS) generates a large amount of sludge as products of their operations, these products are considered solid waste by the ABNT 10004/2004 (*Associação Brasileira de Normas Técnicas*), and, without a proper management, the final disposal of waste can result harmful to the humanity and to the environment by cause pollution. So, that is an environmental issue to be avoided. This study aimed to verify the usability of such waste in asphalt binders for hot asphalt concrete to know if is this mixture could provide an improvement in its behavior, without taking into account, in this initial phase, the direct costs of treatment and/or environmental liabilities. To facilitate the incorporation of WTS and STS sludge waste into the asphalt concrete was used a mechanic mill, in order to make the material pass through the sieve number 200. The residues were added to the mixture by two ways: i) dry, and ii) wet. The first mixture was made subjecting the samples to several high drying temperatures (200°C, 300°C, 500°C, 800°C and air dried) to then add the asphalt binder; in the second case, the sludge was dried at 175 °C and added into the fine aggregate. The sludge-ligand interaction was evaluated by the specific gravity tests, the consistency and by the weight loss or variation RTFOT. The calcined WTS sludge (500 °C) showed improvement in mechanical and adhesion properties. While the STS sludge, dried at the binder heating temperature, and added over the fine aggregate, showed increase only in mechanical properties. Therefore, the study conclude that the use of WTS and STS sludge's in asphalt concrete, for road construction, is viable for technical and environmental aspects, however, future studies are needed to validate these results.

ÍNDICE

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	1
1.2 – OBJETIVOS.....	2
1.2.1 – OBJETIVO GERAL.....	2
1.2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2. - REVISÃO BIBLIOGRAFICA	4
2.1 - TRATAMENTOS DE ÁGUA POTÁVEL.....	4
2.1.1 - LODOS DE ETA	5
2.1.2 - DISPOSIÇÃO DOS LODOS ETA.....	6
2.2 - TRATAMENTOS DE ESGOTO.....	8
2.2.1 - TRATAMENTO DA FASE LIQUIDA:.....	8
2.2.2 -TRATAMENTO DA FASE SÓLIDA	9
2.2.3 – LODOS DE ETE.....	10
2.2.4 - DISPOSIÇÃO DOS LODOS ETE.....	10
2.3 – ESTATÍSTICAS DAS DISPOSIÇÕES DOS LODOS DE ETA E DE ETE.....	13
2.3.1 – DISPOSIÇÃO FINAL DOS LODOS DE ETA EM ALGUNS PAÍSES	13
2.3.2 – DISPOSIÇÃO FINAL DOS LODOS DE ETE NA EUROPA, AMÉRICA DO NORTE E JAPÃO	14
2.3.3 – DISPOSIÇÃO DOS LODOS DE ETA E ETE NO DISTRITO FEDERAL, BRASIL	16
2.3.4 – PERSPECTIVAS DAS DISPOSIÇÕES E TRATAMENTOS FUTUROS	18
2.4 – INCINERAÇÕES DOS LODOS DE ETA E DE ETE	18
2.4.1 – TEMPERATURAS DE CALCINAÇÃO DE LODOS PARA APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL	20
2.5 - MISTURAS BETUMINOSAS	21
2.5.1 – TIPOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS	22
2.5.2 – LIGANTES ASFÁLTICOS	22
2.5.3 – LIGANTES MODIFICADOS.....	23
2.5.4 - METODOLOGIAS DE DOSAGENS	24
2.5.4.1 - METODOLOGIA MARSHALL	24
2.5.4.2 - METODOLOGIA SUPERPAVE	25
2.5.4.3 - METODOLOGIA HVEEM.....	26
2.5.4.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS DE DOSAGEM	26
2.5.4.5 - DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROJETO DO LIGANTE ASFÁLTICO	26
2.6 – MATERIAL FILER.	27
2.7 - UTILIZAÇÕES DA CAL EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	28
2.8 - AVALIAÇÕES DE PROPRIEDADES DAS MISTURAS BETUMINOSAS.....	30
3 – MATERIAIS E METODOLOGIA	31
3.1 – MATERIAIS UTILIZADOS	31
3.1.1 – LIGANTE ASFÁLTICO.....	31
3.1.2 – LODOS DE ETA E DE ETE	31
3.1.3 – CAL HIDRATADA	32
3.1.4 – AGREGADOS	32
3.2 – ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	32
3.2.1 - TRATAMENTOS DOS LODOS DE ETA E DE ETE.....	32
3.2.2 – ENSAIOS FÍSICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	33
3.2.2.1 – GRANULOMETRIA	33

3.2.2.2 – ENSAIO DE ABRASÃO “LOS ANGELES”	34
3.2.2.3 – FORMA DAS PARTÍCULAS	35
3.2.2.4 – MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO	36
3.2.2.5 – ADESIVIDADE AO LIGANTE ASFÁLTICO	37
3.2.2.6 - RESISTENCIA AO CHOQUE E DURABILIDADE	38
3.2.2.7 - EQUIVALENTE DE AREIA	38
3.2.2.8 – DENSIDADE REAL	38
3.2.2.9 – MASSA ESPECÍFICA REAL	39
3.2.2.10 – GRANULOMETRIA DO FILER	39
3.2.2.11 – CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS DE ETA E DE ETE	40
3.3 – FORMAS DE ADIÇÃO DOS LODOS AO CONCRETO ASFÁLTICO	40
3.3.1 – INCORPORAÇÃO DOS LODOS ETA E ETE NO LIGANTE ASFÁLTICO	41
3.4 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE LODOS DE ETA E ETE	42
3.4.1 – ENSAIO DE VISCOSIDADE BROOKFIELD	42
3.4.2 – ENSAIO DE PENETRAÇÃO	43
3.4.3 – ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO	43
3.4.4 – ENSAIO DE ENVELHECIMENTO RTFOT	43
3.5 – METODOLOGIA DE DOSAGEM	44
3.5.1 – ESPECIFICAÇÕES DAS MISTURAS	45
3.5.2 – METODOLOGIA MARSHALL	46
3.6 – ENSAIOS PARA PROPRIEDADES MECÂNICAS	47
3.6.1 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA	47
3.6.2 – RESISTENCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA RT	48
3.7 – ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ADESIVIDADE	49
3.7.1 – RESISTÊNCIA AO DANOS POR UMIDADE INDUZIDA	49
3.7.2 – DESGASTE POR ABRASÃO – ENSAIO CANTABRO	50
4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	51
4.1.1 – TRATAMENTOS DOS LODOS DE ETA E DE ETE	51
4.1.2 – ENSAIOS FÍSICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	53
4.1.3 – GRANULOMETRIA DOS FILERS	55
4.1.4 – CARACTERIZAÇÕES DOS LODOS DE ETA E DE ETE	55
4.1.4.1 – DISTRIBUIÇÃO DOS MINERAIS	55
4.1.4.2 – ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS-TG	57
4.1.4.3 – A ANÁLISE TERMO DIFERENCIAL (DTA)	58
4.2 – INCORPORAÇÃO DOS RESÍDUOS LODOS DE ETA E ETE NAS MISTURAS BETUMINOSAS	60
4.2.1 – INCORPORAÇÃO DOS LODOS AO LIGANTE ASFÁLTICO	60
4.2.2 – INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS LODOS SOBRE O AGREGADO MIÚDO	60
4.3 – ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DOS LODOS DE ETA E DE ETE	61
4.3.1 – ENSAIO DE VISCOSIDADE BROOKFIELD	61
4.3.2 – ENSAIO DE PENETRAÇÃO	63
4.3.3 – ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO	64
4.3.4 – ENSAIO DE ENVELHECIMENTO RTFOT	66
4.3.5 – ENSAIO DE VISCOSIDADE BROOKFIELD APÓS DO RTFOT	67
4.4 – ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	69
4.4.1 – METODOLOGIA DE DOSAGEM MARSHALL	69
4.4.2 – TEOR ÓTIMO DE ASFALTO	70
4.4.3 – PARÂMETROS DE DOSAGEM	72
4.5 – RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	74

4.5.1 – ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL	74
4.5.2 – RESISTENCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA RT	74
4.5.3 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA	75
4.6 – ENSAIOS DE ADESIVIDADE.....	76
4.6.1 – RESISTÊNCIA AO DANO POR UMIDADE INDUZIDA - ENSAIO <i>LOTTMAM</i>	76
4.6.2 – DESGASTE POR ABRASÃO – ENSAIO CÂNTABRO	78
5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	79
5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	79
5.2 – CONCLUSÕES	79
5.3 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	80
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	82
APÊNDICES.....	88
A. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	88
B. PARÂ.METROS DE DOSAGEM DA METODOLOGIA MARSHALL	91
C. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECANICAS E DE ADESIVIDADE DE MISTURAS ASFALTICAS.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Disposição de lodos de ETA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA).....	13
Tabela 2.2 Disposição de lodos de ETA no Japão 2005 (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos -EPA).....	13
Tabela 2.3 Disposição dos lodos de ETE nos países da União Europeia (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos -EPA).....	14
Tabela 2.4 Disposição de lodos de ETE na América do Norte e Japão. (Moss et al., 2013).	15
Tabela 2.5 Produção de água e lodos de ETA – CAESB 2012.....	16
Tabela 2.6 Produção e disposição de lodos de ETE – CAESB 2012.....	17
Tabela 3.1 Certificado de ensaios – PRETROBRAS.....	31
Tabela 3.2 Carga abrasiva para o ensaio de abrasão “Los Angeles” (Norma DNER-ME 035/98).34	34
Tabela 3.3 Graduação para ensaio abrasão “Los Angeles” (Norma DNER-ME 035/98).....	34
Tabela 3.4 Formas das partículas (Norma ABNT-NBR 6954/1989).....	35
Tabela 3.5 Determinação da graduação do material após análise granulométrica (Norma DNER – ME 086/94).....	36
Tabela 3.6 Granulometria especificada para o filer.....	39
Tabela 3.7 Quantidade de corpos-de-prova ensaiados para cada mistura.	45
Tabela 3.8 Especificações granulométricas (Norma DNIT 031/2006 - ES).	45
Tabela 3.9 Especificações de Concreto Asfáltico CA (Norma DNIT 031/2006 - ES).	46
Tabela 3.10 Especificações granulométricas (Norma DNIT 031/2006 - ES).	46
Tabela 4.1 Tempos de calcinação versus Variação das massas dos lodos.	51
Tabela 4.2 Caracterização física dos agregados.	53
Tabela 4.3 Granulometria de lodos	55
Tabela 4.4 Composição química dos lodos de ETA e de ETE e da Cal Hidratada.	56
Tabela 4.5 Ensaio de viscosidade Brookfield das misturas de referência.	61
Tabela 4.6 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETA e ETE.	61
Tabela 4.7 Resultados Ensaio RTFOT de misturas com lodos de ETA e ETE.....	66
Tabela 4.8 Faixas de temperaturas de Usinagem e Compactação.....	70
Tabela 4.9 Teor de asfalto.	71
Tabela 4.10 Densidades dos ligantes modificados.....	72
Tabela 4.11 Parâmetros Metodologia Marshall.	73
Tabela A.1 Variação das massas dos lodos de ETA e de ETE após da calcinação.....	88
Tabela A.2 Forma das partículas	88
Tabela A.3 Ensaio da Massa Especifica Real	89
Tabela A.4 Ensaio da Massa Especifica Real pelo penta-picnômetro.	89
Tabela A.5 Ensaio de viscosidade Brookfield de CAP 50/70 após do RTFOT.	89
Tabela A.6 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETA após do RTFOT. ..	90
Tabela A.7 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETE após do RTFOT. ...	90
Tabela C.1 Ensaio de Resistencia à tração Rt das misturas.	95
Tabela C.2 Ensaio desgaste por abrasão.	96
Tabela C.3 Ensaio de desgaste por abrasão.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Disposição final dos lodos de ETE dos países da União Europeia 1992 - 2009. (Modificado - EURSTAT).....	14
Figura 2.2 Disposição final dos lodos de ETE nos Estados Unidos 1992 - 2004. (Modificado - Geyer, 2001 & Moss <i>et al.</i> , 2013).....	15
Figura 2.3 Determinação do teor ótimo de ligante asfáltico (Bernucci <i>et al.</i> , 2008).	27
Figura 3.1 (a) Amostra de lodos de ETE na condição seca; (b) Amostra de lodos de ETA na condição úmida; (c) Destorroamento dos lodos de ETE.	32
Figura 3.2 (a) Secagem ao ar dos lodos ETA; (b) Forno mufla.	33
Figura 3.3 Equipamento de granulometria: (a) Peneirador mecânico; (b) Peneiras serie ASTM.	33
Figura 3.4 Ensaio de adesividade ao ligante asfáltico.....	37
Figura 3.5 (a): Equipamento rotacional para elaboração de misturas; (b) Sedimentação, 30% Lodo de ETA e 70% CAP 50/70.....	41
Figura 3.6 Equipamento do Ensaio RTFOT.....	43
Figura 3.7 Metodologia Marshall.....	47
Figura 3.8 Adequação dos LVDTs para medida do Módulo de Resiliência.....	48
Figura 3.9 Ensaio de Resistência à tração.	48
Figura 3.10 Ensaio Lottman: (a) Saturação a vácuo; (b) congelamento; (c) Banho Maria.....	49
Figura 3.11 Corpos de prova (CP) antes e depois do ensaio.....	50
Figura 4.1 Variação de massas dos lodos de ETA e de ETE com a calcinação.....	52
Figura 4.2 Variação dos lodos de ETA e de ETE após da calcinação: (a) Calcinação a 300 °C; (b) Calcinação a 500 °C; (c) Calcinação a 800 °C.....	52
Figura 4.3 Adesividade com os Ligantes de referência: (a) CAP 50/70; (b) 80% CAP + 20% CAL.....	54
Figura 4.4 Adesividade com os Ligantes modificados com lodo: (a) 80% CAP 50/70 + 20% Lodo de ETA (calcinado); (b) 80% CAP + 20% Lodo de ETE (calcinado).....	54
Figura 4.5 Granulometria dos lodos de ETA e de ETE.	55
Figura 4.6 Difratoograma de raios-X dos lodos de ETA, ETE (secos ao ar) e Cal Hidratada... ..	56
Figura 4.7 Análise Termogravimétrica dos lodos de ETA, ETE (secos ao ar) e Cal Hidratada.....	57
Figura 4.8 Análise Termo diferencial Cal Hidratada.	59
Figura 4.9 Análise Termo diferencial: (a) lodos de ETA; (b): Lodos de ETE.....	59
Figura 4.10 Mistura de CAP e lodo de ETA seco ao ar.	60
Figura 4.11 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETA.....	62
Figura 4.12 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETE.	62
Figura 4.13 Ensaio de Penetração: misturas com lodos de ETA e ETE.....	63
Figura 4.14 Ensaio do Ponto de Amolecimento: misturas com lodos de ETA e ETE.	64
Figura 4.15 Ensaio de RTFOT de misturas com lodos.....	66

Figura 4.16 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETA após do RTFOT.....	67
Figura 4.17 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETE após do RTFOT.....	67
Figura 4.18 Variação da viscosidade após do RTFOT (135 °C).....	68
Figura 4.19 Variação da viscosidade após do RTFOT (150 °C).....	68
Figura 4.20 Variação da viscosidade após do RTFOT (177 °C).....	69
Figura 4.21 Curvas de Viscosidade versus Temperatura de Ligantes.....	70
Figura 4.22 Determinação do teor ótimo de asfalto.	71
Figura 4.23 Densidade do ligante modificado versus Teor ótimo de asfalto.	72
Figura 4.24 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	74
Figura 4.25 Ensaio de módulo de resiliência.	75
Figura 4. 26 Números de golpes – Volume de Vazios.....	76
Figura 4.27 Resultados de ensaio Lottman modificado	77
Figura 4.28 Resultados do ensaio Cântabro - Desgaste por abrasão.....	78
Figura 4.29 Corpos de prova após o ensaio Cântabro: (a) Mistura 1 - Asfalto convencional; (b) Mistura 4 - Asfalto modificado com lodos de ETE.	78

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES.

% VAM	Vazios no agregado mineral
%CAP	percentagem de ligante asfáltico da mistura;
% <i>f</i>	percentagem de filer na mistura
%am	percentagem de agregado miúdo na mistura;
% <i>ag</i>	percentagem de agregado graúdo na mistura;
% V _v	Volume de vazios
% W	Teor de umidade
σ_d	Tensão desvio aplicada repetidamente
ϵ_R	Deformação resiliente
An	Abrasão <i>Los Angeles</i> da graduação n
a	Comprimento
a	absorção do agregado
A	massa do agregado seco
A	massa picnômetro vazio,
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
b	Largura
B	massa do agregado na condição saturada superfície seca
B	massa picnômetro vazio mais a massa do agregado
BL	Blenda
c	Espessura
C	leitura correspondente ao agregado imerso em água
C	massa picnômetro vazio mais a massa do agregado e água
cm	Centímetro
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Concreto betuminoso usinado à quente
CH ₄	Metano
CKE	Equivalente de Centrifugação de Querosene
CLE	Cinzas de Lodos de Esgoto
Cm	Centímetros
CPA	Camada Porosa de Atrito
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Conama	Conselho nacional do meio ambiente
cp	Centipoise
<i>d</i>	densidade relativa aparente da mistura compactada
<i>d</i> _{CAP}	densidade relativa do ligante asfáltico;
<i>d_f</i>	densidade relativa dos grãos do material de enchimento
<i>d</i> _{am}	densidade relativa das partículas do agregado miúdo;
<i>d</i> _{ag}	densidade relativa das partículas do agregado graúdo.
<i>D_r</i>	Densidade relativa
D	massa picnômetro cheio de água
D	Diâmetro de corpo-de-prova
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio

DF	Distrito federal
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento nacional de estradas de rodagem
DNIT	Departamento nacional de infraestrutura de transporte
EA	Equivalente de Areia
ES	Especificação de serviço
et al	Entre outros
EPA	Environmental Protection Agency
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos Americanos
EUROSTAT	Estatísticas da União Europeia
F	Carga de ruptura
g	Gramas
g/cm ³	Gramas/centímetro cúbico
GC	Graus Celsius
Grad	Graduação
GS	Massa específica real
<i>G_{sa}</i>	Massa específica do agregado na condição seca
<i>G_{sb}</i>	Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca
Gse	Massa específica efetiva
H	Altura de corpo-de-prova
IDT	Indirect Tensile Test
ISC	Índice Suporte Califórnia
l/s	Litros por segundo
Lbs	Libras
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma-força
kN/m ³	Quilonewton/metro cúbico
kPa	Quilopascal
mn	massa total da amostra seca, colocada na máquina;
m'n de 1,7mm).	massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira
mm	Milímetros
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
<i>M</i>	massa do corpo-de-prova ao ar
<i>M_i</i>	massa do corpo-de-prova em imersão
ME	Método de ensaio
MG	Minas gerais
mim	mínimo
min	Minuto
MPa	Megapascal
MR	Módulo de resiliência
MT	Metacaulinita
n	Graduação
N	Newton
N/A	Não Aplica
NBR	Norma Brasileira
NESP	Não Especifica

°C	Grau Celsius
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Peso do corpo-de-prova, antes do ensaio;
P'	Peso do corpo-de-prova, após do ensaio;
pH	Potencial Hidrogeniônico
plg	Polegada
PRADs	Para Recuperação de Áreas Degradadas
QNP	Quadra Norte P
RBV	Relação betume vazios
RCS	Resistencia à Compressão Simples
REGAP	Refinaria Gabriel Passos
RJ	Rio de Janeiro
rpm	Rotações por minuto
RRt	Relação à resistência retida à tração.
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
Rt ₁	Resistencia à tração das amostras sem acondicionamento
Rt ₂	Resistencia à tração das amostras com acondicionamento
RTFOT	<i>Rolling thin oven test</i>
s-1	1/Segundos
SMA	Stone Matrix Asphalt
SUPERPAVE	Superior Performance Asphalt Pavementes
SSS	Saturado superficialmente seco
SST	Superpave Shear test
Tn	Tonelada
UE	União Europeia
UnB	Universidade de Brasília
UFMG	Universidade Federal de Campinha Grande
VCB	Vazios com Betume
VAM	Vazios do agregado Mineral
WERF	Water Environment Research Foundation

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A necessidade de preservação do meio ambiente e os cuidados com a saúde requerem tratamentos da água para consumo humano e dos efluentes de esgoto. Quando se realiza o tratamento convencional da água potável, gera-se um volume de resíduo chamado de lodo de ETA (Estação de Tratamento de Água). Do mesmo modo, com o tratamento dos efluentes de esgoto gera-se um volume de resíduo chamado de lodo de ETE (Estação de Tratamento de Esgoto). Os dois tipos de lodos são classificados segundo a norma brasileira ABNT 10.004/2004 como “resíduo sólido”.

As disposições dos lodos de ETA e de ETE é um grande desafio mundial. O Brasil editou em 2010 a Lei 12.305 instituindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, obrigando as estações de tratamentos a adotar disposição segura dos resíduos sólidos e desenvolver novas práticas que conduzam ao desenvolvimento sustentável. As soluções geralmente adotadas encontram-se ligadas diretamente às características do lodo e são controladas segundo as legislações ambientais específicas vigentes (Portella *et al.*, 2003). Os principais usos dos lodos, no Brasil, são em áreas agrícolas, conformação de aterros sanitários, fabricação de tijolos e recuperação de áreas degradadas. Algumas pesquisas foram realizadas objetivando a sua incorporação em materiais de construção civil, tais como: concretos (Fontes 2008), solos (Pereira 2012) e camadas de pavimentos (Silva, 2008 e Lucena, 2012). A disponibilidade desses resíduos para tais usos depende da viabilidade técnica, econômica e ambiental, buscando-se geralmente o aumento de receita e principalmente redução de custos e impactos ambientais (Wollff *et al.*, 2005).

A Europa e América do Norte utilizam a calcinação como fim para os lodos, mas esta solução, além de necessitar de tecnologia sofisticada, apresenta alto custo por tonelada tratada (Lucena, 2012). Uma das vantagens deste processo é que caso seja realizada em conjunto com outros resíduos urbanos desidratados e não passíveis de reciclagem pode ser uma solução adequada por apresentar alto poder calorífico, aproveitável em outras aplicações (Naime, 2012). Entretanto, uma limitação para o emprego desta tecnologia deve-se a geração de gases tóxicos como: óxidos de nitrogênio, furanos, dioxinas, gases ácidos, e geração de cinzas (Lee *et al.*, 2011). Embora estes possam ser controlados através do aperfeiçoamento do processo de combustão e da utilização de filtros (Feitosa, 2009), e a cinza resultante do procedimento possa ser aproveitada na construção civil.

A disposição final dos lodos no Brasil ocorre, principalmente, em aterros sanitários devido à vasta extensão territorial do país. Entretanto, essa deve ser considerada uma solução momentânea que

carece de maiores estudos, pois a longo prazo pode acontecer a percolação de subprodutos do lodo e a contaminação dos solos e águas subterrâneas por metais tóxicos (Campana, 2009). Além disto, essa disposição também é uma alternativa cara e que comporta riscos geotécnicos, devido a elevada umidade, podendo contribuir para a ocorrência de instabilidade de taludes que podem levar a desmoronamentos de significativas proporções (Lucena, 2012).

A pavimentação pela sua extensão e grandes volumes de material mobilizado constitui uma alternativa ao reuso dos resíduos de lodo de ETA e de ETE. Nesta tecnologia os resíduos tóxicos são misturados com materiais que tendem a criar uma matriz sólida altamente impermeável, capturando ou fixando os resíduos dentro desta estrutura (Lucena, 2012).

Diante desse cenário o presente estudo busca analisar a possibilidade do uso dos lodos calcinados de ETA e de ETE vislumbrando a melhoria do comportamento das misturas asfálticas para fins de pavimentação.

1.2 – OBJETIVOS

1.2.1 – Objetivo geral

Avaliar o efeito da utilização dos lodos de ETA e de ETE como material fino incorporado ao ligante asfáltico e aos agregados miúdos, por meio de ensaios que avaliem as características mecânicas e de adesividade.

1.2.2 – Objetivos específicos

- realizar tratamento térmico a diferentes temperaturas de calcinação dos lodos de ETA e de ETE, a fim de obter um material estável na temperatura de usinagem do Concreto Betuminoso Usinado a Quente-CBUQ;
- avaliar a consistência (viscosidade Brookfield, penetração e ponto de amolecimento) dos ligantes asfálticos modificados com adição de lodos de ETA e de ETE;
- avaliar a influência dos lodos de ETA e de ETE no envelhecimento do ligante asfáltico;
- realizar a dosagem do Concreto Betuminoso Usinado a Quente CBUQ com adição do fíler lodo de ETA e de ETE pelo método Marshall;
- avaliar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas tipo CBUQ com e sem adição de fíler de ETA e de ETE por meio dos ensaios: Estabilidade Marshall, módulo de resiliência e resistência à tração;

- Analisar a influência dos lodos de ETA e de ETE na adesividade do CBUQ segundo os ensaios de: resistência ao dano por umidade induzida (*Lottman*), desgaste por abrasão (*Cantabro*) e adesividade ao ligante asfáltico.

1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo encontra-se a introdução e motivação, baseada no panorama geral da geração e disposição dos resíduos dos lodos de ETA e de ETE, assim como os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre o tema, descrevendo os principais processos de tratamentos de água potável e de esgoto, a geração de resíduos e suas aplicações na atualidade. Apresentam-se também considerações relevantes sobre o concreto betuminoso, tais como as metodologias usadas na determinação do teor ótimo do ligante asfáltico, os requisitos do material filler e exemplos de trabalhos realizados com filler especiais.

O terceiro capítulo apresenta os materiais utilizados nesta pesquisa e as metodologias adotadas para a realização do tratamento térmico dos lodos e na execução dos ensaios de caracterização dos agregados, de consistência do ligante e da dosagem e determinação das propriedades mecânicas e de adesividade das misturas asfálticas, a fim de avaliar a influência dos lodos de ETA e ETE no desempenho do comportamento do concreto asfáltico.

O quarto capítulo contém a análise e discussão dos resultados de consistência e envelhecimento do ligante asfáltico modificado pela adição dos lodos, assim como as propriedades mecânicas e de adesividade referentes às misturas modificadas.

No quinto capítulo encontram-se as conclusões obtidas na pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2 - REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A água é um dos recursos naturais mais importantes para a população. Para garantir o bem estar dos habitantes quanto à qualidade de vida e saúde pública, precisa-se ter um sistema de abastecimento e tratamento de água potável e de efluentes, a fim de aproveitar corretamente os recursos hídricos para o consumo e evitar a poluição (Grassi, 2001). As estações de tratamento de água e de esgoto causam grandes agressões ao meio ambiente, pela quantidade e toxicidade dos resíduos produzidos (Lucena, 2012). No entanto, elas são indispensáveis, pois sem estas os danos ambientais seriam muito maiores. Em virtude disso o capítulo da revisão bibliográfica irá abordar a explicação dos tratamentos de água e efluentes, seus resíduos e sua destinação. Assim como também considerações do concreto betuminoso, como forma de destinação segura dos resíduos de lodos de ETA e de ETE.

2.1 - Tratamentos de água potável

A “Declaração Universal dos Direitos da Água” apresenta no item 3: “Os recursos naturais de transformação da água em água potável são lentos, frágeis e muito limitados. Assim sendo, a água deve ser manipulada com racionalidade e precaução” (ONU, 1992). A humanidade tem buscado desde a antiguidade preservá-la, embora alguns insistam em manterem-se alheios a essa constatação contida na referida declaração da ONU.

Segundo os escritos da história Grega há registros de métodos para a filtração da água mediante os processos de filtração feitos através de carvão, exposição aos raios de sol e ebulição. No antigo Egito a reserva de água era feita em recipientes por muitos meses, a fim de possibilitar o assentamento das partículas suspensas e o consumo de água ocorre na parte superior. Em alguns casos utilizavam minerais e vegetais para aperfeiçoar o processo e clarificar a água.

A primeira Estação de Tratamento de Água (ETA) foi construída em Londres em 1829, e tinha a função de filtrar a água do rio Tâmisia em filtros de areia. Devido à descoberta de que doenças letais da época (como a cólera e a febre tifoide) eram transmitidas pelo consumo de água, houve um aumento no estudo e emprego de técnicas de filtração e de cloração (Almeida, 2011).

As estações de tratamento de água têm por função transformar água natural em água apropriada para o consumo humano mediante os processos de purificação, coagulação, floculação, decantação e filtração. Com a adição de diversos componentes químicos na água formam-se resíduos de partículas suspensas que são removidos pela sedimentação, filtração, adsorção em hidróxidos e óxidos ou carvão ativado (Tsutiya et al., 2001).

A norma ABNT 12.216 classifica as águas naturais em quatro grupos e indica o tipo de tratamento que deve ser empregado para o abastecimento de água potável:

- tipo A: águas subterrâneas ou superficiais provenientes de bacias sanitariamente protegidas precisam de um tratamento de desinfecção e correção do pH;
- tipo B: águas subterrâneas ou superficiais provenientes de bacias não protegidas precisam de um tratamento de: desinfecção, correção do pH, decantação simples e filtração;
- tipo C: águas superficiais provenientes de bacias não protegidas precisam de um tratamento de: coagulação, seguida ou não de decantação, filtração em filtros rápidos, desinfecção e correção do pH;
- tipo D: águas superficiais provenientes de bacias não protegidas, sujeitas a fontes de poluição precisam de um tratamento mínimo do tipo C e tratamento complementar apropriado a cada caso.

Segundo Freitas (2001) os principais tratamentos realizados em uma ETA são:

- coagulação: É a primeira etapa do processo de tratamento da água, neste adiciona-se substâncias químicas (sulfato de alumínio) para unir as partículas suspensas na água;
- floculação: Quando a água está em movimento, se realiza a união de partículas sólidas em flocos maiores;
- decantação: Pela gravidade os flocos ficam depositados no fundo, separando-se a água dos sólidos;
- filtração: A água passa por diferentes tamanhos de filtros com o fim de reter impurezas de tamanhos menores e não decantados;
- desinfecção: Aplicação de cloro na água para evitar microrganismos;
- fluoretação: Aplicação de flúor na água para evitar a geração de carie dentária;
- correção de pH: controle de pH na água para preservação da rede de distribuição.

2.1.1 - Lodos de ETA

Os resíduos denominados lodos de ETAs têm origem principalmente nos decantadores e nas águas de lavagem dos filtros, suas características dependem fundamentalmente das condições apresentadas pela água natural, dosagens e produtos químicos utilizados, e da forma de limpeza dos decantadores (Tsutiya et al., 2001). Os produtos químicos mais utilizados nas ETAs são sulfato de alumínio, cal e cloro (Portella *et al.*, 2003) que passam a serem os principais componentes químicos do lodo. Os lodos de ETA são constituídos principalmente de micro-organismos, partículas orgânicas

e inorgânicas, compostos e elementos químicos. Desta maneira o lodo de ETA é composto quase integralmente de partículas finas a coloidais (Lucena, 2012).

No Distrito Federal destacam-se o uso do hidroxiclreto de alumínio e do sulfato de alumino (Moreira, 2007). A geração de lodos será função da capacidade de tratamento da estação, dimensão da rede de atendimento e qualidade da água exigida para o consumo da população (Lucena, 2012).

2.1.2 - Disposição dos lodos ETA

Devido à precariedade no saneamento básico em Brasil, a quantidade de lodo produzido diariamente tende a aumentar nos próximos anos com o aumento da rede de serviços e da população (Lucena, 2012). Segundo os órgãos ambientais, os lodos de ETAs não podem ser lançados nos cursos d'água sem nenhum tratamento devido aos possíveis riscos à saúde pública e à vida aquática.

A disposição do lodo de ETA é um grande desafio mundial, inclusive no Brasil. Os principais usos do lodo de ETA no estado de São Paulo (Tsutiya *et al.*, 2001) são: em áreas agrícolas, fabricação de tijolos e recuperação de áreas degradadas.

- **Agricultura**

A utilização do lodo de ETA em áreas agrícolas justifica-se por este trazer benefícios na melhoria estrutural do solo; ajuste de pH; adição de traços de minerais; aumento da capacidade de retenção de água e melhoria das condições de aeração do solo (Tsutiya *et al.*, 2001). Nos Estados Unidos utilizam-se os lodos de ETA com presença de sais de ferro e alumino em agricultura, áreas florestais e degradadas a fim de aproveitar os nutrientes benéficos. Basicamente a utilização do lodo na agricultura vai depender das características físicas e químicas deste e da ausência de contaminantes (Januário *et al.*, 2007).

- **Áreas degradadas**

Utilizado na recuperação de áreas degradadas, mediante a introdução em cultivos de grama comercial que possibilitam o aumento da aeração e da capacidade de retenção de líquido no solo, além de fornecer nutrientes adicionais às plantas. Deve considerar o acúmulo de metais no solo, adsorção de nutrientes, e teor de umidade, assim como também sua possível contaminação do lençol freático (Tsutiya *et al.*, 2001).

Disposição em aterros

A disposição em aterros é considerada uma solução econômica no Brasil, devendo a mesma ser tecnicamente viável segundo as regulamentações ambientais. Suas restrições estão ligadas à

necessidade de grandes áreas adjacentes às estações de tratamento, assim como também a possíveis efeitos de contaminação do solo (Januário *et al.*, 2007).

- **Aplicações na Engenharia Civil**

Pesquisas realizadas no Brasil indicam resultados satisfatórios quanto ao uso de lodos de ETA na produção de material cerâmico destinado à construção civil sem função estrutural. Nesse caso o uso se consideraram a proporção de 10% de lodo em relação à massa de argila. A utilização está ligada basicamente aos custos econômicos finais de produção das indústrias cerâmicas (Januário *et al.*, 2007).

Essa utilização ocorre quando a granulometria do lodo de ETA for similar à da argila e nele se fizer presente compostos de argila, silte, areia, coagulante e matéria orgânica, produto da remoção durante o tratamento da água. A presença de carvão ativado no lodo inviabiliza sua aplicação, uma vez que causa expansão e conseqüentemente rachaduras nos tijolos (Tsutiya *et al.*, 2001 e Duarte 2008).

Costa (2011) simulou a fabricação de concreto para calçadas, utilizando o lodo de ETA em um traço empírico em massa de 1:2:3 (cimento (1): areia (2): brita (3)). O estudo foi desenvolvido incorporando a esse traço o lodo de ETA nas proporções de 5%, 10% e 20% como agregado miúdo. Os ensaios de compressão axial apresentaram resistências de 15 MPa, sendo superiores à recomendada de 10 MPa para calçadas. Lucena (2012) estudou a possibilidade de incorporar os resíduos de lodo de ETA ao solo para utilização em base e sub-base de pavimentos. A autora usou a técnica de estabilização/solidificação e incorporou ao solo 20% do lodo de ETA e, adicionalmente cal, cimento e emulsão como estabilizantes nos teores de 1%, 2%, 3% e 4%. Os incrementos do teor dos estabilizantes indicam aumentos significativos de Índice Suporte Califórnia ISC, Resistência à Compressão Simples - RCS, Resistência à tração - RT e do Módulo Resiliente – MR

Silva (2008) avaliou a utilização de lodo de ETA como fíler em substituição ao cimento Portland no Concreto Asfáltico na região Amazônica. O autor observou a adequação do lodo de ETA como fíler propiciando o aumento da rigidez da mistura e do módulo de resiliência. Verificou-se ainda maior resistência à tração por compressão diametral, comprovando tecnicamente a viabilidade da utilização do lodo de ETA no Concreto Asfáltico, além de contribuir para a redução custo econômico devido à falta de materiais apropriados na região.

- **Lançamentos em sistemas de coleta e tratamento de esgotos**

Esta alternativa apresenta viabilidade quando há uma Estação de Tratamento de Esgotos próxima da ETA, capaz de receber o volume adicional de lodo. Não se considera como uma forma final de disposição dos resíduos, mas sim de uma forma de transferência. A alternativa é muito utilizada quando a ETA se encontra em área densamente urbanizada ou não há áreas disponíveis para a disposição do lodo (Januário *et al.*, 2007).

2.2 - Tratamentos de esgoto

O esgoto é o resultado final das águas utilizadas pela humanidade, considerando-se segundo os usos como: sanitário e industrial. O esgoto sanitário é originado nas unidades residenciais, prédios comerciais, institucionais que contenham banheiros, lavanderias, desagues ou dispositivos que utilize a água para finalidade doméstica sendo composto principalmente de água residual, restos de comidas e compostos químicos presentes nos produtos detergentes. O esgoto residual é o resultado de processos industriais e comerciais tais como petroquímicas, siderúrgicas, indústrias têxteis, matadouros, cervejarias entre outros e são compostos principalmente de produtos químicos utilizados nos processos industriais (Pereira, 2012).

2.2.1 - Tratamento da fase líquida

O tratamento das águas residuárias coletadas na rede inclui: pré-tratamento, primário, secundário e, eventualmente, terciário, como se descreve nas seguintes etapas:

Pré-tratamento: separação de sólidos por meios físicos, utilizando as seguintes fases:

- gradeamento: consiste em fazer a separação dos objetos e resíduos sólidos mais grosseiros em suspensão, tais como: pedaços de madeira, animais mortos e objetos de elevados tamanhos, a fim de facilitar o transporte do efluente e evitar danos no sistema (Takahide, 1999 e Mello, 2007);
- peneiramento: remoção de sólidos grosseiros com granulometria menor que 0.25 mm;
- desarenação: consiste na remoção da areia presente nos esgotos, utilizando o mecanismo da sedimentação de grãos segundo a densidade, neste a areia é depositada no fundo, enquanto a matéria orgânica fica em suspensão (Takahide, 1999).

Tratamento primário: Consiste na separação de partículas sólidas da fase líquida por meio de processos físico-químicos. A principal fase do tratamento é a sedimentação, onde são retirados os

sedimentos formados na decantação primária, intitulados também de “Lodos Primários”. Ao mesmo tempo são retirados espumas, odores e graxas acumuladas na superfície (Mello, 2007).

Tratamento secundário: Consiste na absorção de matéria orgânica coloidal por reatores biológicos em condições aeróbias ou anaeróbias. Após esta etapa, a água residual apresenta pouca poluição por matéria orgânica sendo ela admissível no meio ambiente, enquanto que o esgoto residual sofre posteriormente um processo de sedimentação nos decantadores secundários (Mello, 2007).

Os processos utilizados no tratamento secundário são: lagoas de estabilização, reatores anaeróbios, sistemas de lodos ativados, decantadores secundários, filtros biológicos e tanques de sedimentação (Feitosa, 2009). Entre os principais, destacam-se:

- lagoas de Estabilização: são processos naturais de baixo custo que removem a matéria rica em carbono e organismos patogênicos. Segundo a porcentagem de estabilização da DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), as lagoas se classificam em: facultativa, anaeróbia ou de mistura (Feitosa, 2009);
- lodos ativados: consiste no processo de recirculação de sólidos do fundo do tanque de decantação por meio de bombeamento, a fim de converter os microrganismos em gás carbônico e água, mediante a alimentação da matéria orgânica (Feitosa, 2009). O processo se realiza-se em condições aeróbias, onde ocorre injeção do oxigênio para dar condições ao desenvolvimento dos microrganismos que só vivem em presença de ar e assimilam matéria em grande quantidade no esgoto (Piveli, 2006). Este deve ser precedido pela remoção de sólidos grosseiros e areia, podendo ainda ser precedido pela remoção de sólidos sedimentáveis segundo a norma NBR 12209;
- filtração biológica: consiste na construção de filtros, onde o líquido percola por meio de uma camada de lodo formada no fundo do tanque rico em bactérias que retém e decompõe a matéria orgânica.

Tratamento terciário: É utilizado para remover poluentes em águas residuais antes de sua descarga no corpo receptor, tais como filtração, cloração para remoção de bactérias, absorção por carvão ativado e outros processos químicos finais para remoção de espuma, sólidos inorgânicos e cor (Takahide, 1999).

2.2.2 - Tratamento da fase sólida

Após o tratamento na fase líquida dos lodos, ocorre o da fase sólida nas seguintes etapas:

- adensamento por gravidade: é realizado mediante um adensador em forma circular, equipado com braços raspadores mecânicos. O lodo é encaminhado para o centro do adensador onde é feita a descarrega (Rosário, 2007);
- adensamento por flotação ou centrifugação: consiste numa unidade de flotação e saturação. A unidade de flotação separa a fase sólida da líquida, enquanto que a unidade de saturação dissolve o ar na água sobre pressão (Rosário, 2007);
- digestão aeróbia: realiza-se em duas fases, na primeira se dá a formação de ácido volátil, e na segunda a produção de gás metano sem presença de oxigênio molecular (Garcia, 2006);
- digestão anaeróbia: consiste na inclusão de aeração excessiva, provocando desenvolvimento de microrganismos aeróbios a realizar sua própria oxidação, gerando uma redução do material celular (Garcia, 2006);
- desidratação do lodo: etapa na qual é feita a remoção de umidade do lodo utilizando equipamentos mecânicos (Takahide, 1999).

2.2.3 – Lodos de ETE

O tratamento de esgoto é regulado no Brasil pela norma NBR 12209. Durante as etapas do tratamento gera-se o resíduo de lodo de ETE que depende das características físicas, químicas e biológicas das águas residuárias. Os lodos de ETE apresentam na sua composição uma variedade de patógenos, vírus, parasitas e fungos que sobrevivem depois de serem submetidos a processos de tratamento e podem representar risco à saúde humana e animal. Alguns lodos de ETE tem presença de metais pesados devidos às águas residuais industriais e de superfície de fluxo, contendo nesse caso grandes quantidades de zinco provenientes de fertilizantes fosfatados (Lucena, 2012).

Lodos provenientes de Tratamentos de Esgoto Industrial necessitam de gestões ambientais que promovam entre os setores industriais processos de tratamentos mais limpos evitando que sejam simplesmente lançados na rede do esgoto doméstica. A população pode contribuir para o tratamento do lodo de ETE utilizando de modo eficiente e apropriado a água e produtos de limpeza, o que contribui para que se evite a desestabilização nos sistemas biológicos do tratamento (Garcia, 2006).

2.2.4 - Disposição dos lodos ETE

O tratamento de esgotos gera como subproduto o lodo. Este gera problema socioambiental da disposição final, que atinge inúmeras cidades do Brasil e do mundo. A principal disposição deste ocorre como material para a conformação de aterros sanitários e fertilizantes agrícolas (Campana, 2009). A disponibilidade dos resíduos lodos depende da viabilidade técnica, econômica e ambiental,

procurando aumento de receita e principalmente redução de custos e impactos ambientais (Wollff *et al.*, 2005 e Pereira, 2012). Formas de disposição deste resíduo são apresentadas a seguir:

- **Aterros Sanitários**

A utilização de lodos de ETE como material alternativo em aterros sanitários é uma prática utilizada por diversos países por apresentar vantagens com respeito aos custos na aquisição e contribuição de nutrientes na camada vegetal (Junior *et al.*, 2011). Feitosa (2009) classifica os aterros em dois tipos: o primeiro é denominado Aterro exclusivo, que é conformado com lodo seco ou com teor de resíduo sólido superior a 30% e, o segundo é conformado com lodo e misturado com resíduos sólidos urbanos, apresentando um teor mínimo de sólidos de 20%.

Entre os principais problemas encontrados na disposição destes lodos em aterros sanitários encontra-se: a poluição de águas subterrâneas e superficiais, percolação e escorrimentos de líquidos com substâncias tóxicas e metais pesados, produção de gases poluidores do ar, umidade excessiva do solo, etc. Tais poluições causam danos à vida aquática e terrestre, contaminação do solo e possíveis instabilidades dos aterros que levam ao trincamento e desmoronamento em significativas proporções, devido às variações da poro-pressão. Considera-se a disposição em aterros sanitários como uma opção não viável a longo prazo (Campana 2009; Feitosa 2009 & Lucena 2012).

- **Disposição superficial no solo (Landfarming)**

A utilização da disposição superficial no solo é uma alternativa de baixo custo na qual se pode dispor de grandes volumes por unidade de área. Suas limitações de uso são: grandes áreas são distantes de centros urbanos, requer presença de solo impermeável, gera possível contaminação do lençol freático, maus odores e, dificuldade de reintegração da área (Lee *et al.*, 2011).

- **Recuperação de Áreas degradadas**

Este processo consiste na bio-degradação de resíduos orgânicos e retenção de metais pesados na camada superficial do solo, utilizando os nutrientes e a matéria orgânica para fins agrícolas, recuperação e revegetação (Feitosa, 2009). Evidencia-se resultados positivos sobre a reconstrução da flora, embora apresente limitações pela contaminação do lençol freático e contaminação do solo com metais e ao mesmo tempo presença de odores fortes (Pereira, 2012).

- **Usos Agrícolas**

Na agricultura usam-se bio sólidos provenientes de lodos biológicos com compatibilidade na utilização produtiva. Os lodos são utilizados em atividades onde se necessita de tratamentos industriais antes de chegar ao consumidores, assim como alimentos que precisem de cozinhar para

seu consumo, a fim de eliminar os riscos para a saúde (Feitosa 2009). Suas limitações radicam na contaminação do solo, possível patogenicidade e liberação de maus odores (Lee *et al.*, 2011).

- ***Aplicações na Engenharia Civil***

A diminuição do consumo de recursos naturais e o encapsulamento de metais pesados justificam a aplicação dos lodos de ETE como agentes na melhoria das características dos materiais empregados na construção civil (Pereira, 2012). Várias alternativas do uso dos lodos de esgoto convertidos em cinzas são fomentadas no setor da engenharia civil, tais como: concretos para estrutura (convencional e de alto desempenho), argamassas, pavimentos e blocos cerâmicos (Fontes, 2008). Existem pesquisas que descrevem a utilização dos lodos de Esgoto calcinados por combustão como substituição ao agregado leve na fabricação de concretos. Fontes (2003) e Pereira (2012) apud citaram Brosch (1975), Tay (1987), Moralies *et al.* (1992), Monzó *et al.* (1996), Khanbilvard *et al.* (1995) e Geyer (2001) como os principais autores a realizarem este tipo de concretos, obtendo características compatíveis com os requisitos fixados pelas especificações quanto ao ensaio de resistência à abrasão e de resistência mecânica. Sua aplicação prática não tem sido desenvolvida devido aos elevados custos com respeito às alternativas disponíveis (Geyer, 2001).

Geyer (2001) estudou as possibilidades de aproveitamento do lodo após serem calcinados como parte do cimento Portland no concreto. Os resultados da sua pesquisa indicam a viabilidade de substituição em percentuais de até de 20% do cimento, trazendo benefícios ambientais e técnicos, com a melhoria da resistência à compressão, assim como também garantindo a retenção dos compostos nocivos.

Fontes (2008) realizou quatro tipos de misturas para concretos de alto desempenho, utilizando materiais tais como: Cinzas de lodos de Esgoto (CLE), Cinzas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), Metacaulinita (MT) e uma mistura em proporção igual de CLE e RSU denominada Blenda (BL). Esses aditivos foram incorporados ao concreto em substituição de 5% a 10% em massa do Cimento, acarretando melhorias nas propriedades mecânicas, de durabilidade e ambientais, além de reter nas matrizes cimentícias os metais pesados.

Sayed *et al.*(1995) utilizaram os resíduos de esgoto como material filer na fabricação de misturas asfálticas para regiões de clima quente. A pesquisa analisou a utilização do lodo de esgoto, na forma de cinza, em substituição a materiais de enchimento. Todos os parâmetros analisados (estabilidade, fluência, vazios na mistura, vazios nos agregados minerais e relação betume/vazios) atenderam os valores mínimos estabelecidos em norma. Além disso, foram satisfatórios os testes para estabilidade Marshall a temperaturas elevadas de 70 e 80 °C.

Duarte (2008) estudou a disposição final do lodo de ETE na utilização na massa cerâmica para a fabricação de tijolos maciços. A indústria cerâmica possui uma enorme capacidade para absorver os resíduos de ETE como parte de sua matéria orgânica. A pesquisa fundamentou-se na adição máxima de 20% de lodo para dois tipos de argilas estudadas. O problema apresentado na pesquisa foi que ocorre perda de massa e absorção de água elevada nos tijolos (Duarte, 2008).

2.3 – Estatísticas das Disposições dos lodos de ETA e de ETE

As alternativas de disposição final dos lodos em aterros sanitários, solos, agricultura e lançamentos nas correntes de águas naturais, têm sido muito questionados devido aos problemas ambientais, falta de áreas, crescimento populacional e por não apresentarem uma condição segura (Geyer, 2001).

2.3.1 – Disposição final dos lodos de ETA em alguns países

A Tabela 2.1 indica a disposição final dos lodos de ETA em países desenvolvidos, enquanto que a Tabela 2.2 descreve a disposição dos lodos de ETA no Japão no ano 2005. As estatísticas foram obtidas segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA).

A tendência mundial da utilização dos resíduos das ETAs segundo Ferreira *et al.* (2009) é na incorporação das indústrias cimenteira (EUA, Japão, Alemanha e Inglaterra) e siderúrgica (Holanda), na agricultura e controle de eutrofização (EUA, Alemanha, Espanha, Japão e Austrália), na cobertura de aterros sanitários (EUA) e na composição de revestimentos cerâmicos (Japão e Espanha).

Tabela 2.1 Disposição de lodos de ETA (Modificado - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos –EPA).

País	Aterros	Solo	Descargas nas redes		Outros: construção civil.	Ano de avaliação
			Esgoto	Água		
Estados Unidos	33	25	24	11	7	2000
França	13	6	29		52	2002
Reino Unido	58		29	2	11	2002
Alemanha	35		12		53	2002

Tabela 2.2 Disposição de lodos de ETA no Japão 2005 (Modificado - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos –EPA)

Agricultura	Energia	Indústria Química	Papel e celulose	Siderúrgica	Construção civil	Outros
20,8	23	4	8,4	10,2	18,1	15,5

2.3.2 – Disposição final dos lodos de ETE na Europa, América do Norte e Japão

Na Tabela 2.3 e Figura 2.1 são apresentadas as estatísticas da disposição final dos lodos de ETE na Europa segundo dados obtidos da comissão Europeia EUROSTAT para os anos 1992 (Geyer, 2001) e 2010. Os dados foram comparados para obter as possíveis tendências, embora para alguns países a informação se encontre incompleta e apresentem baixa confiabilidade. Além disso, em alguns países existem elevadas quantidades de resíduos descartados, sem informação da destinação final destes, sendo apenas relatadas como “outros” e podendo afetar o cálculo dos percentuais totais (Kelessidis, *et al.* 2012).

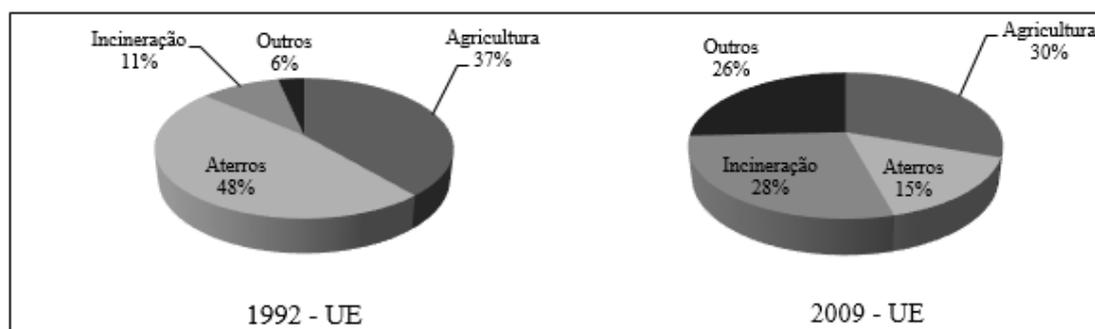


Figura 2.1 Disposição final dos lodos de ETE dos países da União Europeia 1992 - 2009. (Modificado - EURSTAT)

Tabela 2.3 Disposição dos lodos de ETE nos países da União Europeia (Modificado - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos –EPA).

País	Agricultura		Aterros		Incineração		Outros	
	1992	2009	1992	2009	1992	2009	1992	2009
Holanda	44	0,0	53	0,0	3	100,0	0	0,0
Eslovênia	---	0,0	---	18,5	---	63,0	---	18,5
Bélgica	31	14,1	56	0,0	9	53,3	4	32,6
Alemanha	25	28,6	63	0,1	12	52,5	0	18,8
Austria	13	15,7	56	8,3	31	35,8	0	39,4
Grécia	3	0,0	97	72,2	0	26,5	---	1,3
França	50	47,1	50	8,3	0	19,0	0	25,7
Reino Unido	---	70,0	---	5,0	---	15,0	---	10,0
Chipre	---	50,0	---	0,0	---	12,5	---	37,5
Luxemburgo	81	50,0	18	0,0	0	10,0	0	30,0
Itália	34	22,0	55	45,0	11	3,0	0	30,0
Polônia	---	21,8	---	14,6	---	1,6	---	62,2
República Checa	---	46,8	---	12,3	---	1,4	---	39,5
Hungria	---	56,9	---	29,6	---	0,8	---	12,7
Dinamarca	37	---	33	---	28	---	2	---
Inglaterra	51	---	15	---	5	---	28	---
Espanha	10	---	50	---	10	---	30	---
Suíça	60	---	30	---	20	---	0	---
Média	36,6	30,2	48,0	15,3	10,8	28,2	5,8	25,6

--- Não se obtiveram registros.

Existe uma variedade de tecnologias de tratamento de efluentes utilizadas nos países Europeus, embora a disposição final dos lodos de ETE ocorra em três principais grupos: agricultura, construção de aterros e calcinação. Observa-se que nos últimos tempos a construção de aterros como disposição de lodos de ETE está diminuindo em todos os países Europeus avaliados. Verifica-se também uma diminuição significativa do uso dos lodos de ETE no setor agrícola, principalmente na Holanda, Bélgica, Luxemburgo e Itália, por ser considerado como disposição insegura pela acumulação de substâncias indesejáveis, tais como metais pesados, patógenos e poluentes orgânicos (Fytili, 2008).

Também se ressalta um incremento geral de 17% na calcinação apesar das restrições e normativas ambientais. Os países que apresentaram maior crescimento entre os anos 1992 e 2009 quanto ao desenvolvimento do processo de calcinação, são Holanda, Alemanha e Bélgica, embora os custos de produtos e gases para o controle da poluição do ar sejam altos. Nota-se novas tecnologias, tais como a oxidação úmida, a gaseificação e processos combinados que geram vantagens definitivas sobre a combustão em termos de custos e de tratamentos de gases de combustão (Fytili, 2008). As tendências analisadas dependem das condições sociais, legais e locais próprias de cada país (Kelessidis *et al.*, 2012).

A Tabela 2.4 indica as disposições dos lodos de ETE na América do Norte e Japão, enquanto que na Figura 2.2, apresenta-se a disposição final dos lodos de ETE nos Estados Unidos para os anos de 1992 e 2004 (Moss *et al.*, 2013).

Tabela 2.4 Disposição de lodos de ETE na América do Norte e Japão. (Modificado - Moss *et al.*, 2013).

Pais	Agricultura	Aterros	Calcinação	Outros	Ano de Avaliação
Estados Unidos	42	30	14	14	1990
	60	17	20	3	2004
Canada	43	4	47	6	2001
Japão	10	6	80	4	1990

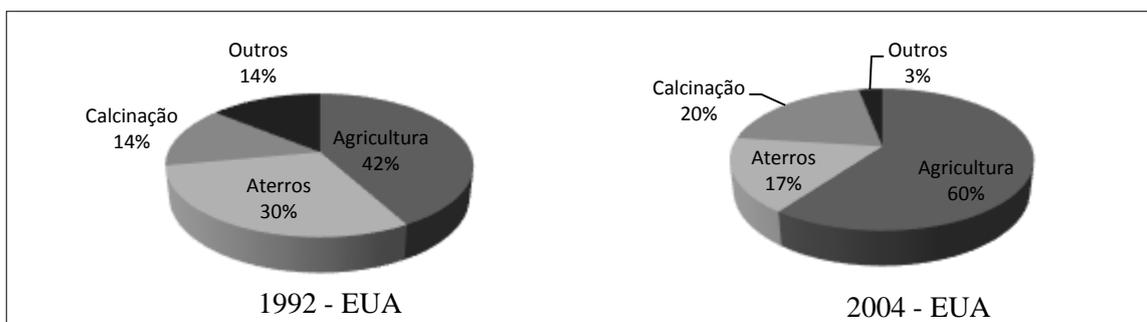


Figura 2.2 Disposição final dos lodos de ETE nos Estados Unidos 1992 - 2004. (Modificado - Geyer, 2001 & Moss *et al.*, 2013).

A calcinação tem aumentando nos últimos anos nos países da União Europeia, Japão e Estados Unidos. Presume-se que países com pouca extensão territorial tendem a utilizar alternativas diferentes da disposição no solo, como na agricultura e na construção de aterros (Geyer, 2001).

Os registros da informação estatística da produção e disposição dos lodos de ETA nos Estados Unidos são inadequados devido ao fato dos valores apresentados pela Agência de Proteção do Ambiente (EPA) não registrar valores reais e sim estimativos. A estimativa de dados baseia-se no tamanho da população, crescimento populacional e dados estimativos de produção de resíduos de lodos de ETE por uma pessoa. Porém torna-se um problema a falta de conhecimento da quantidade e qualidade real dos nutrientes presentes nos resíduos, além da falta de controle e registro por algumas estações. Para o ano 1900 se tinha uma produção de lodo seco de aproximadamente 5,60 milhões de toneladas; para o ano 1999 seu crescimento foi projetado para 6,90 milhões e para o ano 2004 se estimou em 7,18 milhões. Dados reais de Inglaterra apresentam variações significativas no ano 2011 (Moss *et al.*, 2013).

2.3.3 – Disposição dos lodos de ETA e ETE no Distrito Federal, Brasil

O Brasil tem aproximadamente 7500 ETAs. Presume-se que 70% da quantidade do lodo gerado nestas ETAs seja lançado diretamente nos corpos d'água mais próximos, produzindo grandes impactos ambientais, tais como: aumento de sólidos, assoreamento, turbidez, concentração de alumínio, liberação de odores, toxicidade e impacto visual (Barroso *et al.*, 1999). A CAESB conta com cinco sistemas de produção de água constituídos de captações superficiais e subterrâneas com capacidade total de produzir 9565 l/s, abastecendo 98,1% da população do Distrito Federal. O nível de atendimento da coleta de esgotos é de 82,2% da população, sendo tratados na sua totalidade. As Tabelas 2.5 e 2.6 indicam a produção de lodos de ETA e de ETE nas diferentes estações de tratamento do Distrito Federal, assim como o processo de tratamento e sua disposição.

Tabela 2.5 Produção de água e lodos de ETA – CAESB 2012

ETA	Vazão (l/s)		Tratamento	Lodo- de ETA (Tn).		Concentração de sólidos (%)	Disposição final
	Projeto	Atual		Mensal	Anual		
Brazlândia	165	95	Convencional			----	Rede de Esgoto
Brasília	2800	1807	Flotação com filtração direta	228,3	2740	18,61	Recuperação de áreas degradadas Ceilândia
Rio Descoberto	6000	4451	Filtração direta	120,0	1440	24,88	
Pipiripau	640	326	Convencional compacta	27,5	330	31,11	Recuperação de áreas - Planaltina, RAVI-DF.
Engenho das Lajes	7	3	Convencional			----	Desenvolvimento de projetos para definição do tratamento a ser efetuado,
Paranoá	36	29	Convencional			----	já que são ETAs de
Lago Sul	190	89	Filtração direta			----	pequeno porte e que
Planaltina	60	33	Convencional			----	representam 3% da vazão total produzida.
Vale do Amanhecer	54	29	Convencional			----	

Segundo os dados da Tabela 2.5, observa-se que 96% do lodo produzido são dispostos para a recuperação de áreas degradadas, 3% são armazenados enquanto se efetuam estudos e projetos de disposição e, 1% é descarregado na rede de Esgotos.

Tabela 2.6 Produção e disposição de lodos de ETE – CAESB 2012

ETE	Vazão (l/s)		Tratamento	Lodo de ETE(Tn.)	Disposição final
	Projeto	Média Atual			
Alagado	154	76	Reator anaeróbio de fluxo ascendente, Lagoa de alta taxa, Escoamento superficial e Polimento final.	----	Não desidrata lodo
Brasília Norte	911	479	Remoção Biológica de nutrientes, Polimento final (lodos ativados a nível terciário).	24399	Utilização atual em recuperação de áreas degradadas
Brasília Sul	1500	1193	Remoção Biológica de nutrientes Polimento final (lodos ativados a nível terciário).	61150	Utilização atual em recuperação de áreas degradadas
Brazlândia	86	41	Lagoa anaeróbia e facultativa	0	Não desidrata lodo
Gama	328	197	Reator anaeróbio de fluxo ascendente, biológicos e Clarificador.	9397	Secagem e armazenamento para uso em PRADs
Melchior	1469	889	Reator anaeróbio de fluxo ascendente Lagoa de alta taxa	14914	Secagem e armazenamento para uso em PRADs
Paranoá	112	63	Reator anaeróbio de fluxo ascendente, Conjunto de tanques de aeração e Clarificação com polimento final.	744	Secagem e armazenamento para uso em PRADs
Planaltina	256	98	Reator anaeróbio de fluxo ascendente, Lagoa facultativa e de maturação.	0	Não desidrata lodo
Recanto das Emas	320	138	Reator anaeróbio de fluxo ascendente, aerado e Lagoa aerada facultativa.	8026	Secagem e armazenamento para uso em PRADs
Riacho Fundo	94	48	Lodos Ativados por batelada a nível terciário.	592,58	Envio para a ETE Melchior para uso em PRADs
Samambaia	284	261	Reator anaeróbio de fluxo ascendente Lagoa facultativa, de alta taxa e polimento e Polimento final.	0	Não desidrata lodo
Santa Maria	154	42	Reator anaeróbio de fluxo ascendente, Lagoa de alta taxa, Escoamento superficial e Polimento final	0	Não desidrata lodo
São Sebastião	226	121	Reator anaeróbio de fluxo ascendente Escoamento superficial e Lagoa de maturação	0	Não desidrata lodo
Sobradinho	86	98	Lodos ativados e tratamento químico		
Torto	10	1	Reator anaeróbio de fluxo ascendente compartimentado e Processo de infiltração dos efluentes no solo	0	Não desidrata lodo
Vale do Amanhecer	35	14	Reator anaeróbio de fluxo ascendente Lagoa facultativa e de maturação	0	Não desidrata lodo

Segundo os dados da Tabela 2.6 observa-se que o 82.6% dos resíduos lodos de ETE são desidratados, diminuindo a umidade em 85% a fim de serem utilizados ou dispostos como materiais sólidos. Os lodos desidratados são armazenados para utilização em recuperação de áreas degradadas de cascalheiras localizadas em Planaltina e Ceilândia.

2.3.4 – Perspectivas das disposições e tratamentos futuros

A calcinação e a disposição dos lodos de ETE na agricultura parecem ser as técnicas a serem mais utilizadas pelos países Europeus nos próximos anos. O reforço dessas práticas provavelmente resultará na adoção de novas tecnologias aumentando a remoção de agentes patogênicos e controle de odores, para garantir a proteção ambiental e os cuidados com a saúde humana e animal (Kelessidis *et al.*, 2012).

Estudos do grupo de pesquisa HIT do Japão em busca de alternativas aos combustíveis fósseis, desenvolvem pesquisas sobre a utilização dos lodos de Esgoto para combustíveis de automóveis utilizando tecnologias capazes de converter os lodos em gases com alta concentração de hidrogênio. Os ensaios até hoje foram realizados em pequena escala e se espera ter a primeira estação em grande escala para o ano 2015. O método propõe menores custos e maior preservação ambiental em relação aos métodos tradicionais de extração de gás natural (Esteadman, 2012).

A Agência de Obras Pública do Japão comunicou em 2013 que na cidade de Fukushima instalou-se um dispositivo capaz de reduzir o volume de lodo de esgoto por meio de radioatividade. A tecnologia é capaz de aquecer o lodo até 450 °C e reduzir cerca de um quinto do seu volume inicial. O dispositivo utilizado em Fukushima é capaz de tratar 30 toneladas por dia.

2.4 – Calcinações dos lodos de ETA e de ETE

A calcinação é o processo que utiliza a queima do lodo para reduzir significativamente o seu volume, formando uma composição que pode ser nociva pela concentração de metais pesados. Alguns autores consideram a calcinação como uma forma de disposição dos resíduos no ar, enquanto outros consideram um tratamento intermediário, como parte do processo de desidratação e eliminação da matéria orgânica (Geyer, 2001).

A elevada produção de lodos e a preocupação ambiental têm levado os pesquisadores do mundo a buscarem formas adequadas de gestão, uma delas é a queima e aproveitamento das cinzas na construção civil (Geyer, 2001 e Pereira, 2012). A calcinação é o processo de combustão completa da matéria orgânica até sua transformação em cinza, pelo fato de ocorrer oxidação química na

presença de oxigênio. Esta tecnologia é adotada no tratamento de resíduos sólidos urbanos, industriais, hospitalares, entre outros (Fontes, 2008).

Quando se realiza a calcinação junto com outros resíduos urbanos desidratados e não passíveis de reciclagem esse tratamento pode ser uma solução adequada por apresentar alto poder calorífico aproveitável em outras aplicações (Naime, 2012).

Bresters *et al.* (1997) citam como principais vantagens da calcinação a valorização energética dos lodos, minimização de odores, e confiabilidade do sistema. Entretanto, apresenta desvantagens como altos custos de aquisição, operação e transporte.

A calcinação é um processo que promove maior redução dos lodos, todavia acaba gerando cinzas e gases como: óxidos de nitrogênio, furanos, dioxinas e gases ácidos. Na gestão dos lodos atualmente se realizam estudos sobre sua utilização como fonte de energia (Lee, *et al.* 2011).

Devido às emissões gasosas geradas no processo de calcinação e para avaliar o impacto ambiental pela poluição do ar, Souza *et al.* (2008) estudaram as diferentes concentrações de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) que são geradas durante a queima do lodo de ETA a temperaturas de 200 e 600 °C. O monóxido de carbono, considerado um gás leve, é tóxico e causa poluição do ar e efeitos severos à saúde humana. O dióxido de carbono é, na atualidade, uma grande preocupação por contribuir para a poluição do ar e para o efeito estufa. Este último ocorre quando a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre é absorvida por determinados gases presentes na atmosfera, promovendo a retenção do calor (Santos, 2000). O metano é um gás mais nocivo quanto ao efeito estufa do que o dióxido de carbono (Souza *et al.*, 2008).

Existem processos que geram problemas ambientais maiores que a calcinação de lodos, tais como a queima de combustíveis ou derivados do petróleo. A calcinação com emissões controladas causa menos problemas ambientais que a disposição no solo, não justificando limitações como às estabelecidas para os outros processos supracitados (Geyer, 2001). Quando as cinzas são incorporadas nas matrizes dos materiais de construção na engenharia civil é considerada uma forma segura de disposição final (Geyer, 2001).

A principal disposição final dos resíduos de lodos de ETE no Brasil é em aterros sanitários devido a sua vasta extensão territorial, embora contribua para problemas ambientais. O Japão, que apresenta extensão territorial quase 23 vezes menor que o Brasil, utiliza a calcinação como destino final do lodo em virtude da limitação de espaço. De acordo com Pereira (2012) 80% da produção de

lodo de ETE do Japão é incinerada e as cinzas resultantes do processo estão sendo aproveitadas como co-incineradores em fornos de cimento ou termoelétricas e também em misturas com cimento, prática também adotada nos países da Europa (Feitosa, 2012).

As cinzas dos lodos de ETA são consideradas como um material poli plástico feito pela cristalização de minerais numa fase vítrea. As propriedades das cinzas dependem do tipo de calcinação e dos produtos químicos introduzidos no tratamento da água bruta. Uma prática sustentável para a preservação do meio ambiente é o uso das cinzas de lodos de ETA na fabricação de cimento para concreto. A ideia despertou grande interesse nos Estados Unidos devido aos componentes minerais presentes na sua composição, principalmente sílica, óxidos de cálcio e alumínio. Estes proporcionam características similares às cinzas pozolânicas, permitindo um elevado poder cimentante capaz de substituir o cimento Portland (Yusuf *et al.*, 2012).

2.4.1 – Temperaturas de calcinação de lodos para aplicações na engenharia civil

A matéria orgânica é composta por organismos vivos, resíduos de plantas e animais pouco ou muito decompostos, que varia consideravelmente em estabilidade, susceptibilidade ou estágio de alteração (Silva *et al.*, 1999). Considera-se que a matéria orgânica pode ser destruída por destilação com temperaturas compreendidas entre 200 ° C e 300 ° C., carbonizada entre 300 ° C e 400 ° C e consumida em temperaturas maiores que 450 ° C (Spagnollo *et al.*, 2002).

Na literatura há diferentes pesquisas que envolvem o uso de cinzas provenientes da calcinação de materiais residuais aplicados em misturas com os materiais convencionais usados na engenharia civil, principalmente concretos e materiais para pavimentação, com o objetivo de melhorar suas características.

Fontes (2003) realizou análises térmicas e gravimétricas a fim de determinar a temperatura ótima de queima para avaliar a potencialidade de aplicação da cinza de lodos de esgoto como material suplementar na produção de concretos com cimento Portland. Os estudos revelaram que a cinza incinerada a 450 ° C não apresenta matéria orgânica, a 550 ° C, a mesma apresenta-se estabilizada e a 650 ° C ocorre transformação exotérmica.

Behak (2007) calcinou casca de arroz em uma faixa de temperatura controlada de 650 ° C a 800 ° C a fim de ser misturada com cal e utilizada na estabilização de um solo Uruguaio destinado à execução da sub-base de um pavimento. Os resultados indicaram maior valor de módulo de deformabilidade e resistência à compressão simples, fato atribuído ao incremento da atividade pozolânica da cinza por apresentar estrutura amorfa e estabilização química.

Tay et al. (1994 a) e Tay et al. (2002 b) *apud* Fontes (2008) estudaram a utilização de cinzas de lodo de ETE misturadas em proporção em peso igual com cal hidratada (50% Lodo de ETE e 50% Cal hidratada) sendo o lodo calcinado a uma temperatura de queima de 1000 °C durante 4 horas para confecção de cimento biológico para a produção de argamassas. Os autores concluíram que a substituição de 30% de cimento Portland por cimento biológico aumentou a resistência à compressão simples.

O rejeito da produção do processamento de arroz na Colômbia ocupa grandes espaços gerando impactos visuais e ambientais. Devido a isto, Góngora *et al.* (2007) efetuaram a dosagem de misturas betuminosas com adição do resíduo de casca de arroz incinerada a 500 °C como material filer. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa foram avaliados os parâmetros de estabilidade, fluência e volume de vazios a fim de determinar o teor ótimo de asfalto de quatro tipos de misturas, utilizando teores de 25, 50, 75 e 100% da faixa do filer granulométrico. A alternativa da mistura foi satisfatória para substituições do material filer em até 50%, conseguindo melhorar sua estabilidade e resistência à aplicação das cargas produzidas pelo tráfego.

Guedes (2012) realizou análises termogravimétricas de resíduos lodos da indústria têxtil a fim de incorpora-los na fabricação de argamassas. Os estudos mostram três etapas importantes. Na primeira etapa ocorre uma perda de massa de 44,3% numa faixa de temperatura entre 28° C e 76 °C, devido ao excesso de água presente no lodo. Na segunda etapa ocorre uma perda de massa de 16% numa faixa de temperatura entre 236 ° C e 307 °C, a qual pode ser atribuída à presença de matéria orgânica e água de constituição. Finalmente, na terceira etapa aconteceu uma estabilização da perda de massa numa temperatura superior a 500 °C, fato que pode ser atribuído à eliminação da matéria orgânica.

2.5 - Misturas betuminosas

Na pavimentação os resíduos tóxicos podem ser misturados com materiais que tendem a criar uma matriz sólida altamente impermeável, capturando ou fixando os resíduos dentro desta estrutura (Lucena, 2012).

Diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas objetivando encontrar novos materiais para a construção rodoviária e que apresentem desempenho satisfatório e custos relativamente baixos. Estes estudos têm por objetivo a melhoria da qualidade dos revestimentos asfálticos de modo a proporcionar benefícios de conforto e segurança aos usuários possibilitando uma redução dos custos operacionais dos veículos e contribuindo para o progresso socioeconômico do país. (Bock *et al.*, 2009).

Misturas betuminosas são materiais heterogêneos quanto à natureza de seus componentes sendo geralmente compostos pela mistura de agregados pétreos recobertos por meio de um ligante asfáltico. Estas misturas são geralmente usadas no revestimento passando a suportar diretamente as cargas dos veículos e a ação climática. O revestimento asfáltico deve fornecer os requisitos hidráulicos e mecânicos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego projetado (Bernucci *et al.*, 2008).

2.5.1 – Tipos de misturas asfálticas

Os revestimentos asfálticos podem ser feitos por mistura dos componentes ou por penetração do asfalto no agregado. Os revestimentos realizados por misturas são fabricadas numa usina estacionaria, onde são misturados todos os materiais em conjunto e transportados para a pista, onde é colocada com os equipamentos necessários. Os revestimentos por penetração são executados em pista e pode ser utilizado como revestimentos ou camadas intermediarias, onde se dispõem os materiais em camadas separadas.

De acordo com o tipo de ligante asfáltico pode ser preparado a quente com uso de cimento asfáltico de petróleo CAP ou a frio utilizando emulsão asfálticas de petróleo. Bernucci *et al.* (2008) afirmam que conforme à distribuição granulométrica, as misturas asfálticas a quente podem ser consideradas como densas, abertas, contínuas e descontínuas.

2.5.2 – Ligantes Asfálticos

O ligante asfáltico é um material de construção utilizado principalmente na pavimentação e constituído principalmente de betume e outros elementos químicos em pequena proporção como: oxigênio, nitrogênio e enxofre. O betume é uma mistura de hidrocarbonetos solúveis no bissulfeto de sódio e carbono, constituídos de moléculas classificadas em quatro grupos: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos. Os asfaltenos são partículas coloidais envolvidas por resinas que impedem sua floculação e estão dispersas em óleos maltenos (Alencar *et al.*, 2006 e Bernucci *et al.*, 2008).

Os asfaltenos também são encarregados de proporcionar a dureza do asfalto, conformados por hidrocarbonetos de maior peso molecular, que a maior temperatura apresenta maior viscosidade. Os maltenos são compostos por resinas e óleos que aportam características, tais como: aderência aos agregados, trabalhabilidade e consistência. Os óleos têm baixa viscosidade e lubrificantes que permitem o movimento das micelas formadas a partir dos asfaltenos, assim como também ajudam a manter em suspensão as resinas e os asfaltenos (Susunaga, 2012).

A consistência dos ligantes asfálticos pode entender-se como o comportamento do fluxo dos fluidos. A temperaturas baixas o asfalto se comporta como sólido rígido, enquanto que em

temperaturas médias e altas, o asfalto se comporta como um fluido viscoso e líquido respectivamente. A consistência do asfalto decresce à medida que aumenta a temperatura (Eiler, 2009). Razão pela qual os ligantes asfálticos são materiais viscoelásticos que podem apresentar comportamento elástico ou viscoso, segundo as condições de temperatura e tempo (Alencar *et al.*, 2006).

O envelhecimento do ligante asfáltico ocorre mediante os mecanismos de oxidação, endurecimento exsudativo, endurecimento físico e perda de voláteis. A oxidação é a interação do ar com o ligante ocorrida no processo de produção e aplicação. O endurecimento exsudativo é a mitigação de óleos do ligante para o agregado mineral. O endurecimento físico ocorre pela exposição normal do asfalto à temperatura ambiente devido à acomodação de moléculas e cristalização de parafinas do ligante. Por último, a perda de voláteis é baixa no processo de envelhecimento (Lima *et al.*, 2006).

2.5.3 – Ligantes Modificados

Devido às condições climáticas e ação do tráfego, são necessárias modificações das propriedades dos asfaltos para contribuir para o desempenho das misturas. Os asfaltos são principalmente modificados por polímeros que apresentem maior estabilização à estocagem. A quantidade adicionada de polímero depende das propriedades finais desejadas como seu grau de melhoria e seu custo (Alencar *et al.*, 2006), assim como também das necessidades do local onde será aplicado. Pesquisas recentes apresentam resultados da utilização de materiais como fibras e borrachas para a modificação do asfalto (Bernucci *et al.*, 2008).

Os principais requisitos dos materiais modificadores do asfalto é resistir à degradação nas temperaturas usuais de estocagem e compactação, assim como a apresentar a capacidade de misturar-se adequadamente ao asfalto, melhorando suas características de viscosidade e garantindo sua trabalhabilidade (Bernucci *et al.*, 2008). Outro requisito do ligante modificado são propriedades como maior coesão, melhor adesão aos agregados e boa resistência ao envelhecimento, refletindo em maior resistência a fadiga e a deformação permanente (Momm *et al.*, 2004).

A avaliação da consistência nos ligantes modificados é definida como a medida da suscetibilidade à mudança de temperatura e resistência ao fluxo, que afeta diretamente a capacidade e resistência à deformação da mistura (Yero *et al.*, 2011). Estudos de Soares *et al.* (2000) indicam que a consistência dos ligantes asfálticos influenciam diretamente na densidade dos mesmos. Deste modo estabelecem uma relação constante entre a taxa de variação da densidade dos ligantes e a taxa de variação do teor ótimo de asfalto em misturas CBUQ, indicando que o teor ótimo de ligante asfáltico depende da consistência. Os estudos foram feitos com ligantes de diferentes viscosidades (CAP 30/45, 50/60 e 85/100) e mantendo constante o tipo e faixa granulométrica dos agregados.

O principal problema apresentado nos ligantes modificados é a perda de adesão entre agregado e ligante, a qual pode acontecer pela incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do material betuminoso, a ocorrência de umidade e a presença de finos prejudiciais na superfície do agregado (Oliveira Filho *et al.*, 2006).

A cal hidratada é um material modificador utilizado para aumentar a adesão entre o ligante e a superfície dos agregados. Estudos indicam que a adição de cal reduz o envelhecimento pela absorção dos produtos de oxidação polares, e melhoram a adesividade (Alencar *et al.*, 2006).

Hartmann *et al.* (2008) avaliaram a influência da adição de diferentes teores e tipos de finos nas características do ligante asfáltico CAP 50/70. Foram realizados ensaios de penetração, ponto de amolecimento, massa específica, ponto de fulgor e viscosidade rotacional a fim de verificar a alteração nas propriedades do ligante pela influência dos materiais finos. Os autores obtiveram em todos os casos valores de penetração menor e maior ponto de amolecimento do que a mistura de referência. Isto ocorre devido a influência do aumento do teor de filer na mistura, modificando a sua consistência com as adições. Os resultados de massa específica e a viscosidade brookfield tiveram aumento proporcional à adição de filer. A influência dos fíleres nas propriedades reológicas do ligante asfáltico foi, em ordem decrescente, cal hidratada, cal extra, cimento Portland e pó de pedra.

2.5.4 - Metodologias de dosagens

O revestimento do pavimento tem que ser projetado por meio de ensaios que determinem o teor ótimo de asfalto a fim de garantir os parâmetros das características mecânicas, tais como: estabilidade, fluência, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e adesividade. A metodologia de dosagem é considerada primordial na vida útil do pavimento, uma vez que a falta de ligante produz misturas propensas a desagregação e fadiga, enquanto o excesso de ligante gera misturas susceptíveis a exsudação e afundamento de trilha de roda.

2.5.4.1 - Metodologia Marshall

A dosagem mais utilizada mundialmente é a metodologia Marshall desenvolvida pelo engenheiro Bruce Marshall no ano 1940. O método foi desenvolvido para definir o teor de ligante asfáltico nos revestimentos necessário para resistir às cargas de roda oriundas de pressão de pneus das aeronaves militares na segunda guerra mundial. Os principais passos para a aplicação da metodologia são:

1. caracterização dos materiais - massas específicas reais dos agregados e cimento asfáltico de petróleo (CAP).

2. determinação da faixa granulométrica segundo o tipo de mistura a realizar.
3. enquadramento do agregado na faixa granulométrica escolhida.
4. determinação das temperaturas de mistura e compactação segundo a curva de viscosidade do ligante asfáltico escolhido (viscosidade Saybolt – Furol).
5. ajuste percentual em massa dos agregados em função do teor de asfalto.
6. determinação da massa específica máxima (DMT) correspondente a cada porcentagem de asfalto.
7. fabricação de corpos de prova com adoção de teores de asfalto segundo a experiência do projetista (T, em %). Geralmente é recomendado realizar grupos de teor de asfalto acima e abaixo do valor estabelecido ($T \pm 0,5\%$ e $T \pm 1,0$). Para cada teor de asfalto é recomendado fazer 3 corpos de prova como testemunhos.
8. determinação dos parâmetros dos corpos de prova tais como altura média, massa seca submersa e na condição saturada superficialmente seca, para obter a massa específica aparente (d), e pela comparação com a massa específica máxima (DMT) obter as relações volumétricas típicas da dosagem.
9. as relações volumétricas típicas são: Volume de vazio (Vv), Vazios com betume (VCB), Vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazios (RBV).
10. determinação da Estabilidade (N) e fluência (mm), mediante uma prensa tipo Marshall, numa velocidade de 0,8 mm/seg. Os corpos de prova são submersos em banho-maria por um tempo entre 30 e 40 minutos numa temperatura de 60 °C antes do ensaio.
11. determinação do teor de projeto de ligante asfáltico.

Embora haja novos métodos para dosagem de misturas betuminosas, a dosagem Marshall ainda é a mais utilizada no Brasil em virtude das normas do DNIT. A norma DNIT-ME 043/95 regula a metodologia Marshall, com base na ASTM e os procedimentos do Instituto de Asfalto norte – Americano, embora não considere as últimas mudanças com respeito à absorção de ligante pelos agregados e o uso da fórmula para o cálculo da DMT (Bernucci *et al.*, 2008).

2.5.4.2 - Metodologia superpave

Entre os anos 1987 e 1993 surgiu a metodologia SHPR *Strategic Highway Research Program* – Superpave que corrigiu o efeito da compactação do método Marshall. O problema da metodologia anterior é que esta originava misturas com excesso de ligante asfáltico, provocando exsudação e originando deformações prematuras.

2.5.4.3 - Metodologia Hveem

O método de projeto de misturas Hveem foi desenvolvido no ano 1930 pelo engenheiro Francisco Hveem na divisão de Estradas da Califórnia e é utilizado principalmente pelos estados ocidentais dos Estados Unidos. Os principais procedimentos para a aplicação são recomendados pelo Instituto de Asfaltos, descritos no manual “Métodos de projeto de mistura de Asfálticas a quente” (Tia, 2005).

2.5.4.4 – Considerações sobre as Metodologias de Dosagem

A metodologia Marshall é muito utilizada no Brasil e segue os procedimentos da norma ASTM e do Instituto de Asfalto norte-americano. Entretanto, não apresenta as últimas atualizações sobre a consideração da absorção de ligante pelos agregados e o uso da massa seca com superfície saturada, interferindo na determinação das relações volumétricas (Bernucci *et al.*, 2008).

A maior diferença entre o método Marshall e as demais é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros). Outra diferença é a forma de escolha da granulometria dos agregados.

O método Hveem foi desenvolvido com sucesso para projetar misturas betuminosas, devido ao índice S Hveem que é um parâmetro que avalia diretamente a resistência da mistura. A desvantagem do método é que o estabilômetro Hveem é um equipamento empírico e não é amplamente conhecido e utilizado (Tia, 2005).

2.5.4.5 - Determinação do teor de projeto do ligante asfáltico

Existem vários métodos para determinar o teor ótimo de asfalto num concreto betuminoso. A norma Brasileira do DNIT 031/2006 recomenda valores do volume de vazios entre 3% a 5% e a relação Betume/Vazios entre 65% a 72% para a faixa A, enquanto para as faixas B e C, se recomenda valores de 3% a 5 % no volume de vazios e de 75% a 82% na relação Betume/Vazios e para todas as faixas de agregados uma estabilidade mínima de 500 kgf.

Para camadas de rolamento, as especificações DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S.A. do estado de São Paulo recomenda um volume de vazio de 4%. Existe um método que avalia a média dos parâmetros de estabilidade Marshall, massa específica aparente e volume de vazios. Bernucci *et al.*, 2008 propõem um método gráfico que considera dois parâmetros volumétricos, volume de vazios e relação Betume/Vazios correspondentes aos grupos de teor de asfalto. O método consiste em fazer linhas de tendência dos parâmetros e linhas de limites específicos, o valor é calculado a partir da interseção das linhas de tendência com os valores das especificações, selecionando a média dos teores centrais, como se mostra na Figura 2.4 (Bernucci *et al.*, 2008).

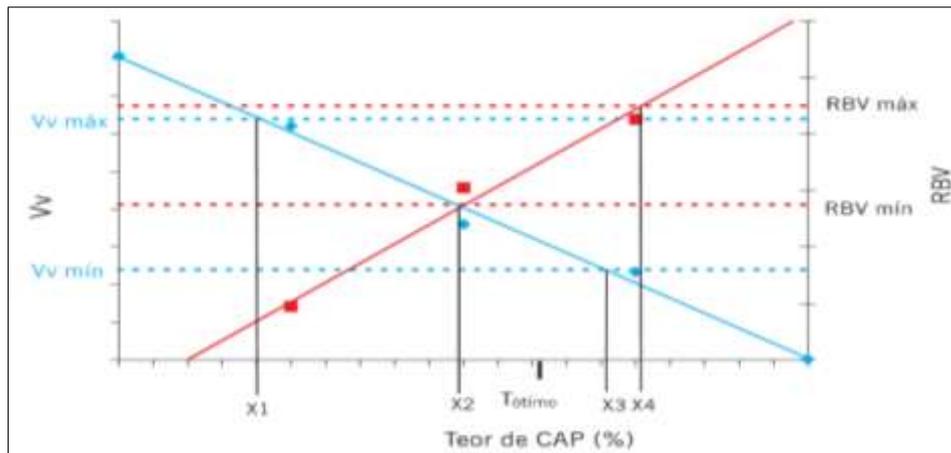


Figura 2.3 Determinação do teor ótimo de ligante asfáltico (Bernucci et al., 2008).

2.6 – Material Filer.

A norma DNER-EM 367/97 define o material de enchimento ou filer como o material inerte finamente dividido passante no mínimo 65% pela peneira N° 200 (0,075 mm). Este tem que apresentar homogeneidade e estar livre de grumos. Os materiais mais utilizados segundo a norma são: cimento Portland, pó calcário, cal hidratada, cinza volante ou outro material convenientemente preparado para atender a granulometria preconizada pela norma.

Segundo Bardini (2013) as principais funções do material filer são:

- atuar como material de enchimento contribuindo para preencher os vazios da mistura;
- fornecer pontos de contato entre os agregados, originando uma mistura densa;
- atuar como material ativo do mastique pela interação física e química, modificando sua trabalhabilidade e resistência à água e ao envelhecimento;
- aumentar a estabilidade da mistura mediante o aumento da viscosidade;
- modificar a densidade.

O teor de material filer na mistura densa tem que ser suficiente para melhorar sua graduação e trabalhabilidade e reduzir os vazios do esqueleto mineral, resultando misturas mais densas, menos permeáveis e de textura fina, porém o excesso de filer reduz a flexibilidade e durabilidade da mistura.

Os principais fatores que influenciam no comportamento das misturas segundo Bardini (2013), são:

- granulometria;
- espessura do ligante asfáltico;
- proporção filer/asfalto;
- área superficial e textura;
- composição mineralógica;
- atividade físico-química.

O ligante asfáltico ao envolver o filer suficientemente fino (menor que 20 μm) forma o mastique. Este se apresenta na forma de uma fina película onde os grãos de filer criam pontos de contato entre as partículas do esqueleto pétreo. Quando o filer apresenta granulometria grossa, o mastique vai preencher os vazios do esqueleto mineral, mas pode ocorrer sedimentação dos grãos, tornando a mistura não homogênea. As especificações Superpave de dosagem de misturas asfálticas recomendam que a razão em peso entre o filer mineral e o ligante asfáltico se situe entre 0,6 e 1,2 para todo tipo de mistura (Cominsky *et al.*, 1994).

Segundo a natureza, o filer pode ser natural quando é constituído de partículas minerais que provêm dos agregados utilizados nas misturas asfálticas, e considerar-se filer artificial quando provêm de outras fontes, por exemplo, pó calcário, cal hidratada, cimento Portland ou outros materiais

Cavalcante *et al.* (2001) avaliaram o efeito do tipo e do teor de filer nas propriedades mecânicas do CBUQ utilizando seis tipos de material filer: areia de campo; pó de pedra; pó calcário; cal hidratada; carbonato de magnésio e cimento Portland. Pelos resultados dos ensaios mecânicos observou-se aumento dos valores de resistência à tração estática, indicando que as partículas dos fileres uniram-se ao ligante, aumentando a sua consistência e conseqüentemente a rigidez e a resistência da mistura.

2.7 - Utilizações da cal em misturas asfálticas

A cal é um produto importante para a sociedade por seus múltiplos usos, principalmente na engenharia civil. Ela é um composto sólido conhecido como óxido de cálcio resultante da decomposição térmica de calcário a 900 °C. Segundo Bock (2012), os tipos de cal são:

- cal virgem - também chamada de cal viva resulta da calcinação de pedras calcárias sem a presença de argila ou com esta em quantidades muito pequenas. Segundo sua pureza em óxidos de cálcio e magnésio, ela é classificada como Calcítica, Magnesiana ou Dolomítica sendo que o teor de óxido de cálcio na cal diminui nessa ordem (Bock, 2012).
- cal hidratada - resulta da reação da cal virgem com a água por meio da combinação química dos óxidos anidros de cálcio com água. De modo semelhante à cal virgem, dependendo da quantidade de hidróxido de cálcio ela pode se classificar como Calcítica, Magnesiana ou Dolomítica (Book, 2012).

A incorporação de cal em misturas asfálticas, tem a função de melhorar a adesividade agregado-ligante e enrijecer o ligante asfáltico. Deste modo, a cal contribui para retardar o trincamento do revestimento e altera reduzindo o efeito da oxidação do ligante, porém, reduz o envelhecimento.

Bock *et al.* (2009) avaliaram em laboratório o comportamento mecânico e a adesão/coesão de cinco tipos de misturas betuminosas adicionando a cal de diferentes maneiras: sem cal como material

de referência; cal como material filer; mistura de cal ao agregado graúdo seco; mistura de cal ao agregado graúdo úmido e mistura de cal sob a forma de calda no agregado graúdo, substituindo 1% do peso total de agregados.

Os autores observaram nas cinco amostras em relação à amostra de referência (sem cal) um conteúdo de ligante asfáltico menor. Os resultados dos ensaios de resistência à tração (Rt) apresentaram-se praticamente inalterado. No ensaio do módulo de ruptura as amostras com adição de cal tiveram menor resistência, com misturas mais elásticas. Com respeito à perda de massa, todas as misturas com adição de cal apresentaram perda maior devido ao maior poder cimentante do ligante asfáltico da amostra de referência. Todas as amostras apresentaram desempenho satisfatório enquanto à característica de adesividade.

Lutf *et al.* (2008) realizaram experimentos a fim de avaliar o comportamento mecânico do Concreto Asfáltico com incorporação de cal hidratada em forma de filer objetivando reduzir o dano devido à umidade nos pavimentos flexíveis. A incorporação da cal foi feita de duas formas, seca e lama, utilizando-se diferentes proporções da relação (cal/água), substituindo 1% do peso total dos agregados. Nos dois tipos de misturas observou-se o aumento do poder ligante na interface CAP-Agregado, melhorando as características de adesividade e mecânicas tais como, deformação permanente e razão de resistência à tração.

Boeira (2011) realizou estudos experimentais do desempenho de misturas asfálticas com diferentes tipos e teores de cal, a fim de avaliar o comportamento mecânico e a adesividade em um concreto asfáltico convencional. O autor utilizou cal dolomítica e calcítica incorporadas na forma seca sobre o agregado graúdo seco, substituindo 1% e 2% do peso total dos agregados. A adição proporcionou aumentos significativos do módulo de resiliência e da resistência à tração.

Bock (2012), a fim de avaliar a influência da cal nas propriedades mecânicas do Concreto Asfáltico, substituiu porcentagens (1% e 2%) do peso total dos agregados por cal calcítica e dolomítica utilizando dois tipos de ligantes asfálticos (convencional e polimerizado). Os resultados indicaram maiores valores de módulo de resiliência e resistência à tração. Na análise da influência da cal no envelhecimento de ligantes (RTFOT) observaram-se menores variações de massa e de viscosidade após do ensaio quando de sua adição.

No Brasil, como forma de melhorar a adesividade nas misturas asfálticas, realiza-se geralmente a substituição parcial ou total do filer mineral da granulometria por cal. Rebouças (2011) realizou corpos de prova de CBUQ substituindo a fração filer por outros tipos de materiais tais como: cal, cimento e pó de pedra. O autor obteve maiores valores de resistência à tração e desgaste cântabro, sendo a resistência à tração maior para a cal, e o desgaste cântabro menor para o cimento.

2.8 - Avaliações de propriedades das misturas betuminosas

Os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos buscam compatibilizar as ações solicitantes (tráfego, fatores ambientais, parâmetros de deformabilidade dos materiais) com a capacidade portante dos materiais (vida de fadiga e afundamento de trilha de roda) a fim de prever o desempenho ao longo da vida útil do pavimento. Os ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas tem por objetivo simular as condições reais do tráfego e permitem caracterizar mecanicamente o comportamento das misturas betuminosas (Junior, 2008).

Os principais defeitos estruturais dos pavimentos asfálticos são devidos às deformações permanentes e trincas por fadiga. As deformações permanentes acontecem geralmente no início da vida útil do pavimento devido a cargas elevadas e às altas temperaturas. Enquanto que as trincas por fadiga aparecem pelo envelhecimento do asfalto, devido às cargas cíclicas e à qualidade dos materiais (Bardini, 2013).

Segundo Bernucci *et al.* 2008, os principais ensaios de caracterização mecânica são:

- ensaios convencionais - os ensaios de estabilidade e de fluência Marshall, determinam a resistência às deformações sobre o efeito da aplicação de cargas;
- ensaios de módulos - os ensaios de módulo de resiliência e módulo complexo (módulo dinâmico) são utilizados para conhecer a relação tensão-deformação dos materiais asfálticos e determinar a rigidez dos materiais;
- ensaios de ruptura - os ensaios de resistência à tração indireta e vida de fadiga, levam o material ao estado de ruptura através da aplicação de carregamentos estáticos e dinâmicos;
- ensaios de deformação permanente – ensaio triaxial com carregamento repetido; ensaio de compressão uniaxial não confinada (creep estático e creep dinâmico); ensaios de simulação do tráfego no laboratório; ensaios de adesividade envolvendo ensaios mecânicos tais como o ensaio Cântabro e o ensaio Lottman que avalia o dano por umidade induzida (original ou modificado). A deformação permanente é um defeito mais comum na pavimentação asfáltica que pode apresentar-se na camada do revestimento, nas subcamadas ou pela combinação dos dois efeitos. A deformação permanente no revestimento acontece pelas combinações do fluxo do material (visco-elástico ou visco-plástico) e do dano neste material, representado pela formação e propagação de trincas. A capacidade de resistir depende da consistência, da distribuição volumétrica da mistura (agregados e ligantes), entre outros. Já nas camadas não asfálticas ela é gerada pela ação do tráfego e por meio de rupturas por cisalhamento do material.

3 – MATERIAIS E METODOLOGIA

Este capítulo destina-se a descrever os materiais, e as metodologias utilizados para: o tratamento térmico dos lodos, a elaboração do concreto asfáltico e a realização dos ensaios de caracterização e estudo do comportamento mecânico. Este estudo divide-se em três partes: a primeira corresponde à caracterização dos materiais; a segunda destinada à avaliação da interação dos lodos com o ligante asfáltico; e a terceira à avaliação das propriedades mecânicas e de adesividade do concreto betuminoso, utilizando ligante modificado com os lodos de ETA e de ETE.

3.1 – MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 – Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa é um Cimento Asfáltico de Petróleo tipo CAP 50/70 produzido na refinaria Gabriel Passos (REGAP), de propriedade da Petrobras e localizada no município de Betim, Minas Gerais. Esse tipo de ligante asfáltico é convencionalmente empregado em obras de pavimentação da cidade de Brasília e do Brasil em geral. A Tabela 3.1 indica os ensaios de qualidade do CAP 50/70 feitos pela Petrobras e fornecidos pela distribuidora.

Tabela 3.1 Certificado de ensaios – PRETROBRAS (Refinaria Gabriel Passos 2013).

CERTIFICADO DE ENSAIOS - PETROBRAS			
Produto: Cimento Asfáltico 50/70			
Característica	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	50 a 70	50	0,1 mm
Ponto de amolecimento	46	49,5	° C
Viscosidade Brookfield SP-21 a 135; 150 e 177 ° C	Min: 57 a 285; 112; 274	66; 176; 350	cP
ROTF Penetração Retida	55 min	72	%
ROTF Aumento do ponto de amolecimento	8 máx.	3,4	° C
ROTF Ductilidade a 25 ° C	20 min	> 150	cm
ROTF Variação em % massa	-0,5 a 0,5	-0,099	%
Ductilidade a 25 ° C	60 min	> 150	cm
Solubilidade n tricloroetileno	99,5 min	100	% Massa
Ponto de fulgor	235	347	° C
Índice de suscetibilidade térmica	-1,5 a 0,7	-1,0	N/A
Densidade Relativa a 20/4° C	----	1,005	N/A
Aquecimento a 177 ° C	----	NESP	N/A

3.1.2 – Lodos de ETA e de ETE

Os *lodos de ETA e ETE* utilizados nessa pesquisa são respectivamente resultado do tratamento de água e esgoto pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB. As amostras foram coletadas da ETA Brasília e da ETE norte no mês de outubro do ano 2012. A ETA

atende o 99% de pessoas com serviços de abastecimento de água e a ETE o 93% com serviços de esgotamento sanitário da população regularmente instalada no Distrito Federal. Na Figura 3.1 encontram-se ilustrados os lodos de ETA e ETE em diferentes condições.



Figura 3.1 (a) Amostra de lodos de ETE na condição seca; (b) Amostra de lodos de ETA na condição úmida; (c) Destorramento dos lodos de ETE.

3.1.3 – Cal hidratada

A Cal hidratada foi utilizada na mistura de referência (denominada convencional) para efeito de comparação com as misturas preparadas com adição de lodos. Neste estudo foi utilizada uma cal calcária produzida no estado de Minas Gerais. Esta escolha fundamentou-se no fato da literatura internacional, especialmente a estadunidense, indicar o emprego de cales com elevados teores de hidróxido de cálcio para a obtenção de melhores resultados quanto às melhorias de adesividade e desempenho das misturas asfálticas (Bock, *et al.*, 2009).

3.1.4 – Agregados

O agregado graúdo e miúdo empregados na fabricação do concreto asfáltico foram definidos de modo a satisfazer a faixa média da granulométrica tipo C da norma (DNIT 2006), destinada para camadas de rolamento densas. Na pesquisa foi utilizada material calcário proveniente da pedreira Briccal Indústria, Comércio e Mineração Ltda., localizada na região do Distrito Federal.

3.2 – ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPIEDADES DOS MATERIAIS

3.2.1 - Tratamentos dos lodos de ETA e de ETE

Primeiramente, as amostras de lodo de ETA e de ETE foram secas ao ar para minimizar a influência dos agentes externos. Para isto, foi realizada uma secagem preliminar durante 15 dias, aproveitando as condições climáticas de altas temperaturas, aproximadamente 28 °C. No estudo

dos resíduos submetidos ao tratamento térmico os lodos secos ao ar foram calcinados em forno tipo mufla nas temperaturas de 200 °C, 300 °C, 500 °C e 800 °C em uma quantidade aproximada de 100 gramas. A calcinação foi realizada por um período de 45 minutos, período no qual o peso se estabilizava. O forno tipo mufla encontra-se na Figura 3.2



Figura 3.2 (a) Secagem ao ar dos lodos ETA; (b) Forno mufla.

3.2.2 – Ensaios físicos para caracterização dos agregados

Os ensaios de caracterização física dos agregados foram realizados para verificar se eles cumpriam os requisitos exigidos na norma (DNIT, 2006) para a posterior utilização no Concreto Betuminoso Usinado a Quente CBUQ. Estes encontram-se detalhados a seguir.

3.2.2.1 – Granulometria

Os ensaios de análise granulométrica (DNIT 1998) foram realizados para os agregados graúdos e miúdos. A norma estabelece o procedimento para encontrar a distribuição dos tamanhos do agregado, por peneiramento manual ou mecânico, a fim de obter a distribuição dos tamanhos, dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados. Os equipamentos utilizados para a obtenção da granulometria encontra-se na Figura 3.3.



Figura 3.3 Equipamento de granulometria: (a) Peneirador mecânico; (b) Peneiras serie ASTM.

3.2.2.2 –Ensaio de Abrasão “Los Angeles”

Para fins de pavimentação os agregados devem resistir à quebra, degradação e desintegração, causadas pela ação do tráfego e o manuseio durante o processo construtivo do revestimento asfáltico. Os agregados devem apresentar características de tenacidade, resistência à abrasão e dureza, que são perfeitamente avaliadas pelo ensaio de abrasão Los Angeles (Bernucci *et al.*, 2008). A norma (DNIT, 1998), determinação da abrasão “Los Angeles” descreve a abrasão como o desgaste sofrido pelo agregado quando este é submetido a ciclos de desgastes na máquina “Los Angeles”. O agregado é submetido a uma carga abrasiva por meio de esferas de aço, a um número de revoluções determinadas. A quantidade de agregado selecionada para o ensaio assim como a carga abrasiva depende da relação entre a granulometria e a graduação mais próxima das apresentadas na Tabela 3.2. A Tabela 3.3 apresenta as composições relativas a cada graduação especificada em norma.

Tabela 3.2 Carga abrasiva para o ensaio de abrasão “Los Angeles” (DNIT, 1998).

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

Tabela 3.3 Graduação para ensaio abrasão “Los Angeles” (DNIT, 1998).

Peneiras abertura em mm		Amostra massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	38	-	-	-	-	5000 ± 50	5000 ± 50	-
38	25	1250 ± 25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
9,5	6,3			2500 ± 10	-	-	-	-
6,3	4,8			2500 ± 10	-	-	-	-
4,8	2,4			-	5000 ± 10	-		-
Massa total em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
No de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

A granulometria da amostra selecionada encaixa na graduação tipo C da Tabela 3.3. Portanto, neste ensaio foram utilizados 2.500 g de material passando pela de peneira de 9,5 mm e retido na de 6,3 mm e 2500 g de material passando pela peneira de 6,3 mm e retido na de 4,8 mm. Colocou-se uma carga abrasiva de 8 esferas de aço totalizando uma massa de 3.330 g, a uma velocidade de 30 rpm a 33 rpm, aplicando-se um total de 500 rotações do tambor. O resultado da abrasão “Los Angeles” do agregado é calculado pela equação 3.1.

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} * 100 \quad (3.1)$$

Onde:

A_n = abrasão *Los Angeles* da graduação n, com aproximação de 1%;

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) correspondente ao agregado ensaiado;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7mm).

3.2.2.3 – Forma das partículas

Os ensaios para definir a forma das partículas foram realizados de acordo com a metodologia da norma ABNT 1989. Nesta, para cada partícula é medido o comprimento (a), largura (b) e espessura (c). A classificação das partículas quanto à forma é definida pelas relações b/a e c/b encontra-se apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Formas das partículas (Norma ABNT 1989).

Média das Relações b/a e c/b	Classificação da Forma
b/a >0,5 e c/b >0,5	Cúbica
b/a <0,5 e c/b >0,5	Alongada
b/a >0,5 e c/b <0,5	Lamelar
b/a <0,5 e c/b <0,5	Alongada - Lamelar

O índice de forma (f) também foi determinado pelo ensaio descrito no método da norma (DNIT, 1994). Esse índice varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando $f = 1,0$ e lamelar quando $f = 0,0$. É adotado o limite mínimo de $f = 0,5$ para aceitação de agregados quanto à forma.

O Índice de Forma determina a variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõe o agregado. O procedimento consiste na determinação da análise Granulométrica do material (DNER, 1998) pelas Peneiras 76; 63,5; 50; 38; 25; 19; 12,7; 9,5 e 4,8mm. Após esta etapa verifica-se em qual graduação a distribuição granulométrica se encaixa e então passa-se o material pelos crivos redutores correspondentes. A determinação da quantidade do material e os crivos de abertura circular e redutores, são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Determinação da graduação do material após análise granulométrica (Norma DNER)

Graduação	Crivos de abertura circular mm		Pesos das frações da amostra g	Crivos redutores correspondentes mm **	
	Passando *	Retido		Crivo I	Crivo II
A	76,0	63,5	3 000	38,0	25,0
	63,5	50,0	3 000	32,0	21,0
	50,0	38,0	3 000	25,0	17,0
	38,0	32,0	3 000	19,0	12,7
B	32,0	25,0	2 000	16,0	10,5
	25,0	19,0	2 000	12,7	8,5
	19,0	16,0	2 000	9,5	6,3
C	19,0	16,0	2 000	9,5	6,3
	16,0	12,7	2 000	8,0	5,3
	12,7	9,5	2 000	6,3	4,2
D	12,7	9,5	1 000	6,3	4,2
	9,5	6,3	1 000	4,8	3,2

* Tamanho diretriz

** Abertura em tamanhos comerciais.

3.2.2.4 – Massa específica e absorção

A norma DNIT (determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo) define os seguintes termos:

- massa específica na condição seca: relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluídos os vazios permeáveis, como é apresentado na equação 3.2.

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C} \quad (3.2)$$

Onde:

G_{sa} : massa específica do agregado na condição seca, em kg/dm³ ou em g/cm³;

A: massa do agregado seco, em kg ou g;

B: massa do agregado na condição saturada superfície seca, em kg ou em g;

C: leitura correspondente ao agregado imerso em água, em kg ou g.

- massa específica na condição saturada superfície seca: relação entre a massa do agregado na condição saturada superfície seca e o seu volume, excluídos os vazios permeáveis, como é apresentado na equação 3.3.

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C} \quad (3.3)$$

Onde:

G_{sb} : massa específica do agregado na condição saturada superfície seca, em kg/dm^3 ou em g/cm^3 ;

- *absorção*: aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento dos seus poros por água, expresso como percentagem de sua massa seca, como é apresentado na expressão 3.4..

$$a = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (3.4)$$

Onde:

a: absorção do agregado, em percentagem.

- vazios permeáveis: descontinuidades ligadas diretamente à superfície externa do agregado que, na condição saturada superficialmente seca, são passíveis de reter água.

Para a realização dos ensaios, utilizou-se uma massa da amostra segundo a norma de 3 kg, correspondente a dimensão de máxima característica do agregado de 19 mm.

3.2.2.5 – Adesividade ao ligante asfáltico

O método para a determinação da propriedade que tem o agregado de ser aderido por um material betuminoso é descrito pela norma (DNIT, 1994) adesividade ao ligante betuminoso. O ensaio consiste em medir o deslocamento numa película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado – ligante é submetida a 40 °C à ação de água destilada durante 72 horas. O resultado é anotado como satisfatório quando não verifica-se deslocamento do filme asfáltico ao fim de 72 horas.



Figura 3.4 Ensaio de adesividade ao ligante asfáltico.

3.2.2.6 - Resistencia ao choque e Durabilidade

No revestimento asfáltico, alguns agregados, tanto graúdos como miúdos, podem apresentar desintegração química pelas condições ambientais. O ensaio descrito pela norma (DNIT, 1994) (avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio) determina a resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo pelas soluções. O método é qualitativo e quantitativo, seu registro deve conter a observação do efeito da ação do sulfato de sódio ou de magnésio e a natureza da ação, e a contagem do número de partículas afetadas.

O resultado apresenta o peso das frações da amostra antes do ensaio e a percentagem em peso de cada fração da amostra que, após o ensaio, passe através da peneira na qual a fração foi originalmente retida. A média ponderada é calculada com base na granulometria da amostra inicial. Além disto, deve ser contabilizado no ensaio o número de partículas maiores que 19 mm, identificando quantas e como foram afetadas (desintegração fendilhamento, esmagamento, quebra, laminagem, etc) devido ao experimento.

3.2.2.7 - Equivalente de Areia

O agregado miúdo deve ser um material limpo e livre de materiais deletérios tais como: vegetação, argilas, grumos, tolerando-se quantidades insignificantes. O ensaio de equivalente de areia é descrito pela norma (DNIT, 1997). Esta fundamenta-se na relação volumétrica entre duas alturas de níveis (superior e inferior) da suspensão argilosa numa proveta, com uma quantidade de agregado miúdo o solo em condições padronizadas pelo ensaio. O resultado do Equivalente de Areia (EA) é determinado pela expressão 3.5:

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} * 100 \quad (3.5)$$

3.2.2.8 – Densidade Real

O método para a determinação da densidade real ou massa específica de agregados miúdo é definido pela norma (DNIT, 1995). O método de ensaio consiste em colocar 500 gramas de material seco num picnômetro de 500 ml, após aquecer a amostra no picnômetro e conseguir a expulsão do ar existente esfriando em banho maria. O cálculo da massa específica dos grãos é feita por meio da diferença de pesos do picnômetro vazio, cheio de água e com o agregado miúdo mais água, mediante a expressão 3.6.

$$D_r = \frac{B - A}{(D - A) - (C - B)} \quad (3.6)$$

Onde:

A: massa do picnômetro vazio, em g;

B: massa do picnômetro vazio mais a massa do agregado, em g;

C: massa do picnômetro vazio mais a massa do agregado e água, em g.

D: massa do picnômetro cheio de água, em g.

3.2.2.9 – Massa específica Real

O método para a determinação da massa específica de solos finos e material de enchimento é definido pela norma (DNIT, 1994). A norma especifica utilizar uma quantidade do material fino aproximadamente de 60 gramas, que devem ser colocadas num frasco chamado de *Le Chatelier*, especial para o ensaio com querosene. O cálculo da massa específica real é feito com a relação da massa do material e o volume do líquido deslocado, segundo a expressão 3.7.

$$Massa - Especifica - real = \frac{massa - do - material}{volume - do - liquido - deslocado} \quad (3.7)$$

Determinou-se também a densidade mediante um penta-picnômetro modelo pentapyc 5200e da “*Quantachrome Instruments*”, para determinar o volume real dos materiais sólidos. Utilizou-se os dois métodos para realizar a comparação de resultados. O mesmo procedimento será utilizado para o cálculo da massa específica real da cal e dos lodos de ETA e de ETE.

3.2.2.10 – Granulometria do Filer

A norma (DNIT, 1997) apresenta as características exigidas do material de enchimento utilizado nas misturas betuminosas. Em laboratório, a fim de tornar os resíduos de lodos em material filer foi utilizado um almofariz com a mão de gral para realizar o destorroamento primário e em seguida utilizou-se um moinho mecânico convencional para atingir a granulometria exigida pela especificação supracitada (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 Granulometria especificada para o filer.

Abertura de malha	%, em peso, passando.
0,42	100
0,18	95-100
0,075	65-100

3.2.2.11 – Caracterização dos lodos de ETA e de ETE

Para avaliar a concentração dos principais minerais que constituem os lodos, foram realizados ensaios de DRX (Difração dos Raios - X). As análises foram feitas no laboratório de Raios X do instituto de Geociências da UnB utilizando-se um aparelho Rigaku D-MAXB com radiação de $\text{CuK}\alpha$, velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$, intervalo de medida de $0,05^\circ$, sendo a varredura de 2 a $70^\circ 2\theta$. As interpretações dos difratogramas e identificações dos minerais ocorreram no mesmo Laboratório utilizando o software JADE 3.0 para Windows, *XRD Pattern Processing for the PC*, 1991-1995 *Materials Data*, Inc.

Os ensaios de Análise Térmica Diferencial (ATD) e Análise Térmica Gravimétrica (TG) também foram realizados. A ATD foi feita para determinar como reage o material a diferentes temperaturas, com respeito às transformações endotérmicas (desidratação) e exotérmicas (oxidação e reconstrução da estrutura cristalina). Enquanto que a ATG permite determinar as variações do material em massa com o seu aquecimento.

3.3 – FORMAS DE ADIÇÃO DOS LODOS AO CONCRETO ASFÁLTICO

Existem diferentes formas de incorporação de materiais ao concreto asfáltico, adicionando-os ao ligante asfáltico ou aos agregados ou simplesmente usando-os na forma de filer. Bock (2009) realizou estudos dos métodos de incorporação de cal ao concreto asfáltico, e determinou que a forma mais satisfatória é acrescentando a cal sobre o agregado graúdo seco, e não substituindo na forma de filer da faixa granulométrica (prática atual). Bernucci *et al.*, (2008) descrevem duas formas de incorporação de borracha moída ao concreto asfáltico. A primeira forma é denominada via úmida, onde a borracha é acrescentada diretamente no ligante asfáltico. Enquanto que a segunda forma é a via seca, onde a borracha é adicionada aos agregados, embora não seja considerada viável, pois a borracha afeta o processo de compactação.

Nessa pesquisa realizou-se a incorporação dos lodos de ETA e de ETE ao Concreto Asfáltico como material filer, de duas formas. Na primeira forma incorporou-se o resíduo diretamente ao ligante asfáltico na proporção de 15% de resíduo e 85% de CAP 50/70, a fim de avaliar a consistência, segundo os ensaios de viscosidade, penetração e ponto de amolecimento. A limitação a 15% de resíduo se deu devido ao fato de que para teores superiores a esse ocorria acentuada deposição dos mesmos. Para o estudo dos lodos incorporados ao concreto asfáltico, adicionou-se 20% de resíduo

assumindo o teor ótimo de asfalto de 5% inicialmente determinado, ou seja, a mistura resultante passou a ser composta por 4% de CAP e 1% de lodo.

Segundo a norma Brasileira (DNIT, 2006) para a faixa granulométrica tipo C, indica-se uma quantidade do material filer compreende entre 2 e 10% em relação à massa de agregado. Enquanto que a metodologia Superpave recomenda que a razão matemática em peso entre o filer e o ligante se situe entre 0,6 e 1,2 para todo tipo de mistura.

Dado a umidade e teor de matéria orgânica nos lodos, realizou-se um tratamento térmico conforme apresentado na seção 3.2. Este teve por objetivo obter um resíduo modificador estável e não degradável nas temperaturas de usinagem, compactação e de serviço. A temperatura adequada de calcinação dos resíduos de lodos de ETA e de ETE foi determinada por meio dos ensaios de perda de massa e de consistência do ligante asfáltico na presença dos lodos.

A segunda forma de incorporação foi diretamente sobre o agregado miúdo, a fim de utilizar o resíduo na condição seca a 175 ° C por 24 horas. Este fato é justificado por reduzir o tempo no qual ocorre contato entre os lodos e o ligante asfáltico a temperaturas de usinagem e compactação.

3.3.1 – Incorporação dos lodos ETA e ETE no ligante asfáltico

As agregações de lodos foram quebradas manualmente mediante um almofariz com a mão de gral e depois passados em um moinho mecânico a fim de obter material passante pela peneira N° 200. As misturas foram elaboradas num equipamento rotacional, com uma velocidade de 280 rpm durante um período de 45 minutos, tal como ilustrado na Figura 3.5 (a).

Foram analisadas diferentes percentagens de adição do lodo ao CAP (15; 20; 25 e 30% em peso), entretanto, observou-se maior homogeneidade nas misturas com 15%. A adição de porcentagens maiores fez com que, durante o processo de agitação, o lodo sedimentasse no fundo da cuba, tornando a mistura não homogênea. A Figura 3.5 (b) ilustra este fenômeno.



Figura 3.5 (a): Equipamento rotacional para elaboração de misturas; (b) Sedimentação, 30% Lodo de ETA e 70% CAP 50/70.

O ligante asfáltico foi aquecido a 165°C e misturado com os lodos produzindo os seguintes tipos de misturas.

- LA: Ligante asfáltico CAP 50/70 (Referência 1).
- LA-CH: 85% Ligante asfáltico CAP 50/70 + 15% Cal Hidratada (Referência 2).
- LA - ETA: 85% Ligante asfáltico CAP 50/70 + 15% Lodos de ETA.
- LA -ETE: 85% Ligante asfáltico CAP 50/70 + 15% Lodos de ETE.

Os lodos de ETA e ETE foram estudados nas condições secos ao ar e calcinados a temperaturas de: 200, 300, 500 e 800 °C. No total obteve-se 11 tipos de misturas (10 amostras com adição dos lodos e uma é a de referência contendo cal) e uma amostra constituída pelo ligante puro.

Para identificar a temperatura adequada de calcinação para os lodos foram realizados ensaios de caracterização do asfalto modificado, tais como: curvas reológicas do ligante (viscosidade Brookfield - tempo) e penetração para avaliar a consistência. Foram realizados outros ensaios de caracterização do ligante asfáltico, tais como: o ensaio de anel e bola para determinar a temperatura na qual o asfalto amolece em condições padronizadas e o ensaio RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) para simular o envelhecimento em curto prazo para comparar como as misturas são alteradas pela adição do lodo quanto ao envelhecimento.

3.4 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE LODOS DE ETA E ETE

3.4.1 – Ensaio de viscosidade Brookfield

Nesta pesquisa, a viscosidade do ligante foi determinada utilizando-se o equipamento rotacional Brookfield para determinar as propriedades reológicas dos ligantes convencionais e modificados. O equipamento é parte da especificação da norma Brasileira NBR – 15184 e seu princípio de operação consiste em medir o torque provocado pelo movimento rotacional de um spindle imerso no fluido. O resultado final da viscosidade é dado em centi Poises e a taxa de cisalhamento é dada em s⁻¹.

Para cada tipo de misturas betuminosas foram realizadas três determinações da curva de viscosidade utilizando-se a quantidade de 8 gramas de ligante e realizando leituras da viscosidade a temperaturas de: 135; 150 e 177 °C, conforme preconizado pelo regulamento técnico (ANP, 2005), Agência Nacional de Petróleo.

3.4.2 – Ensaio de penetração

A norma de determinação da penetração (DNIT, 1999) define a penetração como a distância em décimos de milímetro que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material betuminoso sob condição padronizada de carga, temperatura e tempo. O resultado é dado pela média de no mínimo três leituras feitas da penetração de uma agulha de massa padronizada (100 g) em um volume de 60 ml de ligante asfáltico durante 5 segundos na temperatura de 25°C.

3.4.3 – Ensaio de ponto de amolecimento

O ponto de amolecimento é considerado empiricamente como a medida da temperatura na qual o asfalto aquece e apresenta uma condição de escoamento (Bernucci *et al.*, 2008). A norma (DNIT, 2010) determina o ponto de amolecimento pelo método do anel e bola. O ensaio consiste em colocar uma bola de aço sobre uma amostra de asfalto confinada dentro de um anel metálico padronizado. O conjunto é colocado em banho Maria num béquer contendo água que é aquecida a uma taxa controlada de 5°C/minuto. Quando o asfalto amolece o necessário para não suportar mais o peso da bola de aço, esta penetra no ligante e avança em direção ao fundo do béquer. O resultado do ensaio corresponde à média das temperaturas indicadas pelo termômetro no instante em que a bola de aço toca o fundo do béquer.

3.4.4 – Ensaio de envelhecimento RTFOT

O ensaio consiste na avaliação do envelhecimento em curto prazo do asfalto, mediante o uso da estufa de filme rotativa conhecida como *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) ilustrada na Figura 3.6. O ensaio simula o envelhecimento causado pela oxidação e evaporação, incluindo o efeito do ar por injeções feitas a cada 3 a 4 segundos numa película fina de asfalto de 35 g que é girada dentro de um recipiente de vidro, a 163°C por 85 minutos. O resultado define-se como a perda de massa simulada pelas condições padronizadas do ensaio.



Figura 3.6 Equipamento do Ensaio RTFOT.

3.5 – METODOLOGIA DE DOSAGEM

As dosagens das misturas estudadas nesta pesquisa foram elaboradas com base na incorporação do filer ao ligante asfáltico, condição de mistura intitulada via úmida. Nesse processo de mistura substituiu-se 20% do ligante asfáltico em peso, pelos materiais filer lodo de ETA, de ETE e Cal Hidratada, conforme a mistura. A seguir são apresentados os ligantes empregados:

- LA: Ligante asfáltico CAP 50/70 (Referência 1).
- LA-CH: 80% Ligante asfáltico CAP 50/70 + 20% Cal Hidratada (Referência 2).
- LA - ETA: 80% Ligante asfáltico CAP 50/70 + 20% Lodos de ETA.
- LA -ETE: 80% Ligante asfáltico CAP 50/70 + 20% Lodos de ETE.

Para as misturas com incorporação dos resíduos lodos sobre o agregado graúdo via seca, trabalhou-se com os teores ótimos de ligante asfáltico obtidos na dosagem via úmida.

Visando a simplificação, deste ponto em diante, para as misturas de Concreto Asfáltico (CA) usadas nesta pesquisa será adotada a seguinte nomenclatura.

1. Para a mistura de referência convencional, tem-se:

a). CA: Concreto Asfáltico (Amostra de referência 1).

2. Para as a primeira forma de incorporação dos lodos ao concreto asfáltico (diretamente no ligante Asfáltico) ou via úmida, tem-se:

b). CA – CH – u: Concreto Asfáltico – Cal Hidratada (Amostra de referência 2).

c). CA – ETA – u: Concreto Asfáltico – Lodos de ETA calcinados (500 °C).

d). CA – ETE – u: Concreto Asfáltico – Lodos de ETE calcinados (500 °C).

3. Para a segunda forma de incorporação dos lodos ao concreto asfáltico (secos sobre o agregado miúdo) ou via seca, tem-se:

e). CA – CH – s: Concreto Asfáltico – Cal Hidratada (Amostra de referência 3).

f). CA – ETA – s: Concreto Asfáltico – Lodos de ETA secos (175 °C).

g). CA – ETE – s: Concreto Asfáltico – Lodos de ETE secos (175 °C).

Os corpos-de-prova foram utilizados para a dosagem, avaliação de propriedades mecânicas e de adesividade. Na Tabela 3.7 se ilustra o resumo da quantidade de corpos de prova ensaiados para cada mistura.

Tabela 3.7 Quantidade de corpos-de-prova ensaiados para cada mistura.

ENSAIOS	Misturas						
	Referência	Via úmida			Via seca		
	CA	CA-CH-u	CA-ETA-u	CA-ETE-u	CA-CH-s	CA-ETA-s	CA-ETE-s
Estabilidade e Fluência Marshall	15	15	15	15	3	3	3
Módulo de resiliência	3	3	3	3	3	3	3
Resistencia á tração	3	3	3	3	3	3	3
Umidade induzida	6	6	6	6	6	6	6
Cântabro	3	3	3	3	3	3	3
Curva (Vv-Golpes)	9						
TOTAL	39	30	30	30	18	18	18

3.5.1 – Especificações das misturas

Segundo as especificações da norma (DNIT, 2006) de pavimentos flexíveis em concreto asfáltico, a granulometria do agregado para a composição do concreto asfáltico, deve enquadrar-se nas faixas granulométricas especificadas na Tabela 3.8 da norma.

Tabela 3.8 Especificações granulométricas (DNIT, 2006).

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando.			
Série	Abertura	A	B	C	Tolerâncias
ASTM	(mm)				
2"	50,8	100	---	---	± 7%
1 1/2"	38,1	95 -100	100	---	± 7%
1"	25,4	75-100	95 - 100	---	± 7%
3/4"	19,1	60-90	80 - 100	100	± 7%
1/2"	12,7	---	---	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
N 4	4,8	25 -50	28 -60	44 -72	± 5%
N 10	2,00	20 - 40	20 - 45	22 -50	± 5%
N 40	0,42	10-30	10 - 32	8 - 26	± 5%
N 80	0,18	5 - 20	8 -20	4 - 16	± 3%
N 200	0,075	1- 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0	4,5 - 7,5	4,5 - 9,0	± 0,3%
		Binder	C Ligação e rolamento	C. Rolamento	

O agregado graúdo e miúdo foi utilizado nesta pesquisa em proporções tais de modo a enquadrar-se na faixa granulométrica C, utilizada para uma camada de rolamento de pavimento.

As porcentagens de ligante da mistura asfáltica exigidas pela norma (DNIT, 2006) para atingir as características de estabilidade e resistência à compressão diametral são apresentadas na Tabela 3.9. As características que deve atender o revestimento asfáltico, enquanto à relação betume/vazios, os mínimos de vazios do agregado mineral, estabilidade e resistência à tração por compressão diametral são descritas na Tabela 3.10.

Tabela 3.9 Especificações de Concreto Asfáltico CA (Norma DNIT 031/2006 - ES).

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de ligação (Binder)
Porcentagem de vazios, %	DNER-1995	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-1995	75 - 82	65 - 72
Estabilidade, mínima, (kgf) (75 golpes)	DNER-1955	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, Mpa	DNER-2009	0,65	0,65

Tabela 3.10 Especificações granulométricas (DNIT, 2006).

VAM – Vazios do Agregado Mineral		
Tamanho Nominal Máximo do agregado		VAM Mínimo %
#	mm	
1 1/2"	38,1	13
1"	25,4	14
3/4"	19,1	15
1/2"	12,7	16
3/8"	9,5	17

3.5.2 – Metodologia Marshall

A metodologia de dosagem utilizada nesta pesquisa foi a Marshall e fundamenta-se nos procedimentos contidos na norma (DNIT, 1995) de misturas betuminosas a quente e ensaio Marshall. Na Figura 3.7 se estabelece um fluxograma do desenvolvimento da metodologia.

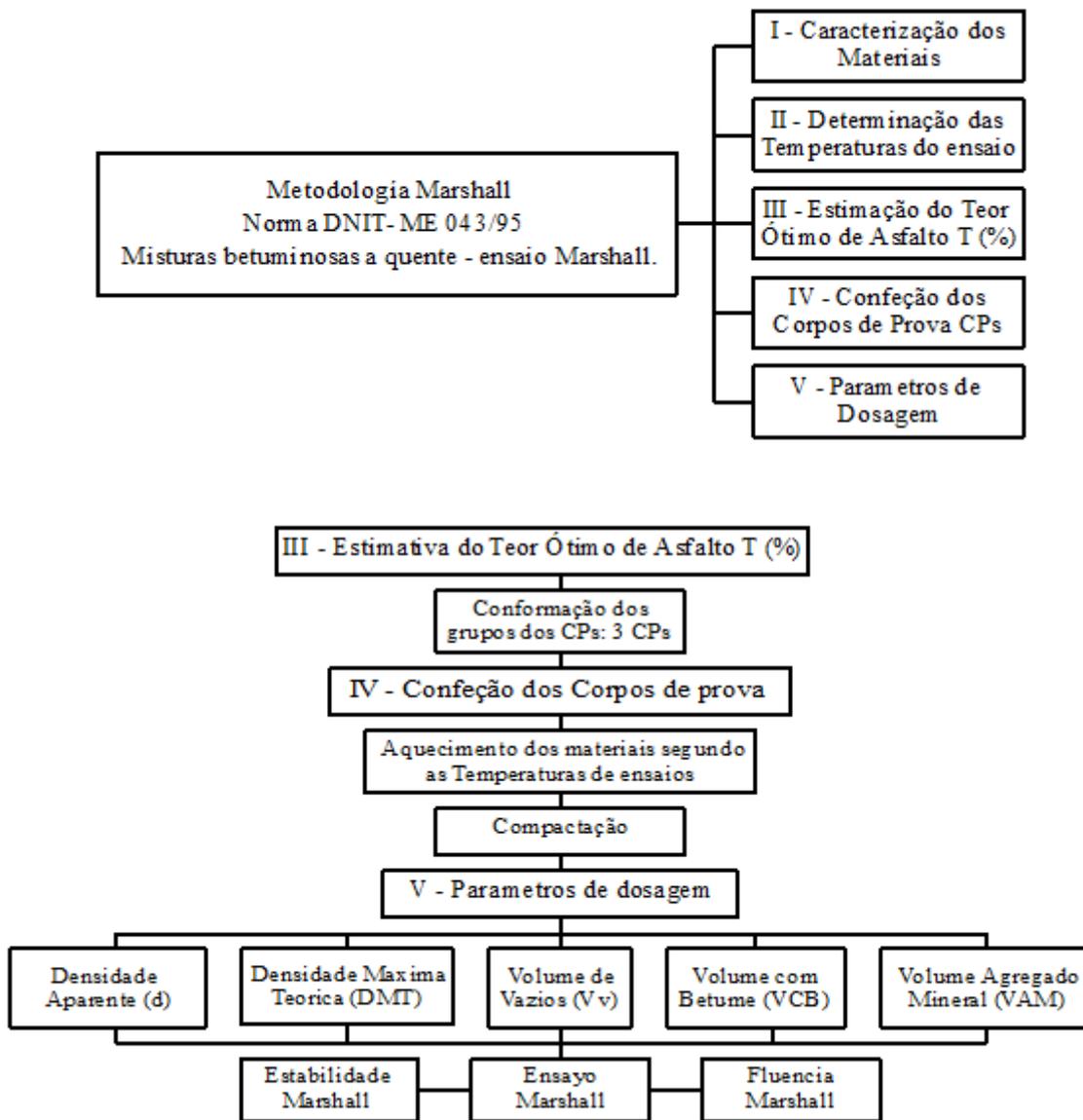


Figura 3.7 Metodologia Marshall.

3.6 – ENSAIOS PARA PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.6.1 – Módulo de resiliência

O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é padronizado no Brasil pela norma DNIT-ME 2009. Essa norma define o conceito de módulo de resiliência como “a relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura”. Na Figura 3.8 pode-se observar os LVTDS utilizados para a obtenção do módulo resiliente.

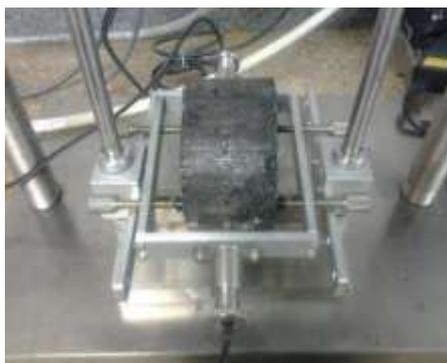


Figura 3.8 Adequação dos LVDTs para medida do Módulo de Resiliência.

A determinação do módulo de resiliência para cada par de tensões é feita segundo a expressão 3.8.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \quad (3.8)$$

MR : Módulo de resiliência, kPa;

σ_d : Tensão desvio aplicada repetidamente, kPa;

ε_R : Deformação específica resiliente;

3.6.2 – Resistência à tração estática RT

A Resistência à tração é um importante parâmetro para a caracterização das misturas betuminosas. O ensaio para sua determinação consiste na aplicação de duas forças concêntricas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro. O ensaio é padronizado pela norma Brasileira (DNIT, 2009). O método assume que a ruptura do corpo de prova ocorre por tração ao longo do diâmetro solicitado quando as tensões geradas se igualam à tensão admissível do material que deve permanecer em regime elástico durante o ensaio. A Figura 3.9 ilustra a execução do ensaio de resistência à tração.



Figura 3.9 Ensaio de Resistência à tração.

O cálculo matemático da resistência à tração é feito pela seguinte expressão (3.9):

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (3.9)$$

σ_R : Resistência à tração, Mpa;

F: Carga de ruptura, N;

D: Diâmetro do corpo de prova, cm;

H: Altura de corpo de prova, cm;

3.7 – ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ADESIVIDADE

3.7.1 – Resistência ao dano por umidade induzida

O ensaio Lottman Modificado (AASHTO, 1989) ou ensaio de umidade induzida avalia a adesividade nas misturas asfálticas tentando simular a perda de resistência ou outros danos causados pela umidade do pavimento. A análise do ensaio é feita pelo quociente da relação entre as resistências à tração de amostras condicionadas e não condicionadas. O ensaio consiste em simular as etapas de construção, compactação e cura do revestimento asfáltico. Neste são moldados 6 corpos de prova segundo a metodologia Marshall, com um índice de vazios entre 6 e 8%, obtidos a partir do gráfico número golpes da compactação *versus* Vv. Destes, 3 corpos de prova foram acondicionados mediante a saturação a vácuo com uma pressão entre 250 e 650 mmHg, durante um tempo compreendido entre 5 e 10 minutos, a fim de atingir uma saturação de 55% a 80%, depois de um congelamento a -18 °C durante 15 horas. Em seguida os corpos de prova foram colocados em banho Maria a temperaturas de 60°C e 25°C por um tempo de 24 e 2 horas respectivamente. Os outros 3 corpos de prova não foram submetidos a acondicionamento. O critério de aceitação para misturas não suscetíveis à umidade de acordo com a (AASHTO, 1989) é de Relação da Resistencia à Tração RRT \geq 70%. A versão da Norma Brasileira para o ensaio, está baseada na norma da AASHTO T 283, tendo como critério de aceitação, o mesmo valor. No entanto, a versão (AASHTO, 2007) compatibilizada para a metodologia Superpave adota RRT \geq 80%. A Figura 3.10 ilustra o condicionamento das amostras do ensaio Lottman Modificado.



Figura 3.10 Ensaio Lottman: (a) Saturação a vácuo; (b) congelamento; (c) Banho Maria.

A seguinte expressão (3,10) indica o procedimento matemático para o cálculo da relação das resistências:

$$RRT = \frac{Rt_2}{Rt_1} \quad (3.10)$$

RRT: Relação à resistência retida à tração;

Rt₁: Resistência à tração das amostras sem acondicionamento, Mpa.

Rt₂: Resistência à tração das amostras com acondicionamento, Mpa.

3.7.2 – Desgaste por abrasão – Ensaio Cântabro

O ensaio por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero é regulado pela norma Brasileira (DNIT, 1999), a qual fixa as condições de trabalho com emprego da máquina Los Angeles. O ensaio consiste em colocar no tambor um corpo-de-prova sem carga abrasiva a 300 revoluções, a uma velocidade de 33 rpm e temperatura de 25 °C. Registraram-se os pesos dos corpos de prova antes e após o ensaio. O resultado é obtido segundo a expressão (3.11):

$$A = \frac{P - P'}{P} * 100 \quad (3.11)$$

A: Desgaste da mistura betuminosa com asfalto-polímero, com aproximação de 1%.

P: Peso do corpo de prova, antes do ensaio;

P': Peso do corpo de prova, após do ensaio.

Os resultados foram considerados a média aritmética de três corpos de prova para cada teor de asfalto, sem variações individuais que extrapolassem +/- 20% do valor médio. Figura 3.11 apresenta os corpos de prova (CP) antes e depois do ensaio.



Figura 3.11 Corpos de prova (CP) antes e depois do ensaio.

4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados com os dois tipos de lodo coletadas nas estações da CAESB em Brasília. No início são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de: caracterização dos materiais, tratamento térmico dos lodos de ETA e de ETE. Em seguida, são analisados e comparados os resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico com influência dos lodos de ETA e de ETE, tais como: viscosidade Brookfield, penetração, ponto de amolecimento, ensaio de envelhecimento RTOFT e viscosidade após do ensaio RTOFT. Por fim, são analisadas as dosagens Marshall e as propriedades mecânicas das misturas asfálticas estudadas, tais como a resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência. Analisou-se ainda as propriedades de adesividade referentes ao dano por umidade induzida (Ensaio de *Lottman* modificado) e o desgaste por abrasão (Ensaio *Cantabro*).

4.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPIEDADES DOS MATERIAIS

4.1.1 - Tratamentos dos lodos de ETA e de ETE

A etapa de calcinação foi realizada em diferentes temperaturas (200; 300; 500 e 800 ° C), cada uma delas mantida por 45 minutos. Os resultados mostraram que quanto menor a temperatura, menor foi a acurácia dos mesmos (grau de proximidade de uma leitura do valor real), ou seja, em temperaturas mais elevadas ocorre maior estabilidade no valor da leitura. Sempre foi necessário aquecer o equipamento à temperatura de calcinação e após fazer o procedimento da calcinação.

Para determinar o tempo ótimo de calcinação dos resíduos de lodos de ETA e de ETE realizou-se calcinações de amostras de lodos para avaliar as variações de massa nas faixas de tempo numa temperatura constante de 500 ° C. A Temperatura fundamentou-se na literatura por apresentar-se a perda total de matéria orgânica. A Tabela 4.1 apresenta os resultados de massa a cada 15 minutos.

Segundo os resultados obtidos verifica-se que após um tempo de 45 minutos cessa a variação de massa para os dois tipos de resíduos, motivo pelo qual esse foi o tempo de calcinação adotado como ótimo para fins da pesquisa.

Tabela 4.1 Tempos de calcinação versus Variação das massas dos lodos.

Tempo (min)	Lodo de ETA		Lodo de ETE	
	Peso (g)	Variação (%)	Peso (g)	Variação (%)
0	30	0,0	30	0,0
15	20	33,3	19,4	35,3
30	18	40,0	16	46,7
45	17,5	41,7	15,8	47,3
60	17,5	41,7	15,8	47,3
120	17,5	41,7	15,8	47,3

Durante a etapa de calcinação dos lodos de ETA e de ETE nas diferentes temperaturas, observou-se um padrão único de comportamento. As amostras calcinadas apresentaram perda crescente de massa com o aumento da temperatura de calcinação, como é apresentado na Figura 4.1. Este fato pode ser atribuído à quantidade de água e matéria orgânica presentes no lodo. Também observou-se fisicamente durante a calcinação do lodo-de-ETE a presença de incandescências, indicativas da perda de matéria orgânica. Comportamento semelhante também foi observado em pesquisas por Fontes (2003). A Figura 4.1 apresenta que a perda de massa foi maior no lodo ETE e que para ambos os lodos ela é menor quando se passa de 500 ° C para 800 ° C.

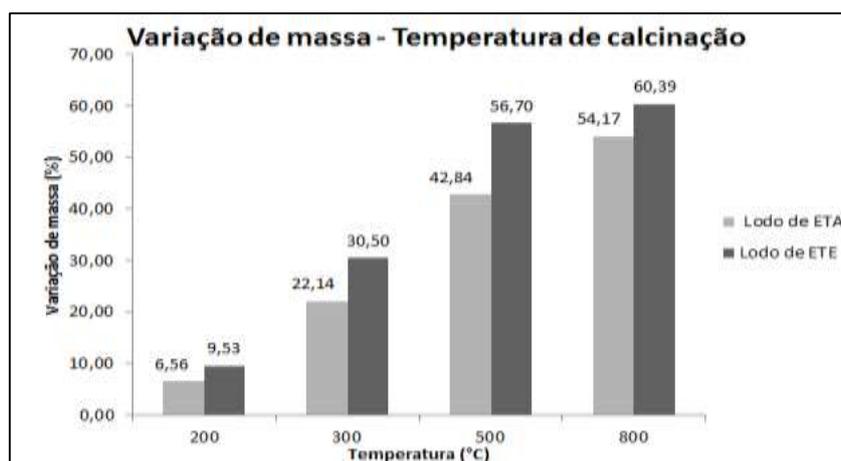


Figura 4.1 Variação de massas dos lodos de ETA e de ETE versus a temperatura de calcinação.

As aparências das amostras após da queima dos lodos estão ilustradas na Figura 4.2. Observa-se que com o aumento da temperatura de calcinação ocorreu um clareamento das amostras. As cores do lodo calcinado variaram do preto até chegar a uma coloração muito clara, quase amarela. Esse clareamento pode ser atribuído à perda de matéria orgânica e da água presente no lodo. Segundo Geyer (2001) a coloração avermelhada indica a presença do ferro e das partículas silicosas. Observa-se a presença de partículas brilhosas indicativas da presença de mica ou quartzo no resíduo, os quais são resistentes às variações de temperatura.



Figura 4.2 Variação dos lodos de ETA e de ETE após da calcinação: (a) Calcinação a 300 ° C; (b) Calcinação a 500 ° C; (c) Calcinação a 800 ° C.

4.1.2 – Ensaios físicos para caracterização dos agregados

A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos ensaios realizados nos agregados graúdos e miúdos, utilizados na dosagem e confecção dos concretos asfálticos.

Tabela 4.2 Caracterização física dos agregados.

Ensaio	Norma de ensaio	Unidade	Especificação	Obtido
Equivalente de Areia	DNER-ME 054/97	%	min 55	66%
Abrasão los Angeles	DNER-ME 035/98	%	máx 50	31%
Índice de Forma	DNER-ME 086/94	IF	> 0,5	0,7
Durabilidade	DNER-ME 089/94	%	máx 12	7
Adesividade do agregado ao betume (CAP puro)	DNER-ME 078/94	Qualitativa	Satisfatória	Satisfatória
Massa específica na condição seca	DNER-ME 195/97	g/cm ³	----	2,64
Massa específica na condição saturada superfície seca	DNER-ME 195/97	g/cm ³	----	2,59
Absorção	DNER-ME 195/97	%	----	0,8
Densidade Real - Agregado miúdo	DNER-ME 084/95	g/cm ³	----	2,6
Massa específica Real - filer granular	DNER-ME 085/94	g/cm ³	----	2,719
Massa específica Real - filer Cal hidratada	DNER-ME 085/94	g/cm ³	----	2,692
Massa específica Real - filer Lodo de ETA*	DNER-ME 085/94	g/cm ³	----	1,675
Massa específica Real – filer Lodo de ETE*	DNER-ME 085/94	g/cm ³	----	1,389

* Lodos Calcinados a 500 ° C.

Os agregados constituem perto de 95% do peso da mistura asfáltica, gerando a estrutura sólida do revestimento asfáltico, porém é importante o conhecimento das características mecânicas com relação à durabilidade ao longo da vida útil do pavimento.

Os resultados de abrasão “Los Angeles” apresentaram uma perda de 30,6%, sendo satisfatório por ser inferior ao valor máximo de 50% que preconiza a norma do (DNER, 2006) para a fabricação de camadas de rolamento de Concreto Asfáltico.

A forma das partículas foi obtida mediante a medição das dimensões das partículas do agregado e a determinação do fator forma com os crivos. No primeiro ensaio observa-se predominância de partículas cúbicas, seguidas de laminares e por último alongadas. No segundo ensaio, constatou-se a forma cúbica, pelo fator forma ser superior a 0,5. A presença de partículas cúbicas irregulares indica melhor intertravamento entre os grãos de agregados após a compactação, evitando a quebra dos agregados na mistura.

No ensaio de adesividade foram avaliados quatro tipos de ligantes asfálticos utilizados para as misturas em estudo: Referência 1: (CAP 50/70), Referência 2: (80% CAP + 20% Cal hidratada), Ligante 3: 80% CAP + 20% Lodo de ETA e Ligante 4: 80% CAP + 20% Lodo de ETE, ambos os lodos calcinados a 500°C. Para os quatro ligantes obteve-se resultados satisfatórios segundo o método de avaliação da norma (DNER, 1994), dado que não se observou deslocamento das películas betuminosas. O fato da adesividade entre o agregado calcário e os ligantes com presença de lodos, ser satisfatória pode ser atribuída à compatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do CAP 50/70 com suas respectivas modificações pela cal e pelos lodos. Nas Figuras 4.3 e 4.4 observam-se os resultados dos ensaios realizados com os diferentes ligantes.



Figura 4.3 Adesividade com os Ligantes de referência: (a) CAP 50/70; (b) 80% CAP + 20% CAL.

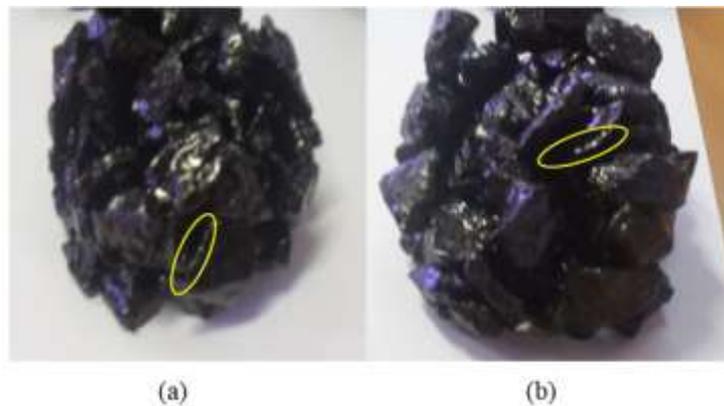


Figura 4.4 Adesividade com os Ligantes modificados com lodo: (a) 80% CAP 50/70 + 20% Lodo de ETA (calcinado); (b) 80% CAP + 20% Lodo de ETE (calcinado).

Nas Figuras 4.3 e 4.4 observam-se que os principais pontos de desprendimentos de ligante asfáltico do agregado, de forma geral, ocorreram nas bordas dos agregados. Estes eventualmente podem ser atribuídos a desprendimentos de parte dos próprios agregados, como são apresentado nos círculos das figuras. A mistura que apresentou melhor desprendimento foi a que utilizou ligante modificado com cal. Nas misturas com presença de lodos, podem-se observar os pequenos grãos distribuídos uniformemente ao longo da superfície do agregado, constatando-se sua capacidade de ligação ao asfalto e aos agregados.

4.1.3 – Granulometria dos Filers

Após o destorroamento dos grãos dos lodos com a mão de gral e o moinho, realizou-se o peneiramento com o conjunto de peneiras da norma (DNIT, 1997) e comparou-se com textura da Cal Hidratada. Os resultados da granulometria são apresentados na Tabela 4.3 e Figura 4.5.

Tabela 4.3 Granulometria de lodos

Série	Abertura (mm)	%, em peso, passando.		
		Especificação	Lodo de ETA	Lodo de ETE
N 40	0,42	100	100	100
N 80	0,18	95-100	95,9	95,2
N 200	0,075	65-100	68,4	69,8

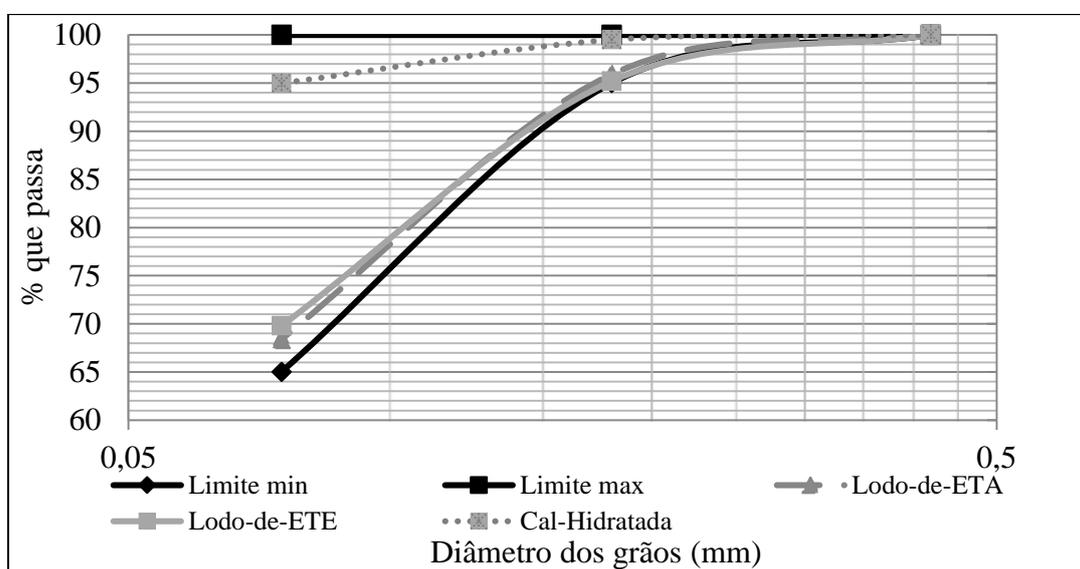


Figura 4.5 Granulometria dos lodos de ETA e de ETE.

Pode-se observar que, assim como a cal hidratada, os resíduos de lodo atendem as dimensões necessárias para que o material se enquadre como material filer. Entretanto, destaca-se que enquanto a cal se aproxima do limite máximo, preconizado por norma, os lodos se aproximam do mínimo.

4.1.4 – Caracterizações dos lodos de ETA e de ETE

4.1.4.1 – Distribuição dos minerais

A distribuição dos minerais presentes nos lodos de ETA e de ETE foram determinadas pelo método de Difração de Raios X (DRX). A Figura 4.6 apresenta os difratogramas dos dois tipos de resíduos, lodos de ETA e de ETE, assim como o da Cal-hidratada como material de referência.

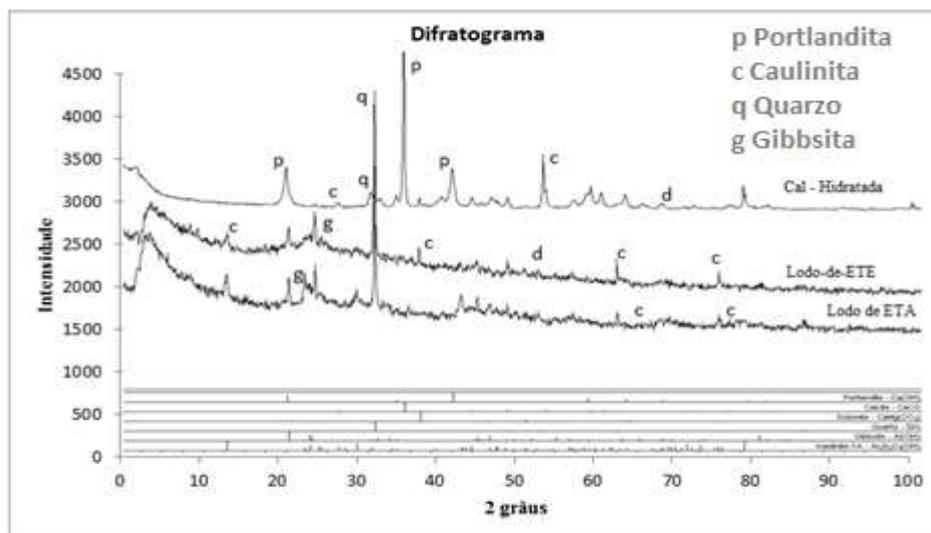


Figura 4.6 Difratoograma de raios-X dos lodos de ETA, ETE (secos ao ar) e Cal Hidratada.

A Figura 4.6 apresenta picos característicos de fase cristalina, permitindo determinar a predominância de Quartzo, Caulinita e Gibbsita na fase inorgânica para os dois tipos de lodos. Verifica-se a presença de Dolomita no lodo-de-ETE. Wolff (2005) trabalhou com lodos da ETA da Cenibra – Belo Horizonte/MG e encontrou resultados similares aos obtidos nesta pesquisa.

A Tabela 4.4 apresenta os minerais encontrados nos materiais avaliados, assim como suas principais características. Observa-se que os lodos de ETA e de ETE contêm hidróxidos e silicatos de alumínio, que são compostos por metais de cargas elétricas positivas. Estas apresentam compatibilidade de aderência com moléculas de asfaltenos, devido à carga eletronegativa do asfalto, sendo um ponto favorável para incorporação dos resíduos à mistura.

Tabela 4.4 Composição química dos lodos de ETA e de ETE e da Cal Hidratada.

Mineral	Fórmula química	Composição	Dureza	Densidade Relativa
Cal Hidratada				
Portlandita	Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio	2	2.23
Calcita	CaCO ₃	Carbonato de Cálcio	3	2.72
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	Carbonato de Cálcio e magnésio	3.0 - 4.0	2.85
Quartzo	SiO ₂	Dióxido de silício	7	2.65
Resíduo de Lodo-de-ETA				
Quartzo	SiO ₂	Dióxido de silício	7	2.65
Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Silicato de Alumínio Hidratado	2.0 - 2.5	2.60
Gibbsita	Al(OH) ₃	Hidróxido de alumínio	2.5 - 3.0	2.35
Resíduo de Lodo-de-ETE				
Quartz	SiO ₂	Dióxido de silício	7	2.65
Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Silicato de Alumínio Hidratado	2.0 - 2.5	2.60
Gibbsita	Al(OH) ₃	Hidróxido de alumínio	2.5 - 3.0	2.35
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	Carbonato de Cálcio e magnésio	3.0 - 4.0	2.85

Observa-se também, na composição química dos lodos de ETA e de ETE, alta presença de alumínio (Al), Silício (Si), (O) oxigênio, e traços de Magnésio (Mg), e Cálcio (Ca).

Na maioria das ETAs Brasileiras utiliza-se sulfato de alumínio ou hidróxido de ferro como coagulantes, os quais encontram-se presentes nos subprodutos gerados. Análises químicas encontradas na literatura refletem que os elementos com maior predominância nos lodos de ETA são: Alumínio (22,8%), Silica (13,42%) e outros como o Ferro (7,98%) (Portella, 2003).

Duarte (2008), ao estudar a composição mineralógica do lodo de Esgoto, observou a predominância de quartzo, caulinita e anortita. Enquanto que para lodos da indústria têxtil, estudados por Guedes (2012), verificou-se quantidades elevadas de sílica, o que indica compatibilidade com os materiais constituintes do cimento Portland, além da presença dos óxidos de alumínio e de ferro.

Araújo (2008) utilizou o processo de calcinação a 550 °C a fim de retirar a matéria orgânica presente no lodo de ETE. Após o procedimento, o autor realizou análises mineralógicas encontrando como minerais principais: Quartzo, Ilita, Hematita e predominância de estruturas cristalinas.

4.1.4.2 - Análises Termogravimétricas-TG

A Figura 4.7 apresenta a variação da perda de massa em relação à temperatura de aquecimento dos materiais estudados.

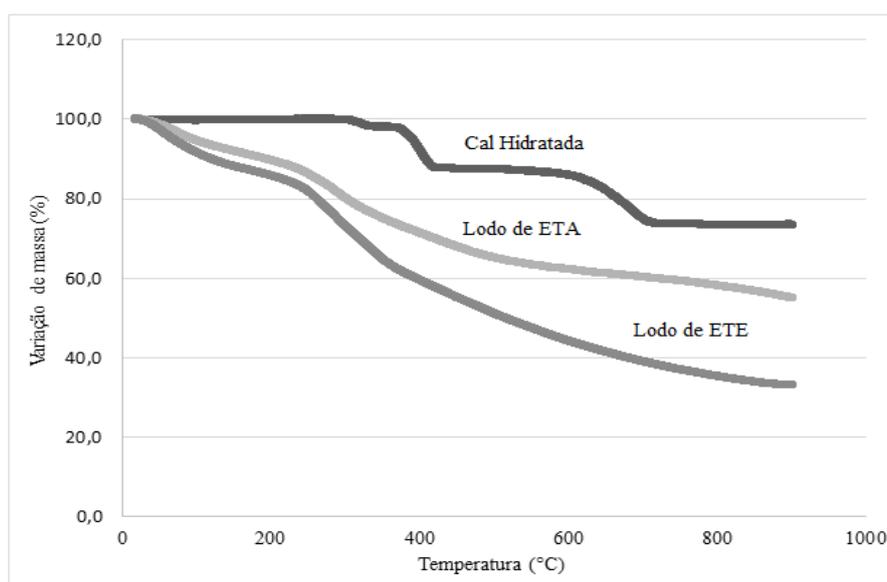


Figura 4.7 Análise Termogravimétrica dos lodos de ETA, ETE (secos ao ar) e Cal Hidratada.

A Cal Hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta duas faixas significativas de perda de massa, gerando três trechos significativos, dentro dos quais se considera uma variação de massa constante. O primeiro trecho está compreendido desde a temperatura inicial até os $334\text{ }^\circ\text{C}$, no qual não se apresenta perda de massa. Após se apresenta uma faixa de perda de massa entre $334\text{ }^\circ\text{C}$ e $403\text{ }^\circ\text{C}$, o fato pode ser atribuído à saída da água da estrutura, sendo que a cal hidratada apresenta uma composição química de Óxido de Cálcio (CO) e Água (H_2O). O segundo trecho está compreendido desde os 403 até os $610\text{ }^\circ\text{C}$, no qual também se apresenta uma perda de massa constante. A segunda grande variação de massa ocorre a faixa de $610\text{ }^\circ\text{C}$ a $657\text{ }^\circ\text{C}$, que pode ser atribuída à combustão da cal hidratada, gerando carbonato de cálcio. No último trecho se observa uma estabilização da perda de massa para valores maiores de $675\text{ }^\circ\text{C}$.

Os lodos de ETE e de ETA começaram a apresentar uma perda de massa numa faixa de temperatura entre $70 - 80\text{ }^\circ\text{C}$. Observa-se uma variação de massa ao longo de toda a faixa de temperatura aplicada, sendo a maior faixa entre $150 - 450\text{ }^\circ\text{C}$. A variação da perda de massa se deve a evaporação da água, assim como também à perda da matéria orgânica.

O Lodo de ETA apresentou perda de massa crescente entre 70 e $400\text{ }^\circ\text{C}$, possivelmente pela eliminação da matéria orgânica. Entre 450 e $550\text{ }^\circ\text{C}$ ocorre uma menor variação de massa. Para valores maiores que $600\text{ }^\circ\text{C}$, o material ainda continua perdendo massa, entretanto em menor proporção.

Observa-se que as faixas de temperaturas das principais perdas de massa são iguais para os ambos lodos, apesar do lodo de ETE apresentar maiores perdas. Os lodos de ETA apresentam maior quantidade de hidróxidos de alumínio devido à utilização de produtos químicos durante o tratamento da água.

O lodo de ETE apresentou uma perda de massa total aproximada de 65% , enquanto que para o lodo de ETA a perda de massa aproximada foi de 45% . Estes valores estão próximos dos valores referenciados na literatura para as mesmas condições do ensaio. Lucena (2012) obteve uma perda de massa nos lodos de ETE de 55% e para os lodos de ETA de 35% .

4.1.4.3 - A Análise Termo Diferencial (DTA)

A DTA permite determinar a temperatura inicial dos processos térmicos endotérmicos e exotérmicos. Caso a reação seja exotérmica a amostra irá liberar calor, enquanto que se for endotérmica a amostra irá capturar calor. As Figuras 4.8 a 4.9 a e b apresentam os resultados dos ensaios de DTA da cal hidratada e dos lodos de ETA e de ETE respectivamente.

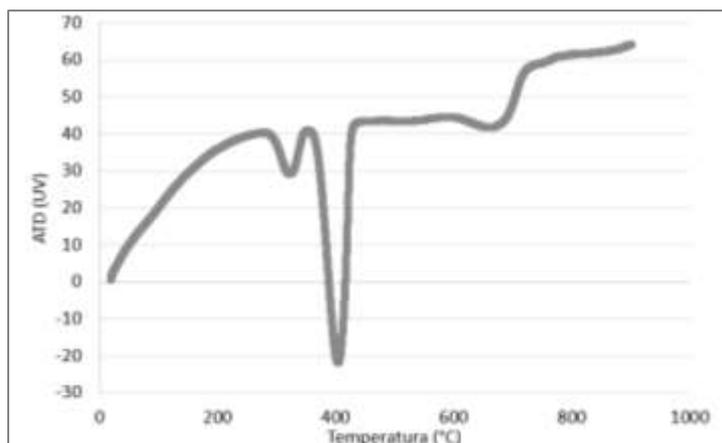


Figura 4.8 Análise Termo diferencial Cal Hidratada.

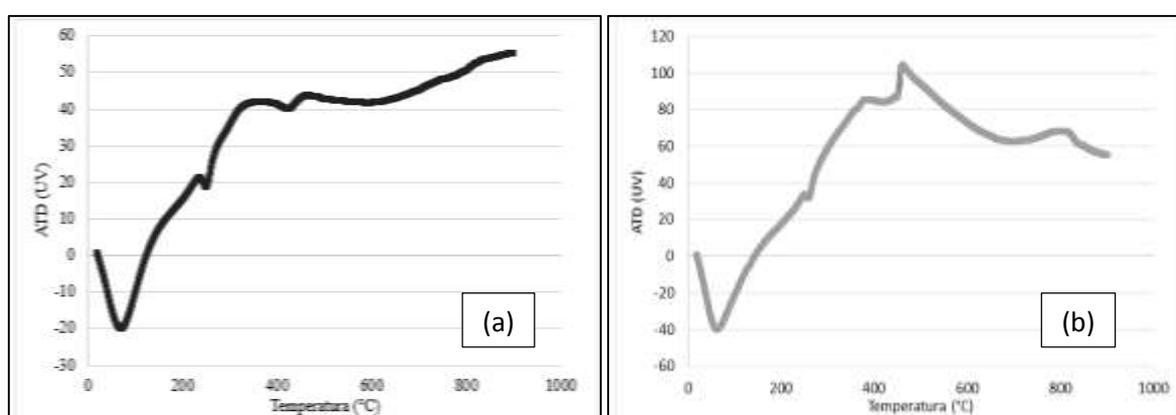


Figura 4.9 Análise Termo diferencial: (a) lodos de ETA; (b): Lodos de ETE.

Na Análise de ATD da Cal Hidratada observa-se dois picos endotérmicos de grande intensidade numa faixa de temperatura entre 260 °C – 420 °C, atribuído à perda de água. Na faixa de temperatura entre 420 °C – 700 °C não se observam picos pela estabilidade do Carbonato de Cálcio.

Nas Análises de ATD, para os lodos de ETA e de ETE, observa-se simultaneamente um pico endotérmico de grande intensidade numa faixa de temperatura entre 60 °C – 100 °C, atribuído à perda de água. Verifica-se a existência de três picos exotérmico, entre as faixas de 260 -270 °C; 380 °C – 400 °C e 460 °C - 470 °C, associados à combustão da matéria orgânica. No lodo de ETE, observa-se que nas temperaturas superiores a 650 °C começa acontecer uma degradação do material, onde não é possível determinar os pontos de endotérmicos ou exotérmicos.

Os lodos de ETA e de ETE, apesar das diferentes composições, apresentam curvas de ATD com comportamento similar, porém com deslocamentos entre as mesmas.

Araújo (2008) encontrou para uma amostra particular de lodo de ETE, na DTA: pico endotérmico a 48 °C, devido da perda de água livre da amostra, e pico exotérmico em 306 °C e 425 °C, característicos da decomposição da matéria orgânica.

4.2 – INCORPORAÇÃO DOS RESÍDUOS LODOS DE ETA E ETE NAS MISTURAS BETUMINOSAS

4.2.1 – Incorporação dos lodos ao ligante Asfáltico

As alternativas foram analisadas a fim de utilizar os resíduos com o menor tratamento possível, e minimizando os custos da calcinação. As primeiras alternativas foram, utilizar os lodos secos ao ar, e secos a 100 ° C. As outras alternativas foram utilizar os lodos nas condições calcinadas a 200 ° C; 300 ° C; 500 ° C e 800 ° C. As duas primeiras alternativas (secos ao ar e a 100 ° C) não foram satisfatórias, pois embora os materiais se encontrassem na condição seca ocorreu reação da matéria orgânica com o asfalto gerando o efeito espuma, apresentando o envelhecimento a curto prazo em virtude da umidade presente nos lodos. O fenômeno de envelhecimento pode ser evidenciado fisicamente pela formação de bolhas de ar provenientes das moléculas de água que reagem na temperatura de usinagem do cimento asfáltico. A Figura 4.10 ilustra este fenômeno.



Figura 4.10 Mistura de CAP e lodo de ETA seco ao ar.

No processo de mistura com os lodos calcinados de ETA e de ETE, observou-se que a sedimentação ocorre em função da temperatura de aquecimento do ligante, sendo que a maior temperatura de aquecimento, menor sedimentação de partículas. Para a temperatura de aquecimento da mistura ligante-lodos (condição calcinados a 500 ° C) maior de 150 ° C, ocorre menor sedimentação dos grãos finos, enquanto que para temperaturas menores ocorre um aumento deste fenômeno.

4.2.2 – Incorporação de resíduos lodos sobre o agregado miúdo

Outra alternativa analisada foi a secagem, preliminar, dos resíduos em estufa a uma temperatura de 175 ° C durante 24 horas, pois essa temperatura corresponde à de aquecimento do CAP para mistura. Após a secagem, estes foram incorporados imediatamente sobre a fração de agregado miúdo de forma homogênea e misturados com a quantidade de ligante asfáltico CAP 50/70, para depois recobrir os agregados graúdos. A mistura dos materiais foi feita à quente e seguiu o

procedimento para fabricação de Concreto Asfáltico da norma (DNIT, 2004), como são apresentados nos resultados de dosagem, avaliação das características mecânicas e de adesividade.

4.3 – ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DOS LODOS DE ETA E DE ETE

4.3.1 – Ensaio de viscosidade Brookfield

A Tabela 4.5 apresenta os resultados da viscosidade Brookfield obtidos para as misturas de referência com e sem adição de cal hidratada. Para a amostra pura de ligante asfáltico CAP 50/70 foram utilizados os spindles 21 e 27. Para a segunda amostra de referência preparada com ligante asfáltico CAP 50/70 e cal hidratada foi utilizado o spindle 27. Os resultados das amostras ensaiadas com o splider 21 mostraram-se compatíveis com o certificado dos ensaios fornecidos pelo distribuidor Centro – Oeste Asfaltos e atingiu os requisitos mínimos das especificações da Agencia Nacional do Petróleo ANP.

Tabela 4.5 Ensaio de viscosidade Brookfield das misturas de referência.

Misturas de referência	Viscosidade Brookfield (cP)		
	135°C	150°C	177°C
CAP 50/70 Teórica SP-21	274	112	57
CAP 50/70 SP-21 PETROBRAS	350	176	66
CAP 50/70 SP-21	350	170	68
CAP 50/70 SP-27	440	180	60
85% CAP + 15% Cal hidratada SP-27	560	240	90

A Tabela 4.6 e as Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os resultados de viscosidade Brookfield para as 10 misturas obtidas com 85% de ligante asfáltico e 15% de lodos nas cinco condições térmicas: seco ar e calcinação a 200 °C, 300 °C, 500 °C e 800 °C.

Tabela 4.6 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETA e ETE.

Condição dos lodos	Viscosidade Brookfield (cP)					
	Com lodos de ETA			Com lodos de ETE		
	135°C	150°C	177°C	135°C	150°C	177°C
Condição Seca ao ar	430	160	60	540	230	90
Calcinação (T = 200 °C)	460	180	80	510	250	110
Calcinação (T = 300 °C)	490	230	60	460	200	60
Calcinação (T = 500 °C)	710	350	100	660	250	90
Calcinação (T = 800 °C)	540	210	60	680	260	80

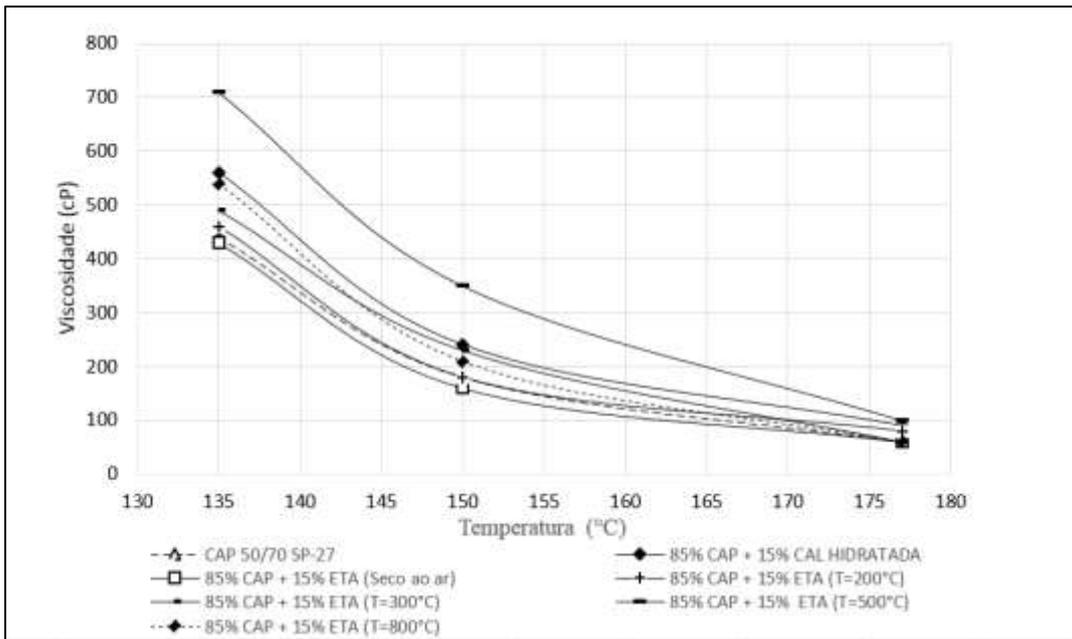


Figura 4.11 Ensaios de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETA.

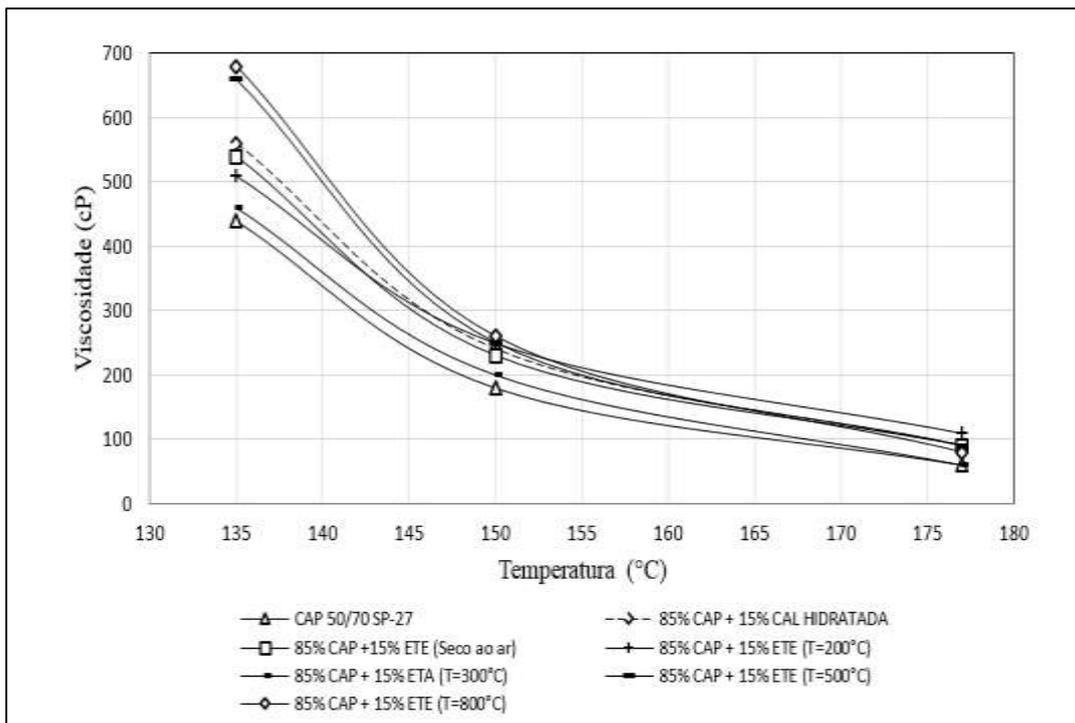


Figura 4.12 Ensaios de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETE.

Observa-se que as misturas feitas para lodos de ETA secos ao ar (sem nenhum tratamento) apresentaram menor viscosidade para as temperaturas compreendidas entre 150 e 177 °C em relação ao CAP puro. Comportamento diferente do observado para os lodos de ETE, que apresentou maior viscosidade nos pontos estudados. Conclui-se pela não viabilidade da utilização dos resíduos de lodo de ETA e de ETE na condição seca ao ar devido à perda de massa na fabricação da mistura e na execução do ensaio de viscosidade, além dos problemas ambientais que podem ocorrer com queima

do resíduo na temperatura de usinagem do cimento asfáltico, assim como também falta de adesividade devida à umidade dos lodos. Em termos gerais, o ensaio de viscosidade para misturas de lodos de ETA e de ETE registraram valores maiores que o ligante puro, indicando maior rigidez, inferindo-se que estes resíduos podem contribuir para o aumento da estabilidade, resistência à tração e módulo de resiliência em uma mistura de concreto asfáltico.

Observa-se que os valores de viscosidade dos lodos de ETA são maiores que dos lodos de ETE para temperaturas de 300 e 500 °C. Isso pode ser atribuído ao fato do lodo de ETA conter maior quantidade de metais que o lodo de ETE em virtude dos produtos químicos utilizados no tratamento da água. Além disto, os lodos de ETE contêm alta presença de matéria orgânica que são eliminados na calcinação, ficando resíduos sólidos que geram menores valores de viscosidade.

4.3.2 – Ensaio de penetração

A Figura 4.13 apresenta os resultados dos ensaios de penetração das misturas com lodos de ETA e de ETE.

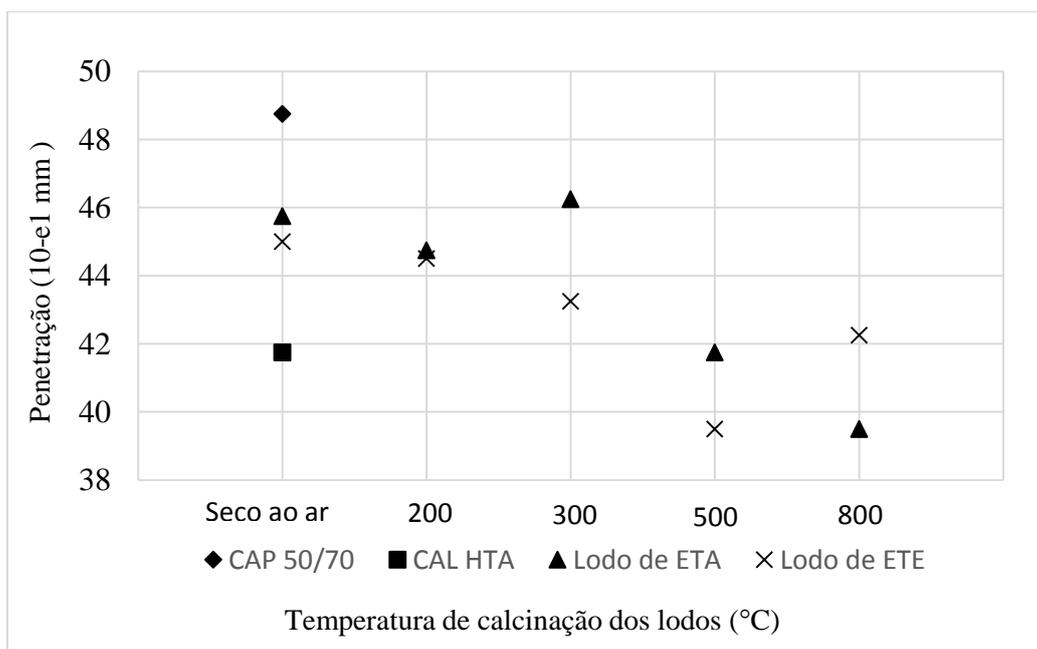


Figura 4.13 Ensaio de Penetração: misturas com lodos de ETA e ETE.

As misturas com lodos de ETA e ETE apresentaram penetrações inferiores a amostra de referência CAP puro, indicando uma maior dureza das misturas. As misturas com o lodos de ETA, nas condições seco ao ar e calcinados a 200 e 300°C, apresentaram um maior valor penetração do que a mistura de referência com Cal hidratada. As misturas calcinadas à temperatura de 500 e 800°C apresentam um valor de penetração igual e inferior à essa mistura de referência.

As misturas com lodos de ETE seco ao ar e calcinados a temperaturas de 200 e 300 °C apresentaram um valor de penetração superior ao valor da amostra de referência com Cal hidratada. Enquanto que a mistura com lodo de ETE calcinado a temperaturas de 500 °C apresentou valor semelhante a amostra com cal e o calcinado a 800 °C valor de penetração inferior a esta.

De forma geral, pode-se observar que as misturas com presença de lodos calcinados a temperaturas de 500 e 800°C apresentam menores valores de penetração. Uma possível explicação para este fato é que o resíduo de lodos de ETE calcinado a 500 °C apresenta uma perda em peso superior a 50%, por isso reage melhor com o CAP 50/70, gerando uma diminuição de penetração e apresentando uma maior dureza.

4.3.3 – Ensaio de ponto de amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento (Anel e Bola) é realizado para conhecer a temperatura na qual o asfalto amolece em condições padronizadas. A Figura 4.14 ilustra os resultados para as misturas com os lodos de ETA e ETE.

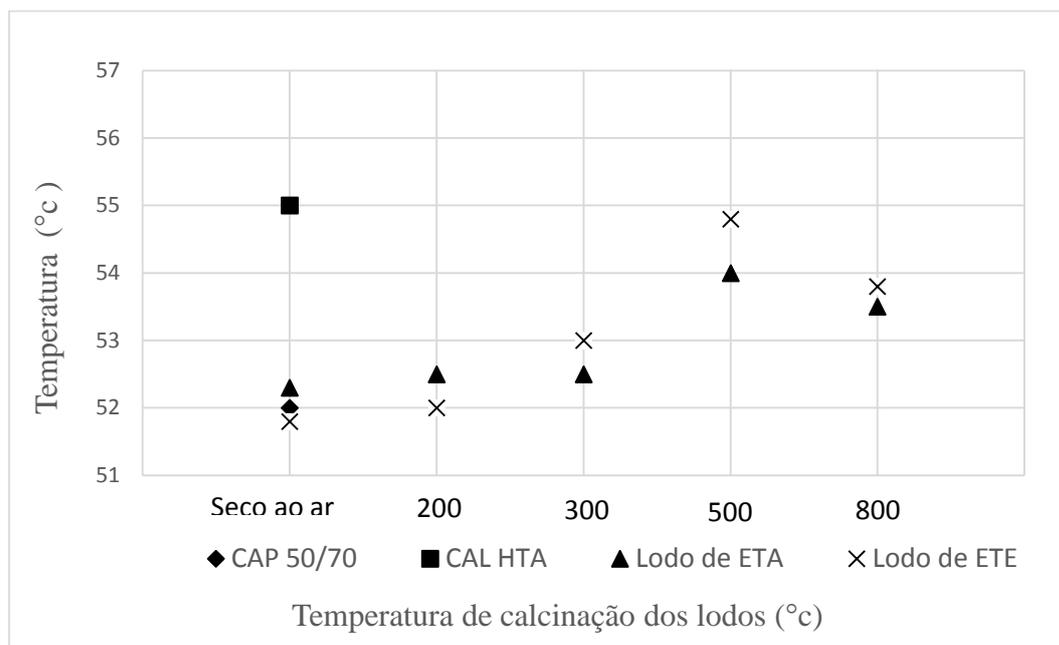


Figura 4.14 Ensaio do Ponto de Amolecimento: misturas com lodos de ETA e ETE.

Observa-se na Figura 4.14 a influência da temperatura de calcinação dos lodos de ETA e de ETE na rigidez do ligante, e conseqüentemente no aumento do ponto de amolecimento. As misturas realizadas com lodos de ETA e ETE, secos ao ar e calcinados a temperatura de 200 °C, apresentaram pouca influência no ponto de amolecimento, indicando que a mistura nesses casos não promove melhoria na consistência em relação à mistura de referência (CAP 50/70). Entretanto, para as misturas feitas com lodos calcinados a temperaturas de 300, 500 e 800°C verifica-se influencia direta dos

lodos no aumento do ponto de amolecimento, o qual pode ser em parte atribuído ao aumento da consistência (maior viscosidade e menor penetração)

A Figura 4.15 mostra que o ponto de amolecimento relaciona-se com a penetração sendo que a linha de tendência situa-se abaixo dos pontos correspondentes a ambas as amostras de referência.

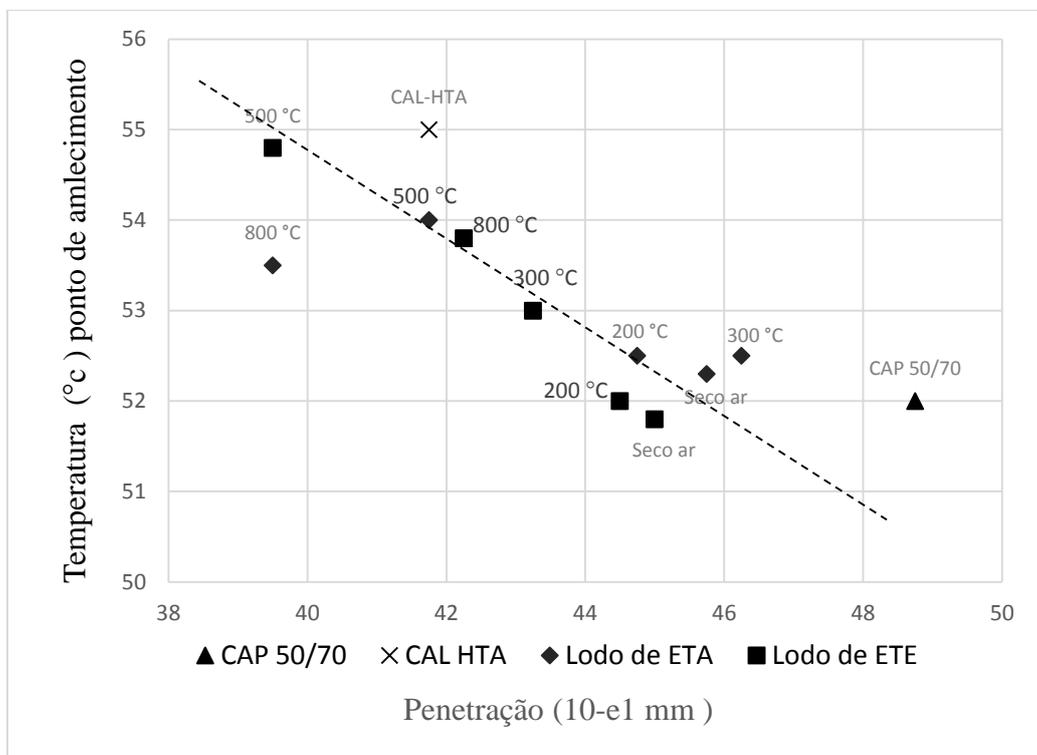


Figura 4.14 Relação entre o Ponto de Amolecimento e a penetração: misturas com lodos de ETA e ETE.

De forma geral, pode-se observar razoável redução na temperatura correspondente ao ponto de amolecimento das misturas com os lodos de ETA e de ETE em relação à mistura de referência com cal hidratada. Caso ocorra um aumento das temperaturas de usinagem, o ponto de amolecimento aumenta proporcionalmente. Apesar do aumento do ponto de amolecimento diminuir a susceptibilidade térmica, caso esta requeira aumento das temperaturas de usinagem e compactação irá gerar um maior custo energético.

A relevância do conhecimento do ponto de amolecimento do ligante é permitir avaliar a resistência às deformações permanentes e ao afundamento de trilhas de roda nos pavimentos. Deste modo, para altas temperaturas de amolecimento, como observado nas misturas de lodos calcinadas a 500 e 800 °C, espera-se a ocorrência de menor afundamento de trilhas e o aumentando da resistência às deformações permanentes.

4.3.4 – Ensaio de envelhecimento RTFOT

O ensaio envelhecimento RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) foi realizado para verificar a influência da adição dos lodos no envelhecimento em curto prazo do cimento asfáltico pela perda de massa e modificação de suas propriedades durante o processo de usinagem. A Tabela 4.7 e a Figura 4.14 indicam perda de massa das misturas em estudo após o ensaio.

Tabela 4.7 Resultados Ensaio RTFOT de misturas com lodos de ETA e ETE.

Mistura		Massa Inicial (gr)	Massa final (gr)	Varição (%)
CAP 50/70 (Referência 1)		35,247	35,185	0,176
85% CAP + 15% Cal hidratada (Referência 2)		34,918	34,851	0,192
Lodo de ETA	Condição Seca ao ar	35,442	35,182	0,739
	Calcinação (T = 200 °C)	34,824	34,756	0,196
	Calcinação (T = 300 °C)	34,893	34,778	0,331
	Calcinação (T = 500 °C)	34,849	34,723	0,363
	Calcinação (T = 800 °C)	35,009	34,92	0,255
Lodo de ETE	Condição Seca ao ar	34,999	34,791	0,598
	Calcinação (T = 200 °C)	35,15	35,069	0,231
	Calcinação (T = 300 °C)	35,176	35,063	0,322
	Calcinação (T = 500 °C)	34,976	34,882	0,269
	Calcinação (T = 800 °C)	35,157	35,054	0,294

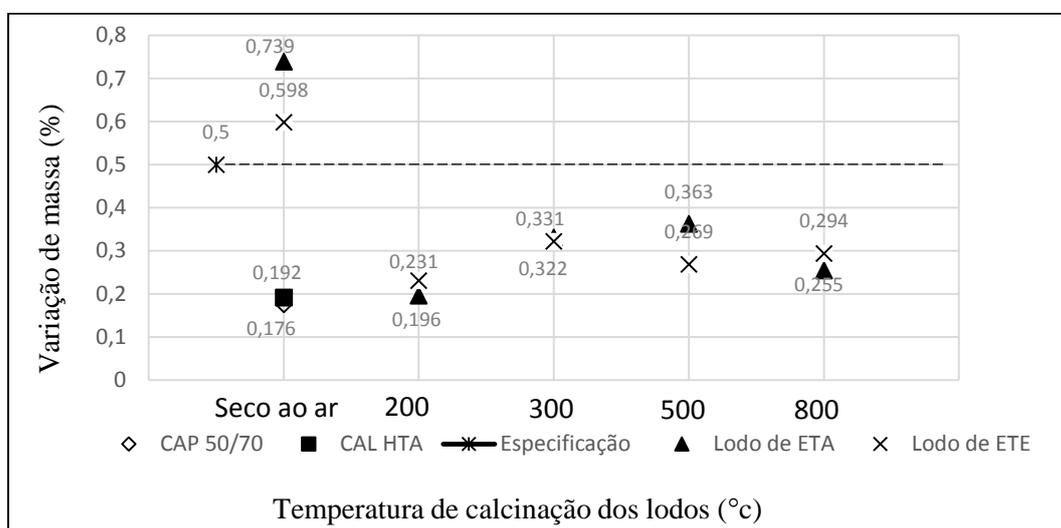


Figura 4.15 Ensaio de RTFOT de misturas com lodos.

Pela análise da Figura 4.15 observa-se a influência da temperatura de calcinação na variação da massa. A amostra com adição de cal hidratada apresenta perda de massa aproximadamente igual à mistura de referência pura (CAP 50/70). As misturas com os lodos de ETA e de ETE secos ao ar apresentaram maior perda de massa, superando o valor máximo especificado em norma (máx 0.5), o que apontaria para a não viabilidade de utilização desses lodos nessa condição de secagem por se

tratar de um resíduo químico volatilizável durante o processo da usinagem, no entanto, considerando-se o fato de que esses lodos secos ao ar ainda permanecem com 6% de umidade no lodo de ETA e 8% no lodo de ETE. Supõe-se que as perdas ocorridas se devam a evaporação da água. Nas demais condições de calcinação observam-se, variações aproximadamente iguais da massa das misturas pela influência dos lodos de ETE e de ETA calcinados a diferentes temperaturas com relação às misturas de referência (CAP 50/70).

4.3.5 – Ensaio de viscosidade Brookfield após do RTFOT

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam os resultados de viscosidade Brookfield para os lodos de ETA e de ETE após os ensaios RTFOT. Nas tabelas 4.8 a 4.9 observa-se o aumento de viscosidade de cada mistura, para as três temperaturas avaliadas.

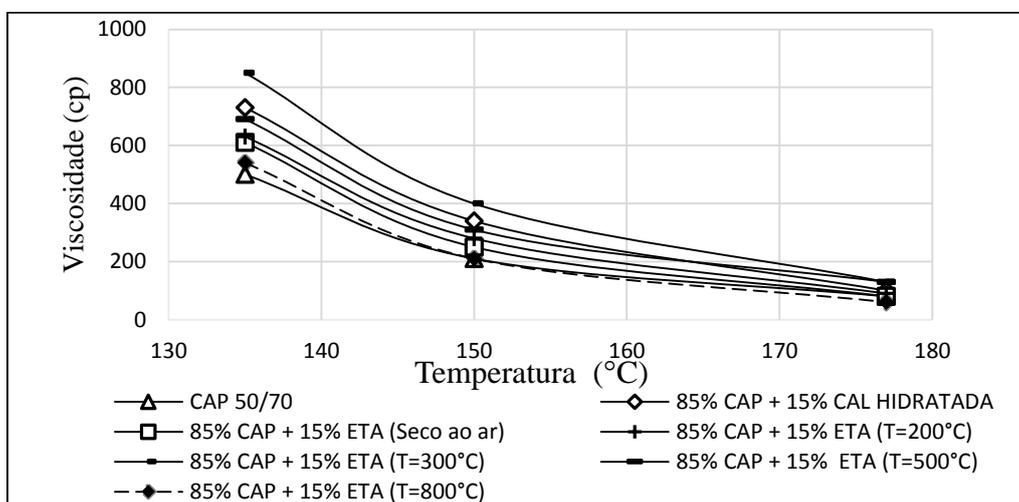


Figura 4.16 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETA após do RTFOT.

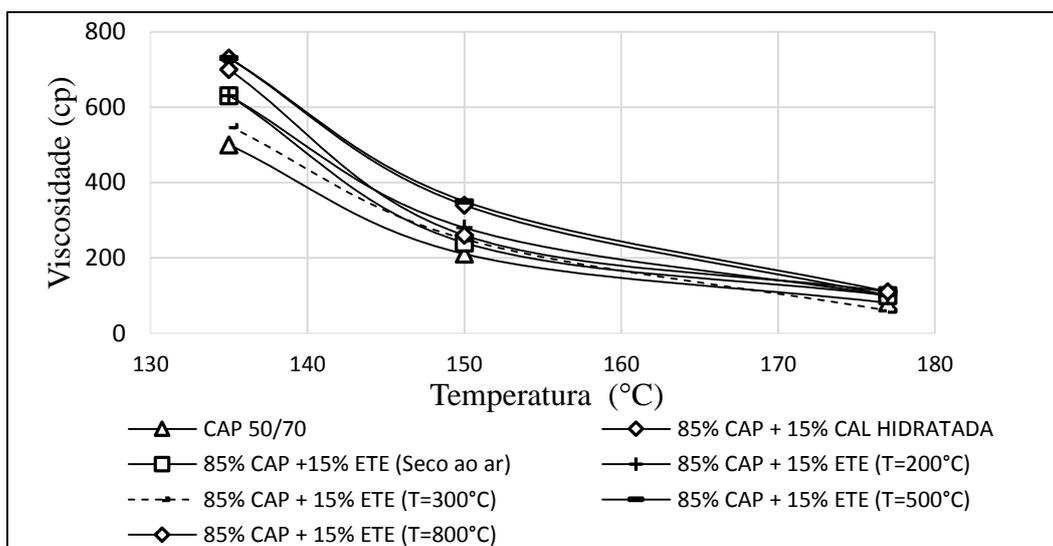


Figura 4.17 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETE após do RTFOT.

Os resultados das Figuras 4.18 a 4.20 mostram que as misturas com lodos de ETA e ETE apresentaram variações maiores do que a mistura de referência 1 (CAP 50/70) e menores do que a mistura de referência 2 (CAP 50/70 + Cal hidratada). Observa-se que para as misturas com lodos calcinados a temperaturas de 500 e 800 °C, as variações oscilam perto das variações da mistura com cal hidratada (Referência 2). Este fato pode ser devido a reações dos lodos de ETA e ETE calcinados a altas temperaturas com o ligante asfáltico modificando a consistência das misturas.

No apêndice, Tabela A5 à Tabela A7, são apresentados os resultados da viscosidade rotacional antes e após do ensaio RTFOT para as amostras de referência e as amostras de estudo respectivamente. A variação de viscosidade antes e após do ensaio RTFOT em porcentagem é apresentado nas Figuras 4.18 a 4.19, para as temperaturas de 135 °C, 150 °C e 177 °C respectivamente.

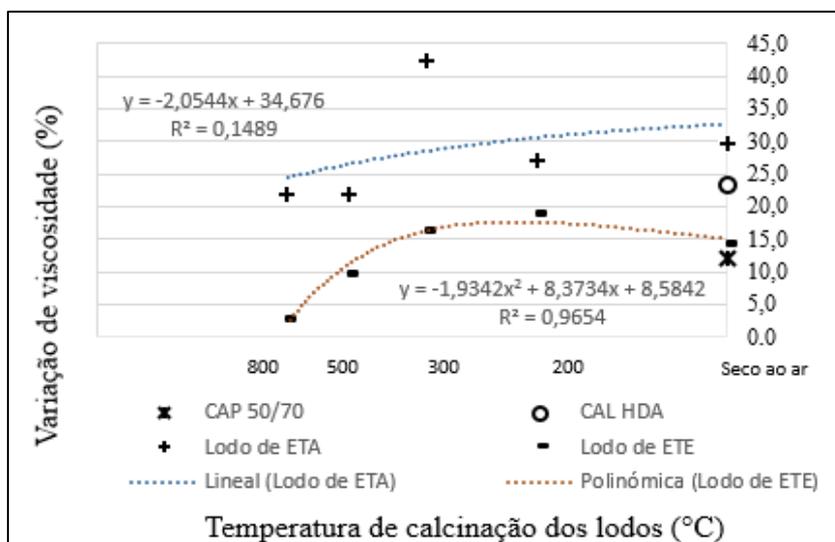


Figura 4.18 Variação da viscosidade após do RTFOT (135 °C).

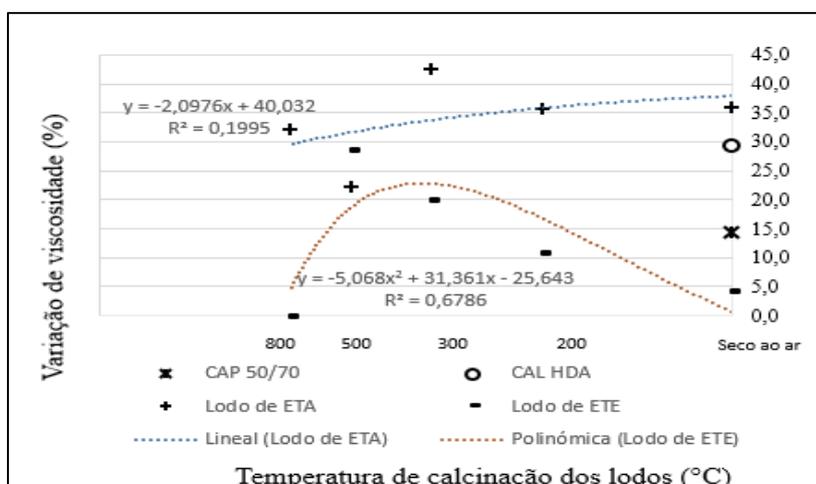


Figura 4.19 Variação da viscosidade após do RTFOT (150 °C).

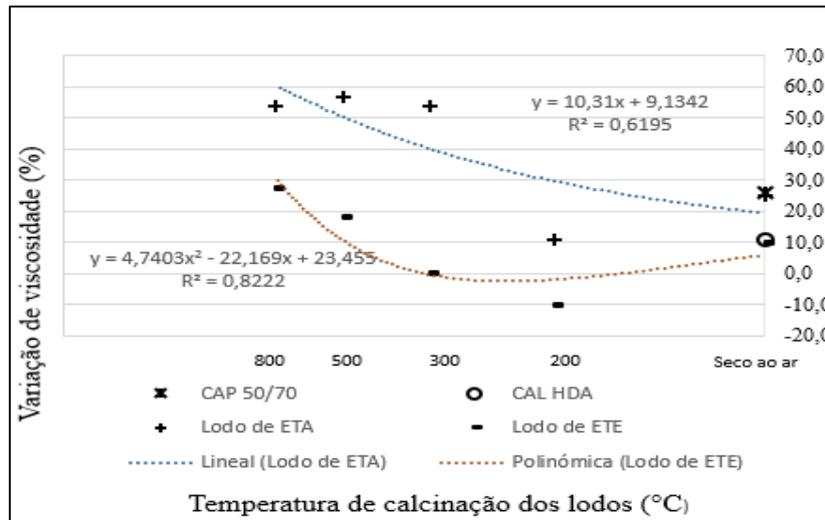


Figura 4.20 Variação da viscosidade após do RTFOT (177 °C).

Nas figuras de variação de viscosidade, pode-se observar que os lodos de ETA, nas diferentes temperaturas de calcinação, apresentam um comportamento com uma tendência de função lineal, enquanto que os lodos de ETE apresentam uma linha de tendência de uma função polinômica. Observa-se que as misturas com os lodos de ETA apresentam uma variação maior que as misturas com os lodos de ETE, constatando que as misturas com os lodos de ETA aumentam a consistência do ligante asfáltico.

Observa-se que aconteceu maiores variações de viscosidade antes e após do ensaio RTFOT na temperatura de estudo de 177 ° C. De forma geral, pode-se observar que maiores temperaturas de calcinação apresentam maiores variações de viscosidade, fato que pode ser atribuído ao fenômeno de envelhecimento da amostra, pois a mesma fica exposta a diferentes temperaturas.

4.4 – ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.4.1 – Metodologia de dosagem Marshall

A dosagem Marshall foi realizada para determinar o teor ótimo de ligante para a fabricação do concreto asfáltico com adição dos lodos calcinados a 500 ° C ao ligante asfáltico. Utilizou-se a composição 80% de CAP puro e 20% material filer. A utilização dos lodos calcinados a 500 °C nessa fase do estudo se deu devido ao fato de que nessa condição as misturas apresentaram maiores incrementos na consistência do ligante.

A partir das curvas de viscosidade *versus* temperatura dos quatro tipos de ligante asfáltico estudados (LA, LA-CH, LA-ETA e LA-ETE), obteve-se as faixas de temperaturas de usinagem e compactação das misturas. As faixas das temperaturas de usinagem e de compactação foram obtidas a partir das faixas de viscosidades preconizadas pela norma (DNER, 1995).

Na Figura 4.21 são apresentadas as curvas de viscosidade *versus* temperatura para os ligantes de estudo. Observa-se acréscimos nas faixas de temperaturas de compactação e usinagem das misturas com adição dos resíduos, entretanto estas não diferem significativamente da mistura de referência do CAP puro e são semelhantes à da Cal. De modo geral, os incrementos de temperaturas de fabricação de concreto asfáltico são considerados razoáveis por apresentar temperaturas de aquecimento do ligante asfáltico inferiores 177 °C, temperatura crítica na qual ocorre o envelhecimento do ligante.

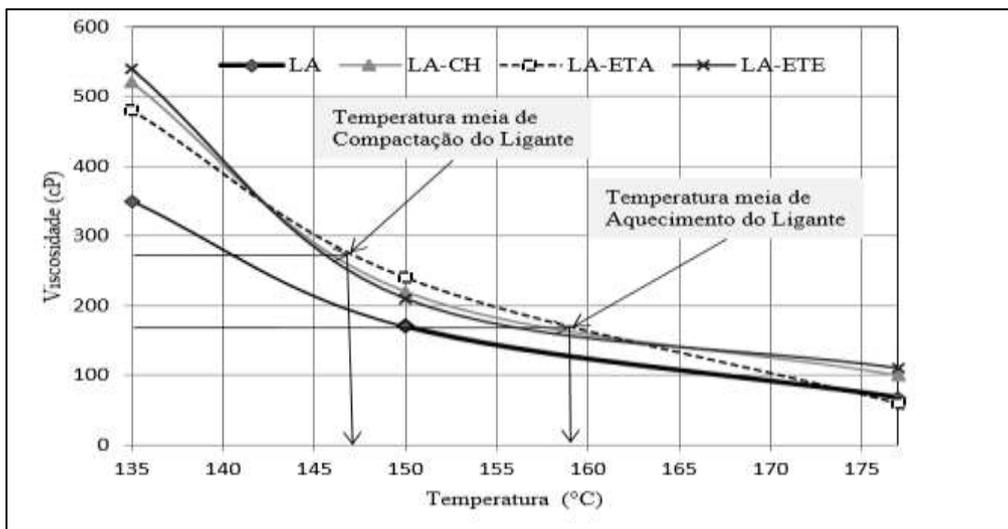


Figura 4.21 Curvas de Viscosidade versus Temperatura de Ligantes.

A Tabela 4.8 resume as faixas de temperaturas de usinagem (aquecimento do ligante e agregado) e de compactação utilizadas nesta pesquisa sendo que os desvios correspondem aos valores medidos.

Tabela 4.8 Faixas de temperaturas de Usinagem e Compactação.

Limites de temperaturas de mistura e compactação	Referência	Via úmida		
	CA	CA-CH-u	CA-ETA-u	CA-ETE-u
Aquecimento do ligante	150 +/- 3	157,5 +/- 4	159 +/- 3	155 +/- 2, 5
Compactação	140 +/- 2	145 +/- 2	147 +/- 2,5	145 +/- 1,5
Aquecimento do agregado	165 +/- 3	172,5 +/- 4	174 +/- 3	170 +/- 2,5

O aumento das viscosidades dos ligantes modificados com a cal e com os resíduos de lodos acarretou aumento nas faixas de temperaturas de compactação e usinagem das misturas.

4.4.2 – Teor ótimo de Asfalto

Para determinar o teor ótimo de asfalto foram realizados ensaios com cinco diferentes teores de CAP puro, CAP + Cal, CAP + lodo de ETA e CAP + lodo de ETE, assumindo a partir dos

resultados obtidos o teor ótimo de 5% com desvio padrão de +/-0,5%. Foram utilizados três métodos para determinar este teor ótimo. O primeiro critério considera o valor médio do teor ótimo correspondente ao máximo da estabilidade, máxima massa específica e um determinado volume de vazios mínimo. O segundo baseia-se na norma DNIT, considerando a relação de betume/vazios e o um determinado valor do volume de vazios da mistura, exigindo-se um valor de estabilidade mínima. O terceiro corresponde à intercepção gráfica entre o volume de vazios e a relação betume/vazios segundo as faixas máximas e mínimas das normas. A Tabela 4.9 e o Figura 4.22 apresenta o resultado dos teores ótimos de asfalto calculados a partir dos três métodos, para os quatro tipos de misturas asfálticas.

Tabela 4.9 Teor de asfalto.

Teor de Asfalto (%)				
Teor de Asfalto	Referência	Via úmida		
	CA	CA-CH-u	CA-ETA-u	CA-ETE-u
Critério 1	5,2	5,2	5,3	5,3
Critério 2	5	4,7	4,9	5
Critério 3	5,1	4,8	5	5,1
Média	5,1	4,92	5,08	5,14

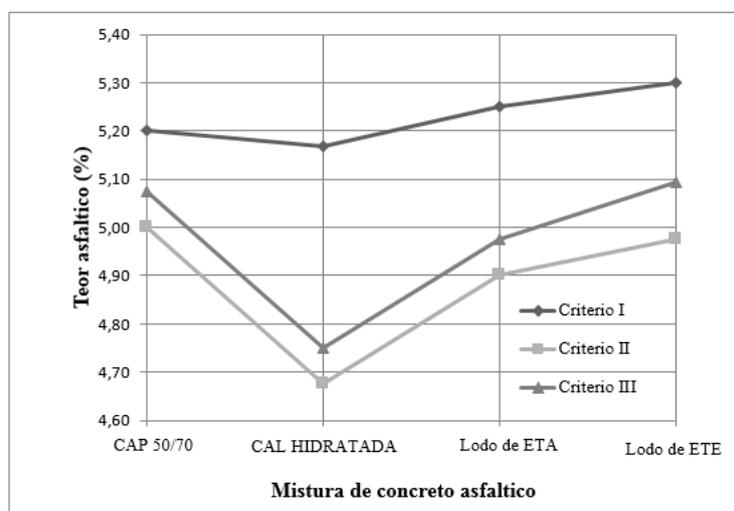


Figura 4.22 Determinação do teor ótimo de asfalto.

Embora haja uniformidade nos três métodos, utilizou-se o método gráfico para determinar o teor ótimo, pois além de relacionar os parâmetros volume de vazios e relação betume/vazios, apresentou valor intermediário em relação aos encontrados pelos outros métodos. As misturas realizadas com cal e com o lodo de ETA apresentaram valores inferiores ao teor ótimo obtido para o CAP puro, entretanto a mistura com lodo de ETE apresentou valor equivalente a esta.

Pode-se concluir que a adição da Cal Hidratada, na proporção 20% do peso do ligante asfáltico, contribui para redução de 0,3% do teor ótimo de asfalto no CBUQ, sendo o teor ótimo

composto por: 0,96% Cal-Hidratada, e 3,84% CAP 50/70. A mistura com lodo de ETA apresentou uma redução do 0,1% no teor ótimo de asfalto, utilizando 4% de CAP 50/70 e 1% do resíduo. Na mistura com os lodos de ETE não houve variação no teor ótimo de asfalto, mas a quantidade de CAP 50/70 reduziu para 4,08%, com adição de 1,02% de Lodo de ETE.

Uma possível explicação da redução do teor ótimo de asfalto nas misturas com a cal hidratada e os lodos de ETA deve-se a diminuição da massa específica do ligante modificado com os materiais fileres (Lodos e Cal hidratada). A Tabela 4.10 e a Figura 4.23 apresentam os resultados dos ensaios de densidade dos ligantes modificados e os respectivos teores de asfalto. Observa-se que o aumento da densidade do CAP produz uma tendência de diminuição do teor ótimo de asfalto num CBUQ, no entanto, volumetricamente se esperaria o contrário o que aponta para a influência da cal e dos lodos no comportamento das misturas.

Tabela 4.10 Densidades dos ligantes modificados.

Ligante modificado	Massa específica do Ligante		Teor Ótimo de Asfalto	Teor de filer adicional
	Modificado	Teórico	No CBUQ	
LA: CAP 50/70	1,002	----	5,1	0,00
LA – CH	1,129	1,146	4,8	0,96
LA-ETA	1,085	1,090	5,0	1,00
LA-ETE	1,050	1,061	5,1	1,02

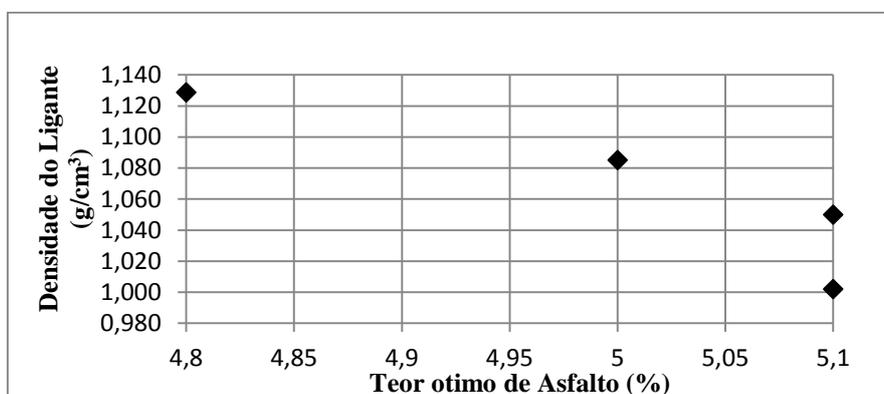


Figura 4.23 Densidade do ligante modificado versus Teor ótimo de asfalto.

O aumento da densidade do CAP, devida à contribuição do material filer, produz uma tendência de diminuição do teor ótimo de asfalto no CBUQ, pois este diminui com o aumento da densidade do ligante.

4.4.3 – Parâmetros de Dosagem

A Tabela 4.11 apresenta os parâmetros volumétricos a partir do teor ótimo de asfalto para todas as misturas estudadas.

Tabela 4.11 Parâmetros Metodologia Marshall.

Parâmetros	Especificações	Referência	Via úmida			Via seca		
	DNIT 1995	CA	CA-CH-u	CA-ETA-u	CA-ETE-u	CA-CH-s	CA-ETA-s	CA-ETE-s
Ligante asfáltico (%)	---	5,1	4,8	5,0	5,1	4,80	5,00	5,10
d (g/cm ³)	---	2,423	2,392	2,370	2,37	2,359	2,352	2,325
DMT(g/cm ³)	---	2,509	2,468	2,450	2,448	2,434	2,427	2,399
VV (%)	3 a 5	3,4	3,1	3,3	3,1	3,1	3,1	3,1
VAM (%)	Min 14	15,72	13,57	14,56	15,08	11,3	11,7	11,8
RBV (%)	75 a 82	78,5	78,5	77,5	77,6	78,4	79,0	79,2
Estabilidade (N)	5000 min	11300	11400	15080,4	16100	20780,0	13982,3	14820,0
Fluência (0,25 mm)	----	20	17	14	10	13	15	17

Verifica-se que as densidades aparentes das misturas (d) com presença de material filer adicional (Cal hidratada e lodos) em todas as formas de incorporação são inferiores à da amostra de referência (CA). Este fato ocorre provavelmente pelo aumento da densidade do ligante modificado, ou pelo aumento da consistência dos ligantes asfálticos utilizados.

Observa-se que as densidades aparentes das misturas com adição de material filer no agregado graúdo por via seca são inferiores às das misturas com adição de lodos no ligante asfáltico por via úmida, indicando que os grãos de material filer tem maior capacidade de preencher os vazios da mistura, quando são incorporados sobre o agregado miúdo, que no ligante asfáltico.

Os quatro tipos de misturas, cumprem satisfatoriamente os requisitos da Norma (DNIT, 2006) quanto ao volume de vazios compreendidos entre 3 e 5%.

Misturas asfálticas que apresentem maior volume de vazios, apresentam maior tendência ao envelhecimento do ligante asfáltico, pois o ar presente nos vazios acelera o processo de oxidação do asfalto. Nesse sentido, os lodos contribuem para retardar o processo de envelhecimento no concreto asfáltico e aumentar sua resistência.

O tamanho máximo nominal da granulometria dos agregados adotada foi 25,4 mm, pelo qual, o volume de agregado mineral mínimo (VAM) segundo os requisitos exigidos na norma Brasileira (DNIT, 2004) é 14%. Observa-se que as misturas com adição dos lodos e de cal hidratada no agregado miúdo por via seca não atendem ao preconizado devido a: diminuição da quantidade de ligante asfáltico, aumento do material filer e baixo teor de absorção dos agregados graúdos. Este fato é prejudicial, pois quando o pavimento sofrer ação das cargas pode se submeter a deformações, deslocamentos e ruptura no revestimento. As misturas realizadas com lodos e cal hidratada adicionados ao ligante asfáltico, via úmida, atingem os requisitos satisfatoriamente.

4.5 – RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.5.1 – Estabilidade e Fluência Marshall

A Tabela 4.11 apresentou os resultados de estabilidade e fluência Marshall. De acordo com a tabela verifica-se que as misturas com adição de lodos de ETA e de ETE apresentaram maior estabilidade que as duas misturas de referência. Este fato indica que os corpos de prova com lodos incorporados sobre o agregado miúdo por via seca são mais resistentes à ruptura que os corpos de prova de prova cujo resíduo foi adicionado ao ligante por via úmida. Observa-se que a misturas de concreto asfáltico com lodos de ETE, independentemente da forma de incorporação, apresentaram maior estabilidade que os lodos de ETA.

Os corpos de prova com adição dos lodos de ETE e de ETA apresentaram valores de fluência inferiores aos da amostra com CAP puro e CAP mais cal, indicando menor deslocamento vertical ante a carga máxima. Verifica-se que os corpos de prova com os resíduos de lodos e cal hidratada adicionada ao ligante asfáltico por via úmida apresentaram menores deslocamentos que as misturas confeccionadas com a adição dos resíduos e cal hidratada por via seca ou sobre agregado miúdo.

4.5.2 – Resistência à tração estática RT

A Figura 4.24 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração realizados para as misturas estudadas. Analisando-se os resultados verifica-se maiores valores de resistência à tração nas misturas feitas com os ligantes modificados com presença dos lodos de ETA e ETE do que as amostras de referência. Todos as amostras analisadas atenderam ao valor mínimo de 0,65 MPa preconizado pela norma (DNIT, 2006). Resultado similar foi obtido por Silva (2008) ao estudar a incorporação do lodo de ETA como material filler.

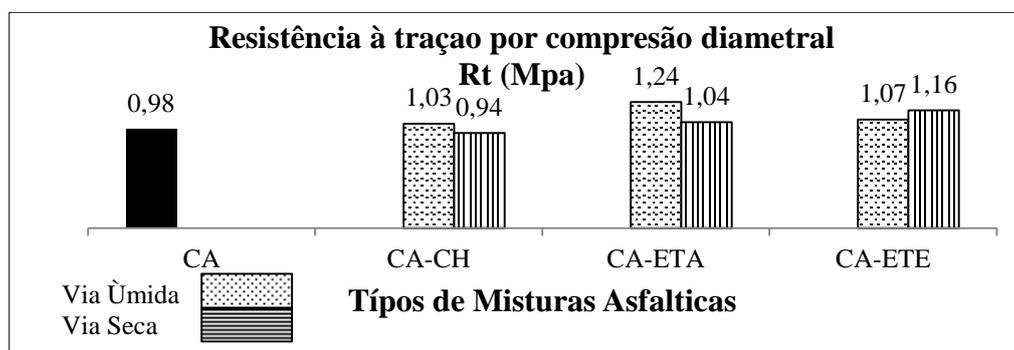


Figura 4.24 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

O aumento da resistência à tração indica maior capacidade estrutural das misturas, o aumento desta com a presença dos lodos podem estar atrelados, mesmo que parcialmente devido à pequena variação ocorrida, à diminuição do volume de vazios conforme mostrado na Tabela 4.14. As misturas

com adição de lodos de ETA no ligante asfáltico por via úmida indicam maior aumento da resistência à tração que as misturas com lodos incorporados por via seca provavelmente devido a sua maior interferência na viscosidade do asfalto.

O resíduo lodo de ETE apresentou melhores resultados quando foi adicionado sobre o agregado miúdo, via seca. O fato pode ser explicado pela alta relação betume/vazios, indicando que os vazios estão preenchidos com ligante e por tanto apresentam maior resistência.

4.5.3 – Módulo de resiliência

A Figura 4.25 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de resiliência das misturas estudadas. Os resultados permitem determinar a rigidez da mistura, segundo a relação entre a repetição da tensão de desvio e as deformações recuperáveis. De modo geral, verifica-se o aumento do valor do módulo de resiliência das misturas com incorporação dos resíduos lodos de ETA e de ETE em relação à mistura de referência -CAP puro.

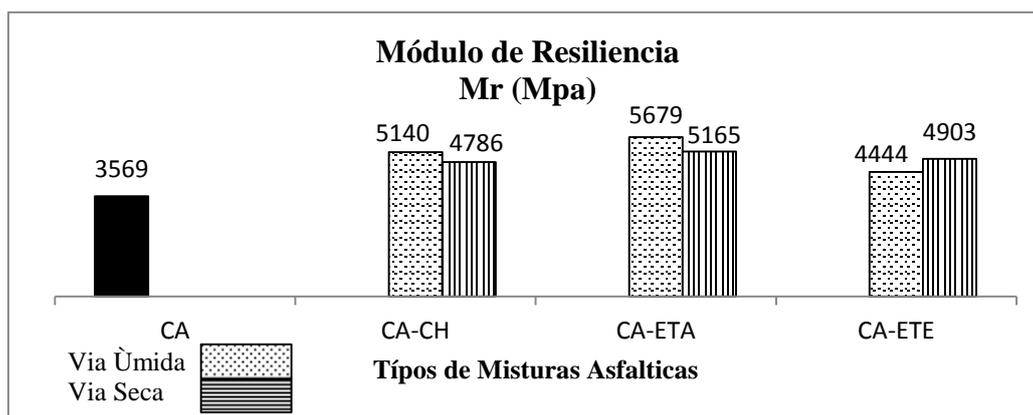


Figura 4.25 Ensaio de módulo de resiliência.

Observa-se que as misturas confeccionadas com ligante modificado com lodo de ETA, por ambos processo de adição, apresentaram maior valor de módulo de resiliência do que ambas as misturas de referência. Entretanto, as misturas com adição de lodo de ETE, com forma de adição análoga a de lodo de ETA, apresentaram valores superiores a mistura com CAP puro e inferiores as misturas contendo cal hidratada.

A melhoria dos valores de módulo de resiliência com a incorporação dos lodos de ETA e de ETE calcinados ocorrem devido à maior rigidez das misturas proporcionada pelo aumento da viscosidade. Constatação semelhante tem sido evidenciada em trabalhos com utilização de asfaltos modificados com diferentes materiais, principalmente com Borracha (Momm et al., 2004).

As elevadas rigidezes das misturas com lodos de ETA e de ETE podem ser atribuídas às melhores ligações entre o ligante asfáltico e as partículas finas desses resíduos devido à diferença de cargas eletromagnéticas. Outro fator a ser considerado é a perda de resíduos voláteis no processo de calcinação, gerando afinidade, assim como também o envelhecimento em curto prazo ocorrido na fabricação dos corpos de prova.

A aceitabilidade dos incrementos de módulo de resiliência das misturas estudadas com a adição de lodos de ETA e ETE irá depender das características dos materiais e espessuras das outras camadas da estrutura de pavimento dentro de uma análise conjunta, pois segundo Silva (2008) a compatibilização das deformações define a vida útil do pavimento. Quando o valor do módulo de resiliência aumenta consideravelmente, diminui a flexibilidade, podendo acontecer deformações permanentes. Porém, o critério para definir valores de módulo de resiliência adequados, é a espessura da camada de revestimento (Junior, 2008) e a compatibilidade de deformação entre as camadas que constituem o pavimento.

4.6 – ENSAIOS DE ADESIVIDADE

4.6.1 – Resistência ao dano por umidade induzida - ensaio *Lottman*

A norma da (AASHTO, 2007) determina a compactação de corpos de prova com energia variável de modo a se obter volume de vazios variando entre 6% e 8% para definir a curva número de golpes *versus* volume de vazios. A partir desta determina-se o número de golpes a ser utilizado na compactação ao longo do estudo da mistura (Figura 4.26). A curva de calibração foi feita para a mistura de referência tipo I (CAP 50/70) sendo esse resultado estendido para os outros tipos de misturas.

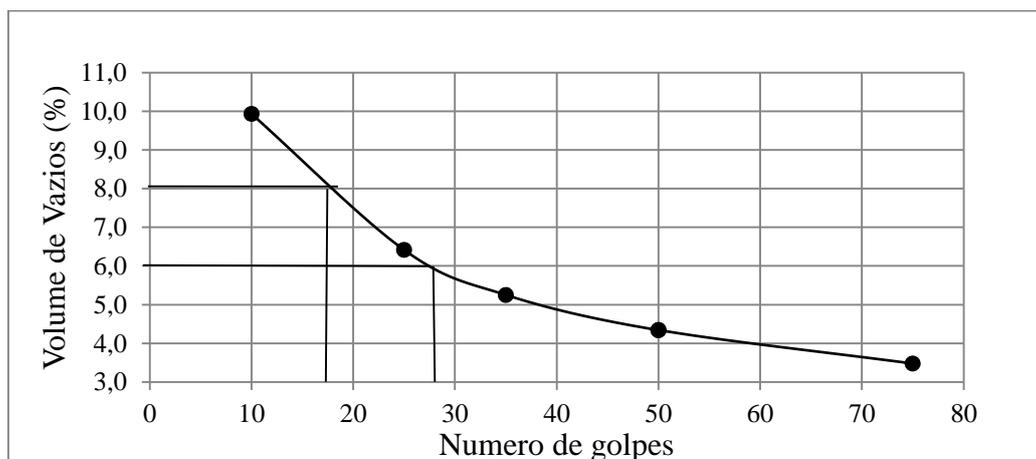


Figura 4. 26 Números de golpes – Volume de Vazios.

Observa-se que para atingir um volume de vazios entre 6% e 8% para a mistura de referência analisada é necessário um número de golpes compreendidos entre 18-28. Adotou-se então 25 golpes

para a compactação das demais amostras. O resultado do volume de vazios obtido para cada amostra é apresentado no apêndice, Tabela C3. Na mesma tabela apresentam-se também os valores da resistência a tração diametral dos conjuntos de amostras condicionadas e não condicionadas. A Figura 4.16 ilustra o valor da relação de resistências à tração RRT dos dois conjuntos de amostras estudadas.

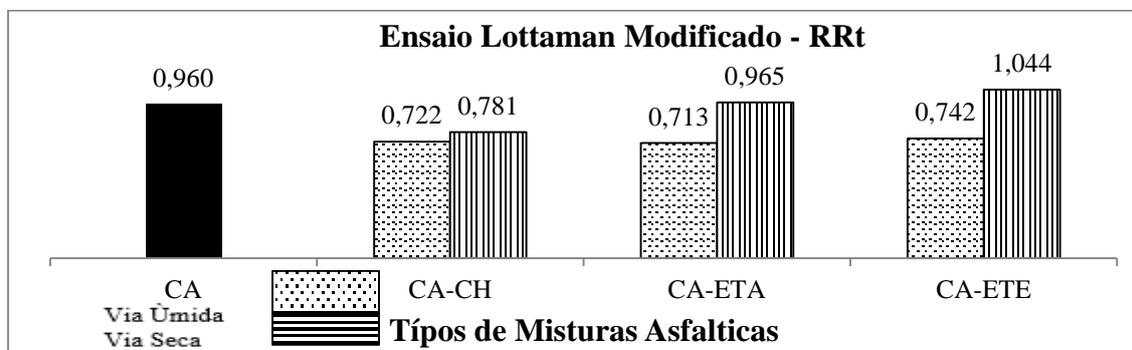


Figura 4.27 Resultados de ensaio Lottman modificado

As misturas com adição de cal hidratada atingiram os valores mínimos da relação de resistências RRT com e sem acondicionamento que propõe a AASHTO 2007 e a norma Brasileira ABNT 15617 (2011).

Observa-se que o resíduo de lodo de ETA e de ETE apresentaram simultaneamente melhor desempenho como materiais contribuintes da adesividade quando foram incorporados sobre o agregado miúdo por via seca. O fato pode ser atribuído aos pontos de contato gerados entre o material filer e os grãos dos agregados graúdos e miúdos. Enquanto que os lodos incorporados pela via úmida apesar de atingir o limite requerido pela AASHTO, apresentaram menor valor da relação de resistência RRT. O fato das misturas apresentar menor relação de resistências, pode ser atribuído ao aumento da rigidez do ligante asfáltico quando foi submetido a temperatura baixa. O aumento da rigidez ocasiona perda da flexibilidade e porem a ser frágil, tendo assim menor relação das resistências (Silva,2008).

De forma geral, todas as misturas estudadas com os resíduos sólidos, atingiram o valor da relação RRT especificado como mínimo pela AASHTO 283 (2007) e a norma Brasileira ABNT 15617 que estipulam 70%, ou seja, 0,7 conforme os resultados apresentados na Figura 4.27.

Na versão da norma (AASHTO 1999) que se compatibiliza com o método da SUPERPAVE, o valor mínimo de aceitação é de 80%. Nesta abordagem, as misturas de estudo confeccionadas pela via úmida não atingem o critério da norma. O fato de apresentar menores relações das resistências à tração das amostras condicionadas e não condicionadas, pode estar associado ao aumento da rigidez do ligante asfáltico submetido às temperaturas baixas do ensaio.

4.6.2 – Desgaste por abrasão – Ensaio Cântabro

Os resultados do ensaio de desgaste por abrasão de misturas betuminosas com adição de resíduos lodos e cal hidratada nas duas condições de incorporação (via seca e úmida) são apresentados na Figura 4.28. De modo geral, todas as misturas estudadas apresentaram um maior desgaste à abrasão do que a amostra de referência (CA), fato que pode atribuir-se à diminuição da quantidade de CAP 50/70. A cal hidratada apresentou a maior porcentagem de desgaste pela via úmida. Em termos gerais, todas as amostras estudadas apresentaram valores menores que 25%, situando-se, portanto, dentro do limite permitido para ligantes modificados com polímeros.

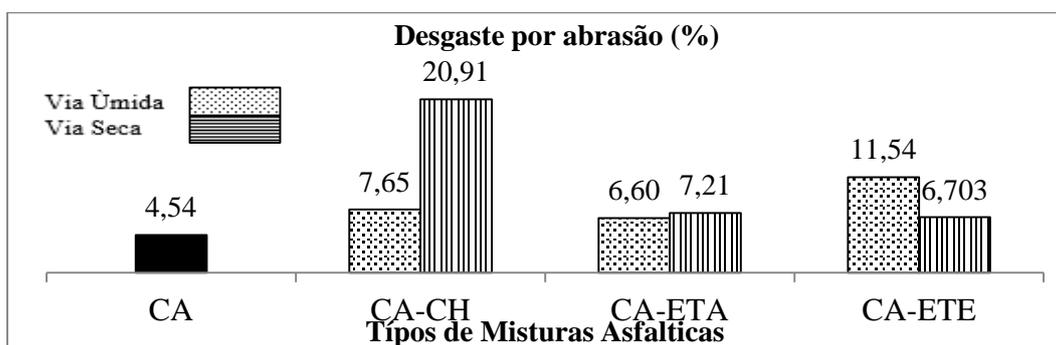


Figura 4.28 Resultados do ensaio Cântabro - Desgaste por abrasão

A mistura betuminosa com resíduos de lodos de ETA incorporados no ligante asfáltico por via úmida apresentou menor desgaste que a mistura com os lodos incorporados sobre o agregado miúdo por via seca. A mistura com presença de lodo de ETE adicionado sobre o agregado miúdo por via seca apresentou menor desgaste que a mistura confeccionada por via úmida, fato atribuído aos pontos de contato gerados pelo material filer e os agregados graúdos na mistura por via seca.

Observa-se que a adesividade do ligante asfáltico com os resíduos de lodo de ETE não foi satisfatória como a do CAP puro, originando uma porcentagem de desgaste na mistura por via úmida igual a mais de duas vezes o apresentado pela mistura de referência CA (Figura 4.29).



Figura 4.29 Corpos de prova após o ensaio Cântabro: (a) Mistura 1 - Asfalto convencional; (b) Mistura 4 - Asfalto modificado com lodos de ETE.

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Nesse capítulo apresentam-se as principais considerações e conclusões das análises das propriedades mecânicas e de adesividade dos concretos asfálticos com adição dos lodos de ETA e de ETE, segundo as duas formas de incorporação, por via seca e por via úmida.

5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

- Na determinação da viscosidade rotacional - Brookfield dos ligantes modificados com a incorporação dos resíduos lodos e da cal, mostrou-se recomendável fazer a incorporação e agitação do ligante modificado nos intervalos de mudança de temperatura do material de modo a evitar processos de sedimentação e a obtenção de uma amostra homogênea e representativa.
- No processo de calcinação recomenda-se adotar uma camada de resíduo de no máximo um centímetro de espessura, a fim de que o oxigênio penetre ao longo da camada e consiga-se fazer efetivamente o processo de combustão.

5.2 – CONCLUSÕES

- Os resultados dos ensaios de penetração apresentaram redução do valor quando incorporados os lodos de ETA e de ETE secos ao ar e calcinados a diferentes temperaturas. Esta redução indica o aumento de consistência do ligante asfáltico com a incorporação.
- Com respeito à consistência do cimento asfáltico modificado com a presença dos lodos de ETA e de ETE, observou-se o aumento da viscosidade com a temperatura de calcinação. A simulação do envelhecimento em curto prazo, RTFOT, e a viscosidade após, corroborou com a constatação da influência dos lodos no aumento da consistência das misturas sendo que as maiores alterações se deram para os lodos calcinados a 500 ° C e 800 ° C como modificadores no CAP 50/70.
- Nas avaliações das misturas com lodos de ETA e de ETE na condição seco ao ar, embora seja a alternativa mais econômica e ecologicamente correta quanto ao consumo de energia por requerer tratamento mínimo do resíduo, não se verificou melhorias nas propriedades de consistência. A amostra nesta condição não atendeu às condições preconizadas pela norma ASTM D 2872 quanto à perda de massa no ensaio RTFOT.
- Os teores ótimos de asfalto determinados na dosagem Marshall diminuíram respectivamente em 0,3% e 0,1 % quando se utilizou a cal hidratada e o lodo de ETA, em relação à amostra de CAP puro.

- Observou-se que a mistura com lodo de ETA adicionado ao ligante asfáltico apresentou maiores valores de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência que as misturas de referência. De maneira análoga, as misturas do lodo de ETE adicionado diretamente no agregado graúdo apresentaram melhoria das propriedades mecânicas quando comparadas às amostras de referência.
- As relações de resistência à tração por compressão diametral das misturas com presença dos lodos de ETA e de ETE submetidas à condição de dano por umidade induzida são satisfatórias.
- No ensaio Cântabro, pode-se concluir que os lodos de ETA, em suas duas formas de incorporação, e o lodo de ETE incorporado sobre o agregado miúdo apresentaram desgastes inferiores ao preconizado pela norma.
- Avaliando-se o conjunto de resultados verifica-se ser tecnicamente viável o uso dos lodos de ETA e de ETE como filler em misturas asfálticas. O melhores resultados foram obtidos para esses lodos calcinados a 500 ° C, com a incorporação por via úmida para os lodos de ETA e por via seca para os lodos de ETE.
- Pode-se concluir que tecnicamente a utilização dos lodos de ETA e de ETE no concreto betuminoso na forma proposta é viável e ambientalmente permite a disposição segura dos resíduos, no entanto, pesquisas adicionais são importantes para validar esses resultados.

5.3 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A pesquisa trouxe avanços na viabilidade de utilizar os resíduos de lodos de ETA e de ETE no concreto asfáltico, mas para aprofundar no tema, como sugestões para pesquisas futuras indicam-se:

- Avaliar misturas betuminosas com ligante asfáltico modificado com porcentagens maiores e menores de lodo que os teor estudado (20% lodos – 80% CAP);
- Utilizar diferentes tipos de materiais granulares, na fabricação do concreto asfáltico, a fim de melhor analisar a adesividade com os ligantes com presença dos lodos, em especial com agregados que apresentem pouca adesividade ao ligante asfáltico convencional;
- Utilizar nas misturas a frio o lodo de ETA e de ETE em condição não calcinada.
- Execução e monitoramento de um trecho experimental dividido em quatro sub-trechos: um apenas com o CAP, um com CAP mais cal hidratada, um com adição de lodo de ETA e um com adição de lodo de ETE, a fim de extrair corpos de prova do trecho e avaliar as propriedades mecânicas e de adesividade em laboratório;

- Estudar diferentes tipos de amostras de lodos de ETA e ETE, para se verificar a interferência de eventuais heterogeneidades oriundas dos diferentes tipos de tratamento nas propriedades e comportamento das misturas, assim como também realizar uma classificação química maior;
- Estudar temperaturas de calcinação próximas às de usinagem do concreto betuminoso de modo a buscar a redução de custos.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
_NBR 12209: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário (1992). 12p.
_NBR 12216: Projeto de estações de tratamento de águas para abastecimento público (1992). 18p.
_NBR 15617: Misturas asfálticas – determinação do dano por umidade induzida (2008). 9p.
- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. Society for Testing Materials. AASHTO T 283: Resistance of compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.
- ALENCAR, A.E., BRINGER, R.M., SOARES, J.B. & DE SOARES, S. (2006). Efeito da presença de aditivos nas propriedades reológicas do Ligante Asfáltico Modificado por EVA. 18 Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás IBP, Rio de Janeiro, Brasil, 1:1-6.
- ALMEIDA, A.L. (2011). Tratamento de água e esgoto um mercado promissor para uma questão essencial, revista especializada em tratamentos de água & efluentes, (1): 1-12.
- ARAÚJO, F.D.S. (2008). Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, 76 P.
- BARDINI, V.S., KLINSKY, L.M. & FERNANDES, J.L. (2010). A importância do filler para o bom desempenho de misturas asfálticas. *Minerva*, 7(1): 71-78.
- BARDINI, V.S. (2013). Influência do Fíler Mineral em Propriedades de Misturas Asfálticas Densas. Tese de doutorado, USP, São Carlos, SP, 344p.
- BARROSO, M.M. & CORDEIRO, J.S. (1999). Problemática dos metais nos resíduos gerados em estações de tratamento de água, ABSE 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, PR, (1): 1-8.
- BENTO, P.F. (2006). Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos. Dissertação de Mestrado, UNB, Brasília, DF, 132p.
- BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M., CERATTI, J.A. & SOARES, J.B. (2008). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro, RJ, 540 p.
- BOCK, A.L., HARTMAN, D., BUDNY, J., SPECHT, L.P. & CERATTI, J.A. (2009). Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, 14(1): 59-69.
- BOCK, A.L. (2012). Efeitos da incorporação de Cal Hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 142 p.
- BOEIRA, F.D. (2011). Estudo laboratorial do desempenho de misturas asfálticas com diferentes tipos e teores de cal. Monografia – Curso de engenharia civil, UNIJUÍ, Ijuí, RS, 64p.

CAVALCANTE, V.T. & SOARES, J.B. (2001). O efeito do tipo e do teor de fíler nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas, 33a Reunião anual de pavimentação, ABPv, Florianópolis, SC, 1: 507- 518.

CAMPANA, A.S. (2009). Caracterização e estudo do comportamento térmico de resíduo (lodo) proveniente de estações de tratamento de água e de esgotos do município de Araraquara. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química, UNESP, Araraquara, SP, 82 p.

COSTA, A.J. (2011). Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado com cloreto de poli alumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas – Estudo de caso na ETA do município de Mirassol – SP. Dissertação de mestrado, USP, São Carlos, SP, 155 p.

COMINSKY, R.J., HUBER, G.A., KENNEDY, T.W. MICHAEL, A. (1994). The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. SHRP National Research Council, Washington, DC, 171 p.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

_DNER – EM 078/94: Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso – Método de ensaio, 3p.

_DNER – EM 081/94: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo – Método de ensaio, 6p.

_DNER – EM 084/94: Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real – Método de ensaio, 4p.

_DNER – EM 086/94: Agregado – determinação do índice de forma – Método de ensaio, 5p.

_DNER – EM 089/94: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio – Método de ensaio, 5p.

_DNER – ME 133/94: Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência– Método de ensaio, 8p.

_DNER – ME 138/94: Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, 6p.

_DNER – ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall – Método de ensaio, 11p.

_DNER – EM 084/95: Agregado miúdo– determinação da densidade real – Método de ensaio, 3p.

_DNER – EM 193/96: Materiais betuminosos líquidos e semissólidos – determinação da densidade – Método de ensaio, 6p.

_DNER – EM 054/97: Equivalente de areia – Método de ensaio, 10p.

_DNER – EM 195/97: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo – Método de ensaio, 10p.

_DNER – EM 367/97: Material de enchimento para misturas betuminosas – Especificação de material, 3p.

_DNER – EM 035/98: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles” – Método de ensaio, 6p.

_DNER – EM 083/98: Agregados – análise granulométrica – Método de ensaio, 5p.

_DNER – EM 033/99: Material betuminosos – determinação da penetração – Método de ensaio, 7p.

_DNER – EM 383/99: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio cântabro. Método de ensaio, 2p.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes.

_DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico – Especificação de Serviço,14p.

DUARTE, A.C. (2008). Incorporação de lodo de Esgoto na massa cerâmica para fabricação de tijolos maciços: uma alternativa para a disposição final do resíduo. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, 109 p.

EILER, L.M. (2009). Reologia de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro brookfield. Monografía. Artículo técnico Lemac, Buenos aires, Argentina, 1(1): 118-131.

FERREIRA, P & MORITA, D.M.(2009). Analise comparativa sobre as formas de disposição do lodo nas estações de tratamento de água (ETAs), nos Estados Unidos, França, Noruega, Reino Unido e Brasil. Revista Brasileira de Direito Ambiental, 17(1): 103-124.

FEITOSA, M.C. (2009). Lodos de Esgoto: Algumas aplicações em engenharia. Dissertação de mestrado, UNICAP, Recife, PE, 120 p.

FONTES, C.M. (2003). Potencialidades da cinza de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 120 p.

FONTES, C.M. (2008). Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho. Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 273 p.

FREITAS, M.B. (2001). Apostila de curso, tratamento de água para o consumo humano FIOCRUZ/ENSP, Rio de Janeiro, RJ, 53p.

FYTILI, D. & ZABANIOTOU, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. Renewable & Sustainable energy reviews, 12(1): 116-140.

GARCÍA, N.O. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. Caos Conciencia, lodos residuales, 1(1): 51-58.

GEYER, A.L. (2001). Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto. Tese de doutorado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 238 p.

GÓNGORA, I.A. & LOPEZ, M. (2007). Incidencia de la ceniza de cascarilla de arroz en el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional empleando agregado pétreo procedente del río coello (tol). Monografía, Universidad de Ibagué coruniversitaria, Ibagué, Colômbia, 175 p

GRASSI, M.T. (2001). As águas do planeta terra, Cadernos Temáticos de química nova na escola. Edição especial – Maio (1):31-40.

GUEDES, B.F.R. (2012). Desenvolvimento de argamassa com incorporação de lodo de indústria têxtil visando a aplicação sustentável na construção civil. Dissertação de mestrado, UFCG, Campinha Grande, PB, 85 p.

- HARTMANN, D.A., BOCK, A.L., BUDNY, J. & SPECHT, L.P. (2008). Estudo da influencia da de diferentes teores e tipos de finos nas características do Ligante Asfáltico CAP 50/70. 15 Jornadas Nacional de Iniciação Científica, UNIJUIÍ, ciudad, Brasil, (1): 6p.
- JANUÁRIO, G.F. & FILHO, S.S. (2007). Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo. Engenharia Sanitária e Ambiental 12(2): 117-126.
- JUNIOR, T.D.C. (2008). Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 130 p.
- JUNIOR, A.B., PRIM, E.C. & PIMENTEL, F.J. (2011). Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário, Estudos Tecnológicos, 7(2): 86 – 97.
- KELESSIDIS, A. & STASINAKIS, A.S. (2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. Waste Management, 32: 1186-1195.
- LEE, E.S. & SANTOS, F.J. (2011). Caracterização do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético, II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, IBEAS, Londrina, PR, 1: 1-9.
- LIMA, C.S., TOMÉ, L.G., SOARES, J.B. & SOARES, S.A. (2006). Efeitos da borracha de pneu na viscosidade do ligante asfáltico. 18 encontro de asfalto, IBP, Rio de Janeiro, RJ, 7p.
- LUCENA, L.C. (2012). Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e sub-base de pavimentos. Tese de doutorado, UFPE, Recife, PE, 263 p.
- LUTIF, J.E., KIM, Y.R. & SOARES, J.B. (2008). Influência do método de adição de cal hidratada em misturas asfálticas para reduzir os danos devido à umidade em pavimentos flexíveis.
- MELLO, E. J. R. (2007). Tratamento de esgoto sanitário, Avaliação da estação de tratamento de esgoto do Bairro Novo Horizonte na cidade de Araguari. Monografia, UNIMINAS, Uberlândia, MG, 77p.
- MOMM, L., DUMKE, M.P. (2004). Estudo do concreto asfáltico drenante modificado por copolímeros SBS, polímeros e asfalto-borracha, XVIII Congresso de pesquisa e ensino em transportes. ANPET, Florianópolis, Santa Catarina, RT 1: 38 -50.
- MOSS, H.L. DONOVAN, J.F. & CARR, S. (2013). Enabling the future: Advancing Resource Recovery from Biosolids. CDM Smith Inc, Cidade, Estado ou país, Número vol, 65 p.
- NAIME, R. (2012). Destinação final conjunta entre matéria orgânica e lodos de ETAs e ETES, Ecodebate, esgoto sanitário, Brasil, 1: 1-4.
- OLIVEIRA FILHO, C.M.S., SOARES, J.B. (2006). Adesão e coesão em misturas asfálticas (Melhoradores de adesividade, ligantes modificados e Intertravamento). XX ANPET, Brasília.
- PEREIRA, K.L. (2012). Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos. Dissertação de mestrado, UFRN, Natal, RN, 125p.

- PIVELI, R.P. (2006). Tratamento de Esgotos Sanitários. Apostila do curso de tratamento de Esgotos Sanitários. EP-USP, SP, 71 p.
- PORTELLA, K.F., ANDREOLI, C.V., HOPPEN, C. SALES, A. BARON, O. (2003). Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna, 22 Congresso Brasileiro de engenharia sanitária ambiental. Sigla do Organizador, Curitiba, Paraíba, 10p.
- REBOUÇAS, E.D.S. (2011). Comportamento de misturas asfálticas do estado de Roraima fabricados com basaltos e diferentes tipos de fíler. Monografia, UFRR, Boa vista, RR, 78p.
- ROSARIO, C.G. (2007). Avaliação da disposição de lodo gerado numa estação de tratamento de água em rator anaeróbio de fluxo ascendente e manto de lodo (UASB). Dissertação de mestrado, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, SP, 236p.
- SAYED, M.H., MADANY, I.M. & BUALI, A.R. (1995). Used of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions. *Construction and Building Materials*, 9(1): 19-23.
- SANTOS, M.A. (2000). Inventário de emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas. Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, JR, 147 p.
- SILVA, J. F. (2008). Comportamento de concreto asfáltico tendo lodo da ETA da cidade de Manaus como fíler. Dissertação de Mestrado, UFAM, Manaus, AM, 180 p.
- SOARES, J.B., LEITE, L.M., MOTTA, L.M. & BRANCO, J.V.C. (1999). Efeito da consistência do CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas. XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, São Carlos, SP, 1: 115-125.
- SOUZA, V.P., TOLEDO, R., HOLANDA, J.N.F., VARGAS, H., FARIAS, R.T. (2008). Análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de água, *Cerâmica*, 54 (331): 351-355.
- SPAGNOLLO, E., AMADO, T.J., JACQUES, A.V. CONCEIÇÃO, C. LEMAINSKI, C.L. & DELLAMEA, R.B. (2002). Carbono e nitrogênio nas frações leve e estável da matéria orgânica em campo natural submetido a queima. XIV Reunião Brasileira de manejo e conservação do solo e da água, Cuiabá, Brasil (1) 4p.
- SUSUNAGA, M.R. (2012). Efecto de la arcilla calcinada en asfalto B 60/70 en porcentajes del 5% al 50%. Monografia, Universidad Piloto, Bogotá, Colombia, 97p.
- TAKAHIDE, S. (1999). Handbook of Water Treatment second English edition. Kurita, Tokyo, Japão, 2 vol., 501 p.
- TIA, M. (2005). Fundamentals and Practice of Asphalt Mixture Design Procedures to Assure Adequate Performance. 13 Conference on Pavement Engineering, Hsin Chu, Taiwan (1) 19p.
- TSUTIYA, M. & HIRATA, A. (2001). Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do estado de São Paulo, 21 Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, ABES – Trabalho técnico, João Pessoa, Paraíba, 9p.
- WOLFF, E., SCHWABE, W.K., LANDIM, A.B. & VITORINO, M.D. (2005). Caracterização do lodo gerado na estação de tratamento de água da Cenibra, 23 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES - Trabalho técnico, Campo Grande, MS, 1(148): 1-7.

- YERO, A.S., HAININ, R. (2011). Influence of Organic Wax on Bitume Characteristics. American J. of Engineering and Applied Sciences, 4(2): 265 – 269.
- YUSUF, R.O., NOOR, Z.Z. & DIN, M.F. (2012). Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete – a review. Int J Global Environmental Issues, 12(2): 214 – 228.
- ZABANIOTOU, D.F. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12: 116-140.

APÊDICES

Este apêndice está distribuído da seguinte forma: Na parte A apresenta-se os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, tais como agregados, ligantes e ligantes modificados pela presença dos lodos de ETA e de ETE; Na parte B são apresentados os resultados da dosagem Marshall para as misturas de estudo, e finalmente na parte C, apresenta-se os resultados das propriedades mecânicas e de adesividade das misturas de estudo.

A. Resultados dos ensaios de caracterização

Tabela A.1 Variação das massas dos lodos de ETA e de ETE após da calcinação.

Temperatura de calcinação (°C)				
	(+/-20) T=45 m	(+/-10) T=45 m	(+/-3) T=45 m	(+/-1) T=45 m
Lodo de ETA				
Inicial	70,10	66,40	75,40	62,40
Final	65,50	51,70	43,10	28,60
Variação	6,56	22,14	42,84	54,17
Lodo de ETE				
Inicial	53,50	80,00	51,50	77,50
Final	48,40	55,60	22,30	30,70
Variação	9,53	30,50	56,70	60,39

Tabela A.2 Forma das partículas

Forma das partículas						
Amostra	Dimensões			Relações		Classificação da forma
	Comprimento	Largura	Espessura			
	a	b	c	b/a	c/b	
1	50,48	12,62	6,32	0,3	0,5	Alongada
2	33,14	23,40	14,4	0,7	0,6	Cúbica
3	40,38	28,10	10,02	0,7	0,4	Laminar
4	33,66	20,30	14,52	0,6	0,7	Cúbica
5	30,5	19,34	15,2	0,6	0,8	Cúbica
6	43,54	22,50	17,01	0,5	0,8	Cúbica
7	33,54	23,00	17,9	0,7	0,8	Cúbica
8	32,4	26,38	12,36	0,8	0,5	Cúbica
9	37,46	11,70	14,12	0,3	1,2	Alongada
10	37,62	24,80	10,44	0,7	0,4	Laminar
11	34,3	22,76	9,22	0,7	0,4	Laminar
12	44,52	23,54	16,08	0,5	0,7	Cúbica

Faixa Circular (19 – 16mm) = Peso utilizado: 2003,8g			
A	Retido no crivo Redutor P1 (9,5mm)	1390,5	gr
B	Retido no crivo redutor P2 (6,3mm)	566,1	gr
Faixa Circular (16 – 12,7mm) = Peso utilizado: 2001,6g			
C	Retido no crivo Redutor P1 (8,0mm)	1660,6	gr
D	Retido no crivo redutor P2 (5,3mm)	325,3	gr
Faixa Circular (12,7 – 9,5mm) = Peso utilizado: 2002,4g			
E	Retido no crivo redutor P1 (6,3mm)	1678,5	gr
F	Retido no crivo redutor P2 (4,2mm)	270,5	gr

$$P1 = A + C + E$$

$$P2 = B + D + F$$

$$f = \frac{P1 + 0,5P2}{100n} = \frac{240,81 + 0,5(59,19)}{100 * 4} = 0,7$$

Tabela A.3 Ensaio da Massa Especifica Real

No	Massa do material	Leitura 1	Leitura 2	Volume do liquido deslocado	Massa especifica Real	Material
1	37,6	0,2	22,65	22,45	1,675	Lodo-de-ETA
2	29,8	0,2	21,65	21,45	1,389	Lodo-de-ETE
3	56,0	0,3	21,1	20,8	2,692	Cal hidratada
4	60,1	0,2	22,3	22,1	2,719	Filer granular

Tabela A.4 Ensaio da Massa Especifica Real pelo penta-picnômetro.

#	Cal hidratada	Lodo de ETA (seco ao ar)	Lodo de ETA (500 C)	Lodo de ETE (seco ao ar)	Lodo de ETE (500 C)
1	2,694	1,514	1,674	1,225	1,389
2	2,692	1,518	1,678	1,227	1,387
3	2,681	1,501	1,677	1,278	1,391
4	2,687	1,504	1,675	1,229	1,386
5	2,678	1,057	1,674	1,245	1,389

Tabela A.5 Ensaio de viscosidade Brookfield de CAP 50/70 após do RTFOT.

Misturas de referencia	Viscosidade Brookfiel após do RTFOT (cP)								
	Antes RTFOT	Após RTFOT	Variação (%)	Antes RTFOT	Após RTFOT	Variação (%)	Antes RTFOT	Após RTFOT	Variação (%)
	135 °C			150 °C			177 °C		
CAP 50/70	440	500	13,6	180	210	16,7	60	80	33,3
85% CAP + 15% Cal hidratada	560	730	30,4	240	340	41,7	90	100	11,1

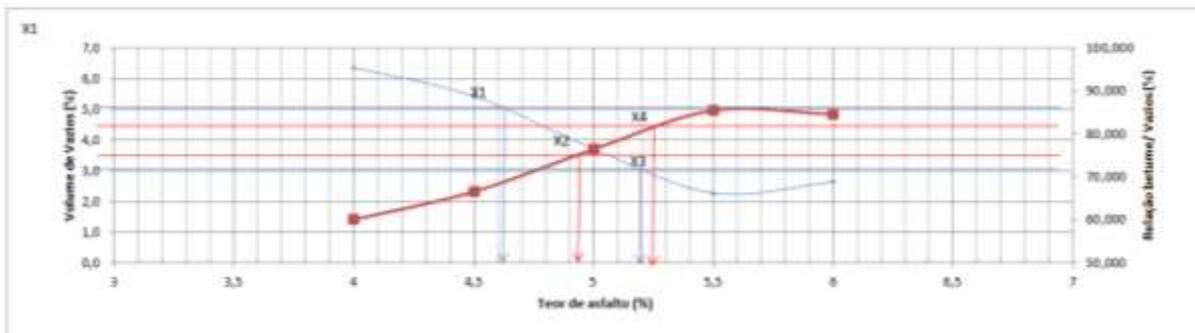
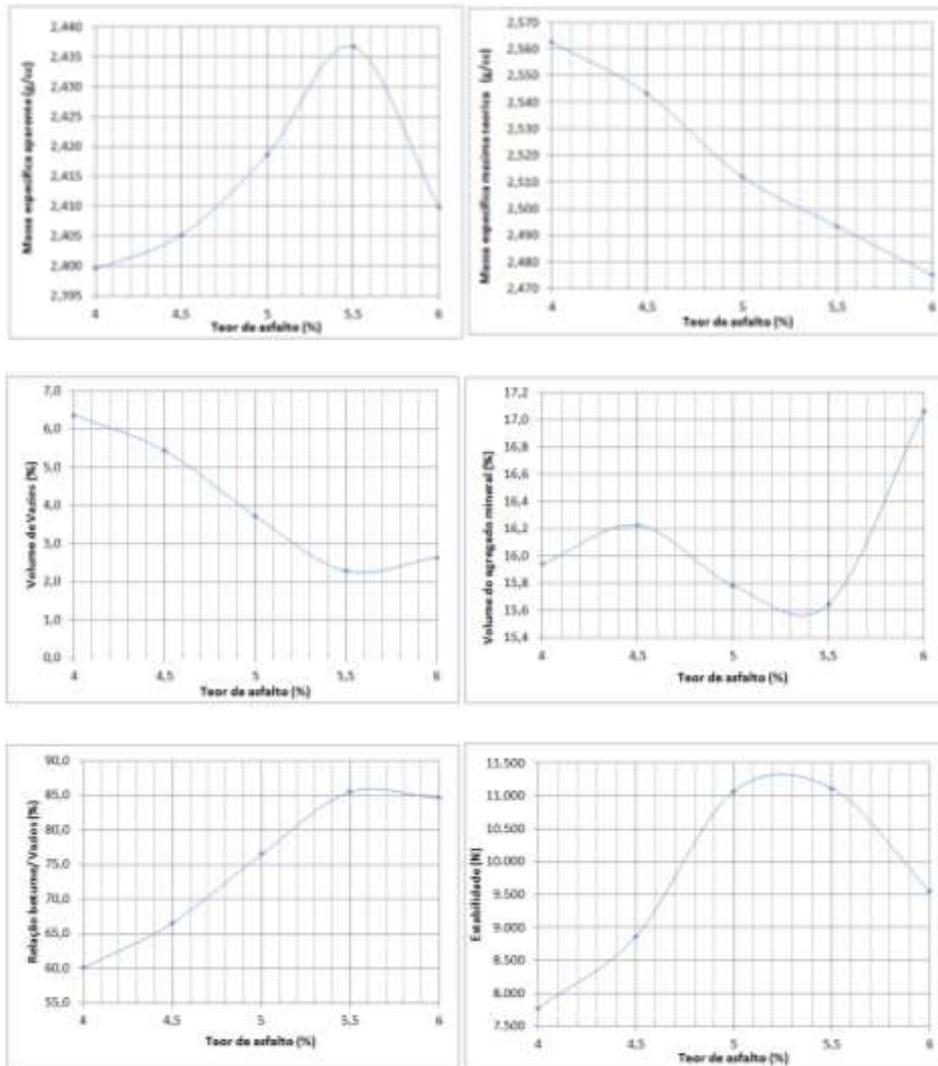
Tabela A.6 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETA após do RTFOT.

Mistura com lodos de ETA	Viscosidade Brookfield após do RTFOT (cP)								
	Antes RTFOT	Após RTFOT	Variação (%)	Antes RTFOT	Após RTFOT	Variação (%)	Antes RTFOT	Após RTFOT	Variação (%)
	135 °C			150 °C			177 °C		
85% CAP + 15% Lodo ETA (Seco ao ar)	430	610	41,9	160	250	56,3	60	80	33,3
85% CAP + 15% Lodo ETA (T = 200 °C)	460	630	37,0	180	280	55,6	80	90	12,5
85% CAP + 15% Lodo ETA (T = 300 °C)	490	850	73,5	230	400	73,9	60	130	116,7
85% CAP + 15% Lodo ETA (T = 500 °C)	710	910	28,2	350	450	28,6	100	230	130,0
85% CAP + 15% Lodo ETA (T = 800 °C)	540	690	27,8	210	310	47,6	60	130	116,7

Tabela A.7 Ensaio de viscosidade Brookfield de misturas com lodos de ETE após do RTFOT.

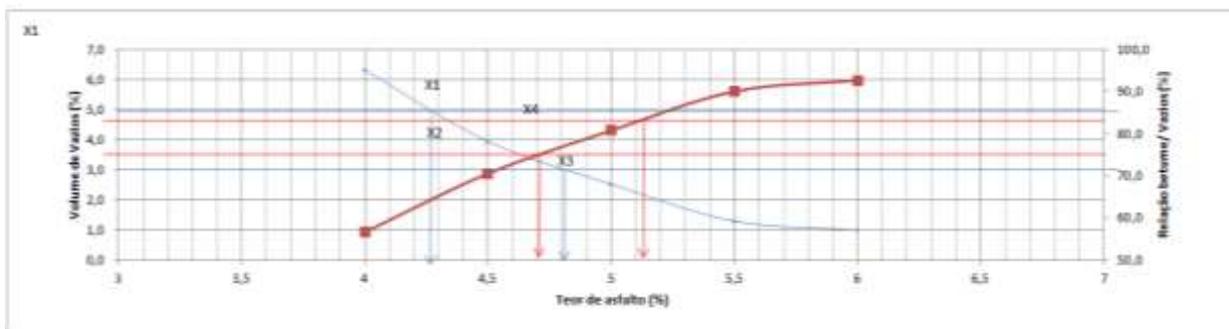
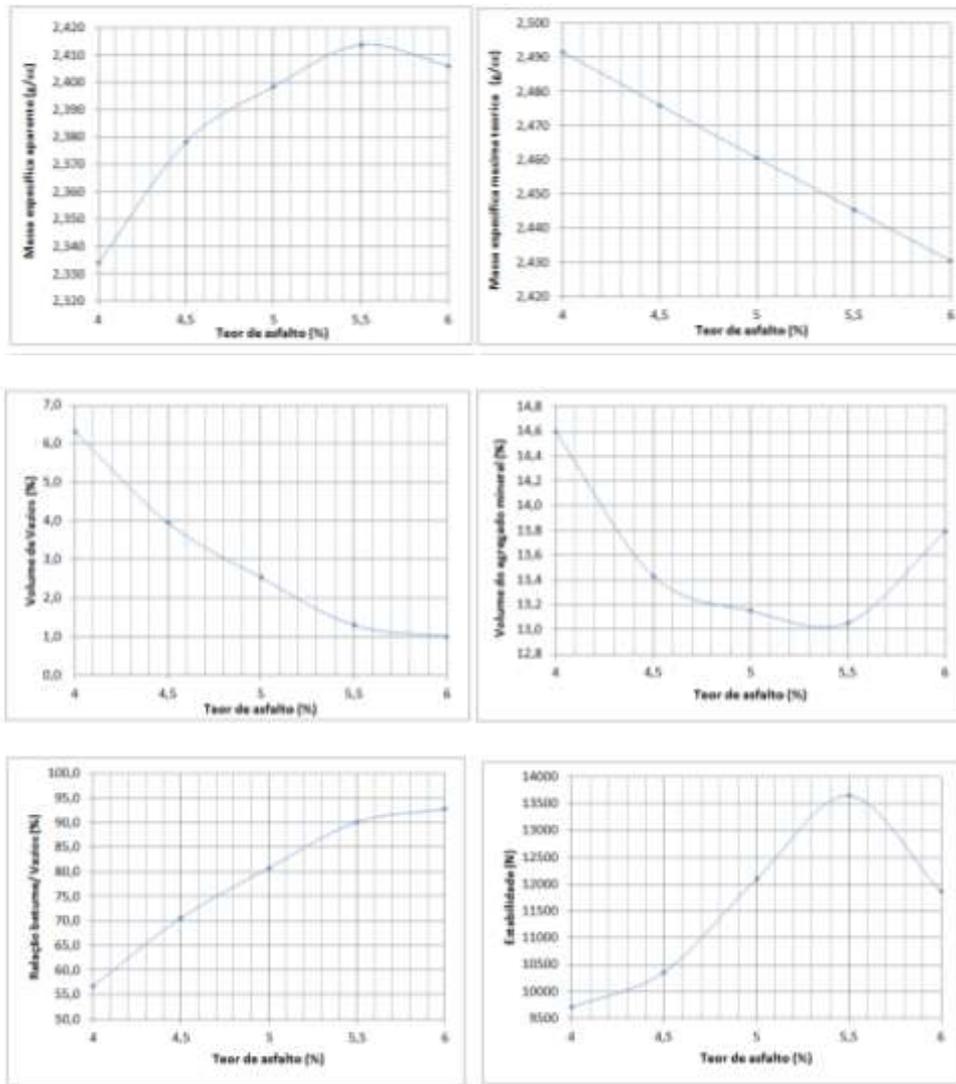
Mistura com lodos de ETE	Viscosidade Brookfield após do RTFOT (cP)								
	Antes RTFOT	Após RTFOT	Variação (%)	Antes RTFOT	Após RTFOT	Variação (%)	Antes RTFOT	Após RTFOT	Variação (%)
	135 °C			150 °C			177 °C		
85% CAP+15% Lodo ETE (Seco ao ar)	540	630	16,7	230	240	4,3	90	100	11,1
85% CAP +15% Lodo ETE (T = 200 °C)	510	630	23,5	250	280	12,0	110	100	-9,1
85% CAP +15% Lodo ETE (T = 300 °C)	460	550	19,6	200	250	25,0	60	60	0,0
85% CAP +15% Lodo ETE (T = 500 °C)	660	730	10,6	250	350	40,0	90	110	22,2
85% CAP+15% Lodo ETE (T = 800 °C)	680	700	2,9	260	260	0,0	80	110	37,5

B. Parâmetros de Dosagem da Metodologia Marshall
 Figura B.1 Mistura tipo I: CAP 50/70 (Referência 1)



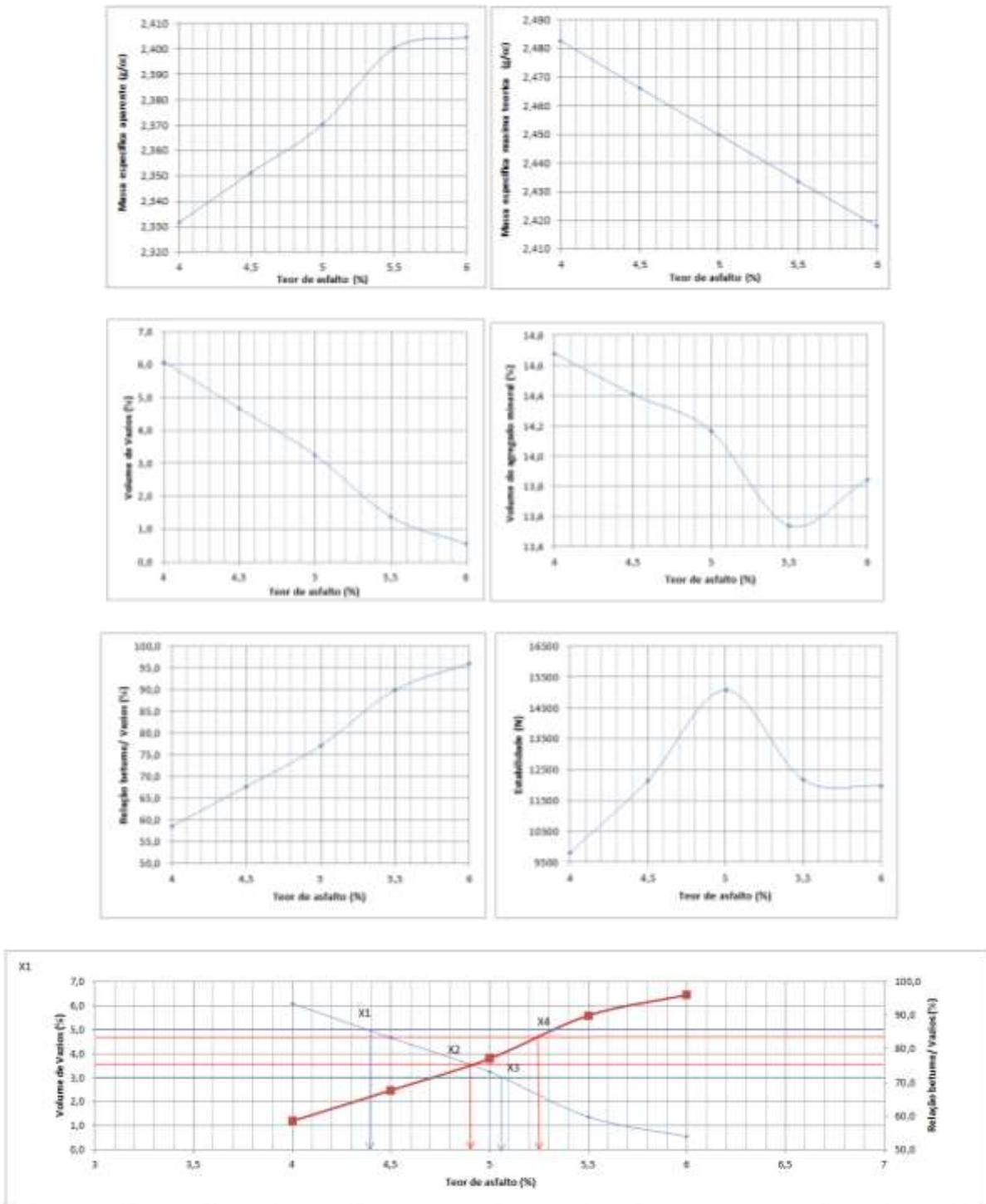
Teor ótimo de Asfalto = 5.1 %

Figura B.2 Mistura tipo III: 80% CAP 50/70 + 20% Cal (Referência 2)



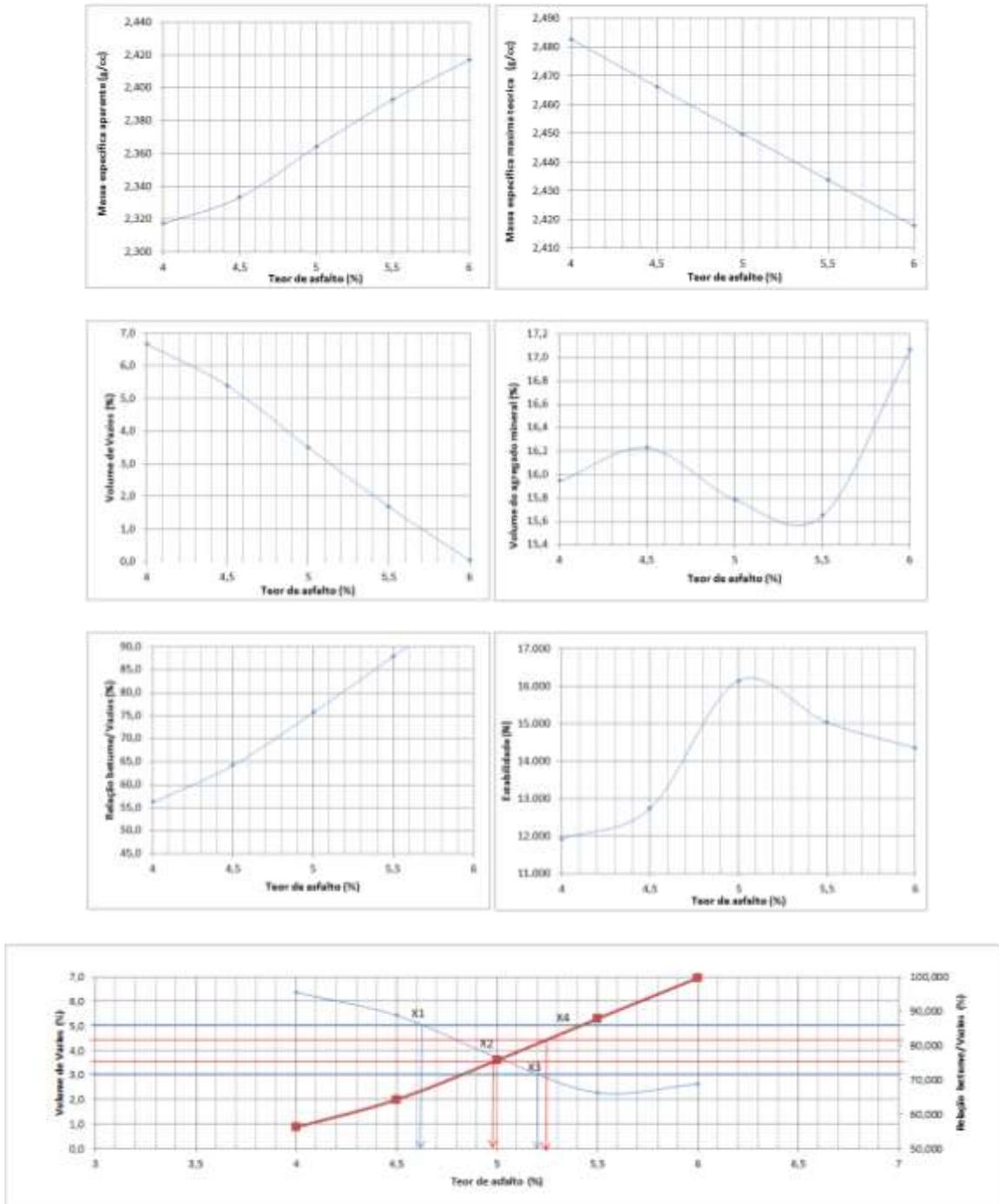
Teor ótimo de Asfalto = 4.8 %

Figura B.3 Mistura tipo III: 80% CAP 50/70 + 20% Lodo de ETA (Calcinado 500 °C)



Teor ótimo de Asfalto = 5.0 %

Figura B.4 Mistura tipo IV: 80% CAP 50/70 + 20% Lodo de ETE (Calcinado 500 °C)



Teor ótimo de Asfalto = 5.0 %

C. Resultados dos ensaios de propriedades mecânicas e de adesividade de misturas asfálticas

Tabela C.1 Ensaio de Resistência à tração R_t das misturas.

Resistência à tração por compressão diametral a 25 °C						
Mistura	CP	H (cm)	D (cm)	F (N)	R_t (Mpa)	R_t (kgf/cm ²)
CA	14	5,85	10,29	9080	0,96	9,60
	15	5,98	10,20	9190	0,96	9,60
	16	5,84	10,24	9530	1,01	10,15
Adição dos lodos na via úmida						
CA-CH-U	22	6,15	10,25	10690	1,08	10,80
	23	6,08	10,29	9620	0,98	9,79
	25	6,07	10,29	8020	0,82	8,17
CA-ETA-U	34	6,10	10,20	11450	1,17	11,72
	35	6,04	10,31	13140	1,34	13,43
	36	6,04	10,26	11820	1,21	12,15
CA-ETE-U	44	6,24	10,22	9810	0,98	9,79
	45	5,95	10,21	12090	1,27	12,67
	46	6,26	10,25	9650	0,96	9,58
Adição dos lodos na via seca						
CA-CH-S	4	5,98	10,35	7910	0,81	8,14
	5	6,12	10,22	11250	1,15	11,45
	9	6,11	10,22	8300	0,85	8,47
CA-ETA-S	19	6,13	10,24	9990	1,01	10,12
	20	6,04	10,31	8010	0,82	8,19
	21	6,04	10,28	12660	1,30	12,98
CA-ETE-S	33	6,17	10,12	10730	1,09	10,94
	34	6,16	10,21	12100	1,22	12,24
	35	6,13	10,18	11350	1,16	11,58

Tabela C.2 Ensaio desgaste por abrasão.

Ensaio Cântabro					
Mistura	CP	P - Peso do Corpo	P' - Peso do Corpo	Desgaste (%)	
		Antes do ensaio (g)	Após do ensaio (g)		
CA	11	1144,1	1096,8	4,13	4,5
	12	1178,6	1123,3	4,69	
	13	1171,3	1115,1	4,8	
Via Úmida					
CA-CH	21	1170	1063,7	9,09	7,6
	22	1178,8	1113,5	5,54	
	23	1179,1	1081,1	8,31	
CA-ETA	31	1163,1	1069	8,09	6,6
	32	1175,3	1120,2	4,69	
	33	1176	1093,3	7,03	
CA-ETE	41	1161	1057,6	8,91	11,5
	42	1168,5	1005,3	13,97	
	43	1170,3	1032,9	11,74	
Via Seca - Sobre o agregado miúdo					
CA-CH	6	1164,3	980,8	15,76	20,9
	7	1174,6	967,2	17,66	
	8	1175,8	831,12	29,31	
CA-ETA	21	1166,4	1063,9	8,79	7,2
	22	1182,8	1085,7	8,21	
	23	1180,6	1126	4,62	
CA-ETE	34	1163,6	1083,6	6,88	6,7
	35	1169,4	1093,1	6,52	
	36	1165,5	1087,3	6,71	

Tabela C.3 Ensaio de desgaste por abrasão.

Ensaio Lottaman Modificado									
Mistura	Amostras não condicionadas				Amostras condicionadas				Relação
	Volume de Vazios (%)		Rt1 (Mpa)		Volume de Vazios (%)		Rt2 (Mpa)		RRT
CA	6,7	6,4	7,75	7,95	6,3	6,3	7,58	7,59	0,96
	6,1		7,55		6,1		7,66		
			8,54		6,6		7,53		
Via Úmida- sobre o ligante asfáltico									
CA-CH-U	7,7	7,5	6,65	7,63	6,6	7,4	5,69	5,51	0,72
	7,3		8,22		7,5		5,23		
	7,6		8,02		8,1		5,60		
CA-ETA-U	7,8	7,7	7,23	7,54	7,3	7,4	5,09	5,37	0,71
	7,7		7,37		6,9		5,16		
	7,5		8,02		8,0		5,87		
CA-ETE-U	6,5	7,0	6,62	6,02	7,3	7,2	4,41	4,47	0,74
	7,2		5,92		6,9		4,56		
	7,5		5,52		7,3		4,43		
Via Seca - Sobre o agregado miúdo									
CA-CH-S	9,0	9,4	5,84	5,64	9,1	9,6	4,91	4,41	0,78
	9,9		5,44		10,5		3,73		
					9,3		4,58		
CA-ETA-S	6,9	7,4	7,47	7,26	7,8	7,6	7,68	7,00	0,97
	8,4		6,91		6,8		7,85		
	6,9		7,39		8,1		5,48		
CA-ETE-S	6,1	6,4	7,28	7,46	6,6	6,4	7,31	7,78	1,04
	6,0		8,37		6,9		8,21		
	7,2		6,72		5,7		7,82		