

**RAQUEL LUÍSA PEREIRA CARNIN**

**REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE AREIA VERDE DE  
FUNDIÇÃO COMO AGREGADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

Tese apresentada ao Curso de Pós Graduação em Química, Setor de Ciências Exatas, Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de doutora.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Jorge da Cunha

**CURITIBA**

**2008**

**TERMO DE APROVAÇÃO****REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO COMO  
AGREGADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

por


**RAQUEL LUÍSA PEREIRA CARNIN**

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Química, pela Comissão Examinadora composta por:

  
Orientador: Prof. Dr. Carlos Jorge da Cunha  
Dep. de Química – UFPR

  
Prof. Dr. Luiz Veriano Oliveira Dalla Valentina  
Dep. de Química – UDESC

  
Prof. Dr. Henry França Meier  
Dep. de Eng. Química – FURB

  
Prof. Dr. Marco Tadeu Grassi  
Dep. de Química – UFPR

  
Prof. Dr. Fernando Wypych  
Dep. de Química – UFPR

**Curitiba, 25 de Janeiro de 2008.**

*Na natureza nada se perde,  
tudo se transforma.  
[Lavoisier, 1789].*

*Ao meu amado filho Felipe cujo  
futuro depende de um mundo mais  
justo e ambientalmente sustentável.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS a oportunidade de ter encontrado anjos amigos que surgiram na minha vida apoiando-me e dando a mão. Agradeço também ter encontrado em meu caminho pessoas que me emprestaram os seus ouvidos em alguns momentos e me falaram o que eu precisava ouvir e acalmaram meu coração... Que os anjos os iluminem queridos amigos...

Aos meus familiares, pelo apoio e incentivo no decorrer de toda a minha vida acadêmica, em especial a minha mãe, que sempre acreditou no estudo como a forma mais digna de se obter um futuro próspero.

Ao meu marido Moacir que continua a dedicar parte de sua vida aos meus estresses, tristezas e alegrias, ao meu trabalho e aos meus sonhos. E ao meu filho Felipe que é o puro amor da minha alma.

Aos amigos da Missão Operária Pedro e Paulo (MOPP) em especial a Jomar, Cláudio e Elias que me mostraram um exemplo de vida a seguir.

A Tupy S.A., por investir na pesquisa e acreditar no meu trabalho. Aos colegas de trabalho, em especial à equipe do Laboratório da Tupy pelo grandioso auxílio no desenvolvimento deste estudo: meus eternos agradecimentos.

Ao meu orientador e amigo, professor Dr. Carlos Jorge da Cunha pelo constante incentivo, sempre indicando a direção a ser tomada nos momentos de maior dificuldade, interlocutor interessado em participar de minhas inquietações, co-autor em vários trechos. Agradeço, principalmente, pela confiança, mais uma vez depositada, no meu trabalho de doutorado.

Àqueles profissionais da UFPR que também participaram na orientação deste estudo: professor Dr. Antônio S. Mangrich, pela atenção e carinho demonstrados, por mais uma amizade a longa distância conquistada. Aos professores: Dr. Patrício P. Zamora e Dra. Sueli Maria Drechsel, pelas sugestões de alguns dados.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR pela colaboração nos estudos da microestrutura e morfologia dos materiais e a algumas pessoas com quem diretamente trabalhei e muito aprendi: professor Dr. Ney Matoso, Vera Regina, Sérgio e Rosângela.

As minhas amigas Fernanda Machado Martins e Elisete Guimarães que me auxiliaram nas técnicas de Difractometria de raios-X e Espectroscopia na região do Infravermelho.

Ao Instituto Militar de Engenharia – IME, em especial ao amigo Cel Paulo Roberto Dias Morales - *a sua energia e entusiasmo pela ciência e pela vida foram contagiantes e decisivos*

*em superar os problemas que foram surgindo. O que aprendi durante esses quatro anos de pesquisa de doutorado constitui uma experiência do ponto de vista científico, técnico e humano.*

Também devo meus agradecimentos ao Cel Álvaro Vieira e ao Eng. Clauber da Costa pela realização dos ensaios do trecho experimental. Ao amigo Paulo Galarca pelas palavras de incentivo durante a realização deste trabalho.

À Ipiranga Asfaltos, em especial aos amigos Humberto, Emerson e Marcos pelo apoio técnico, respeito e confiança no meu trabalho: *vocês sempre terão minha eterna gratidão.*

À Rudnick Minérios Ltda, em especial ao amigo Edson por acreditar na minha pesquisa de doutorado.

À UDESC, em especial à amiga e professora Claudia Pirath pelo carinho, incentivo, respeito e companheirismo: *sei que tenho muito a aprender com você.* À professora Marilena Valladares do Departamento de Materiais da UDESC pelas explicações e sugestões ao trabalho e por permitir realizar as análises de difração de raios-x e térmica. À grande amiga e companheira Rúbia Raquel Luvizão por me acompanhar nesta jornada. À Sônia Prim por me auxiliar em algumas análises.

À FAGOR EDERLAN por participar do estudo do trecho experimental, em especial ao Reginaldo Afonso Lopes, pelas explicações e principalmente pela atenção voltada à esta pesquisa.

À EPAGRI pelas explicações nos estudos de solos de Santa Catarina, em especial ao Engenheiro Gilmar, Hugo Gosmann e ao Dr. José Ângelo Rebelo.

À CETESB, em especial ao Adilson Rossini, Ednea, Cátia e Gabriela pelas sugestões e pelo grande apoio. Ao Dr. Elton Gloeden por participar da Comissão Examinadora como suplente.

Ao IBAMA de Brasília, em especial à Rita Alves Silva e Sandra Cecília Miano pelo incentivo à pesquisa e principalmente pela confiança em meu trabalho.

Agradeço aos colegas de trabalho da Tupy que, direta ou indiretamente contribuíram e contribuem para que coisas grandiosas aconteçam nas nossas vidas.

E, a todos que me motivaram, para que minha fragilidade humana não me fizesse desistir, meu muito obrigado.

## PREFÁCIO

A busca de novos materiais para uso na área de pavimentação encontra, na natureza, um enorme elenco de possibilidades e alternativas que, na maioria das vezes, atende a parte técnica, mas deixa de atender aos aspectos ligados à viabilidade econômica, social e/ou ambiental.

Por outro lado, é comum aparecerem barreiras às novas idéias, principalmente, quando contemplam o uso de materiais com forte apelo ambiental, seja por questões de pontos de vista arraigados a antigos preconceitos ou por existir embasamento técnico que apresenta prescritivamente, as variáveis, cuja análise e resultados condenam tecnicamente a intenção desejada.

Quando os materiais são originados como refugos da linha de montagem industrial, mais aumenta a preocupação e aí se enquadram tanto ambientalistas como também os técnicos da área de pavimentação, questionando todo tipo de resultado, numa flagrante resistência ao novo.

Logicamente que existem também os casos de interesses econômicos que algumas vezes prejudicam o nascimento de novos produtos, processos e serviços que possam colocar seus negócios em risco.

A tese de doutorado de Raquel Luísa Pereira Carnin, intitulada **Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas**, orientada com muita competência e propriedade pelo Prof. Dr. Carlos Jorge da Cunha, vence todas estas barreiras e apresenta um resultado que abre as portas para uma inúmera quantidade de indústrias, em todo o território nacional, resolverem seus problemas relativos à estocagem de resíduos em seus pátios que, de forma sustentável, podem ser reaproveitados por intermédio de um Gerenciamento de resíduos industriais, integrando a participação das próprias indústrias, com universidades, órgãos ambientais e sociedade em geral, possibilitando sua utilização em pavimentos asfálticos, em rodovias próximas dessas indústrias, beneficiando a infra-estrutura de transportes do país.

Este trabalho apresenta de forma didática, metodologicamente correta e com forte embasamento técnico e normativo um conteúdo que cria um novo paradigma que é a viabilidade do uso de resíduos industriais para fins de pavimentação asfáltica, abrindo um potencial para um desenvolvimento sustentável efetivo em todas as regiões do país.

Destaca-se no trabalho o cuidado em mostrar uma enorme quantidade de ensaios laboratoriais que dão a certeza matemática, estatisticamente comprovada, de que os materiais oriundos de Resíduos de Areia Verde de Fundição (RAVF) não apresentam riscos ao meio ambiente.

Sob o ponto de vista técnico e normativo as misturas asfálticas contendo RAVF apresentaram propriedades adequadas para a camada de revestimento asfáltico, no que diz respeito aos parâmetros obtidos no ensaio Marshall, resistência à tração e módulo de resiliência.

Por tudo isto é que recomendo que outros técnicos, pesquisadores, ambientalistas entre outros, sigam o exemplo da Raquel que, com esta tese de doutorado elaborada com rigor técnico, abrangência normativa e acima de tudo com a extrema dedicação e entusiasmo, possam dar continuidade ao assunto, complementando seu conteúdo, conforme recomendado pela própria autora, para que haja a criação de uma nova cultura no emprego de RAVF na pavimentação asfáltica das rodovias de nosso país.

**Cel Paulo Roberto Dias Morales**

**Secretário Executivo do CENTRAN**

**(Centro de Excelência em Engenharia de Transportes)**



## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
PREFÁCIO	VII
LISTAGEM DAS TABELAS	XIII
LISTAGEM DAS FIGURAS	XV
LISTA DE SIGLAS	XVIII
RESUMO	XX
ABSTRACT	XXI
CAPÍTULO 1	1
1.1. Considerações Gerais .....	1
1.2. Objetivos da Tese .....	3
1.2.1. Objetivo geral .....	3
1.2.2. Objetivos específicos .....	3
CAPÍTULO 2	4
REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1. OS COMPONENTES E OS PROCESSOS DA FUNDIÇÃO .....	4
2.1.1. Areia .....	4
2.1.2. Bentonitas .....	6
2.1.3. Pó de carvão .....	9
2.1.4. Água .....	10
2.2. O PROCESSO DE FUNDIÇÃO .....	11
2.2.1. As definições dos processos aplicados na fundição .....	11
2.2.2. Preparação de areias .....	13
2.3. A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO.....	15
2.3.1. Reaproveitamento do RAVF .....	17
2.3.2. Proposta de Preparo e Armazenamento do RAVF .....	18
2.4. NORMAS DE COLETA E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS INDUSTRIAIS ...	20
2.4.1. Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT .....	20
2.4.2. Normatização da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).....	21
2.4.3. Normas SW-846 (Solid Waste) .....	21
2.4.4. Ensaio de toxicidade .....	22
2.5. PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA .....	23

2.5.1. Ligantes asfálticos .....	23
2.5.2. Composição química .....	23
2.5.3. Propriedades físicas .....	24
2.6. AGREGADOS .....	25
2.6.1. Classificação .....	25
2.6.2. Propriedades químicas dos agregados .....	26
2.6.3. Propriedades mineralógicas .....	27
2.6.4. Interação do CAP e agregado .....	27
2.7. CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE – CAUQ .....	28
2.7.1. Constituição da Mistura .....	29
2.7.2. Parâmetros Importantes .....	29
2.7.3. Dosagem do CAUQ .....	31
2.7.4. Método Marshall .....	32
2.7.5. Resistência à tração .....	33
2.8. MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	33
CAPÍTULO 3 .....	36
MATERIAIS E MÉTODOS .....	36
3.1. COLETA DAS AMOSTRAS .....	36
3.1.1. Caracterização dos materiais .....	36
3.1.2. Composição Elementar por Fluorescência de Raios-X .....	38
3.1.3 Composição mineralógica por difração de Raios-X .....	38
3.1.4. Separação das matérias-primas constituintes da AVF e RAVF .....	39
3.1.5. Determinação do consumo de ácido de bentonitas, AVF e RAVF .....	39
3.2. ANÁLISES DE INTERESSE AMBIENTAL E TOXICOLÓGICA .....	40
3.2.1. Ensaio de Lixiviação (NBR 10.005) .....	40
3.2.2. Ensaio de Solubilização (NBR 10.006) .....	40
3.2.3. Ensaio de Toxicidade ( <i>Daphnia magna</i> ) .....	41
3.2.4. Ensaio do Lixiviado e Lixiviado Neutro (CETESB N°152/2007) .....	42
3.2.5. Análise da água de abastecimento público .....	46
3.2.6. Análise térmica .....	46
3.2.7. Espectros de infravermelho .....	46
3.2.8. Análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	47
3.3. CARACTERIZAÇÃO DO CAP-20 .....	48
3.3.1. Cromatografia de camada delgada .....	48

3.3.2. Ensaio de penetração .....	48
3.3.3. Ensaio de ponto de amolecimento .....	49
3.3.4. Ensaio de durabilidade .....	49
3.3.5. Ensaio de ductilidade.....	50
3.3.6. Índice de susceptibilidade térmica.....	50
3.3.7. Ensaio de viscosidade .....	51
3.3.8. Projeto das misturas asfálticas.....	52
3.3.9. Ensaio Marshall .....	53
3.4. TRECHO EXPERIMENTAL .....	58
3.4.1. A execução do projeto .....	59
3.4.2. Controle tecnológico na execução .....	60
CAPÍTULO 4 .....	64
RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	64
4.1. ANÁLISE ELEMENTAR POR FRX .....	64
4.1.1. Análise elementar por FRX das matérias-primas constituintes da AVF .....	64
4.1.2. Análise elementar por FRX do RAVF – Estudo estatístico .....	65
4.1.3. Análise Elementar por FRX dos Agregados Utilizados no CAUQ.....	67
4.2. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA POR DRX.....	68
4.2.1. Caracterização mineralógica por DRX das bentonitas, pó de carvão, AVF e RAVF. ....	68
4.2.2. Caracterização mineralógica por DRX dos componentes do RAVF fracionados...	69
4.3. ANÁLISE TÉRMICA .....	70
4.4. ANÁLISE DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	76
4.4.1. Análise de infravermelho das matérias-primas constituintes do RAVF e da areia convencional.....	76
4.4.2. Caracterização da Morfologia das Matérias-primas da AVF da Linha EII e do RAVF .....	76
4.5. CONSUMO DE ÁCIDO DE BENTONITAS, AVF E RAVF.....	79
4.6. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO.....	80
4.7. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	84
4.8. MISTURAS ASFÁLTICAS (DOSAGEM MARSHALL) .....	87
4.8.1. Misturas asfálticas com adição de cal (Dosagem Marshall).....	88
4.8.2. Caracterização da microestrutura do CAUQ .....	90

4.8.3. Caracterização da interface do RAVF, areia convencional e areia lavada com CAP-20 .....	92
4.9. CARACTERIZAÇÃO DE INTERESSE AMBIENTAL E TOXICOLÓGICA .....	93
4.9.1. Ensaio de lixiviação e solubilização .....	94
4.9.2. Análise da água de abastecimento público .....	97
4.9.3. Análise de interesse ambiental dos corpos-de-prova envelhecidos.....	99
4.9.4. Ensaio do Lixiviado e Lixiviado Neutro (CETESB).....	100
4.9.5. Ensaio de Toxicidade ( <i>Vibrio fischeri</i> ).....	100
4.9.6. Ensaio de Toxicidade ( <i>Daphnia magna</i> ) .....	103
4.10. TRECHO EXPERIMENTAL .....	103
4.10.1. Caracterização dos agregados utilizados no trecho experimental .....	104
4.10.2. Dosagem do CAUQ em laboratório .....	105
4.10.3. Caracterização do ligante asfáltico utilizado no trecho experimental .....	107
4.10.4. Elaboração da dosagem em laboratório.....	107
4.10.5. Resistência à tração .....	108
4.10.6. Módulo de resiliência .....	109
4.10.7. Estudo de interesse ambiental do trecho experimental.....	111
4.10.8. Adição de RAVF nas misturas asfálticas do trecho experimental.....	112
4.10.9. Análise do percolado do trecho .....	115
4.10.10. Microestrutura do corpo-de-prova extraído do trecho.....	119
CAPÍTULO 5 .....	121
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	121
5.1. CONCLUSÕES .....	122
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	124

**LISTAGEM DAS TABELAS**

Tabela 1. Classificação dos resíduos (NBR 10.004, 2004).	16
Tabela 2. Módulos de resiliência e resistência de misturas estudadas no Brasil (BERNUCCI <i>et al</i> , 2007).	35
Tabela 3. Local da realização das análises da pesquisa.	37
Tabela 4. Coleta de RAVF da Linha EII.	38
Tabela 5. Técnicas analíticas utilizadas nos ensaios de lixiviação e solubilização.	41
Tabela 6. Demonstrativo dos segmentos para estudo do RAVF como agregado em pavimentação realizado em Extrema-MG.	60
Tabela 7. Análises elementares por FRX da areia nova, pó de carvão, bentonita natural, bentonita ativada e da AVF.	65
Tabela 8. Análises elementares por FRX de amostras de RAVF da Linha EII.	66
Tabela 9. Análises elementares por FRX de amostras de agregados da Rudnick utilizados nos revestimentos asfálticos.	67
Tabela 10. Caracterização do Ligante Asfáltico da REPLAN.	82
Tabela 11. Análise granulométrica do RAVF.	84
Tabela 12. Composição Granulométrica para o CAUQ.	85
Tabela 13. Comparação dos Resultados da Composição Granulométrica da Mistura.	86
Tabela 14. Resultados da dosagem Marshall.	87
Tabela 15. Resultados do Traço do CAUQ com os Teores de 5, 10 e 15% de RAVF e 1; 1,5 e 2% de Cal.	89
Tabela 16. Resultados do Traço do CAUQ com os Teores de 5, 10 e 15% de Areia Convencional e 1; 1,5 e 2% de Cal.	89
Tabela 17. Parâmetros químicos no lixiviado, solubilizado do RAVF pela NBR 10.004 (2004).	95
Tabela 18. Comparativo dos Cinco Parâmetros Críticos do Solubilizado das Matérias-primas Constituintes da Areia Verde de Fundação - AVF.	96
Tabela 19. Comparativo dos Cinco Parâmetros Críticos do Solubilizado da Areia Convencional, do CAP-20 e de Dois Corpos-de-prova com e sem RAVF.	96
Tabela 20. Comparativo dos Cinco Parâmetros Críticos do Solubilizado de Sete Solos de Bairros de Joinville.	96
Tabela 21. Comparativo do Solubilizado da Fundação X.	98
Tabela 22. Comparativo dos Cinco Parâmetros Críticos do Solubilizado dos Corpos-de-prova Envelhecidos.	100
Tabela 23. Resultados Lixiviado do RAVF – CETESB N°152/2007.	101
Tabela 24. Resultados lixiviado neutro do RAVF – CETESB N°152/2007.	102

Tabela 25. Resultados do ensaio de toxicidade aguda com <i>Daphnia magna</i> .	103
Tabela 26. Análise granulométrica dos agregados.	105
Tabela 27. Composição Granulométrica do CAUQ TUPY e FAGOR.	106
Tabela 28. Características das Misturas Obtidas por (COSTA, 2007).	108
Tabela 29. Resistência à tração (RT) obtidas por COSTA (2007).	108
Tabela 30. Resultados do módulo de resiliência (MR) das misturas obtidas por COSTA (2007).	110
Tabela 31. Média dos MR e RT dos corpos-de-prova do trecho experimental e do laboratório obtidas por COSTA (2007).	111
Tabela 32. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do RAVF da FAGOR pela NBR 10.004 de 2004.	112
Tabela 33. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado da amostra de CAUQ com 10% de RAVF da TUPY pela NBR 10.004 (2004).	114
Tabela 34. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado da amostra de CAUQ com 10% de RAVF da FAGOR pela NBR 10.004 (2004).	115
Tabela 35. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do percolado do trecho CAUQ com 10% de RAVF da TUPY pela NBR 10.004 (2004).	117
Tabela 36. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do percolado do trecho CAUQ com 10% de RAVF da FAGOR pela NBR 10.004 (2004).	118
Tabela 37. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do percolado do trecho CAUQ com 10% de areia convencional pela NBR 10.004 (2004).	119

## LISTAGEM DAS FIGURAS

Figura 1. Instalações de beneficiamento da areia utilizada no processo de fundição (FERREIRA, <i>et al</i> , 2003).	5
Figura 2. Comparativo do resultado do processo de beneficiamento da areia (PEREIRA, 2005).	5
Figura 3. Modelo estrutural da montmorilonita ( <a href="http://www.webmineral.com/data/Montmorillonite.shtml">http://www.webmineral.com/data/Montmorillonite.shtml</a> ).	7
Figura 4. Esquema da ativação da bentonita cálcica (LUZ, 2002).	9
Figura 5. O vazamento do metal no molde.	11
Figura 6. Etapas do processo de fundição e a geração do RAVF.	14
Figura 7. O aspecto físico da AVF na correia transportadora para o processo de moldagem (PEREIRA, 2005).	14
Figura 8. Matérias-primas da AVF (PEREIRA, 2005).	15
Figura 9. O misturador das matérias-primas constituintes da AVF (PEREIRA, 2005).	15
Figura 10. Fluxograma de preparação de RAVF para uso em misturas asfálticas BONIN, 1995 (adaptado).	19
Figura 11. Estruturas químicas típicas do asfalto, onde “R” representa as cadeias de carbonos alifáticos e aromáticos.	24
Figura 12. Constituintes da mistura de CAUQ.	29
Figura 13. Volume para misturas asfálticas (BERNUCCI <i>et al</i> , 2007).	31
Figura 14. Esquema básico das leituras inicial e final de penetração da agulha (MARQUES, 2007).	49
Figura 15. Materiais utilizados na elaboração do CAUQ preparado em laboratório.	53
Figura 16. Ilustração do local onde foi construído o trecho experimental.	59
Figura 17. Localização da cidade de Extrema- MG.	59
Figura 18. Ilustração a seção realizada para o pavimento na pesquisa comparativa realizada em Extrema-MG.	60
Figura 19. Sonda rotativa para extração dos corpos-de-prova do trecho experimental em Extrema-MG.	62
Figura 20. Corpo-de-prova do trecho experimental em Extrema-MG.	62
Figura 21. Sistema de captação d’água aplicado na pista experimental em Extrema-MG.	63
Figura 22. Difratogramas de Raios-X de pó realizados nas amostras de AVF, RAVF e bentonitas ativada e natural.	69
Figura 23. Difratograma de Raios-X de pó realizado na amostra na fração fina do RAVF.	70
Figura 24. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da bentonita em atmosfera de ar.	72

Figura 25. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da bentonita em atmosfera inerte.	72
Figura 26. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do pó de carvão em atmosfera de ar.	73
Figura 27. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do pó de carvão em atmosfera inerte.	73
Figura 28. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da AVF em atmosfera de ar.	74
Figura 29. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da AVF em atmosfera inerte.	74
Figura 30. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do RAVF em atmosfera de ar.	75
Figura 31. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do RAVF em atmosfera inerte.	75
Figura 32. Espectros FTIR das amostras de AVF, RAVF e matérias-primas obtidos em pastilha de KBr.	77
Figura 33. A morfologia da areia não (a) lavada e areia lavada (b).	77
Figura 34. Morfologia da bentonita natural (a) e bentonita ativada (b).	78
Figura 35. Morfologia do pó de carvão (a) e do RAVF (b).	78
Figura 36. Consumo Ácido da Bentonita Natural e Ativada, da AVF e do RAVF.	79
Figura 37. Análise de Infravermelho do CAP-20 da Ipiranga Asfaltos.	83
Figura 38. Análise de Infravermelho Típico do CAP usado nos EUA (SHRP,1993).	83
Figura 39. Análise Granulométrica do RAVF.	84
Figura 40. Análise granulométrica para o CAUQ.	86
Figura 41. Tolerância do traço – Faixa “C” DNIT da Mistura do CAUQ.	87
Figura 42. Micrografia referente a presença de microfissuras (a) e a interface entre o agregado e o ligante (b) do material com 0% de RAVF.	90
Figura 43. Micrografia do material com 5% de RAVF e micrografia da interface entre o agregado e o ligante (b).	91
Figura 44. Microestrutura do material (a) e a interface entre o agregado e o ligante do material (b), ambos com 10% de RAVF.	91
Figura 45. Micrografia do material (a) e os defeitos na interface entre o agregado e o ligante do material (b) com 15% de RAVF.	91
Figuras 46. Micrografias ilustrando a bentonita e o pó de carvão que recobrem o grânulo do RAVF.	92
Figura 47. Micrografias ampliadas mostrando a bentonita e o pó de carvão que recobrem o grânulo do RAVF.	92



Figura 48a. Micrografias do grânulo da areia convencional.	93
Figura 48b. Micrografias do grânulo da areia lavada.	93
Figura 49a,b. Aspecto do material obtido da água de abastecimento.	99
Figura 49c. Difratoograma do material obtido da água de abastecimento.	99
Figura 50. Enquadramento da mistura com RAVF Tupy na Faixa “C” DNIT.	106
Figura 51. Enquadramento da mistura com RAVF Fagor na faixa “C” DNIT.	107
Figura 52. Resistência à tração (RT) das misturas de CAUQ.	109
Figura 53. Micrografia mostrando a interface entre o agregado e o ligante do material do trecho experimental com 10% de RAVF (a) e a interface entre o agregado e o ligante do material com areia de pavimentação(b)	120

**LISTA DE SIGLAS**

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials.  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
AVF - Areia Verde de Fundição  
BES - Elétrons Retroespalhados  
C.A.U.Q. - Concreto Asfáltico Usinado a Quente  
CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo  
DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem  
DIN - Deutsches Institut für Normung  
DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes  
DQUI - Departamento de Química  
DRX - Difração de Raios-X  
DTA - Análise Térmica Diferencial  
ECA - Efeito do Calor e do Ar  
EDX - Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva  
EPAGRI - Empresa de Pesquisas Agropecuárias de Santa Catarina  
FRX - Fluorescência de Raios-X  
FTIR - Fourier Transform Infrared Spectroscopy  
IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo  
IME - Instituto Militar de Engenharia  
IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias  
ISO - International Organization for Standardization  
JCPDS - Joint Committee of Powder Diffraction Standards  
LQ - Limite de Quantificação  
LVDT - Linear Variable Differential Transformer  
MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura  
MR - Módulo de Resiliência  
NBR - Norma Brasileira Registrada  
ND - Não detectado  
PA - Ponto de Amolecimento  
RAVF - Resíduo Areia Verde de Fundição

REPLAN - Refinaria Planalto

RT - Resistência à Tração

SM - Standard Methods

SHRP - Strategic Highway Research Project

SW - Solid Waste

TG - Termogravimetria

UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina

UFPR - Universidade Federal do Paraná

U.S.B.S. - United States Bureau Of Standard

US-EPA - United States Environmental Protection Agency

VMP - Valor Máximo Permitido

## RESUMO

As areias de fundição representam um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção. Somente no Brasil são gerados cerca de 2 milhões de toneladas por ano. A maior parte destes resíduos é disposta em aterros com custos para os geradores e impactos ambientais. O reaproveitamento do Resíduo Areia Verde de Fundição (RAVF) como agregado em misturas asfálticas pode contribuir tanto para reduzir o volume de material descartado quanto para atender à grande demanda regional de agregados para pavimentação de ruas e estradas. Nesse estudo foi analisada a viabilidade técnica e ambiental do uso do resíduo areia verde de fundição em massas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico Usinado a Quente - CAUQ, utilizando como ligante o CAP-20 (cimento asfáltico de petróleo). Foram realizadas análises de caracterização físico-química para amostras e matérias-primas do RAVF, como composição elementar por fluorescência de Raios-X, espectroscopia de infravermelho, difração de Raios-X e análise termogravimétrica. O estudo de classificação ambiental do RAVF foi baseado na norma da ABNT NBR 10.004/2004, bem como nos Procedimentos para Gerenciamento de Areia de Fundição da CETESB (DD 152/2007). Os ensaios ecotoxicológicos foram realizados com os microorganismos *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri* seguindo as normas existentes no Brasil. Por meio do estudo da influência das matérias-primas: (areia lavada, bentonitas, pó de carvão e água) nos parâmetros ambientais do RAVF concluiu-se que o uso contínuo da água de abastecimento está enriquecendo a AVF com os sais dissolvidos que influenciam os parâmetros ambientais do RAVF, notadamente o sódio e o sulfato no extrato solubilizado. Descobriu-se que, por meio de apenas um experimento de análise térmica, realizado no RAVF ou AVF, da temperatura ambiente até 800 °C, em fluxo de ar, é possível determinar os teores de umidade, pó de carvão e bentonitas com base nas perdas de massa na secagem da amostra, na queima do carvão e na desidroxilação das bentonitas, respectivamente. O estudo dos parâmetros ambientais revelou que a concentração das espécies solubilizadas reduz significativamente quando se compara o RAVF com a massa asfáltica contendo o RAVF devido ao efeito do encapsulamento causado pelo CAP. Os estudos de desempenho das misturas asfálticas contendo RAVF, realizados no laboratório e no trecho experimental, revelaram que estas apresentaram propriedades adequadas para a camada de revestimento asfáltico.

## ABSTRACT

Foundry sands represents one of the industrial residues with the greatest production volume. Brazil alone generates some 2 million tons a year. Most of these residues is disposed off in landfills with costs for the generators and environmental impacts. The reclaiming of Green foundry sand as aggregate in asphalt mixes can contribute to reduce the volume of discarded material as well as to help meet the great local demand for paving aggregates. In the present work it was analysed the technical and environmental feasibility of the use of green foundry sand residue in hot mix asphalt using the binder CAP-20. Physico-chemical analyses of characterization were performed in samples and raw materials of the green foundry sand, such as elemental composition with X-ray fluorescence, infrared spectroscopy, X-ray diffraction and thermogravimetric analysis. The environmental classification of the green foundry sand was performed according to the standards ABNT NBR 10.004/2004, and CETESB DD 152/207 (procedures to manage foundry sand). The ecotoxicological tests were performed with the microorganisms *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri* according to brazilian standards. From the study of the influence of the raw materials (washed sand, bentonites, coal powder and water) in the environmental parameters of the green foundry sand it was concluded that the salts, dissolved in the water works water, are salinizing the foundry sand causing the high sodium and sulfate contents observed in the residue's solubilization tests. It was found that by means of only one thermogravimetric analysis, performed in the green foundry sand, from room temperature to 800 °C, in air flux, it is possible to determine the contents of humidity, coal powder and bentonites based on the mass losses of sample drying, coal burning and bentonites dehydroxilation, respectively. The study of the environmental parameters revealed that the concentrations of the solubilized species are significantly reduced when one compares the green foundry sand with the asphalt mix made with green foundry sand due to the encapsulation effect of the binder. The performance studies made on the mixes containing the green foundry sand, both in lab and in an experimental a paved test segment, revealed that these are suited to be used in the asphaltic cover layer.

## CAPÍTULO 1

### 1.1. Considerações Gerais

Com a explosão demográfica ocorrida no século XX houve um aumento significativo na quantidade e tipos de resíduos gerados pela sociedade, sendo que a maioria não recebe destino adequado, comprometendo o meio ambiente por até centenas de anos.

A proliferação de produtos não degradáveis, aliada ao expressivo aumento da população e dos índices de consumo, tem como conseqüência uma séria crise ambiental, no que tange, ao destino dos dejetos e resíduos.

A reciclagem, que busca transformar os rejeitos em produtos úteis para a sociedade, tem se apresentado como uma das alternativas viáveis à redução dos impactos ambientais e dos custos de produção, assim como, as leis que disciplinam a preservação do meio ambiente representam o incentivo ao emprego de materiais reciclados, em todos os segmentos das atividades humanas.

Especificamente, sobre a utilização dos materiais reciclados na construção de estradas existem muitas agências governamentais, organizações privadas e instituições que investem em pesquisas, que busquem conciliar a crescente necessidade de reutilização dos resíduos com as exigências técnicas, operacionais e econômicas da indústria da construção rodoviária, por meio da avaliação do desempenho mecânico.

Nos países do chamado “primeiro mundo” o emprego do RAVF em pavimentação é visto com grande interesse, pois, existe o consenso quanto à necessidade de preservação dos recursos naturais, minimização do descarte de rejeitos, reciclagem e reaproveitamento de materiais erroneamente chamados de resíduos.

No setor rodoviário com as grandes extensões a serem pavimentadas e mantidas, sendo os recursos financeiros cada vez mais escassos, exigem-se a adoção de medidas eficazes para implantar as soluções alternativas mais econômicas e, que ao mesmo tempo, maximizem o efeito de cada unidade monetária disponível.

O emprego do RAVF em pavimentos asfálticos representa uma tecnologia alternativa que está sendo empregada com maior ênfase em países desenvolvidos, por ser ambientalmente correta e eficaz.

No Brasil, os primeiros estudos e avaliações desta tecnologia são recentes, por conseqüência, o reaproveitamento do RAVF em misturas asfálticas ainda é pouco conhecido

no meio rodoviário. Alguns estudos preliminares sobre o uso do Resíduo Areia Verde de Fundição como agregado de asfalto já foram produzidos no Brasil (BINA *et al*, 2000), (STEFENON, 2003), (COUTINHO, 2004), (PEREIRA, 2004) e nos Estados Unidos (MILLER *et al*, 1998) com resultados estimulantes.

O emprego do RAVF<sup>1</sup> como agregado em pavimentação asfáltica se constitui em uma alternativa viável, devido aos resultados como as melhorias técnicas produzidas e por conciliar dois benefícios imprescindíveis à sua aplicabilidade: o ambiental, enquanto estratégia de proteção ao meio ambiente e o financeiro, com a razoável relação custo-benefício.

O trabalho resgata os principais referenciais teóricos sobre o uso do RAVF como agregado em misturas asfálticas. No Capítulo 1 mostra as considerações sobre a importância da realização desta pesquisa. No Capítulo 2 apresenta as principais informações referentes ao beneficiamento da areia e sua utilização nas indústrias de fundição, com destaque a bentonita, assim como, o estudo dos componentes utilizados no processo de fundição. No Capítulo 3 são descritas as técnicas experimentais empregadas na caracterização das matérias-primas do AVF e do RAVF na preparação dos corpos-de-prova do CAUQ. Também mostra o projeto desenvolvido no município de Extrema-MG sobre a viabilidade do uso do RAVF como agregado em misturas asfálticas realizado em 2007 com o Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes – DNIT, Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e Instituto Militar de Engenharia – IME e apresenta o controle tecnológico de execução do trecho experimental para avaliar o comportamento mecânico do concreto asfáltico contendo RAVF, com a apresentação das análises de caracterização dos materiais utilizados e os ensaios para verificar a viabilidade técnica. No Capítulo 4 são apresentadas as análises obtidas sobre a adição do RAVF em misturas asfálticas, os resultados da caracterização das matérias-primas constituintes da AVF, dos materiais constituintes do concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) e dosagem, bem como, as análises de interesse ambiental e o estudo de toxicidade, assim como, os resultados obtidos do trecho experimental constituído de revestimento asfáltico contendo 10% de RAVF, realizado em Extrema-MG. O Capítulo 5 versa sobre as considerações finais, as principais conclusões apresentadas e as indicações relevantes para o aprofundamento das pesquisas na área do reaproveitamento do RAVF como agregado em

---

<sup>1</sup> Tendo em vista a diversidade de denominações, doravante o Resíduo Areia Verde de Fundição será identificado pela sigla RAVF, que compreende as seguintes identificações: resíduo areia de moldagem, matéria-prima alternativa e resíduo areia de fundição.

misturas asfálticas, bem como, a sua utilização como subproduto em outras atividades econômicas.

Nesta pesquisa foi realizada a caracterização físico-química do RAVF e das suas matérias-primas (água, areia lavada, bentonitas, pó de carvão), como composição elementar por fluorescência de Raios-X, espectroscopia de infravermelho, difração de Raios-X e análise termogravimétrica. Também foi determinado o processo de salinização da Areia Verde de Fundição até então desconhecido.

## **1.2. Objetivos da Tese**

### **1.2.1. Objetivo geral**

Analisar a viabilidade técnica e ambiental do reaproveitamento do RAVF como agregado em misturas asfálticas.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Avaliar o comportamento mecânico e estrutural do concreto asfáltico usinado a quente quando este recebe adições de RAVF no concreto asfáltico;
- Estudo ambiental e químico em função do tempo de vida do pavimento alternativo para verificar a possibilidade de agressão ao meio ambiente e à saúde humana;
- Estudo da adesividade ao nível molecular e o estudo da microestrutura do pavimento.



## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1. OS COMPONENTES E OS PROCESSOS DA FUNDIÇÃO

##### 2.1.1. Areia

O principal componente da areia de moldagem ou de macharia utilizada nas fundições é um agregado fino, mineralogicamente puro, denominado “areia base”, ao qual são misturados ligantes ou aglomerantes que têm a finalidade de garantir a manutenção da forma dos machos e das cavidades internas dos moldes durante o processo de fundição (REINERT, 1996).

Para atender as exigências tecnológicas específicas as fundições são obrigadas a adotar vários tipos de ligantes ou aglomerantes, além de aditivos. De acordo com o processo ligante adotado, a indústria de fundição distingue dois tipos genéricos principais de areias de moldagem: “areia verde” e a “areia ligada quimicamente”. Embora seja verde toda a areia aglomerada com argila, por ser moldada no estado úmido é habitual o uso do termo “moldagem em areia verde”, quando os moldes não sofrem secagem antes do vazamento.

Na “areia verde” o agente aglomerante principal é uma argila (bentonita) umedecida, mas toda areia verde contém uma parcela ponderável de materiais orgânicos decorrentes do emprego de aditivos, tais como pó de carvão ou amido, e/ou da incorporação de machos desagregados à areia circulante (MARIOTTO *et al*, 1997). Por outro lado, na areia ligada quimicamente é utilizada uma resina orgânica como aglomerante.

A areia base é um material refratário, em estado solto e granular produzido pela decomposição das rochas pela ação natural da água, vento, gelo, erosões ou artificialmente. O diâmetro dos grãos individualmente pode variar de 3,36 a 0,053 mm, ou seja, 6 a 270 malhas por polegadas, segundo a “United States Bureau Of Standard” (USBS).

A extração do minério é realizada mecanicamente em bancadas, com o uso de retroescavadeira e caminhões basculantes para o transporte até o beneficiamento. Para retirar a cobertura vegetal e o capeamento é utilizado trator de esteira e pá-carregadeira. Quando a extração alcança o nível freático são utilizadas dragas para se fazer a lavra do minério.

Como para o processo de moldagem a areia deve estar isenta de impurezas e argilominerais é necessário passar pela usina de beneficiamento, onde o minério é lavado com

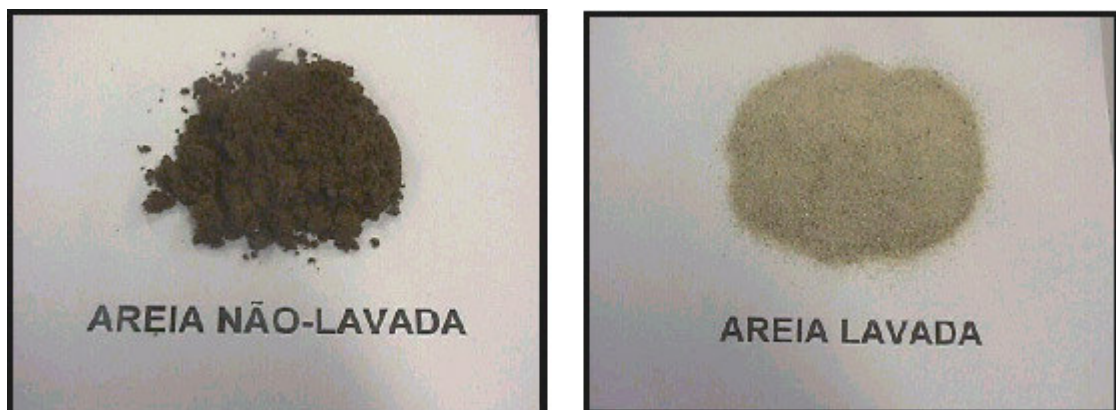
hidróxido de sódio. É utilizado o hidróxido de sódio para promover a saponificação da fase orgânica e o arraste da fase mineral (argila). A adição do coagulante, sulfato de alumínio, à água do processo, gera flocos que decantam na forma de lodo. A água retorna para o processo de lavagem da areia e o lodo, que é basicamente argila, é reutilizada na recomposição do solo e reposição/replanteio da mata.

Os grãos são classificados mecanicamente (granulometria) e posteriormente as areias são secas em fornos com gás natural. A Figura 1 apresenta as instalações de beneficiamento de areia utilizada no processo de fundição.



**Figura 1.** Instalações de beneficiamento da areia utilizada no processo de fundição (FERREIRA, *et al*, 2003).

A Figura 2 ilustra o comparativo do resultado do beneficiamento da areia, conforme as exigências técnicas para a moldagem em indústria de fundição.



**Figura 2.** Comparativo do resultado do processo de beneficiamento da areia (PEREIRA, 2005).

### 2.1.2. Bentonitas

Bentonita é uma argila plástica constituída por argilominerais do grupo das esmectitas e apresenta componentes como: outros argilominerais como a caulinita e illita, feldspatos, anfibólios, cristobalita, quartzo, entre outros, sendo que o teor de componentes não argilosos, dificilmente é inferior a 10%. Podem apresentar cores variadas, tais como: branco, cinza, amarelo, marrom, verde e azul (LUZ *et al*, 2004 apud GRIM, 1968).

As esmectitas apresentam-se como um *sanduíche* (lamela) formado por duas camadas de tetraedros de silício e uma camada de octaedros de alumínio, com uma estrutura do tipo 2:1.

Na lamela podem ocorrer substituições de íons por outros de diferente número de oxidação. A Figura 3 ilustra o modelo estrutural da montmorilonita.

Nos tetraedros, o íon  $Al^{3+}$  pode aparecer substituindo o  $Si^{4+}$ ; enquanto que nos octaedros os íons  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{+3}$  e/ou  $Fe^{2+}$  podem substituir o  $Al^{3+}$  (LUZ *et al*, 2004 apud GUNGOR, 2000; MURRAY, 2000). Esse tipo de substituição provoca um desbalanceamento elétrico que é compensado por cátions, como  $Na^+$  e  $Ca^{2+}$ , que se posicionam entre as lamelas e são intercambiáveis, dando origem a denominação sódica e cálcica das bentonitas.

Algumas bentonitas, menos comuns, podem apresentar íons  $H^+$ ,  $K^+$  e  $Mg^{2+}$  como cátions de compensação. O desbalanceamento de carga na superfície de uma esmectita pode variar de 0,2 a 0,6 por unidade de célula (GRIM, 1962).

Geralmente, as bentonitas, caracterizam-se por apresentar: partículas muito finas; elevada carga superficial; alta capacidade de troca catiônica; elevada área superficial; e inchamento (afastamento das lamelas) quando em presença de água (GUESSER, 1982).

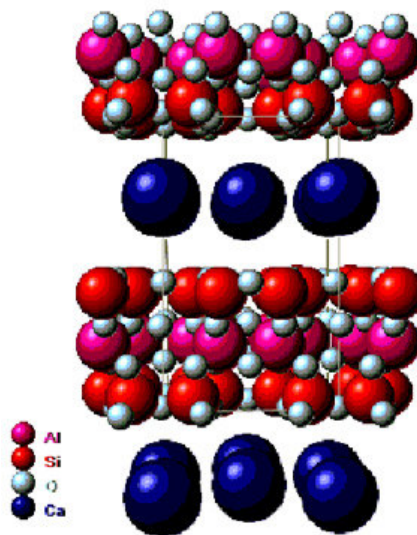
As superfícies das lamelas estão disponíveis para hidratação e troca de cátions. Essas características resultam nas propriedades que determinam o seu aproveitamento industrial.

As bentonitas podem apresentar maior ou menor capacidade de inchamento. Essa característica depende de muitos fatores, tais como: natureza do cátion interplanar, carga lamelar, natureza dos sítios geradores de carga, interestratificação e presença de contaminantes como sais solúveis e substâncias orgânicas.

O fator mais importante costuma ser a natureza do cátion interplanar, uma vez que se o íon sódio, que se hidrata muito facilmente, estiver presente em quantidades apreciáveis, a esmectita apresenta alta capacidade de inchamento, enquanto que se outros íons, como o cálcio ou o potássio, forem predominantes, sua hidratação pouco intensa não permite uma grande separação das lamelas (LUZ *et al*, 2004).

A bentonita é o principal aglomerante da mistura na areia de moldagem e é responsável pela coesão da areia quando em contato com a água. Pelo motivo dessa mistura a escoabilidade, consistência e plasticidade definem as características de seu uso, obtendo moldes uniformemente compactados, que reproduzem fielmente as dimensões do modelo. Sua função coesiva permite que a resistência da caixa de moldagem seja suficiente durante o vazamento, não permitindo assim que a mesma se rompa durante o processo.

Quando ocorre o vazamento do minério fundido a bentonita muda suas características físicas, as moléculas de água que estão presentes entre as lamelas da bentonita são eliminadas, pela elevação da temperatura. Devido às perdas das características coesivas e refratárias há a necessidade de constante reposição da bentonita. A adição de bentonita visa repor a parcela degradada termicamente, bem como suprir com ligante a areia nova incorporada ao sistema (GUESSER *et al*, 1993).



**Figura 3. Modelo estrutural da montmorilonita**  
(<http://www.webmineral.com/data/Montmorillonite.shtml>).

#### **2.1.2.1. Ativação da bentonita cálcica**

A expansão da estrutura de uma esmectita pode ocorrer por dois diferentes mecanismos: o cristalino e o osmótico. O primeiro é consequência da adsorção de camadas monomoleculares de água nas superfícies basais. A presença dessas camadas de água resulta no aumento da distância basal de 10 para 15 Å. Este inchamento é consequência da hidratação dos cátions de compensação. O segundo mecanismo ocorre pela diferença de pressão osmótica entre os espaços lamelares, resultando na penetração de mais água entre as lamelas

da esmectita e, conseqüentemente, em maior expansão. Tal processo pode aumentar bruscamente o espaçamento entre as lamelas para valores de 30-40 Å e continuar até algumas centenas (LUCKHAM *et al*, 1999).

A quantidade de água entre as lamelas depende principalmente da tendência à hidratação do cátion de compensação e da energia de interação entre as lamelas (STUMM, 1992). O íon  $\text{Na}^+$  tem maior energia de hidratação do que o  $\text{Ca}^{2+}$ . Além disso, quando as lamelas têm suas cargas compensadas pelo íon sódio, de menor valência, apresenta-se mais afastadas devido à menor energia de interação, de modo a permitir a penetração de uma maior quantidade de água no espaço entre as lamelas. Isso explica porque a capacidade de expansão da bentonita sódica é muito maior do que a do tipo cálcica.

O beneficiamento das bentonitas cálcicas consta das seguintes etapas: desintegração, adição de 2,5 a 3% em peso de barrilha ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), homogeneização, laminação ou extrudagem, cura (2 a 10 dias), secagem, moagem, classificação e ensacamento.

O processo se inicia com a adição de 3,0% em peso de barrilha, a bentonita espalhada no pátio de homogeneização, sendo o material homogeneizado transferido para uma moega de alimentação na usina. Um alimentador retira o material da moega com a taxa de 4 t/h e descarrega em um desintegrador de rolo, chamado no senso comum de pé-de-cabra. Deste equipamento a bentonita segue por correia transportadora para o misturador de parafuso para adição de água. A mistura com umidade em torno de 34% tem a finalidade de promover maior contato da barrilha com a montmorilonita.

A bentonita ativada e seca é alimentada em um moinho pendular. Por meio de uma ventoinha é injetada uma corrente de ar na parte inferior do moinho, para levar o produto da moagem para um classificador pneumático. A Figura 4 apresenta o esquema da ativação da bentonita cálcica.

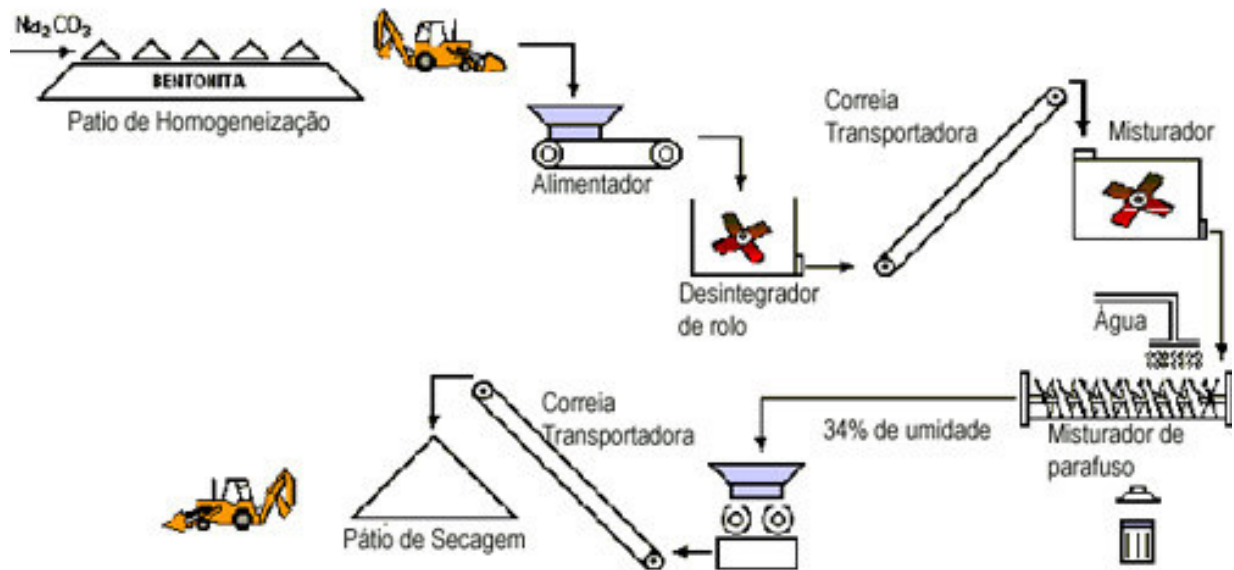


Figura 4. Esquema da ativação da bentonita cálcica (LUZ, 2002).

### 2.1.3. Pó de carvão

Na formulação de composições para as areias de moldagem é comum o emprego do pó de carvão. Os objetivos principais para sua aplicação são: a melhoria do acabamento superficial e a desmoldabilidade e a prevenção de defeitos provocados por atmosfera oxidante, como sinterização, reação metal/molde e porosidades.

O pó de carvão tem cerca de 30% de voláteis, estes voláteis são principalmente hidrocarbonetos que reagem facilmente com o oxigênio. Desta forma a atmosfera do molde será redutora, porque tem sempre excesso de material que se oxida com facilidade. A formação de CO (monóxido de carbono) também contribui para a atmosfera redutora, pois o CO é um gás redutor.

O processo de sinterização é a ligação entre superfícies sólidas vizinhas provocadas pela elevação da temperatura. No caso da areia, um grão se liga ao outro quando submetida a temperatura alta (menor que o ponto de fusão). Um material entre o grão de areia de menor ponto de fusão que a areia pode provocar sinterização entre os grãos.

Os carvões são materiais orgânicos que se decompõem por ação térmica em vários produtos gasosos, líquidos e sólidos. A fração líquida, que contém o alcatrão, é aparentemente a mais importante por conter compostos ricos em carbono, como benzeno, tolueno, xileno e naftaleno.

Conforme MARCHEZE *et al* (1985) existem diferentes teorias para explicar o efeito do pó de carvão sobre o acabamento superficial das peças fundidas: teoria do colchão de gás, pela formação de uma camada de gás que reduziria o contato do metal com o molde; a teoria do envolvimento dos grãos de areia por finas camadas de carbono; teoria da atmosfera redutora, pela decomposição do pó de carvão e formação de atmosfera redutora na interface metal/molde; e teoria do carbono vítreo, um depósito formado a partir de hidrocarbonetos voláteis pesados.

O pó de carvão pode também afetar outras propriedades da areia de moldagem, como a permeabilidade, devido à formação do coque durante os ciclos de fundição, com granulometria mais fina que a da areia; aumento do teor de umidade para manter a compactibilidade, em razão da presença do coque formado; a diminuição da tensão de expansão da sílica, pela presença de frações líquidas formadas pela decomposição térmica do pó de carvão; diminuição da resistência a úmido, pela ação de produtos resultantes do processo de coqueificação, especialmente o enxofre; e alteração da condutividade térmica do molde.

#### **2.1.4. Água**

A característica principal da água na mistura da areia de moldagem é tornar possível a propriedade coesiva dos componentes da mistura através da tensão superficial da água.

A água deve ser controlada a cada mistura para não prejudicar o processo de moldagem; quanto menor a umidade, menor será o poder de inchamento da mistura, dificultando o trabalho de moldagem e “desidratando” o agente coesivo. Já o excesso de umidade traz fatores indesejáveis ao processo da moldagem (DUARTE, 1996). A quantidade correta de água dá à mistura o inchamento correto e o perfeito poder coesivo aos elementos que constituem a caixa de moldagem.

Os sais presentes na água poderão influenciar na composição elementar do RAVF, bem como nos parâmetros ambientais, como por exemplo, no solubilizado.

## 2.2. O PROCESSO DE FUNDIÇÃO

A fundição é o método mais curto para se obter peças metálicas acabadas. Consiste, principalmente em verter (vazamento) metal líquido em caixas de moldagem (Figura 5), com machos montados em seu interior, que caracterizará a peça após a solidificação do metal.

Em síntese, os moldes conformam as faces externas ao passo que os machos conformam as faces internas da peça metálica.

A fundição emprega nos seus processos modelos, moldes e machos que promovem às peças fundidas a sua conformação, de acordo com as etapas existentes de moldagem, fusão e acabamento.



Figura 5. O vazamento do metal no molde.

### 2.2.1. As definições dos processos aplicados na fundição

a) **Modelos:** O modelo trata-se de uma réplica perfeita da peça que será produzida. O modelo pode ser fabricado em madeira, metal, resinas ou outros materiais (PERINI,1986).



- b) **Machos:** Algumas peças a serem fundidas podem apresentar detalhes ou cavidades. Para que se produzam as superfícies internas em certas peças fundidas, coloca-se no interior dos moldes de areia, peças sólidas ou machos feitos de uma mistura compatível com o metal a ser vazado e com o tamanho da peça fundida. Após o vazamento, o macho é removido do interior da peça, deixando a forma interna desejada (KONDIC, 1973).
- c) **Moldes:** O molde tem por função oferecer o formato negativo da peça na qual será vazado o metal líquido. O molde é feito por empacotamento de areia, em torno do modelo, toda a estrutura estando contida numa caixa de moldagem. O molde é feito em duas partes: uma superior (caixa superior) e outra inferior (caixa inferior) (CAMPOS FILHO, 1978).
- d) **Moldagem:** No processo de moldagem a produção de uma peça fundida de projeto simples é feita por meio das seguintes etapas: a partir do desenho da peça, fabrica-se o modelo, em torno do qual soca-se a mistura de moldagem, contendo areia obtida em depósitos naturais e aditivos como a argila e o pó de carvão, usando-se caixas de moldagem para suportar as faces laterais do molde; remove-se o modelo, colocam-se os machos em posição, fecham-se as diferentes partes do molde e verte-se o metal na cavidade resultante. O material da moldagem mantém a forma da cavidade até a solidificação do metal vazado nele.
- e) **Fusão:** Nesta etapa se obtém o estado líquido do metal com a utilização de fornos de fusão. A alimentação do metal líquido é feita por meio de um sistema de canais existentes no molde. Os canais de alimentação alargados ou massalotes são abertos para permitir que o metal escorra para a cavidade do molde.
- f) **Acabamento** - Após a solidificação e resfriamento a peça passa pelo processo de desmoldagem, por meio da vibração do conjunto de moldagem para retirar a mistura de areia e posteriores etapas do acabamento. A areia é removida e a limpeza é operacionalizada através de jateamento, escovação e esmerilhagem. A quebra de canais consiste no ato de colocar a peça em local adequado para então quebrar manualmente, com marreta e martelo, os canais, que não fazem parte da peça e que são classificados como sucata. O jateamento com granalha de aço consiste em colocar a peça, já sem canais em uma câmara na qual se realiza o jateamento com granalha de aço (pequenas esferas de aço) a fim de deixar a peça mais limpa. No acabamento final a escovação e a

esmerilhagem consistem em métodos para a remoção de rebarbas<sup>2</sup>, com o uso de esmeris (CHEGATTI, 2004).

### 2.2.2. Preparação de areias

A Areia Verde de Fundição (AVF) é uma mistura de vários materiais que, de acordo com suas combinações, definem as características de perfeita trabalhabilidade do bolo, que compõe a caixa de moldagem.

A formulação da AVF a ser usada depende do tipo de metal ou liga a ser fundida. Moldabilidade, compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência a esforços mecânicos como compressão e tração, expansividade volumétrica, permeabilidade e perfeita desmoldagem são algumas características da AVF adquiridas no processo de aglomeração executado pelos misturadores.

Conforme ilustrada na Figura 6, as etapas do processo de fundição são:

1. Preparo da AVF, também conhecida como areia de moldagem e preparo da areia de macharia;
2. Fusão do metal nos fornos de indução e cubilô (também chamados de Cupola);
3. Vazamento do ferro líquido em aproximadamente 1400 °C;
4. Desmoldagem e geração do RAVF;
5. Resfriamento e limpeza das peças;
6. Acabamento das peças;
7. Envio das peças aos clientes.

O processo de moldagem é do tipo regenerativo. O material que chega ao final do ciclo de trabalho retorna através de correias transportadoras ao início do processo, reutilizando a mesma areia. Pelos motivos de perda de volume e da descaracterização dos componentes da mistura, torna-se necessário o descarte de parte da AVF, gerando o RAVF, e a freqüente reposição de matérias-primas e o controle de qualidade. A Figura 7 ilustra o aspecto físico da AVF e do mecanismo utilizado para o seu transporte.

A AVF é preparada por meio da descarga de areia nova e areia usada, com a quantidade de água calculada por um controlador de compatibilidade, de modo que a areia caia na máquina de moldar com a umidade final pretendida. A quantidade de água certa para o teor de

---

<sup>2</sup> São restos de metais que aparecem nas peças, que estão fora das dimensões da peça desejada.

bentonita pode ser verificada no momento em que é efetuada a mistura, podendo esta ser corrigida (SCHULZ, 2005). Os demais aditivos são injetados no recipiente de mistura, que funciona continuamente.

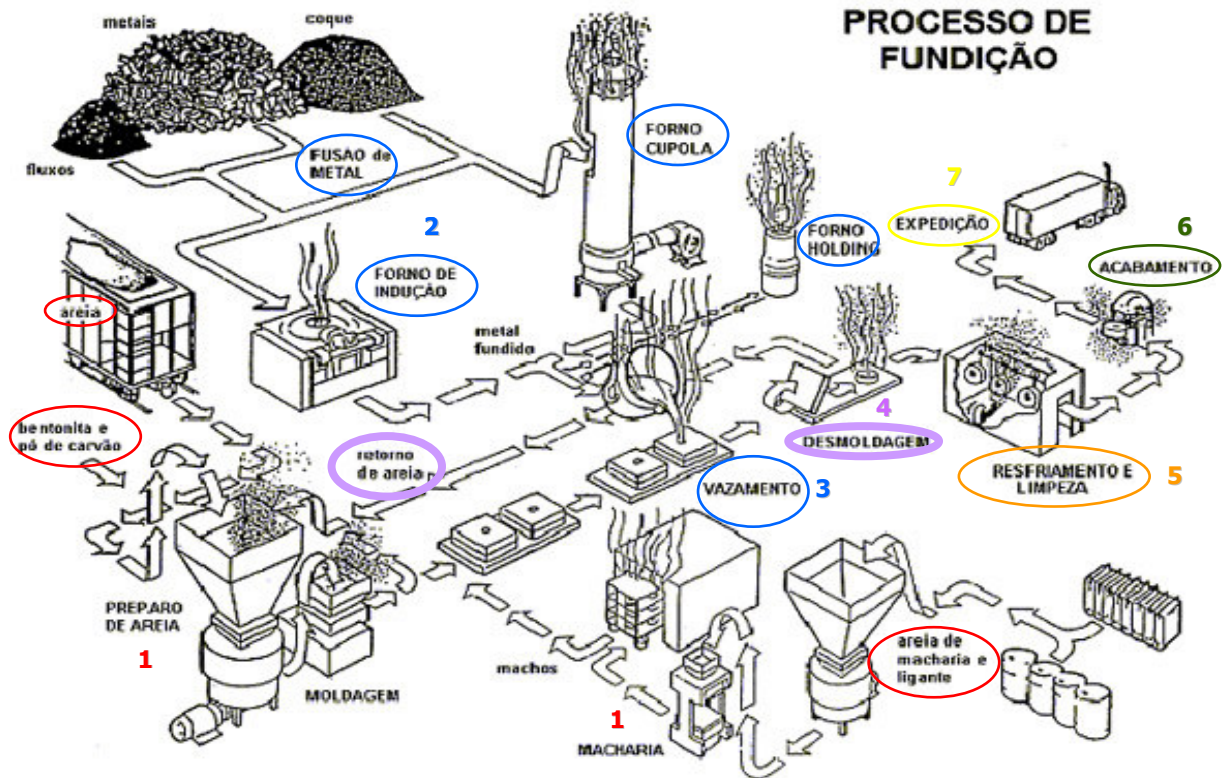


Figura 6. Etapas do processo de fundição e a geração do RAVF.



Figura 7. O aspecto físico da AVF na correia transportadora para o processo de moldagem (PEREIRA, 2005).

O misturador (Figura 9) é o elemento principal para a preparação de AVF, onde são misturadas a areia lavada e areia retorno, bentonitas ativada e natural, pó de carvão e água. Na Figura 8 pode-se verificar o aspecto físico das bentonitas e do pó de carvão.



Figura 8. Matérias-primas da AVF (PEREIRA, 2005).



Figura 9. O misturador das matérias-primas constituintes da AVF (PEREIRA, 2005).

### 2.3. A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO

Muitas indústrias são possíveis geradoras de efeitos nocivos ao meio ambiente, pela própria transformação dos recursos naturais em bens e pela geração de enorme quantidade de resíduos. Considerando-se a diversidade e o porte do parque industrial brasileiro, a quantidade e a qualidade dos resíduos sólidos gerados, assumem uma importância considerável no processo de degradação do meio e de exploração de recursos naturais.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define que resíduos sólidos são os que se encontram em estado sólido ou semi-sólido, resultantes das atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição (NBR 10.004, 2004).

Os resíduos sólidos são considerados como perigosos quando suas características apresentarem risco à saúde pública, provocando doenças até a morte e riscos ao meio ambiente, quando gerenciados de forma inadequada. A classificação de resíduos de acordo com a ABNT NBR 10.004 (2004), compreende desde a identificação do processo que gerou este resíduo, as características de seus constituintes e a comparação destes com as listagens de substâncias, cujo impacto à saúde e ao meio ambiente já é conhecido. A norma NBR 10.004 (2004) classifica os resíduos em duas classes, segundo sua composição e propriedades conforme Tabela 1:

**Tabela 1. Classificação dos resíduos (NBR 10.004, 2004).**

Classificação dos Resíduos		
<b>Classe I</b>	<b>Classe II</b>	
Perigosos	Não perigosos	
	<b>Tipo A</b>	<b>Tipo B</b>
	Não-inertes	Inertes

As indústrias de fundição geram vários tipos de resíduos, dentre eles um tipo de resíduo sólido proveniente do descarte das AVFs, que respondem pela maior parcela de peças fundidas no Brasil, sendo sua utilização em aproximadamente 80% das fundições nacionais (PABLOS, 1996).

O RAVF é classificado como resíduo classe II A porque apresenta no ensaio de solubilização alumínio, ferro e manganês acima do valor máximo permitido da norma (ABIFA, 2006).

SILVA (2007) relata que a norma NBR 10.004 foi baseada no Código Federal de Registros (CFR) nº 40 (Proteção ao Meio Ambiente) e 261 - Sistema de Gestão de Resíduos Perigosos, este último, classifica os resíduos somente em duas classes: perigosos e não-perigosos, não mencionando a aplicação do ensaio de solubilização. Como a norma brasileira incorporou a exigência do teste de solubilização a RAVF foi classificada na Classe II-A.

Os órgãos ambientais do Brasil, com exceção o estado de São Paulo, utilizam a norma NBR 10.004 como parâmetro único para decidir o que fazer com o RAVF. Por isso, as empresas precisam enviar os resíduos para aterros comerciais ou construir aterros próprios. Estes procedimentos adotados pelas empresas ocorrem porque há uma lacuna na Norma, enquanto função de ser um referencial na gestão de resíduos e não definir a possibilidade do reaproveitamento do RAVF.

A extração de matérias-primas da AVF aliado ao acúmulo de RAVF em aterros causa significativos impactos ambientais. Por isso, o reaproveitamento do RAVF deveria ser incentivado para a redução do quantitativo de areia extraído da natureza.

Este estudo pode referendar a possibilidade de incorporação do RAVF em CAUQ e propor uma metodologia tendo em vista os aspectos mecânicos e ambientais desta incorporação, explorados em profundidade nesta investigação.

### **2.3.1. Reaproveitamento do RAVF**

O relatório desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental – EPA de 2006 demonstra que os maiores volumes de areia de fundição estão sendo utilizados em geotécnica, em aplicações como em bases de estradas e cobertura de aterros. Destaca que, dependendo da qualidade do RAVF, este poderá ser um excelente agregado para a produção de cimento Portland, concreto asfáltico e produtos de concretos. Em casos mais restritos, o RAVF está sendo usado em solos agrícolas e outras aplicações como a compostagem.

O reaproveitamento de resíduos de fundição na Europa é recente, no entanto em franco desenvolvimento, por ser considerado uma prioridade dentro da indústria europeia por seus benefícios de preservação ambiental e econômico.

Para reduzir a quantidade de resíduos gerados e incentivar o aproveitamento de resíduos, nos últimos 15 anos, alguns países europeus, especialmente os que possuem áreas territoriais limitadas, aumentaram o valor dos impostos das áreas destinadas à instalação de aterros (SILVA, 2007).

Os estudos recentes realizados no Brasil comprovam a viabilidade técnica e ambiental do RAVF para ser utilizado como matéria-prima, em substituição do agregado miúdo, na composição de concreto asfáltico.

De acordo com COUTINHO (2004), as misturas asfálticas com o resíduo areia de fundição apresentam propriedades adequadas para a camada de revestimento, no que diz respeito as propriedades mecânicas. Os resultados das análises ambientais, das misturas asfálticas com 15% de areia de fundição, demonstraram que este resíduo não oferece risco ambiental.

Ao adicionar 7% do resíduo areia de fundição na confecção de concreto asfáltico, STEFENON (2003) concluiu que o concreto asfáltico contendo o resíduo atende as especificações do DNIT. Destaca ainda que não representa riscos com relação aos poluentes ao meio ambiente.

Com experimentação semelhante BONET (2000) estudou a adição de 8% do resíduo areia de fundição em concreto asfáltico e concluiu que possui boas propriedades mecânicas e atende os limites máximos da norma NBR 10.004.

BINA *et al* (2000) realizaram um trecho experimental no município de Santo André - SP, sendo instalados poços de monitoramento das águas provenientes das chuvas e lavagens da camada de estudo. Foram realizados ensaios ambientais, tanto na areia de fundição, como nos corpos-de-prova de misturas asfálticas preparadas com areia convencional (virgem), com areia de fundição e nos extratos coletados nos poços de monitoramento. No resíduo areia de fundição os parâmetros manganês, ferro e alumínio referente ao ensaio de solubilização determinado pela NBR 10.006/87, apresentaram limites superiores aos permitidos, em contrapartida, nas amostras de massa asfáltica com areia convencional e com areia de fundição, os resultados para todos os parâmetros, nos ensaios de lixiviação, solubilização e massa bruta, apresentaram índices inferiores ao limite e para as amostras (extratos) coletadas nos poços de monitoramento, os resultados foram inferiores aos limites da norma vigente.

Para os pesquisadores o emprego de areia de fundição para a pavimentação asfáltica é ambientalmente viável e a sua utilização parece ser mais segura, do que o risco de descarte não controlado ou de acidentes com aterros industriais controlados.

A falta de estudos sobre o reaproveitamento do RAVF em misturas asfálticas, bem como a ausência de dados sobre as características físico-químicas do RAVF, impulsionou o desenvolvimento desta tese, sendo que o ineditismo do presente estudo se revela com a caracterização físico-química das matérias-primas constituintes da AVF e do RAVF, como composição elementar por fluorescência de Raios-X, espectroscopia de infravermelho, difração de Raios-X e análise termogravimétrica, bem como o estudo do processo de salinização da Areia Verde de Fundição.

### **2.3.2. Proposta de Preparo e Armazenamento do RAVF**

BONIN (1995) desenvolveu um processo de preparação do uso do RAVF para ser utilizado na construção civil. Esse processo consiste na separação física das partículas metálicas, por meio de placas magnéticas capazes de atraírem pequenas partículas.

Segue então para uma peneira classificatória, que retira as impurezas como plásticos e estopas, que também tem a função de separar partículas finas de RAVF, grumos e torrões, que são enviadas para um moinho, onde são quebradas a sua estrutura coesiva, logo após, retorna para o início do processo.



O RAVF limpo de partículas indesejáveis e com uma granulação correta segue para o local de armazenamento.

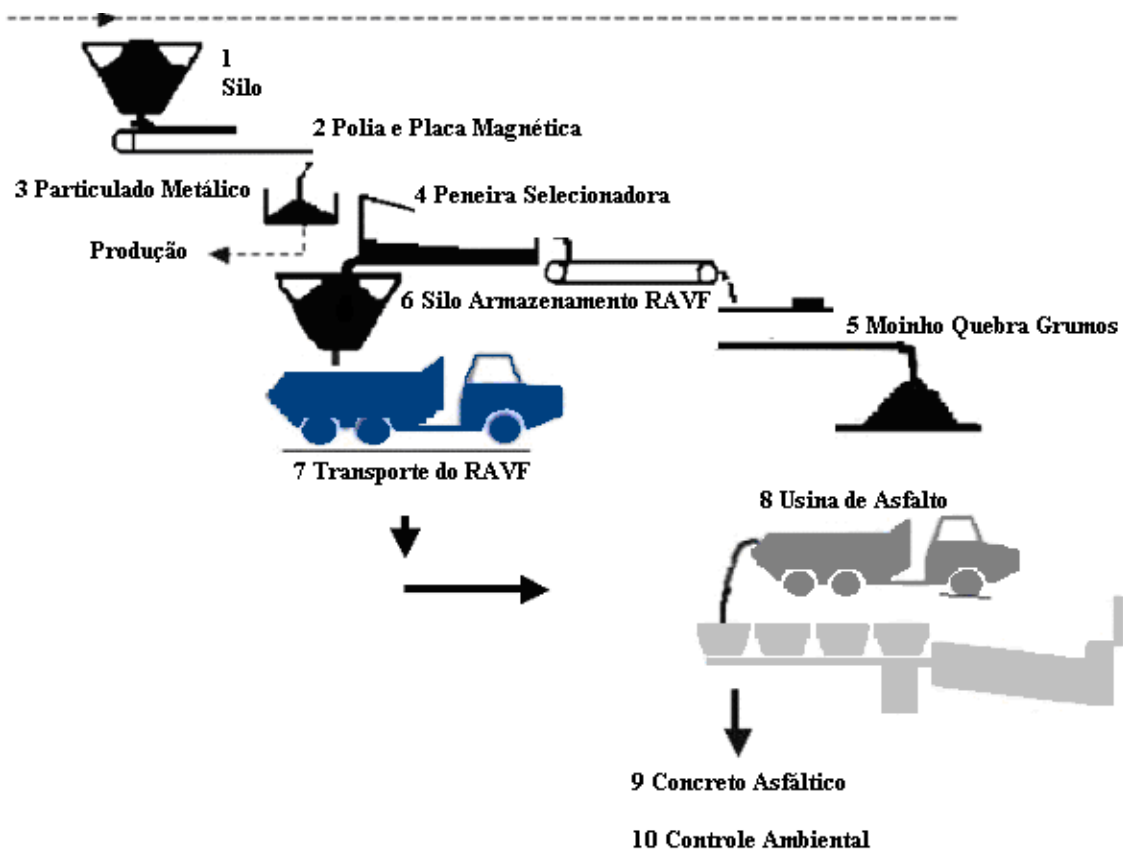
O metal separado retorna para o forno onde é refundido. As partículas de impurezas sólidas são enviadas para o aterro. Assim fica concluída a unidade de preparação do RAVF, conforme ilustrada na Figura 10.

O armazenamento do RAVF, após sua preparação para uso em pavimentação deve garantir condições adequadas para evitar a formação de grumos de RAVF.

A formação de grumos é gerada devido a ação da chuva, que age sobre o monte, criando na superfície uma crosta coesa, devido as partículas finas de bentonita e pó de carvão presentes no RAVF.

Para evitar que ocorra acúmulo de água e o deslocamento do RAVF à rede pluvial, que podem ser ocasionados pelas enxurradas é indicado o uso de um silo de armazenamento, devidamente coberto.

Com o RAVF preparado e acondicionado corretamente, este segue para o processo de utilização em misturas asfálticas.



**Figura 10. Fluxograma de preparação de RAVF para uso em misturas asfálticas BONIN, 1995 (adaptado).**



## 2.4. NORMAS DE COLETA E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Conforme a classificação do resíduo determinada pelas Normas, as empresas geradoras podem identificar o potencial de risco dos resíduos gerados e analisar as melhores alternativas para destinação final, com ou sem a reciclagem.

### 2.4.1. Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT

Com base na natureza do resíduo e em resultados de ensaios de lixiviação (NBR 10.005) e solubilização (NBR 10.006) a norma classifica os resíduos quanto ao seu potencial de riscos ao meio ambiente e à saúde pública. Os resíduos são classificados em duas classes: Classe I – Perigosos que por suas propriedades químicas, físicas ou infectocontagiosas apresentam periculosidade e Classe II – Não perigosos, que subdividem em:

- a) **Classe II A – Inertes:** são os resíduos que, quando amostrados segundo a NBR 10.007 e submetidos a um contato estático ou dinâmico, com água destilada ou deionizada em temperatura ambiente e conforme NBR 10.006 não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor;
- b) **Classe II B - Não Inertes:** os resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos Classe I - Perigosos ou da Classe II A - Inertes. Os resíduos Classe II B podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

A amostragem dos resíduos é normatizada pela NBR 10.007, que especifica a coleta, preservação, estocagem e as condições a serem observadas antes e durante a coleta para que a amostra seja representativa. A norma define um plano de amostragem que deve incluir os pontos de amostragem, tipos de amostradores, número de amostras a coletar, seus volumes, número e tipo de frascos de coleta, métodos de preservação e tempo de estocagem.

#### **2.4.2. Normatização da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)**

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) desenvolveu critérios para a reutilização do RAVF na produção de concreto asfáltico, artefatos de cimento e de concreto, aprovado na Decisão de Diretoria N°152/2007/C/E de 08 de agosto de 2007.

As propostas para a reutilização do RAVF gerado atualmente ou extraído de áreas de aterro inadequadas, serão avaliadas considerando os seguintes critérios:

- a) ser classificado como classe II-A ou II-B, de acordo com a norma NBR 10.004/2004;
- b) apresentar concentrações de poluentes no extrato lixiviado, obtido conforme a norma NBR 10005/2004, menores ou iguais às concentrações estabelecidas pela CETESB;
- c) apresentar concentrações de poluentes no extrato lixiviado neutro; menores ou iguais às concentrações máximas permitidas;
- d) apresentar pH na faixa entre 5,0 e 10,0;

Para ser viável a reutilização da areia de fundição na fabricação de artefatos de cimento não deve apresentar toxicidade frente ao teste de toxicidade aguda com a bactéria luminescente *Vibrio fischeri*. O teste precisa ser realizado de acordo com a norma técnica CETESB L5.227, em dose única máxima de 81,9%, com 5 réplicas com os resultados expressos em porcentagem de inibição (média e desvio padrão) após 15 minutos de exposição. As amostras que apresentam a média da porcentagem de inibição superior a 20% são consideradas como tóxicas.

#### **2.4.3. Normas SW-846 (Solid Waste)**

As normas SW-846 foram criadas pela “United States Environmental Protection Agency” (US-EPA) e representam um conjunto com mais de duzentas determinações para avaliação de resíduos sólidos industriais, como: resíduos sólidos urbanos, águas superficiais, salinas e subterrâneas e solos (MARTINS, 2006).

As normas SW-846 podem ser acessadas em manual eletrônico, dividido em dois volumes e treze capítulos. O volume I está direcionado às atividades de laboratório, contendo

métodos analíticos para determinação de espécies minerais, orgânicas, analitos diversos e propriedades, inclusive para caracterizar periculosidade de resíduo. O volume II apresenta as informações sobre amostragem, contendo inclusive os aspectos estatísticos, bem como, sobre o monitoramento de águas subterrâneas, tratamento de solo e processo de incineração.

#### **2.4.4. Ensaio de toxicidade**

Toxicidade é a propriedade inerente ao elemento ou substância que provoca lesão ou dano nos organismos. A realização das análises ecotoxicológicas tem como objetivo identificar qual a grandeza das substâncias químicas são nocivas, quando isoladas ou misturadas, para conhecer os condicionantes e locais de seus efeitos (KNIE *et al*, 2004).

Os testes de toxicidade (bioensaios) para avaliar os efeitos causados às espécies consistem na exposição dos organismos aquáticos, representativos do ambiente, em várias concentrações de uma ou mais substâncias ou fatores ambientais durante um determinado tempo de exposição.

Na Toxicidade Aguda a substância causa dano ou morte em curto espaço de tempo após contato com os organismos acompanhados. O efeito agudo é um estímulo do agente tóxico, suficientemente capaz de induzir uma resposta em organismos vivos, após um curto período de exposição a esse mesmo agente. O estímulo se manifesta em um intervalo de 0 a 96 horas. Normalmente o efeito é letal, representado por uma interrupção no desenvolvimento do organismo.

Uma avaliação completa exige que os testes sejam realizados com três organismos, sendo estes: produtores primários, consumidores primários e os consumidores secundários. Por exemplo: as bactérias e algas (produtores primários), microcrustáceos (consumidores primários) e peixes (consumidores secundários).

Conforme RODRIGUES (2005) as normas como CETESB, ABNT, EPA, DIN e ISO possuem determinados métodos padronizados para avaliar a toxicidade.

A União Européia possui o mais avançado conjunto de testes de lixiviação, que visa a proteção ambiental no caso de resíduos industriais em materiais de construção, incluindo misturas asfálticas (LEACHING-NET).

Os testes desenvolvidos avaliam a taxa de lixiviação de espécies químicas, a quantidade total lixiviada em um dado tempo, a influência do pH e do estado de agregação, bem como, o tipo de uso do material de construção.

## **2.5. PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA**

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, para resistir aos impactos do tráfego de veículos e do clima e propiciar aos usuários as condições adequadas de rolamento com conforto, economia e segurança.

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos, formados por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço de subleito.

O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego, impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento.

### **2.5.1. Ligantes asfálticos**

O asfalto é um dos mais antigos materiais utilizados pelo homem. Escavações arqueológicas realizadas comprovaram a sua utilização em épocas anteriores à nossa Era. Na Mesopotâmia era usado como aglutinante em trabalhos de alvenaria e construção de estradas. Os reservatórios de água e as salas de banhos eram impermeabilizados com asfalto. Citações bíblicas revelam sua aplicação como impermeabilizante na Arca de Noé. Os egípcios utilizaram o asfalto em trabalho de mumificação. A história registra que o asfalto tende a se perpetuar ao longo dos séculos (IBP, 1999).

Segundo LEITE (1999), o asfalto é considerado como o resíduo formado no processo de destilação a vácuo do petróleo, utilizado como ligante dos agregados minerais na formação do pavimento asfáltico. No Brasil este ligante é conhecido como cimento asfáltico de petróleo (CAP), nos Estados Unidos, como “asphalt cement” e na Europa, como “bitumen”.

### **2.5.2. Composição química**

O CAP é produzido para apresentar qualidade e consistência próprias para o uso na construção e manutenção de pavimentos asfálticos. Pois, além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes possui características de flexibilidade e durabilidade.

O CAP é constituído de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais como vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes.

Uma análise elementar dos asfaltos pode apresentar as seguintes proporções de componentes: carbono de 82 a 88%; hidrogênio de 8 a 11%; enxofre de 0 a 6%; oxigênio de 0 a 1,5% e nitrogênio de 0 a 1% (SHELL, 2003).

De acordo com JADA *et al* (2002) o CAP é um sistema coloidal constituído por duas fases distintas: os maltenos, mais leves e em maior proporção e os asfaltenos (Figura 11). Esses últimos apresentam um número significativo de anéis aromáticos, cadeias alifáticas e cicloalifáticas, além de grupos polares contendo enxofre, nitrogênio e oxigênio (MURGICH *et al*, 1996).

A fração de asfaltenos é solúvel em tolueno e insolúvel em n-pentano. A fração de maltenos é solúvel em pentano (GONZÁLES *et al*, 1987). Esta diferença de solubilidade é usada para se separar as frações.

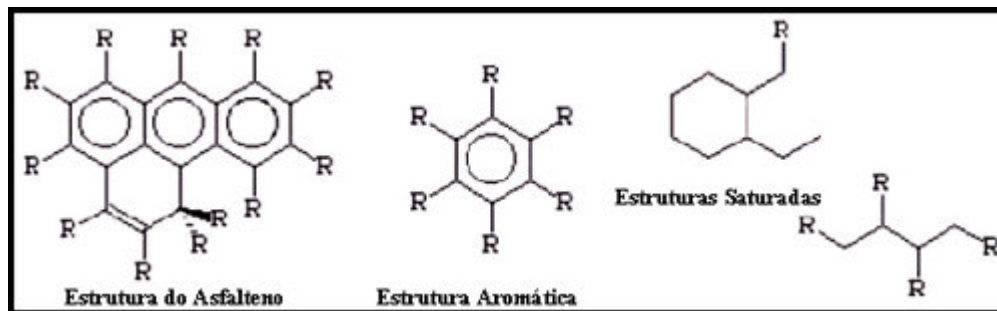


Figura 11. Estruturas químicas típicas do asfálteno, onde “R” representa as cadeias de carbonos alifáticos e aromáticos.

### 2.5.3. Propriedades físicas

Todas as propriedades físicas do asfalto estão associadas à sua temperatura (BERNUCCI *et al*, 2007). Em temperaturas muito baixas as moléculas não têm condições de se moverem umas em relação às outras e a viscosidade fica muito elevada, uma condição térmica que faz o ligante se comportar quase como um sólido. Em contrapartida, quando a temperatura aumenta que permite a movimentação das moléculas, a viscosidade baixa. Já em temperaturas altas, o ligante se comporta como um líquido, sendo que essa transição é reversível.

Os ensaios físicos em cimentos asfálticos podem ser especificados entre os ensaios de penetração, viscosidade, ponto de amolecimento, ductilidade, durabilidade e suscetibilidade térmica.

## **2.6. AGREGADOS**

A ABNT por meio da NBR 9935/2005 define “agregado” como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas à produção de argamassa e concreto.

A quantidade de agregado mineral em misturas asfálticas de pavimentação é geralmente de 90 a 95% em peso e 70 a 85% em volume, esta parcela mineral é parcialmente responsável pela capacidade de suporte de cargas dos revestimentos, influenciando assim o desempenho dos pavimentos.

Na pavimentação asfáltica o agregado é usado normalmente na base e de modo eventual na sub-base (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

### **2.6.1. Classificação**

O desempenho de um agregado depende das propriedades geológicas da rocha de origem, sendo importantes as informações sobre o tipo de rocha, sua composição mineralógica, química e sua granulometria, assim como, o seu grau de interação, tendência à degradação, abrasão e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

A variedade de agregados possíveis de utilização em revestimentos asfálticos é muito grande. Contudo, cada utilização necessita de agregados com características específicas, o que inviabiliza muitas fontes potenciais.

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

Quanto a sua natureza, os agregados são utilizados tal como se encontram na natureza, com exceção as operações de britagem e lavagem, como por exemplo: cascalhos, saibros, areias. Podem ser classificados em artificiais, os resultantes de uma alteração física ou química de outros materiais, como a escória de alto forno ou argila expandida.

Os agregados são classificados quanto ao tamanho, para uso em misturas asfálticas, em graúdo, miúdo e material de enchimento ou “filler” (DNIT 031/2004 - ES):

- a) **Graúdo:** é o material com dimensões maiores do que 2,0 mm, ou seja, retido na peneira n° 10. São as britas, cascalhos, seixos entre outros;
- b) **Miúdo:** é o material com dimensões maiores que 0,075 mm e menores que 2,0 mm. É o material que é retido na peneira n° 200, mas que passa na de abertura 10. São as areias, o pó de pedra entre outros.
- c) **Material de enchimento “filler”:** é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075 mm, corresponde à peneira de n° 200 como, por exemplo, o cimento Portland.

A distribuição granulométrica dos agregados é uma das suas principais características, que influencia no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas, a distribuição granulométrica do agregado impacta em quase todas as propriedades importantes, tais como: rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade e resistência.

A distribuição granulométrica dos agregados é determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento. Na análise de uma amostra seca de agregado esta é fracionada por meio de uma série de peneiras, com as aberturas de malha progressivamente menores (Figura 13). De acordo com a massa total da amostra a distribuição é expressa como porcentagem em massa, em cada tamanho de malha de peneira.

### 2.6.2. Propriedades químicas dos agregados

As propriedades químicas de um agregado identificam a composição química e/ou determinam as transformações que um agregado pode estar sujeito devido à ação química.

De acordo com ROBERTS *et al* (1996) as propriedades químicas dos agregados têm pequeno efeito no desempenho, exceto quando elas afetam a adesividade entre o ligante asfáltico e o agregado e, a compatibilidade com aditivos de anti-descolamento que podem ser incorporados ao ligante asfáltico.

Alguns agregados parecem ter mais afinidade pela água do que pelo cimento asfáltico, e os ligantes asfálticos podem descolar ou não aderirem aos agregados após a exposição à água. Assim como, a natureza da carga elétrica da superfície dos agregados, quando em contato com água, apresenta uma grande influência na adesividade entre o agregado e o cimento asfáltico.

A maioria dos agregados silicosos tais como arenito, quartzo e cascalho se tornam negativamente carregados na presença de água, enquanto materiais calcários desenvolvem carga positiva com a presença de água.

Muitos agregados possuem carga positiva e negativa porque eles são compostos de minerais, como a sílica com carga negativa e o cálcio, magnésio, alumínio ou ferro com carga positiva. Os agregados típicos que conduzem cargas misturadas incluem basaltos e calcários silicosos. Dolomita é exemplo de caso extremo de agregado com polarização positiva e o quartzo de agregado com polarização negativa.

### **2.6.3. Propriedades mineralógicas**

A grande maioria dos agregados é composta por uma combinação de minerais. Dentre os minerais mais importantes se destacam os minerais de sílica (quartzo), os feldspatos (ortoclásio, plagioclásio), os minerais ferromagnesianos (muscovita, vermiculita), minerais carbonatados (calcita, dolomita) e argilo minerais (ilita, caulinita e montmorilonita).

Geralmente os agregados são compostos de muitos minerais, com composições variáveis. Segundo ROBERTS *et al* (1996) os efeitos mais importantes da mineralogia dos agregados, para o desempenho de misturas asfálticas são a adesividade da película de asfalto ao agregado e a resistência ao descolamento pela ação da água.

Em determinados tipos de minerais a ligação entre o cimento asfáltico e os agregados é melhor. O cimento asfáltico normalmente se liga melhor aos agregados carbonatados (calcário) do que aos agregados silicosos (cascalhos).

Apesar da ligação do cimento asfáltico não ser boa em relação a determinados tipos de agregados, esta pode ser melhorada por meio da adição de determinadas substâncias tais como: cal, pó calcário ou os agentes melhoradores de adesividade, também chamados “dopes”. Estes materiais, associados aos agregados, fazem com que a ligação do cimento asfáltico aumente, possibilitando a melhoria das misturas asfálticas.

### **2.6.4. Interação do CAP e agregado**

Há diversos referenciais científicos sobre a adesividade asfalto e agregado na literatura. Um dos mais completos é o estudo realizado pelo “Strategic Highway Research Project” A-341 (CURTIS *et al*, 1993) sendo suas principais conclusões:



- a) As interações entre o agregado e asfalto são fortemente influenciadas pela composição e química da superfície do agregado. Compostos asfálticos com grupos funcionais polares são altamente competitivos pelos sítios ativos (os que contêm metais ou espécies carregadas) na superfície do agregado.
- b) Alguns compostos polares aderem competitivamente à superfície do agregado, por serem altamente suscetíveis a água são rapidamente removidos da superfície do agregado. A cura da ligação asfalto-agregado pode melhorar a união entre um dado par asfalto-agregado, ainda que a interação seja muito específica. Uma sílica padrão adsorve os sítios polares do asfalto, mais do que os sítios apolares, mas por ser hidrofílica, adsorve moléculas de água causando o desprendimento do asfalto.
- c) A interação entre o CAP e agregados minerais, na formação da mistura asfáltica é um fenômeno complexo, pois o CAP é constituído por uma mistura de hidrocarbonetos, contendo alguns grupos polares além de compostos organometálicos contendo níquel, vanádio e ferro. Já o agregado apresenta uma superfície muito heterogênea, apresentando diferentes sítios de ligação e diferentes distribuições de cargas. Frequentemente, esses sítios carregados atraem e orientam os constituintes polares dos asfaltenos.

As características físicas do agregado como textura, porosidade, área superficial, bem como, a estrutura cristalina e química deve ser considerada, no que se refere a adesão do asfalto (VINHA, 1975).

O estudo desenvolvido por YEN (1994) demonstrou que os asfaltenos contribuem para o entendimento do processo de interação entre o asfalto e o agregado. Os compostos polares, sulfóxidos, ácidos carboxílicos, metais e os heteroátomos do asfalto atuam como bases de Lewis, ligando-se aos sítios deficientes de elétrons do mineral, que correspondem aos cátions dos minerais. A adesão asfalto-agregado é o resultado da atração polar entre ácidos e bases de Lewis (RIBEIRO, 2006, GOODRICH *et al*, 1985).

## **2.7. CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE – CAUQ**

Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) é um revestimento flexível, resultante da mistura a quente de agregado graúdo, miúdo, material de enchimento e CAP, de acordo com proporções definidas previamente em laboratório, para atender os requisitos granulométricos, de densidade, de vazios e de resistência, compatíveis com padrões.

Um concreto asfáltico se caracteriza por ser a operação de mistura precedida do aquecimento de seus componentes à temperaturas elevadas, entre 140 °C e 180 °C e sua distribuição e compactação na pista serem também precedidas do aquecimento da mistura em temperaturas entre 80 °C e 140 °C. Devido a ligação entre agregados, os CAUQs são capazes de resistir bem às ações mecânicas de desagregação produzidas pelos veículos (BONET, 2002).

### 2.7.1. Constituição da Mistura

Segundo ROBERTS *et al* (1996) uma compreensão básica da relação peso-volume de misturas asfálticas compactadas é importante tanto do ponto de vista de um projeto de mistura quanto do ponto de vista da construção em campo.

É importante compreender que projeto de mistura é um processo volumétrico, com o propósito de determinar o volume de cimento asfáltico e agregado requerido para produzir uma mistura com as propriedades projetadas (Figura 12).



Figura 12. Constituintes da mistura de CAUQ.

Mt= Massa total

Vt= Volume total

Mc= Massa do CAP-20

Vc= Volume do CAP-20

Mm= Massa agregado miúdo

VAM= Volume de vazios nos agregados minerais

Mg= Massa agregado graúdo

Vami= Volume agregado miúdo

Vag= Volume agregado graúdo

### 2.7.2. Parâmetros Importantes

#### a) Densidade aparente da mistura (d):

Tem como objetivos o cálculo da porcentagem de vazios do agregado mineral e controle de compactação durante a construção. É calculada com a equação:

$$d = \frac{M}{M - Ma} \text{ (Equação 01)}$$

Onde:

M = massa do corpo-de-prova

Ma = massa do corpo-de-prova imerso em água

**b) Densidade máxima teórica da mistura (DMT):**

É a densidade da mistura asfáltica suposta sem vazios e a relação entre a massa total da mistura (100%) e os volumes correspondentes ao cheios da mistura. É calculada por:

$$DMT = \frac{100\%}{\frac{\%b}{Db} + \frac{\%am}{Dam} + \frac{\%ag}{Dag}} \text{ (Equação 02)}$$

Sendo:

%a, %am, %ag → % com que cada componente que entra na mistura.

Db, Dam, Dag → Densidade (real ou aparente) de cada componente da mistura.

**c) Porcentagem de vazios na mistura (Vv):**

É a relação entre o volume de vazios ocupado pelo ar e o volume total da mistura. Misturas com elevada % Vv podem levar a ocorrência de oxidação excessiva do ligante asfáltico, reduzindo a vida útil do concreto asfáltico, além de proporcionar permeabilidade ao ar e água. Misturas com baixo % Vv provocam a ocorrência do fenômeno da exsudação. É calculada por:

$$Vv = \frac{D - d}{D} \times 100 \text{ (Equação 03)}$$

**d) Porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM):**

É o volume total de vazios dado pela soma dos vazios da mistura mais o volume ocupado pelo asfalto. Este parâmetro é de grande interesse. Caso a mistura asfáltica sofrer uma consolidação devido a ação do tráfego, sua plasticidade poderá ficar acrescida, pois a porcentagem de betume que preenche os vazios dos agregados pode tornar-se excessiva, devido à redução do volume de vazios (Figura 13). Este fenômeno poderá provocar deformações, deslocamentos e rupturas no revestimento.

O volume para as misturas asfálticas (VAM) é dado por:

$$VAM = V_v + V_b$$

$$VAM = \frac{D-d}{D} \times 100 + \frac{d \times \%b}{d_b} \text{ (Equação 04)}$$

A porcentagem VAM é normalmente fixada em função do diâmetro máximo do agregado da mistura.

#### e) Relação Betume Vazios (RBV):

A relação indica a porcentagem de vazios do agregado mineral preenchida pelo ligante asfáltico. É calculado por:

$$RBV = \frac{V_b}{VAM} \times 100\% \text{ ou } \%RBV = \frac{VAM - V_v}{VAM} \text{ (Equação 05)}$$

Se  $VAM = 100 \rightarrow$  todos os vazios da mistura estariam preenchidos com asfalto.

Se  $VAM = 0 \rightarrow$  mistura sem asfalto.

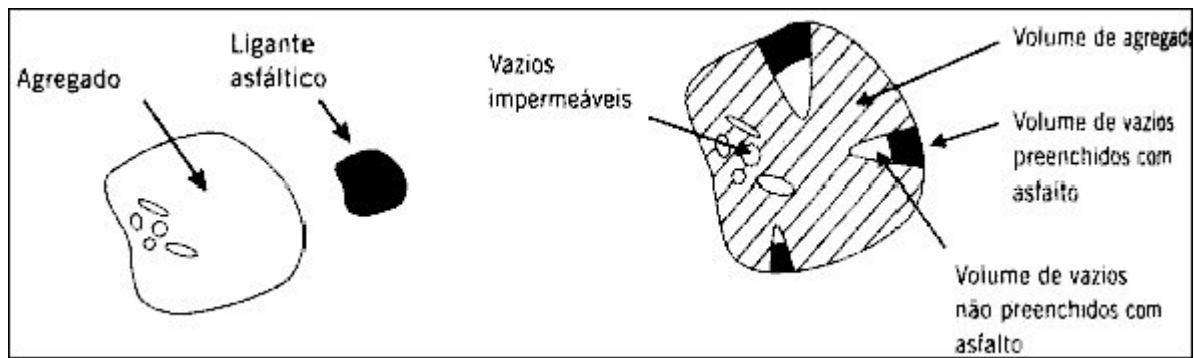


Figura 13. Volume para misturas asfálticas (BERNUCCI *et al*, 2007).

#### 2.7.3. Dosagem do CAUQ

Para a dosagem do concreto asfáltico devem ser realizadas as seguintes etapas:

- Escolha dos agregados, “filler” e ligante asfáltico;
- Determinação das porcentagens com que os agregados (grosso e fino) e “filler” devem contribuir na mistura, de modo a atender as especificações com relação a granulometria;
- Determinação do teor ótimo de ligante. Esta operação pode ser feita por tentativas, com variações do teor de asfalto e comparando os resultados de ensaios de estabilidade para vários teores estudados;

- d) Comparação da mistura estudada com as exigências das especificações, com relação aos vazios de ar, vazios do agregado mineral, granulometria e estabilidade.

Não sendo satisfeitas as condições exigidas, se refaz a dosagem da mistura.

O Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes - DNIT recomenda o método Marshall para dosagem do concreto asfáltico. Este processo é utilizado tanto para projeto de misturas como para controle de campo.

#### **2.7.4. Método Marshall**

No ensaio Marshall os principais parâmetros são densidade, vazios, estabilidade e fluência, onde são moldados corpos-de-prova com teores crescentes de ligante entre 4 a 8%. As proporções de agregados e “filler” são definidas previamente por meio de estudo específico.

Os corpos-de-prova têm a forma cilíndrica e são compactados por meio de soquete que age sobre a mistura, em um cilindro padronizado. Após a confecção dos corpos de prova podem ser calculados os seguintes parâmetros: Densidade Real e Aparente (D,d), porcentagem de vazios (%vv), porcentagem dos vazios do agregado mineral (%VAM) e relação betume vazios (RBV). Feitos os cálculos iniciais, os corpos-de-prova são aquecidos até atingirem 60°C e submetidos aos ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall.

A estabilidade, como sendo a grandeza que mede a resistência da massa asfáltica à aplicação de carga, determina a carga máxima que a massa asfáltica pode suportar.

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

A fluência é a medida do quanto a massa asfáltica pode sofrer uma deformação sob ação cisalhante, sem que haja o seu rompimento, ou seja, é a medida da elasticidade da massa. Se, uma massa asfáltica deformar muito, acarretará esmagamento da mistura e em consequência, ondulação à pista.

É inconveniente também que a massa asfáltica deforme pouco, pois ao sofrer ação de elevado carregamento, sem capacidade de mover-se, pode trincar (MARQUES, 2007).

### 2.7.5. Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração é aplicado sobre corpos-de-prova de concreto asfáltico, através de solicitação estática.

Segundo o DNER/ME 138/94 do Departamento Nacional de Estrada e Rodagem os corpos-de-prova destinados ao ensaio podem ser obtidos diretamente do campo, por extração por meio de sonda rotativa ou os fabricados em laboratório, de forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm a 6,50 cm e diâmetro de  $10 \pm 0,2$  cm.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada através da equação:

$$RT = \frac{2P}{\pi D} = \frac{P}{\pi R} \text{ (Equação 06)}$$

Onde:

RT = tensão de tração uniforme;

P = força aplicada;

R = raio do cilindro;

D = diâmetro do cilindro.

A norma DNIT 031/2004-ES especifica o valor de RT mínimo de 0,6 MPa para concretos asfálticos. Valores típicos de RT para misturas asfálticas moldadas em laboratório ou da pista situam-se na média entre 0,5 MPa e 2,0 MPa.

## 2.8. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Resiliência é definida como a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações (BERNUCCI *et al*, 2007). O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é padronizado pela norma DNER-ME 133/94.

O ensaio de MR em misturas asfálticas é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico regular. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação de carga. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura (T). Os corpos-de-prova cilíndricos são de aproximadamente 100 mm

de diâmetro e 63,5 mm de altura no caso de corpos-de-prova moldados no compactador Marshall, ou de 100 mm de diâmetro e altura entre 35 mm e 65 mm, extraídos de pista ou amostras de maiores dimensões.

O módulo de resiliência é obtido pela equação:

$$MR = \frac{P}{\Delta \times H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (\text{Equação 07})$$

Onde:

MR= Módulo de Resiliência, MPa;

P= carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova, N;

$\Delta$ = deslocamento elástico ou resiliente registrado para 300, 400 e 500 aplicações da carga P, mm;

H= altura do corpo-de-prova, mm;

$\mu$ = coeficiente de Poisson

Nas misturas asfálticas o coeficiente de Poisson pode variar entre 0,35 para baixas temperaturas e 0,50 para altas temperaturas. No Brasil é comum se assumir o valor de 0,30.

Como ilustração, valores médios de módulos de resiliência de diferentes misturas asfálticas estudadas no País são apresentados na Tabela 2. Outro parâmetro que consta na tabela é a resistência à tração, os valores são dados em MPa e a 25°C. Na última coluna apresenta a razão entre esses parâmetros agregando informações de rigidez e resistência, sendo mais desejável um valor pequeno da razão, que com frequência se busca atingir para obter a baixa rigidez, que evita a elevada absorção de tensões, que pode provocar o trincamento prematuro do revestimento e a alta resistência à tração, uma vez que em geral, a maior resistência na ruptura é também associada a maior resistência à fadiga.

Cabe destacar que os módulos de resiliência das misturas asfálticas variam ao longo do tempo, devido ao envelhecimento do ligante asfáltico, o que causa um enrijecimento do ligante e conseqüente aumento de rigidez nos revestimentos.

**Tabela 2. Módulos de resiliência e resistência de misturas estudadas no Brasil (BERNUCCI *et al*, 2007).**

<b>Revestimento</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>MR/RT</b>
<b>Extraído da pista</b>			
CAUQ 1	2.651	0,85	3.119
CAUQ 2	2.297	0,67	3.428
<b>Moldado em laboratório</b>			
CAUQ 1	3.609	1.26	2.864
CAUQ 2	3.026	1.23	2.460



## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são descritas as técnicas experimentais empregadas na caracterização das matérias-primas da AVF, do RAVF e dos corpos-de-prova de CAUQ. Também é descrita a execução do trecho experimental.

#### **3.1. COLETA DAS AMOSTRAS**

As matérias-primas do AVF: areia lavada, bentonita natural e ativada e pó de carvão foram coletadas no Laboratório de Areias da Fundação em estudo, seguindo os procedimentos descritos na NBR 10.007.

A coleta do RAVF foi realizada na Unidade de Fundação de Blocos da Linha EII, seguindo os procedimentos de amostragem de resíduos sólidos, conforme NBR 10.007. Após a coleta dos materiais, estes foram armazenados em baldes plásticos com vedação.

##### **3.1.1. Caracterização dos materiais**

Nesta seção serão descritos como as amostras foram preparadas e como foi feita a caracterização dos materiais empregados no estudo. A Tabela 3 mostra o local da realização das análises deste estudo.

**Tabela 3. Local da realização das análises da pesquisa.**

<b>Análises</b>	<b>Local</b>
Composição elementar por Fluorescência de Raios-X	LAMIR
Composição Mineralógica por Difração de Raios-X	UFPR / UDESC
Separação das Matérias-primas Constituintes da AVF e RAVF	UDESC
Determinação do Consumo de Ácido de Bentonitas, AVF e RAVF	ACQUAPLANT
Ensaio de Lixiviação (NBR 10.005)	TASQA / KZ
Ensaio de Solubilização (NBR 10.006)	TASQA / KZ
Ensaio do Lixiviado e Lixiviado Neutro (CETESB N°152/2007)	ACQUAPLANT
Ensaio de Toxicidade ( <i>Daphnia magna</i> )	UMWELT
Ensaio de Toxicidade ( <i>Vibrio fischeri</i> )	ACQUAPLANT
Análise da Água de Abastecimento Público	ACQUAPLANT
Análise do Sal Obtido da Água de Abastecimento Público (MEV e DRX)	UDESC
Análise Térmica	UDESC
Espectros de Infravermelho	UFPR
Análise Microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	UDESC / UFPR
Caracterização do CAP-20	IPIRANGA ASFALTOS
Análise de Infravermelho do CAP-20	UFPR
Análise Elementar do CAP 20	UDESC
Projeto das Misturas Asfálticas	IPIRANGA / IME / IPR
Análise Granulométrica	IPIRANGA / IME / IPR
Preparo dos corpos-de-prova	IPIRANGA / IME / IPR
Ensaio Marshall	IPIRANGA / IME / IPR
Adição de Cal em CAUQ	IPIRANGA
Ensaio de Resistência à Tração	IME / IPR
Ensaio de Módulo de Resiliência	IME / IPR
Ensaio de Envelhecimento	UNICAMP
Levantamento Deflectométrico	IME / IPR
Análises Ambientais da Água Percolada do Trecho	KZ LABORATÓRIO

### 3.1.2. Composição Elementar por Fluorescência de Raios-X

Este método foi escolhido por ser uma técnica que permite determinar quantitativamente a maioria dos elementos da tabela periódica para amostras sólidas. A análise de fluorescência foi realizada em equipamento da PHILIPS, modelo PW 2400 do LAMIR-UFPR.

Os resultados foram interpretados com o software Semi-Q da PHILIPS com resultados normalizados para 100%. Esta normalização considera o resultado de uma análise de perda ao fogo, realizada em separado, onde a amostra é aquecida a 1000°C por um período de três horas. Foram analisadas amostras de RAVF, sendo que uma amostra não foi moída.

As amostras de RAVF foram coletadas em meses diferenciados no ano de 2004 (maio, agosto e dezembro), porém são do mesmo ponto de geração, ou seja, da Linha EII da Fundação de Blocos (Tabela 4).

As coletas foram realizadas seguindo sempre o mesmo procedimento (pás de plástico, balde de armazenamento). O procedimento de preparo da pastilha e a rotina de detecção foi igual para as três amostras.

**Tabela 4. Coleta de RAVF da Linha EII.**

<b>Amostras</b>	<b>Horário</b>	<b>Data</b>
<b>RAVF 1</b>	9:30	07/05/04
<b>RAVF 2</b>	13:30	09/08/04
<b>RAVF 3</b>	15:30	08/12/04

### 3.1.3 Composição mineralógica por difração de Raios-X

A difração de Raios-X de pó foi realizada no difratômetro PHILIPS, modelo XRD-6000 (radiação Cu  $\alpha$ , varredura de  $2\theta/\theta$ , 40KV e 30mA).

Os difratogramas coletados foram analisados com o software do JCPDS (JCPDS-ICDD, 2001) e por comparação com os difratogramas "teóricos" obtidos do site mincryst. A atribuição das fases levou em consideração a possibilidade físico-química de sua formação.

### 3.1.4. Separação das matérias-primas constituintes da AVF e RAVF

O objetivo da separação das matérias-primas constituintes da AVF e do RAVF é obter os difratogramas de raios-X das amostras moídas de AVF e RAVF para comparar com os difratogramas dos materiais obtidos pelo processo de separação por centrifugação, confirmando assim, as fases presentes na AVF e RAVF.

A metodologia aplicada para a separação por centrifugação foi realizada da seguinte maneira:

- 1°. Pesagem de 50g de RAVF e colocados em bécker;
- 2°. Adição de 200 mL de água, em cada amostra;
- 3°. As amostras foram colocadas no ultrassom por dois minutos;
- 4°. Foi despejada metade da água em outro recipiente, denominado de RAVF fino. Ao retirar as amostras do ultrassom a água foi removida;
- 5°. O recipiente inicial ficou descansando por uma hora;
- 6°. Em seguida foi retirado o restante da água em outro recipiente, denominado RAVF médio;
- 7°. As amostras foram colocadas na estufa por 24 horas;
- 8°. As amostras foram retiradas da estufa e moídas para obtenção do difratograma.

### 3.1.5. Determinação do consumo de ácido de bentonitas, AVF e RAVF

Para definir a origem da reação básica do AVF e RAVF foi determinado o consumo de ácidos das bentonitas, AVF e RAVF, conforme descrito abaixo:

#### a) Reagentes e Equipamentos

Béquer de 250 mL

Agitador magnético com barra de agitação

pHmetro com eletrodo calibrado

Ácido nítrico 0,1 mol/L (padronizado)

Água destilada, de-mineralizada ou mili-Q

Titulador automático (opcional)

#### b) Procedimentos

Colocar a amostra no béquer, adicionando cerca de 100 mL de água destilada (desmineralizada ou mili-Q). Colocar a barra de agitação por cerca de uma hora medindo o pH com o eletrodo.

Registrar o pH inicial (natural) da amostra.

Adicionar o ácido nítrico, em porções de 0,1 mL. Deixar agitando até o pH ficar constante e registrar o pH. Adicionar tantas porções quantas forem necessárias para se atingir um pH menor que sete.

Fazer um gráfico do pH versus o volume (mL) de ácido adicionado e calcular o número de mol de ácido usado para se neutralizar a basicidade dos 10 g.

### **3.2. ANÁLISES DE INTERESSE AMBIENTAL E TOXICOLÓGICA**

Para determinar se o uso do RAVF como agregado em asfalto poderia causar contaminação ambiental foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização (Tabela 6), aplicada aos resíduos 100% sólidos no laboratório TASQA, em Paulínia-SP, de acordo com as ABNT e os procedimentos da CETESB.

A análise da toxicidade do RAVF foi por meio dos microrganismos *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri*.

#### **3.2.1. Ensaio de Lixiviação (NBR 10.005)**

Uma amostra do resíduo seco é peneirada em malha de 9,5 mm, sendo 100g do material passante transferidos para um frasco de lixiviação, contendo 2.000 mL de solução de extração com agitação de  $(30 \pm 2)$  rpm durante  $(18 \pm 2)$ h à temperatura de 25°C. O filtrado obtido é denominado de extrato lixiviado. No extrato lixiviado são analisados diversos parâmetros selecionados por procedimentos específicos de acordo com a Tabela 5.

#### **3.2.2. Ensaio de Solubilização (NBR 10.006)**

Uma amostra do resíduo seco é peneirada em malha de 9,5 mm e 250g do material passante são transferidos para um frasco contendo 2500 mL de água deionizada. O frasco foi coberto e deixado em repouso por sete dias, em temperatura até 25°C. O filtrado obtido é denominado de extrato solubilizado. No extrato solubilizado são analisados diversos parâmetros selecionados por procedimentos específicos conforme Tabela 5.

**Tabela 5. Técnicas analíticas utilizadas nos ensaios de lixiviação e solubilização.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Lixiviação</b>	<b>Solubilização</b>
Alumínio		SM 3120B
Arsênio	SM 3120B	SM 3120B
Bário	SM 3120B	SM 3120B
Cádmio	SM 3120B	SM 3120B
Chumbo	SM 3120B	SM 3120B
Cianeto		SM 4500 CN - F
Cloreto		SM 4500 Cl -D
Cobre		SM 3111B
Cromo Total	SM 3120B	SM 3120B
Fenóis Totais		SM 5530C
Ferro		SM 3111B
Fluoreto	SM 4500F-C	SM 4500F-C
Manganês		SM 3111B
Mercúrio	EPA 7470 A	EPA 7470 A
Nitrato		SM 4500 F
Prata	SM 3120B	SM 3120B
Selênio	SM 3120B	SM 3120B
Sódio		SM 3111B
Sulfato		SM 4500E
Zinco		SM 3111B

### **3.2.3. Ensaio de Toxicidade (*Daphnia magna*)**

Os ensaios ecotoxicológicos para a determinação da toxicidade aguda de amostras líquidas foram realizados pela Assessoria Ambiental UMWELT Ltda, localizada em Blumenau - SC. Os ensaios foram baseados na Norma ABNT NBR 12.713, que faz uso dos organismos-teste (bioindicador): o microcrustáceo *Daphnia magna*. O ensaio consiste na exposição do bioindicador à amostra em diluições sucessivas, sob condições experimentais estritamente controladas, e na avaliação do efeito tóxico da mesma, que se manifesta por meio da inibição da capacidade natatória do microcrustáceo.

A amostra sólida foi triturada e submetida à eluição com água sem interferir no pH do sistema. Este tipo de preparo de amostra verifica a presença de substâncias tóxicas com potencial migratório em solos (água de chuva). Para fins de comparação, o procedimento de eluição da amostra foi repetido com a acidificação do eluato para 5-6, não apresentando alterações nos resultados.

### **3.2.4. Ensaio do Lixiviado e Lixiviado Neutro (CETESB N°152/2007)**

#### **a) Procedimento do Lixiviado**

Segundo a CETESB (Decisão de Diretoria N°152/2007) para que o RAVF possa ser utilizado em CAUQ devem ser realizadas as análises químicas do extrato lixiviado, obtido em pelo menos três amostras de resíduo, para os parâmetros de Arsênio, Bário, Cádmiio, Cromo Total, Chumbo, Mercúrio e Selênio, utilizando a metodologia apresentada na norma NBR 10.005/2004.

O RAVF deve apresentar concentrações de parâmetros no extrato lixiviado, obtido conforme a norma NBR 10.005/2004, menores ou iguais às concentrações estabelecidas pela CETESB.

#### **b) Procedimento do Lixiviado Neutro**

Deve ser utilizado o especificado no item 5.4.1 do "Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos", da norma da ABNT, NBR 10.005/2004. Omitir a etapa descrita em 5.4.1.6 de determinação da solução extratora da NBR 10.005/2004 e utilizar, em 5.4.1.7, água deionizada como solução de extração.

Efetuar medição de pH conforme especificado em 5.4.1.10 da NBR 10.005/2004.

Apresentar os resultados conforme item 6 da NBR 10.005/2004, incluindo observação de que foi utilizada metodologia da NBR 10.005/2004, modificada para obtenção de lixiviado neutro. Nessa modificação, a solução ácida de extração foi substituída por água deionizada.

### c) Ensaio de Toxicidade (*Vibrio fischeri*)

Para a realização do ensaio de toxicidade por meio do micrororganismo *Vibrio fischeri*, conforme estabelecido no documento: Procedimentos para Gerenciamento de Areia de Fundição da CETESB (Decisão de Diretoria N°152/2007) é necessária a execução do ensaio de solubilização da areia de fundição conforme segue:

- 1°. Homogeneizar bem a amostra;
- 2°. Retirar uma alíquota de aproximadamente 100g da amostra, transferir para um frasco de material atóxico com capacidade de 500mL e adicionar 400mL de água altamente purificada ou destilada, ou quantidades que mantenham a proporção entre amostra e água de 1:4;
- 3°. Tampar o frasco e vedar a tampa, certificando-se que não haja vazamento.
- 4°. Agitar manualmente para desfazer possíveis “torrões”;
- 5°. Promover a agitação do frasco por  $22 \pm 2$  horas, utilizando um agitador de “tombo”, a uma velocidade aproximada de 30 RPM.
- 6°. Após a agitação, deixar os frascos em repouso, a temperatura ambiente, durante aproximadamente 1h, para separação das fases;
- 7°. Retirar uma alíquota do sobrenadante e centrifugar, em um frasco atóxico, preferencialmente de vidro borossilicato, a uma velocidade de 5000g durante 10 minutos;
- 8°. Filtrar o centrifugado em membrana de microfibras de vidro, de porosidade 0,8  $\mu\text{m}$  (AP20), em seguida em membrana de acetato de celulose de porosidade 0,45  $\mu\text{m}$ , para reter partículas finas em suspensão;
- 9°. Realizar o teste de toxicidade aguda com *Vibrio fischeri*.

Todos os materiais utilizados no procedimento de análise de laboratório devem estar livres de substâncias tóxicas, que possam afetar os resultados, tendo reação com organismos ou influenciando nas combinações químicas.

Para o bioensaio são necessárias bactérias *Vibrio fischeri* liofilizadas ou congeladas a temperatura de no máximo  $-18^{\circ}\text{C}$ . Para a reativação da luminescência é necessária uma solução tampão de biomassa que deve ser mantida sob refrigeração convencional.



Para a medição da luminescência emitida pelas bactérias é necessário o luminímetro específico para o bioensaio e o termobloco, um equipamento de incubação a 15°C para manutenção da temperatura.

As amostras devem ser testadas o quanto antes possível após a coleta. Se necessário, as amostras podem ser conservadas em temperaturas de 4°C a 8°C em recipientes escuros, não mais que 48 horas. Para períodos maiores devem ser conservadas com -20°C sem a utilização de preservantes.

Antes do início do teste o pH ( $7 \pm 2$ ) e a salinidade (não excedendo os limites de osmolaridade de 20 – 50 g/l) devem ser ajustados conforme necessidade. O ajuste da salinidade faz-se necessário sendo *Vibrio fischeri* uma bactéria marinha.

A bioluminescência produzida pela bactéria marinha *Vibrio fischeri* é a base para o bioensaio de toxicidade. Após um período determinado de tempo a diferença entre a luminescência inicial e final é o indicador de toxicidade utilizado. A toxicidade é avaliada medindo até que ponto a substância causa inibição sobre a emissão de luz pelas bactérias.

A medição é realizada com equipamentos específicos e métodos padronizados. O bioensaio pode ser utilizado para avaliar a toxicidade de água contaminada, sedimentos de solo, água pluvial, entre outros.

Para excussão do ensaio, uma série de diluições devem ser preparadas, conforme método desejado. Para a amostra de controle precisa ser utilizada a solução de cloreto de sódio 2% (NaCl). Os tubos que serão utilizados no ensaio devem ser mantidos a temperatura de 15°C no equipamento de incubação.

Adicionar 12mL de solução de Cloreto de Sódio 2% em um frasco de vidro apropriado, com tampa, e colocá-lo em um dos locais do equipamento de incubação específico para o diâmetro do vidro e aguardar 15 minutos para o equilíbrio térmico da solução.

Retirar o frasco contendo as bactérias liofilizadas do freezer, removendo o lacre para evitar o aquecimento excessivo do produto por contato com as mãos. Retirar a tampa de borracha e adicionar 1mL de solução tampão de reativação refrigerada.

Homogeneizar o conteúdo da ampola, agitando-o levemente com movimentos rotatórios. Colocar o vidro no equipamento de incubação e aguardar de 5 a 10 minutos.

Pipetar 0,1mL da suspensão bacteriana à solução de NaCl 2% (já termicamente equilibrada). Tampar o frasco e invertê-lo 3 vezes com movimentos suaves para homogeneizar seu conteúdo.

Retornar o frasco ao equipamento de incubação e aguardar o equilíbrio térmico e estabilização da solução durante 15 minutos. O conteúdo deste frasco é suficiente para realização de um ensaio.

Repetir o procedimento para realização de ensaios subseqüentes utilizando o restante da suspensão bacteriana reativada na ampola.

Para a execução do ensaio propriamente dito nas cubetas marcadas A1 a A9 deve-se colocar 2 mL de água de diluição (solução salina 2%) em A1 2mL da amostra em A2 1,5 mL de salina 2% em A3 até A8, em A9 adicionar 1mL da solução salina 2%, em A10 1,5 mL da amostra, para a realização da série de diluição, neste exemplo com fator de diluição 1. Deve-se colocar 2mL de amostra na cubeta A9, 1,5 mL na cubeta A8 no equipamento de incubação (termobloco).

A partir da solução A8 realizar as diluições mexendo cada diluição com a micropipeta, sugando-a e expelindo-a rápida e cuidadosamente 2 a 3 vezes. Transferir 1,5 mL da cubeta A8 para a cubeta A6 da A6 para A4, também transferir 1,5 mL da cubeta A9 para A7 e para a cubeta A1 é a controle da menor diluição da amostra 20% da solução bacteriana e 80% da amostra a ser ensaiada, A3 é o controle do restante das diluições A4 até A10. Este método é denominado G1, série de diluições: 1,2,3,4,6,8,12 e 16.

Para a execução do ensaio propriamente dito nas cubetas marcadas A1 a A9, deve-se colocar 1,5 mL de água de diluição (solução salina 2%) para a realização da série de diluição, neste exemplo com fator de diluição 2. Deve-se colocar 1,5 de amostra nas cubetas presentes no equipamento de incubação (termobloco) na posição A9 e A10. A partir da solução A9 realizar as diluições mexendo cada diluição com a micropipeta, para sugar e expelir de forma rápida e cuidadosa por 2 a 3 vezes. Transferir 1,5 mL da cubeta A9 para a cubeta A8, mexendo e transferindo para as outras cubetas sucessivamente até a cubeta A2. A cubeta A1 é o controle do método denominado G2, série de diluições geométricas: 2,4,8,16,32,64,128,256 e 512.

Da suspensão de bactérias previamente preparada deve-se transferir com micropipeta 0,5 mL de suspensão para cada cubeta do compartimento B1 sendo imprescindível anotar o horário. Após 30 segundos, o mesmo volume deve ser transferido para a cubeta C1, e assim sucessivamente respeitando intervalo de tempo.

Decorridos 15 a 20 minutos da pipetagem em B1 é medido a luminescência inicial em cada cubeta, na mesma seqüência e no mesmo intervalo de tempo anterior. Imediatamente após a medição devem ser adicionados na respectiva cubeta 0,5mL da solução controle ou da amostra conforme decorrer do processo.

O ensaio fica encubado por 30 minutos contados a partir da medição da luminescência inicial de B1. Ao término desse período é determinada a luminescência final nas cubetas seguindo o mesmo esquema de tempo.

O intervalo entre a colocação das bactérias e as medições da luminescência devem ser rigorosamente de 30 segundos.

Os valores de luminescência devem ser anotados para posterior avaliação ou programados no luminímetro para geração dos resultados.

### **3.2.5. Análise da água de abastecimento público**

A água utilizada na preparação da AVF é de origem do abastecimento público da Cidade de Joinville proveniente da Companhia Águas de Joinville. A água utilizada na Linha EII foi coletada e enviada ao Laboratório Acquaplant localizado em Joinville para determinar a quantidade de sódio e sulfato.

Foi feito um estudo com o RAVF, de uma outra Fundação da região de Joinville que utiliza água de poço no preparo da AVF.

O objetivo é analisar a influência da água de abastecimento público nos parâmetros de solubilização sódio e sulfato do RAVF da Tupy. Foi coletada a água utilizada na Linha EII e evaporou-se em estufa até obter a quantidade suficiente para a realização das análises de DRX e MEV.

### **3.2.6. Análise térmica**

Dados simultâneos de TG e DTA foram obtidos em um analisador térmico Netzsch STA 449C.

As amostras secas de: bentonita natural e ativada, pó de carvão, AVF e RAVF pesando entre 20 e 35 mg foram colocadas em um cadinho de alumina e aquecida, sob atmosfera de ar sintético, em fluxo de  $70 \text{ mL min}^{-1}$ , da temperatura ambiente até  $800^\circ\text{C}$  em uma taxa de  $10^\circ\text{C min}^{-1}$ . Experimentos similares foram realizados em atmosfera de nitrogênio.

### **3.2.7. Espectros de infravermelho**

Espectros FTIR de: bentonita natural e ativada, pó de carvão, areia de pavimentação, AVF e RAVF foram coletados em um equipamento FTIR BOMEM, modelo MB-100, em

pastilhas de KBr, entre 4000 e 400  $\text{cm}^{-1}$  com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e 32 varreduras. A amostra de CAP-20 foi aquecida e espalhada sobre uma janela de NaCl de modo a obter um filme fino.

### **3.2.8. Análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

O estudo de caracterização da morfologia do RAVF e da microestrutura do corpo-de-prova com RAVF e do RAVF com CAP foi realizado utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura, em microscópio marca Philips, modelo SEM-505.

O corte dos corpos-de-prova foi realizado com serra de diamante, com resfriamento de água em quantidade tal, como nas máquinas usadas em marmoraria para corte de pedras, em velocidade baixa para que o corpo de prova não se aqueça. Os cortes dos corpos de prova foram feitos em máquina de serra para obter a forma desejada. Pois, o concreto asfáltico deve ser usado na temperatura ambiente, pois nesta temperatura que seu comportamento viscoelástico deve ser analisado.

Após o corte, os corpos de prova foram armazenados em ambiente livre de umidade e preparados para a análise da microestrutura. As amostras foram secas em estufa, coladas no porta-amostra com fita adesiva dupla face de carbono condutor, submetidas a alto vácuo por 15 minutos e depois metalizadas com ouro em atmosfera de  $10^{-1}$  torr de argônio por 6 segundos.

Foram realizados estudos para verificar a interface entre o RAVF e o ligante asfáltico, mediante a análise da interface da areia convencional e o ligante e da areia lavada com o CAP-20 da Ipiranga Asfaltos.

Cada material granular foi homogeneizado, quarteado e retirado a amostra para o estudo da interface. Após o quarteamento os materiais foram secos em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$ , homogeneizados e pesados 0,95g, sendo posteriormente misturados e acondicionados em frascos de vidro, devidamente identificados.

O CAP-20 estava acondicionado em recipiente de alumínio com etiqueta de identificação, com aproximadamente dois quilogramas, sendo pesado 0,050g de CAP-20.

Os materiais granulares e o CAP-20 foram colocados em frascos de vidro e posteriormente em estufa, com temperatura monitorada para garantir a temperatura específica de mistura.

Foram preparados três corpos de prova: o primeiro contendo RAVF; segundo a areia usada em concreto asfáltico e terceiro a areia lavada, isenta de argila para efeito de comparação.

Em seguida, os corpos de prova foram resfriados em temperatura ambiente em aproximadamente 30 minutos e posteriormente preparados para análise da interface no Centro de Microscopia Eletrônica de Varredura da UFPR.

O estudo de caracterização da interface do material obtido foi realizado com a técnica de microscopia eletrônica de varredura por elétrons retroespalhados (BES).

### **3.3. CARACTERIZAÇÃO DO CAP-20**

No presente estudo, o cimento asfáltico de petróleo (CAP-20) foi fornecido pela distribuidora Ipiranga asfaltos e é produzido na Refinaria Planalto – REPLAN.

Os métodos de caracterização do ligante asfáltico são apresentados a seguir.

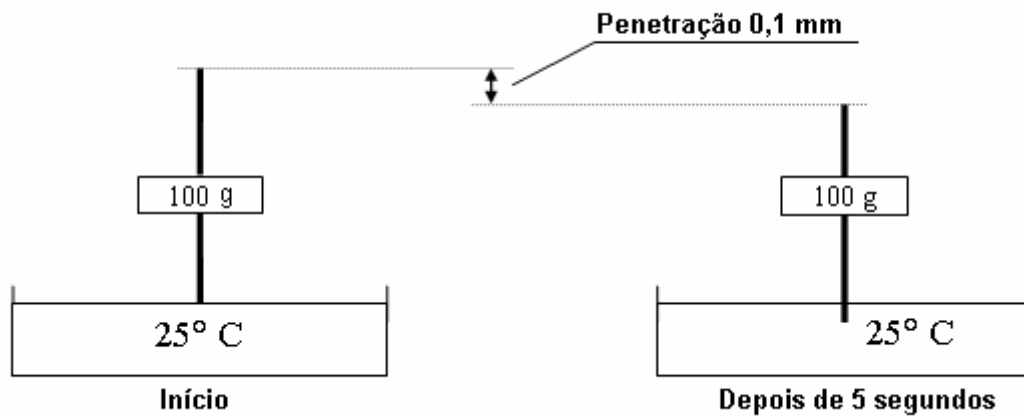
#### **3.3.1. Cromatografia de camada delgada**

A precipitação dos asfaltenos com n-heptano é seguida por separação dos constituintes solúveis em capilares recheados com sílica ou alumina, como meio de adsorção. Após a adição com solventes de diferentes polaridades efetua-se por ionização de chama, a detecção de saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos.

#### **3.3.2. Ensaio de penetração**

A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico por 5 segundos, a temperatura de 25°C. A consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha (Figura 14).

A norma brasileira para este ensaio é a ABNT NBR 6576/98.



**Figura 14. Esquema básico das leituras inicial e final de penetração da agulha (MARQUES, 2007).**

### **3.3.3. Ensaio de ponto de amolecimento**

Uma bola de aço de dimensões e peso especificados é colocada no centro de uma amostra de asfalto, confinada dentro de um anel metálico padronizado. Todo o conjunto é colocado dentro de um banho de água num bécquer. O banho é aquecido a uma taxa controlada de 5 °C/min. Quando o asfalto amolece o suficiente para não mais suportar o peso da bola, a bola e o asfalto deslocam-se em direção ao fundo do bécquer. A temperatura é marcada no instante em que a mistura amolecida toca a placa do fundo do conjunto padrão de ensaio. O teste é conduzido com duas amostras do mesmo material. Se a diferença de temperatura entre as duas amostras exceder 2 °C, o ensaio deve ser refeito. Este ensaio é referenciado pela ABNT NBR 6560/200.

### **3.3.4. Ensaio de durabilidade**

Os asfaltos sofrem envelhecimento (endurecimento) de curto prazo, quando misturados com agregados minerais em usina, devido a seu aquecimento. O envelhecimento de longo prazo do ligante ocorre durante a vida útil do pavimento que estará submetido a diversos fatores ambientais. Os ensaios de envelhecimento acelerado chamados de “efeito do calor e do ar” são usados para tentar simular o envelhecimento do ligante na usinagem.

O ensaio de efeito do calor e do ar (ECA) como é conhecido no Brasil (ABNT NBR 14736/2001) corresponde ao ensaio de película delgada da ASTM D 1754. Consiste em submeter amostras do ligante, colocadas em película de pequena espessura dentro de um

recipiente padronizado, a um certo tempo de solitação de temperatura elevada a jatos de ar, por exposição dentro de uma estufa especial.

A estufa de película fina provoca o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação, permitindo avaliar a presença de frações de óleos mais leves. A oxidação ocorre durante o aquecimento a 163 °C durante 5 horas. Esse ensaio procura simular o efeito do envelhecimento do ligante, durante a usinagem e compactação da mistura. Mede-se o efeito do envelhecimento acelerado nas modificações das características de penetração, ductilidade ou viscosidade do ligante envelhecido em relação ao ligante original.

Há muitos mecanismos envolvidos no envelhecimento dos ligantes asfálticos, porém dos mais relevantes se destacam: a perda de componentes voláteis (saturados e aromáticos) e a reação química do asfalto com o oxigênio do ar. É importante ter um parâmetro que avalie o potencial de envelhecimento de cada ligante nas várias fases de utilização: estocagem, usinagem, transporte, compactação e vida de serviço.

### **3.3.5. Ensaio de ductilidade**

A coesão dos asfaltos é avaliada indiretamente pela medida empírica da ductilidade, que representa a capacidade do material de se alongar na forma de um filamento. Nesse ensaio, os corpos-de-prova de ligantes colocados em moldes especiais e separados ao meio na seção diminuída do molde, sendo imersos em água dentro de um banho que compõe o equipamento.

A ductilidade é dada pelo alongamento em centímetros obtido antes da ruptura de uma amostra de CAP, na seção diminuída do molde com largura inicial de 10 mm, em banho de água a 25°C submetida pelos dois extremos a velocidade de deformação de 5cm/min (ABNT 6293/2001).

### **3.3.6. Índice de susceptibilidade térmica**

A suscetibilidade térmica indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos diante da variação de temperatura. É uma propriedade importante dos ligantes asfálticos, pois se forem muito suscetíveis as variações de estado ou de propriedades frente à variação de temperatura, não são adequadas para o uso em pavimentação.

É aceitável que o ligante asfáltico apresente variações pequenas de propriedades mecânicas nas temperaturas de serviço dos revestimentos, para evitar grandes alterações de comportamento frente as variações de temperatura ambiente.

Normalmente, o índice é determinado a partir do ponto de amolecimento (PA) do CAP e de sua penetração a 25 °, incluindo-se a hipótese que a penetração do CAP no seu ponto de amolecimento seja de 800 (0,1 mm).

Os pontos correspondentes ao logaritmo da penetração pela respectiva temperatura do ensaio, sendo que as penetrações são determinadas em duas temperaturas diferentes, são grafados, fornecendo uma reta como resultado.

### **3.3.7. Ensaio de viscosidade**

O viscosímetro mais usado é o Saybolt-Furol. Este ensaio é padronizado pela ABNT NBR 14756/2001. Trata-se de uma medida empírica da viscosidade obtida por meio de um aparelho mais robusto para uso em campo.

O aparelho consta, basicamente, de um tubo com formato e dimensões padronizadas, no fundo do qual fica um orifício de diâmetro  $3,15 \pm 0,02$  mm. O tubo cheio do material é colocado num recipiente com óleo (banho) com orifício fechado. Quando o material estabiliza na temperatura exigida (135 °C para CAP) é aberto o orifício, quando se inicia a contagem do tempo. Desliga-se o cronômetro quando o líquido alcança no frasco inferior a marca de 60mL. O valor da viscosidade é reportado em segundos Saybolt-Furol, abreviando como SSF, a uma dada temperatura.

Além do uso na especificação, a medida da viscosidade do ligante asfáltico tem grande importância na determinação da consistência adequada, que deve apresentar quando da mistura com os agregados para proporcionar uma perfeita cobertura dos mesmos e quando de sua aplicação em campo.

O viscosímetro Brookfield permite medir as propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e estocagem. Permite ainda obter gráfico de temperatura-viscosidade para projeto de mistura asfáltica, por meio de medida de comportamento do fluido com diferentes taxas de cisalhamento e tensões, obtidas por rotação de cilindros coaxiais que ficam mergulhados na amostra em teste (ABNT NBR 15184). É uma medida da viscosidade dinâmica expressa em centipoise (cP).



### 3.3.8. Projeto das misturas asfálticas

O projeto de misturas asfálticas é uma questão de escolha e proporcionamento de materiais, a fim de obter a qualidade e propriedades desejadas. Na elaboração do projeto das misturas asfálticas é necessário seguir as análises apresentadas na seqüência do texto.

#### a) Análise Granulométrica

Este ensaio permite observar a distribuição dos agregados minerais, em uma série de peneiras com aberturas pré-estabelecidas pelo DNIT, permitindo a classificação dos agregados e a definição sobre a quantidade de agregados que será utilizada na confecção das peças asfálticas.

O método foi baseado na metodologia descrita na norma DNER – ME 083/98. Segundo estabelece 2.500g de agregado graúdo para serem classificados granulometricamente a seco, por meio da separação das frações numa série de dez peneiras, variando de 2 a 0,074mm.

A torre de peneiras foi agitada mecanicamente por 10 minutos. Após esse tempo, o material retido em cada peneira foi pesado para calcular a distribuição granulométrica do agregado graúdo. A mesma análise foi repetida para os agregados miúdos e RAVF, porém, a quantidade de material utilizada foi de 1 kg.

Os agregados utilizados no estudo de laboratório foram doados pela Rudnick Minérios, da região de Joinville, - SC, de origem Gnaisse já empregados na pavimentação, os quais estavam devidamente ensacados, que foram armazenados em temperatura ambiente (Figura 15).

#### b) Preparo dos corpos-de-prova

Com base na análise granulométrica do RAVF e dos agregados foram projetados quatro corpos-de-prova contendo 0, 5, 10 e 15 % de RAVF. A porcentagem ótima de asfalto foi obtida por meio da média aritmética dos três valores seguintes: a porcentagem de asfalto correspondente a máxima densidade; estabilidade e porcentagem média de vazios prevista para o tipo de mistura. A determinação numérica da porcentagem ótima de asfalto é descrita em seção específica.

Na confecção de cada corpo-de-prova os teores projetados de frações de agregado e asfalto foram aquecidos separadamente, sendo que o ligante até a temperatura de 135 °C e os

agregados em 145 °C. Depois misturados com a manutenção constante de temperatura da mistura. Em seguida a mistura foi colocada em molde cilíndrico (100 mm de diâmetro e 63 mm de altura) e compactada com soquete. Quando resfriada a temperatura ambiente o corpo-de-prova foi desenformado, ou seja, retirado do molde metálico.

Cada corpo-de-prova foi pesado ao ar e imerso em água, para a determinação da sua densidade específica aparente. Determinou-se a densidade, volume e massa específica real dos agregados e do asfalto, para calcular o teor de vazios em cada corpo-de-prova.



Figura 15. Materiais utilizados na elaboração do CAUQ preparado em laboratório.

### 3.3.9. Ensaio Marshall

Na realização do ensaio Marshall foram determinados os parâmetros descritos abaixo, sendo que as unidades utilizadas foram as que são utilizadas no procedimento de trabalho do Laboratório de Projetos da Ipiranga Asfaltos.

- a) **Densidade:** obtida por meio do peso pelo volume  $D = P/V$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (Equação 08);
- b) **Estabilidade:** é definida como a carga máxima de compressão que um corpo de prova pode suportar, quando ensaiado na prensa Marshall com temperatura de 60 °C e com o êmbolo de prensa com a velocidade de 5 cm/min (0,83 mm/s). É expressa em  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ , que produz a ruptura diametral do corpo de prova;

- c) **Fluência:** é a deformação diametral do corpo de prova, expressa em centésimos de polegadas, medida no momento da ruptura. Determinou-se a densidade, volume e massa específica real dos agregados e asfalto, para calcular os vazios para cada teor de asfalto. A porcentagem de asfalto ótimo foi obtida por meio da média aritmética das seguintes porcentagens de asfalto: porcentagem de asfalto correspondente à máxima densidade; porcentagem de asfalto correspondente a máxima estabilidade; porcentagem de asfalto correspondente à porcentagem média de vazios previstos para o tipo de mistura. O cimento asfáltico de petróleo (CAP) utilizado neste estudo foi proveniente da Refinaria de Paulínia – REPLAN pertencente a Ipiranga Asfaltos S.A. Cada corpo-de-prova foi colocado em banho-maria a 60°C, por 40 min. Em seguida foi imediatamente levado à prensa do aparelho Marshall para realizar a compressão diametral progressiva ao longo da superfície do corpo-de-prova até o seu rompimento. O valor da estabilidade Marshall é obtido pela carga máxima aplicada (em kgf/cm<sup>2</sup>) que provoca a ruptura diametral do corpo-de-prova, à temperatura de 60 °C e com êmbolo de prensa em movimento com velocidade de 5 cm/min (0,83 mm/s). A deformação diametral máxima sofrida pelo corpo-de-prova é expressa em centésimos de polegadas até o momento da ruptura, onde se obtém o valor da fluência.
- d) **Adição de cal em CAUQ:** Foram preparados corpos-de-prova Marshall contendo RAVF e adicionou-se as porcentagens de 1; 1,5 e 2% de cal. O mesmo procedimento foi realizado para corpos-de-prova Marshall com areia natural.

### 3.3.10. Ensaio de resistência à tração

A norma ABNT NBR 15087/2004 define os passos e equipamentos utilizados no ensaio de resistência à tração. A aparelhagem necessária para o ensaio consiste de:

- a) Prensa mecânica calibrada com sensibilidade inferior ou igual a 20N, com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s;
- b) Sistema capaz de manter, de forma controlada, a temperatura de ensaio em 25 °C em compartimento, câmara ou ambiente laboratorial que comporte a prensa mecânica e possa abrigar vários corpos-de-prova conjuntamente;
- c) Dispositivo de posicionamento e centralização de corpo-de-prova;

- d) Paquímetro e termômetro.

O corpo-de-prova destinado ao ensaio pode ser obtido diretamente do campo por extração por meio de sonda rotativa ou por fabricação em laboratório, de forma cilíndrica.

O procedimento é realizado da seguinte maneira:

- a) Medir a altura (H) do corpo-de-prova com o paquímetro, em quatro posições diametralmente opostas (adotar como altura a média aritmética das quatro leituras);
- b) Medir o diâmetro (D) do corpo-de-prova com o paquímetro em três posições paralelas (adotar como diâmetro o valor da média aritmética das três leituras);
- c) Manter o corpo-de-prova apoiado sobre uma geratriz em compartimento com temperatura controlada de 25°C por no mínimo, por 4 horas. Alternativamente podem ser consideradas outras temperaturas, dependendo dos requisitos do projeto;
- d) Posicionar o corpo-de-prova no dispositivo centralizador e levar à prensa;
- e) Ajustar os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão;
- f) Aplicar a carga progressivamente, com uma velocidade de deslocamento de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, segundo o plano diametral vertical;
- g) Com o valor da carga de ruptura (P) obtido, a RT é calculada.

### **3.3.11. Ensaio de módulo de resiliência**

Para obtenção das propriedades resilientes da mistura estudada, o corpo-de-prova é ensaiado com a aplicação diametral de cargas cíclicas e repetidas, com sistema de medição das deformações recuperáveis do corpo-de-prova. O ensaio é padronizado pela especificação DNER-ME.

A amostra para ensaio foi constituída de um corpo-de-prova cilíndrico com altura de 6,5 cm e diâmetro de  $\pm 0,2$  cm.

Os equipamentos para a realização do ensaio foram:

- a) Sistema pneumático ou hidráulico de carregamento, composto de: regulador de pressão para aplicação da carga vertical repetida; válvula de transmissão da carga vertical; cilindro de pressão e pistão de carga; dispositivo mecânico digital “timer”

para controle do tempo de abertura de válvulas e frequência de aplicação da carga vertical;

- b) Sistema de medição de deformação da amostra constituído de: dois transdutores mecânico-eletromagnético do tipo LVDT (“Linear variable differential transformer”); suporte para fixação dos LVDT na amostra; equipamento de aquisição de dados com características apropriadas para uso com os transdutores;
- c) Estrutura do suporte com acessórios;
- d) Sistemas de controle de temperatura, capaz de manter a temperatura controlada com variação máxima de 1 °C e no intervalo de 20°C – 40°C. O sistema inclui uma câmara de temperatura controlada com dimensões para conter os componentes descritos nos itens a, b, c.

O ensaio é executado da seguinte forma:

- a) Identificação do projeto;
- b) Posicionar o corpo-de-prova no interior do suporte para fixação dos transdutores;
- c) Colocar o corpo-de-prova na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos, com 12,7 mm de espessura e raio de  $10 \pm 0,2$  cm;
- d) Fixar e ajustar os transdutores de modo a se obter registro no equipamento de aquisição de dados;
- e) Observar o perfeito assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo-de-prova;
- f) Determinar a carga vertical repetida a ser aplicada diametralmente no corpo-de-prova, de modo a se obter uma tensão de aproximadamente 30% da resistência à tração determinada;
- g) Para a fase de condicionamento do corpo-de-prova, aplicar 200 vezes a carga vertical repetida diametralmente no corpo-de-prova, com frequência de aplicação da carga de 60 ciclos por minuto com duração de 0,10 segundos e o repouso de 0,9 segundos;
- h) Continuar a aplicação da carga e registrar a deformação resiliente para 300, 400 e 500 ciclos de aplicações;
- i) Repetir as fases descritas nos itens (b) a (h) com o corpo-de-prova posicionado de forma que a carga vertical repetida seja aplicada em plano ortogonal ao interior,

sendo que o módulo de resiliência será a média dos valores determinados nos dois planos ortogonais.

O procedimento para obtenção do módulo de resiliência consistiu na determinação de três valores do módulo durante a realização de três ciclos de ensaio para cada corpo-de-prova. Cada ciclo foi composto por uma quantidade determinada de golpes de condicionamento e 10 (dez) golpes para a determinação do módulo. Para o primeiro ciclo, utilizaram-se, quarenta golpes de condicionamento e dez golpes para os dois últimos ciclos.

### **3.3.12. Ensaio de envelhecimento**

O ensaio de envelhecimento é realizado em curto e longo prazo para simular, respectivamente, o envelhecimento da mistura na fase de pré-compactação (usina, transporte e lançamento) no processo de construção e o envelhecimento que ocorre ao longo da vida em serviço do pavimento. (7 a 10 anos)

Os corpos-de-prova são preparados de acordo com o Método Marshall, deixados em temperatura ambiente por um período de  $16 \pm 1$  hora e retirados do molde, após um período de duas a três horas do término da compactação.

O esfriamento dos corpos-de-prova pode ser feito durante 8 horas ou acelerado com uso de ventilador;

Para simular o envelhecimento em curto prazo, o corpo-de-prova é condicionado em uma estufa ( $135 \pm 3$  °C) com ventilação por um período de 4 horas  $\pm$  5 minutos. Após este período o corpo-de-prova pode ser removido da estufa, pois está pronto para ser submetido aos ensaios.

Neste estudo foi realizado o envelhecimento em longo prazo (AASHTO PP2-00), o qual foi realizado da seguinte maneira: o corpo-de-prova é colocado em estufa com ventilação ( $85 \pm 3$  °C) por um período de 120 horas  $\pm$  30 minutos. A estufa é então desligada e a porta é aberta para permitir o esfriamento do corpo-de-prova em temperatura ambiente, por um período de aproximadamente 16 horas. Durante este período o corpo-de-prova não deve ser tocado. Após este período o corpo-de-prova pode ser removido da estufa e ser submetido aos ensaios.

### 3.4. TRECHO EXPERIMENTAL

O extensivo programa de avaliação de laboratório realizado até então, utilizando as metodologias tradicionais de projeto e dosagem do CAUQ, indicaram resultados de viabilidade de utilização de RAVF nas misturas asfálticas.

Com a implantação de testes de campo, pode-se verificar e comparar os resultados obtidos em condições de laboratório com a resposta do pavimento sob condições de campo, sujeito à aplicação de cargas reais de tráfego e de variações climáticas.

Em 2006 foi realizada uma parceria com o Departamento Nacional de Infra-estrutura em Transportes – DNIT, Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e Instituto Militar de Engenharia – IME para a execução de um trecho experimental contendo RAVF (Figura 16). Na parceria foi incluída a Fundação Fagor com sede na cidade de Extrema -MG, que forneceu o RAVF gerado pela empresa, para fins de comparação de resultados.

Garantindo a premissa de equivalência das características estruturais das camadas inferiores do pavimento, com as mesmas condições e exigências das cargas de tráfego e de fatores climáticos, o objetivo em comparar o comportamento do pavimento ao longo de sua vida de serviço será válido.

O trecho experimental foi realizado na Estrada dos Tenentes, marginal da BR/381 Rodovia Fernão Dias, no município de Extrema do estado de Minas Gerais (Figura 17). A escolha do local foi em função da solicitação da Prefeitura Municipal de Extrema e de acordo com o DNIT.



**Figura 16. Ilustração do local onde foi construído o trecho experimental.**



**Figura 17. Localização da cidade de Extrema- MG.**

### 3.4.1. A execução do projeto

O trecho experimental foi implantado em consideração a execução de seis segmentos, sendo que serão apresentados neste capítulo os três segmentos equivalentes ao CAUQ (Tabela 6).



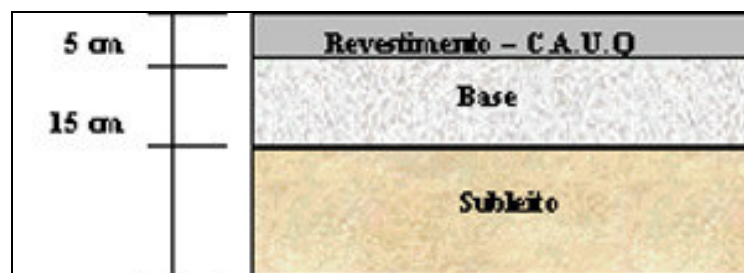
**Tabela 6. Demonstrativo dos segmentos para estudo do RAVF como agregado em pavimentação realizado em Extrema-MG.**

Mistura a Frio	CAUQ
Areia convencional	Areia convencional
RAVF Fagor	RAVF Fagor
RAVF Tupy	RAVF Tupy

Os três segmentos com o revestimento tipo pré-misturado a frio são com areia convencional, com o RAVF gerado da Fundação Fagor e da Fundação Tupy.

A extensão executada foi de 120 metros de comprimento, com largura de 6,50 m. O trecho experimental foi aberto ao tráfego comercial com volume médio de 44 veículos por dia, obtendo-se um número N de  $1,1 \times 10^6$  (eixo padrão de 8,2 ton.).

A estrutura é formada por 5 cm de espessura de revestimento em CAUQ 15 cm de base composta com material tipo bica corrida, fornecida pela Prefeitura Municipal de Extrema, assente sobre subleito heterogêneo, conforme Figura 18.



**Figura 18. Ilustração a seção realizada para o pavimento na pesquisa comparativa realizada em Extrema-MG.**

### 3.4.2. Controle tecnológico na execução

Com a finalidade de avaliar o comportamento mecânico do concreto asfáltico contendo RAVF foram realizadas as análises de caracterização dos materiais, que foram utilizados na execução do trecho experimental, bem como, os ensaios para verificar a resistência do mesmo.

O ligante asfáltico CAP-20 usado na pista experimental é proveniente da Refinaria Paulínia - REPLAN. Para a caracterização do ligante asfáltico foram realizadas as seguintes análises: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade Saybolt-Furol, índice de suscetibilidade térmica, ponto de fulgor e ductilidade.

### 3.4.2.1. Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados na elaboração do trecho experimental foram: Brita nº 01, Pedrisco, Pó de pedra, sendo a Brita nº 1 procedente da pedreira Basalto V e o Pedrisco e Pó de pedra da pedreira Basalto II de natureza mineralógica basáltica. Foi realizada a análise granulométrica dos agregados e do RAVF da Tupy e do RAVF da Fagor.

### 3.4.2.2. Dosagem da mistura

Foi utilizada a norma DNIT 031/2006 para a determinação das porcentagens máximas e mínimas dos agregados empregados na mistura, adotando a faixa “C”, destinada à camada de revestimento asfáltico, também denominada camada de rolamento. Para dosagem da mistura foi adotado o método Marshall.

Para a adição do RAVF em misturas asfálticas foram definidos critérios para estabelecer a quantidade ideal de resíduo a ser incorporado ao concreto asfáltico e/ou outras misturas, para então encontrar a granulometria adequada para a manutenção das características desejadas nas misturas asfálticas, como por exemplo, a porcentagem de vazios (%Vv) e relação betume vazios (%RBV).

Foram adicionados dois diferentes teores de RAVF nas misturas asfálticas, sendo que a Mistura TUPY com 10% e a Mistura FAGOR com 8%, comparando a um “traço base” denominado de Concreto Asfáltico Referência, cujas porcentagens dos materiais são as seguintes: 20% de brita 1; 35% de pedrisco; 35% de pó de pedrisco e 10% de RAVF.

Para o Concreto Asfáltico TUPY foram os seguintes porcentagens de materiais: 25% de brita 1; 30% de pedrisco; 35% de pó de pedrisco e 10% de RAVF. Para a mistura de Concreto Asfáltico FAGOR foram aplicados: 25% de brita nº 1; 30% de pedrisco; 37% de pó de pedrisco e 8% de RAVF.

Com o objetivo de comparar os resultados de controle tecnológico do trecho experimental foram confeccionados corpos-de-prova em laboratório destinados aos ensaios mecânicos de resistência à tração, módulo de resiliência, análises de lixiviação e solubilização.

Os corpos-de-prova do trecho experimental foram extraídos por meio de sonda rotativa, de forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm a 6,50 cm e diâmetro de  $10 \pm 0,2$  cm (Figura 19).

Os corpos-de-prova extraídos do trecho experimental foram enviados para o IME/IPR para a realização dos ensaios de dos módulos de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) (Figura 20).



**Figura 19. Sonda rotativa para extração dos corpos-de-prova do trecho experimental em Extrema-MG.**



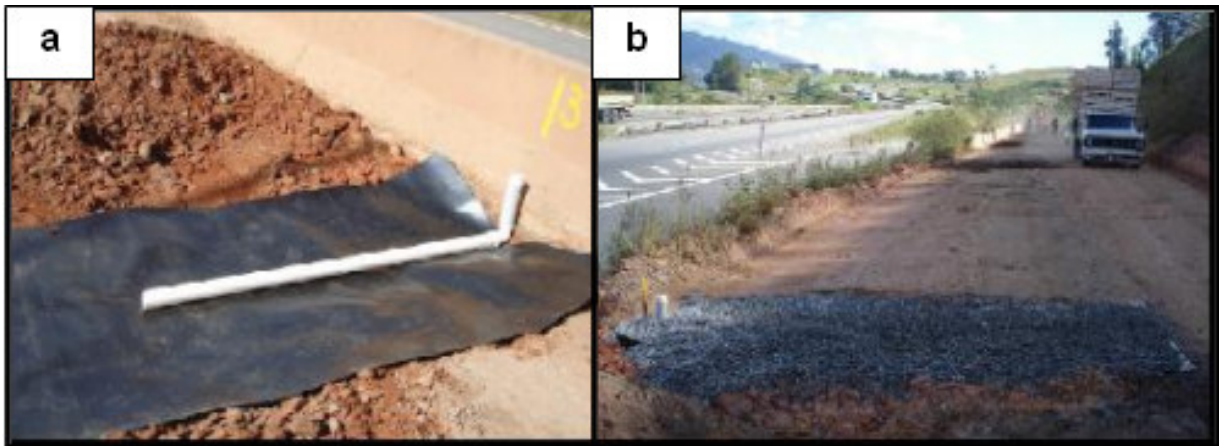
**Figura 20. Corpo-de-prova do trecho experimental em Extrema-MG.**

### 3.4.2.3. Coleta da água percolada do trecho e análises ambientais

Visando o monitoramento ambiental foram instalados sistemas de drenagem da água pluvial, que transpassa o pavimento para posterior coleta e verificação de uma possível contaminação do solo devido à presença dos diferentes tipos de RAVF (Tupy e Fagor).

Os tubos de coleta foram instalados no meio de cada trecho evitando desta forma a contaminação causada por materiais de trechos vizinhos, conforme ilustram as Figuras 21a.b. A água da chuva percolada no trecho experimental foi coletada através de seringas e transferidas para frascos plásticos com vedação.

Foram extraídos corpos-de-prova do trecho para realização de análises de lixiviação e solubilização, bem como da microestrutura do pavimento.



**Figura 21. Sistema de captação d'água aplicado na pista experimental em Extrema-MG.**

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos sobre a adição do RAVF em misturas asfálticas, os resultados da caracterização das matérias-primas constituintes da AVF, dos materiais constituintes do concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) e dosagem, bem como, as análises de interesse ambiental e o estudo de toxicidade. Para complementação serão demonstrados os resultados obtidos do trecho experimental constituído de revestimento asfáltico contendo 10% de RAVF, realizado em Extrema-MG.

#### **4.1. ANÁLISE ELEMENTAR POR FRX**

A análise elementar por fluorescência de Raios-X foi realizada para identificar os elementos químicos presentes na amostra.

##### **4.1.1. Análise elementar por FRX das matérias-primas constituintes da AVF**

Foi realizada a análise elementar para verificar a composição química das matérias-primas constituintes da AVF para possibilitar o comparativo com a composição do RAVF. A análise elementar por fluorescência de raios-X está fundamentada em dados teóricos de sensibilidade dos elementos, sendo ND = Não Detectado (<0,001%).

A Tabela 7 apresenta os resultados de FRX da areia nova, pó de carvão, das bentonitas utilizadas no processo de fundição e da AVF (não moída).

A amostra de areia lavada possui 97% de SiO<sub>2</sub> e teores menores de outros elementos. O pó de carvão possui perda ao fogo de 88% relativa à matéria orgânica, da fração fixa nota-se SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como os principais componentes. As bentonitas, além dos altos teores esperados de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e apresentam Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO, CaO, SO<sub>3</sub>. A AVF contém altos teores de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e também Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO, CaO, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O.

**Tabela 7. Análises elementares por FRX da areia nova, pó de carvão, bentonita natural, bentonita ativada e da AVF.**

<b>Expresso em %</b>	<b>Areia Lavada</b>	<b>Pó de Carvão</b>	<b>Bentonita Natural</b>	<b>Bentonita Ativada</b>	<b>AVF</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	ND	0,027	2,56	1,57	0,926
<b>MgO</b>	ND	0,072	2,74	2,43	1,212
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,85	2,030	17,56	13,46	10,575
<b>SiO<sub>2</sub></b>	97,73	6,322	59,59	61,24	77,406
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,31	0,006	ND	ND	0,081
<b>Ni</b>	ND	0,003	ND	0,01	ND
<b>SO<sub>3</sub></b>	ND	ND	1,74	0,15	1,109
<b>Sb</b>	0,17	ND	ND	ND	ND
<b>Cu</b>	ND	0,002	ND	0,01	ND
<b>Cl</b>	ND	ND	0,29	0,23	0,268
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,34	0,141	0,36	0,42	1,066
<b>CaO</b>	ND	0,273	0,92	1,13	0,741
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,01	0,145	0,52	0,79	0,713
<b>MnO</b>	ND	0,008	0,11	ND	0,053
<b>Cr</b>	ND	ND	ND	0,02	ND
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,15	0,482	5,42	8,61	2,781
<b>Zn</b>	ND	0,003	0,01	0,01	ND
<b>Sr</b>	ND	0,002	0,02	0,01	0,150
<b>I</b>	0,21	ND	ND	ND	ND
<b>Zr</b>	0,23	0,009	0,03	0,01	ND
<b>Rb</b>	ND	0,009	ND	ND	ND
<b>Y</b>	ND	ND	ND	0,01	ND
<b>Ge</b>	ND	0,002	ND	ND	ND
<b>Ba</b>	0,01	ND	ND	0,05	0,097
<b>P.F.</b>	1,435	88,74	8,13	9,79	2,820

#### **4.1.2. Análise elementar por FRX do RAVF – Estudo estatístico**

Para verificar a variação da composição química de diferentes amostras do RAVF foi realizado um estudo estatístico. As amostras de RAVF foram coletadas em meses diferentes: maio, agosto e dezembro no ano de 2004, sendo sua origem a Linha EII da Fundação de

Blocos. O processo de coleta das amostras foi padronizado, ou seja, o preparo da pastilha e a rotina de detecção foram exatamente os mesmos, para as três amostras de RAVF. Sendo que estas não foram moídas.

Na Tabela 8 pode-se verificar que os maiores desvios padrão, correspondentes a Si, Al e Fe estão entre 1,4 e 0,6, que reflete uma relativa constância na composição elementar. Os elementos com maior coeficiente de variação são P e Mn, provavelmente devido aos diferentes teores destes elementos nas matérias-primas (areia lavada, bentonitas ativada e natural, no pó de carvão).

As análises estatísticas mais robustas estão sendo planejadas no futuro para se tentar identificar a sensibilidade da composição elementar ao tipo de liga vazada sobre os moldes.

**Tabela 8. Análises elementares por FRX de amostras de RAVF da Linha EII.**

Expresso em %	RAVF 1	RAVF 2	RAVF 3	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
SiO <sub>2</sub>	77,41	77,71	75,62	76,91	1,13	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,58	9,93	7,97	9,49	1,36	0,14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,78	3,46	4,03	3,43	0,63	0,18
TiO <sub>2</sub>	0,71	0,91	0,76	0,80	0,10	0,13
CaO	0,74	0,74	1,40	0,96	0,38	0,40
MgO	1,21	1,21	0,49	0,97	0,41	0,43
K <sub>2</sub> O	1,07	0,99	1,13	1,06	0,07	0,06
MnO	0,05	ND	ND	0,02	0,031	1,73
Na <sub>2</sub> O	0,93	0,87	0,36	0,72	0,31	0,43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,10	1,44	0,54	0,78	1,44
SO <sub>3</sub>	1,11	1,04	2,39	1,51	0,76	0,50
Cl	0,27	0,16	0,65	0,36	0,26	0,72
Sr	0,15	0,18	0,15	0,16	0,02	0,12
Ba	0,10	0,13	0,11	0,11	0,01	0,13
Zr	ND	0,04	0,04	0,03	0,02	0,87
P.F.	2,82	2,52	3,45	2,93	0,47	0,16

A amostra de RAVF moída apresentou 94,12% de SiO<sub>2</sub> devido a camada que recobre o grão da areia, que é composta de bentonita e pó de carvão e ter sido desagregada durante o

processo de moagem do ensaio, conseqüentemente apresentou menor concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (3,17%).

#### 4.1.3. Análise Elementar por FRX dos Agregados Utilizados no CAUQ.

A Tabela 9 apresenta os resultados da varredura química dos agregados gerados pela Rudnick Minérios e utilizados nos revestimentos asfálticos, sendo que a análise foi realizada em amostras moídas.

**Tabela 9. Análises elementares por FRX de amostras de agregados da Rudnick utilizados nos revestimentos asfálticos.**

Expresso em %	Brita 1	Pedrisco	Pó de Brita	Areia
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2,73	2,64	2,80	0,71
<b>MgO</b>	3,95	4,93	5,12	0,24
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	12,03	12,97	12,92	8,58
<b>SiO<sub>2</sub></b>	61,96	58,26	60,18	83,55
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,34	0,39	0,36	0,07
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,30	0,16	0,20	0,29
<b>Cl</b>	0,08	0,12	0,08	ND
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,77	0,94	0,70	2,87
<b>CaO</b>	4,84	6,64	5,65	0,25
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,96	0,98	0,83	0,23
<b>Cr</b>	0,05	0,05	ND	0,04
<b>Ni</b>	0,02	0,02	0,02	ND
<b>MnO</b>	0,12	0,20	0,16	0,05
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10,39	10,77	9,86	1,57
<b>Cu</b>	0,01	ND	0,01	ND
<b>Rb</b>	ND	ND	ND	0,005
<b>Zn</b>	0,01	0,01	0,01	ND
<b>Sr</b>	0,04	0,03	0,04	0,01
<b>Zr</b>	0,03	0,02	40,03	0,01
<b>Y</b>	0,004	0,01	0,004	ND
<b>Ba</b>	ND	0,06	0,05	0,09
<b>P.F.</b>	1,38	0,80	1,00	1,43



Os agregados: Brita 1, Pedrisco e Pó de brita originam-se da mesma rocha e diferem em granulometria, sendo que as suas composições elementares, obtidas por varredura química com FRX, são muito semelhantes. Em todas as amostras os elementos presentes em maior concentração são, em ordem decrescente, O, Si, Al, Fe, Ca, Mg e Na.

A areia convencional apresenta maior concentração de SiO<sub>2</sub>, em comparação aos agregados graúdos, por ser formada basicamente por quartzo. Apresenta também em sua constituição feldspato e mica, justificando, por exemplo, a presença de K<sub>2</sub>O e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA POR DRX

A técnica de difração de Raios-X foi utilizada para identificar as fases minerais das amostras estudadas.

### 4.2.1. Caracterização mineralógica por DRX das bentonitas, pó de carvão, AVF e RAVF.

A Figura 22 tem os difratogramas de Raios-X do AVF, RAVF, bentonita natural e ativada. Pode-se verificar uma semelhança entre as composições mineralógicas do AVF e RAVF, uma vez que, se tratam de materiais com a mesma composição, apenas diferenciando que o RAVF passou pelo processo de fundição e o AVF foi preparado em laboratório, sem passar pelo processo de fundição.

No difratograma de ambos os materiais foram identificados apenas a presença de quartzo, sendo que as fases que compõem as bentonitas e o carvão não foram observadas.

No DRX das amostras de bentonitas foram identificadas as fases montmorilonita, beidellita e caulinita que são argilominerais (DUTRA *et al*, 2002). Além disso, foi verificada a presença de quartzo, possivelmente nos interstícios microestruturais do argilomineral. Segundo MURRAY (1980) a presença de quartzo nos argilominerais provoca a alta abrasão, devido a sua localização nos interstícios da microestrutura.

O DRX do pó de carvão apresentou picos de difração característicos de mulita e hematita, existe entre 10 e 30°, um desvio da linha base, que pode estar associado à presença de fase não cristalina.

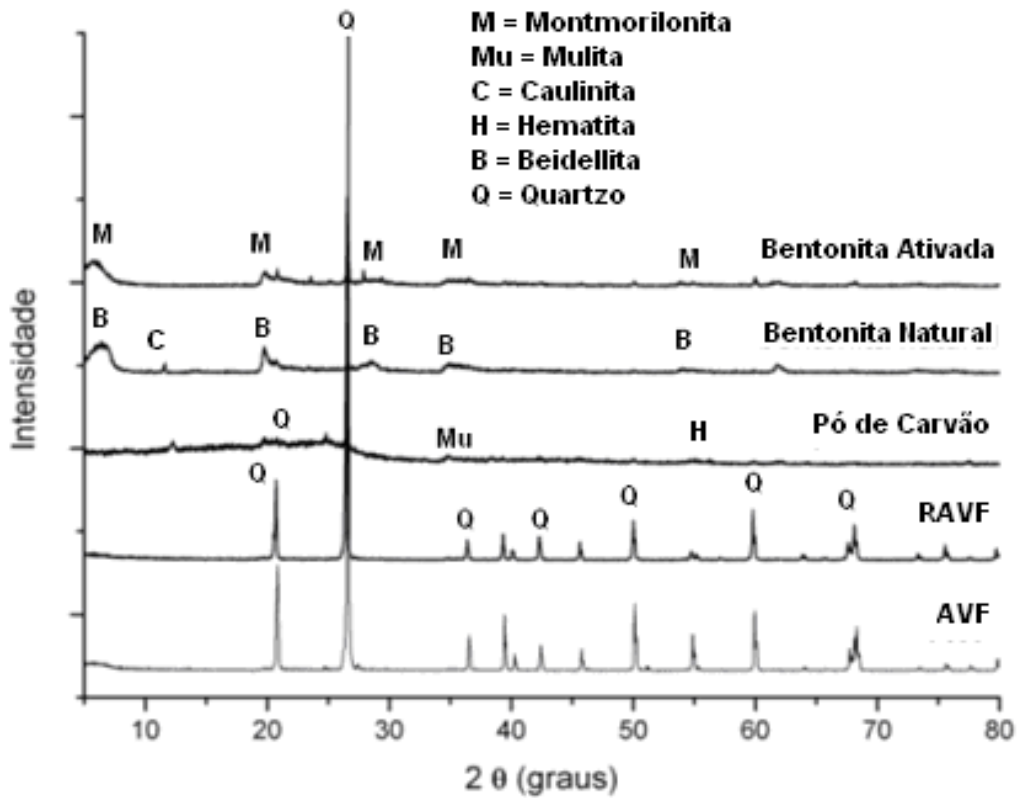


Figura 22. Difratoformas de Raios-X de pó realizados nas amostras de AVF, RAVF e bentonitas ativada e natural.

#### 4.2.2. Caracterização mineralógica por DRX dos componentes do RAVF fracionados

O DRX realizado na fração fina do RAVF confirmou as fases presentes nas matérias-primas constituintes da AVF, ou seja: o quartzo foi observado nas bentonitas e no pó de carvão, a mulita e a hematita foram encontradas no pó de carvão, a beidellita foi observada na bentonita natural e a montmorilonita na bentonita ativada. A Figura 23 expõe as fases encontradas na fração fina do RAVF.

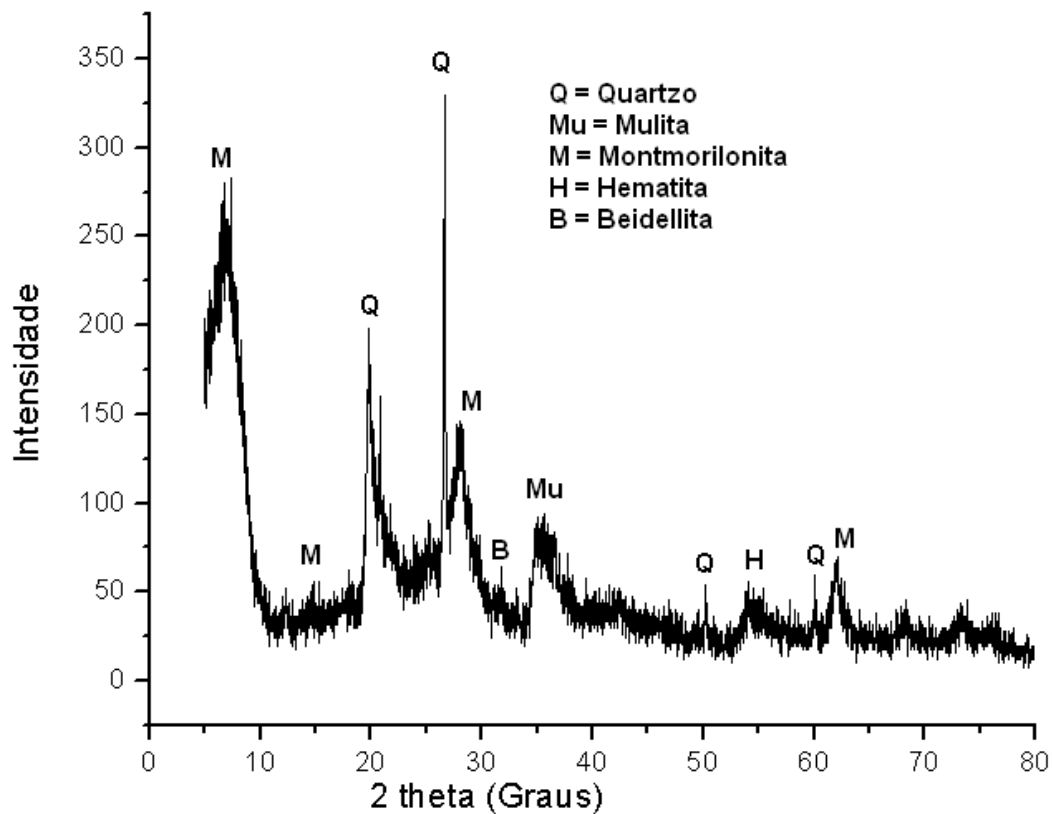


Figura 23. Difratograma de Raios-X de pó realizado na amostra na fração fina do RAVF.

### 4.3. ANÁLISE TÉRMICA

Nas Figuras 24 e 25 é possível visualizar as curvas TG/DTA da bentonita em atmosfera de ar e nitrogênio, respectivamente.

O evento 1 centrado em torno de 106 °C, com perda de massa de cerca de 11%, refere-se a eliminação da água adsorvida. O segundo evento, só perceptível no experimento em atmosfera de ar, com perda de massa de 1,23%, refere-se a perda de água, que está ligada aos cátions intercalados.

O evento, centrado em torno de 650°C, endotérmico, refere-se a desidroxilação da bentonita. O efeito endotérmico não fica explícito na curva DTA do experimento realizado em atmosfera de nitrogênio. A massa residual, em ambos experimentos, é de cerca de 84%.

As Figuras 26 e 27 apresentam as curvas TG/DTA do carvão em atmosfera de ar e nitrogênio, respectivamente. O evento endotérmico, ao redor de 96°C, refere-se à perda de

umidade da amostra. O carvão seco, em atmosfera de ar, apresenta um aumento de massa entre 200 e 320°C; este evento é interpretado como adsorção de oxigênio ao carvão, que não ocorre em atmosfera inerte (BENFELL *et al*, 1996).

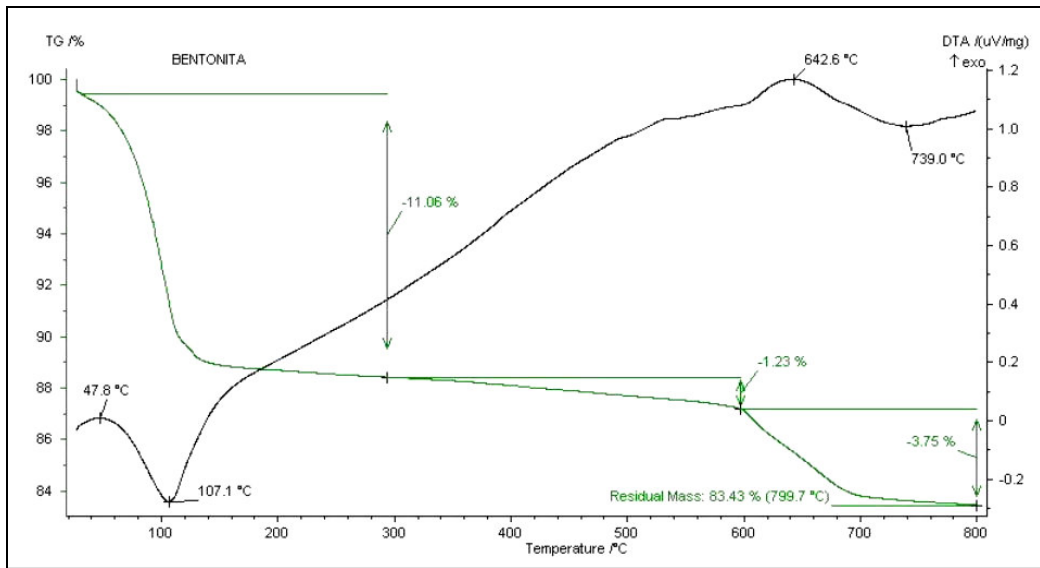
O evento exotérmico de perda de massa que ocorre a partir de 320°C, em atmosfera de ar, corresponde a queima do carvão e a liberação de voláteis. A massa residual obtida no experimento em ar é de cerca de 11 %. No experimento realizado em nitrogênio a pirólise não se completou até a temperatura final de 800 °C, mas estava em torno de 66 %. Assim sendo pode-se estimar que a diferença  $66 - 11 = 55$  % deve-se a materiais fixos combustíveis.

Nas Figuras 28 e 29 são visualizadas as curvas TG/DTA do AVF em atmosfera de ar e nitrogênio, respectivamente. O único registro de análise de TG em AVF encontrado na literatura CANNON *et al*, (2001) possui atribuições similares as apresentadas neste trabalho. Espera-se que os eventos que ocorrem no AVF sejam a superposição dos eventos que ocorrem na bentonita e no carvão.

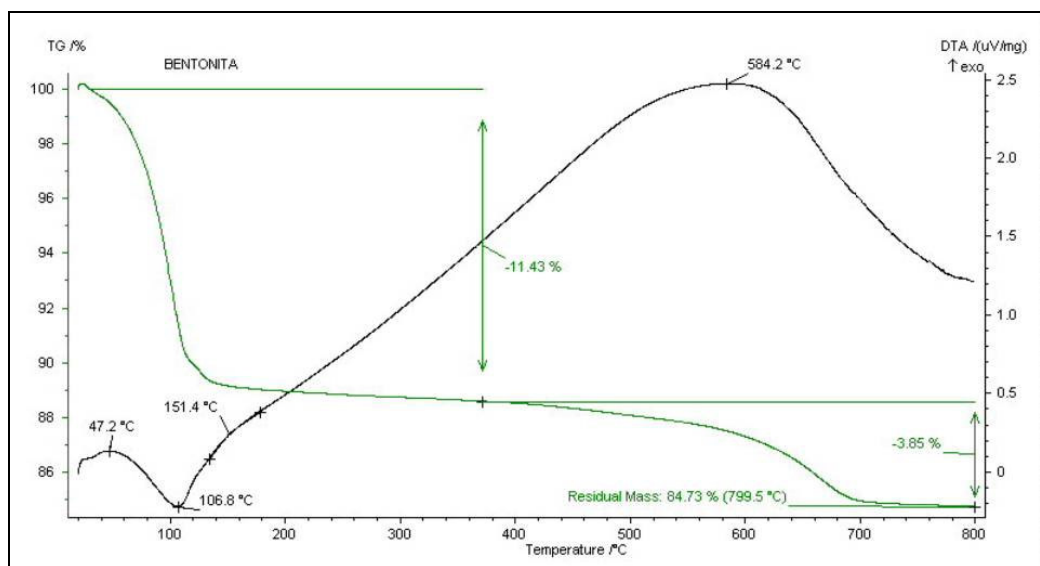
O evento de secagem da amostra está centrado em torno de 65°C e ficou entre 1,14 %. Em atmosfera de ar observa-se um evento exotérmico, centrado em 498,4 °C, atribuído a queima do carvão, seguida de um evento endotérmico, centrado em 579,2 °C, interpretado como sendo a desidroxilação da bentonita.

A massa residual que é constituída majoritariamente de areia é de cerca de 98,0% no experimento em nitrogênio e de 96,5% no experimento ao ar. Ao comparar com os experimentos realizados com a bentonita e com o carvão pode-se interpretar que a diferença  $98,0 - 96,5 = 1,5$ % deve-se ao material combustível e não pirolisável do carvão.

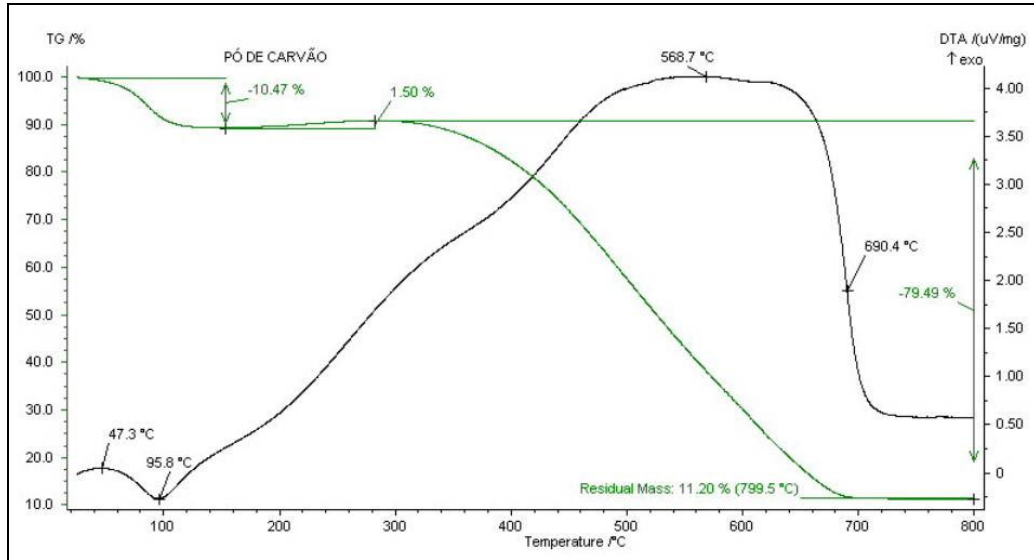
Nas Figuras 30 e 31 estão expostas as curvas TG/DTA do RAVF em atmosfera de ar e nitrogênio, respectivamente. A interpretação dos eventos é análoga dada para os eventos do AVF. No entanto, o pequeno evento de ganho de massa, exibido pelo AVF em atmosfera de ar próximo de 600°C, não é observado no RAVF. O teor de pó de carvão determinado por TG é maior no RAVF que no AVF, traço devido à reposição de pó de carvão novo sobre a areia que já circulou no processo e que tem pó de carvão já alterado pelas altas temperaturas do processo, mas que ainda tem matéria orgânica combustível.



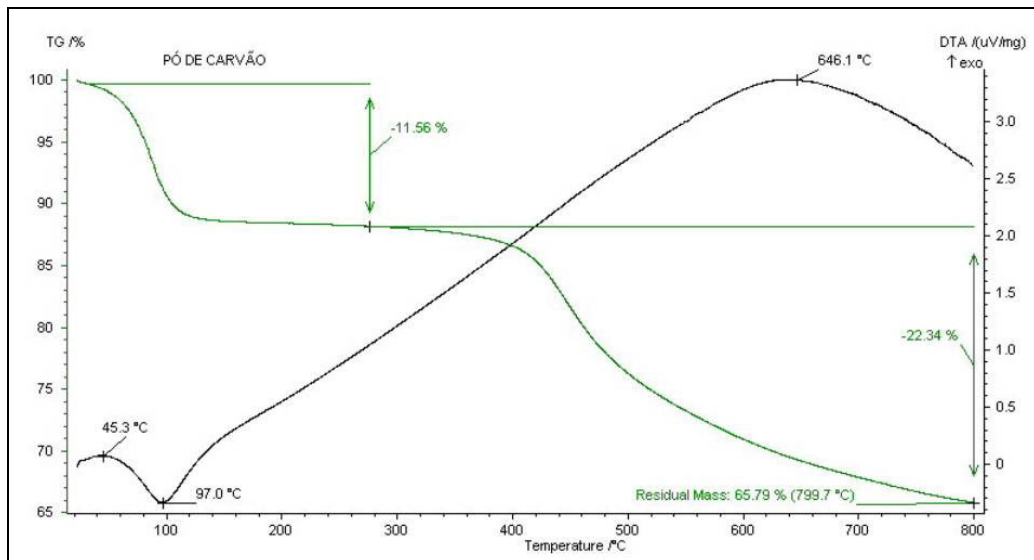
**Figura 24. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da bentonita em atmosfera de ar.**



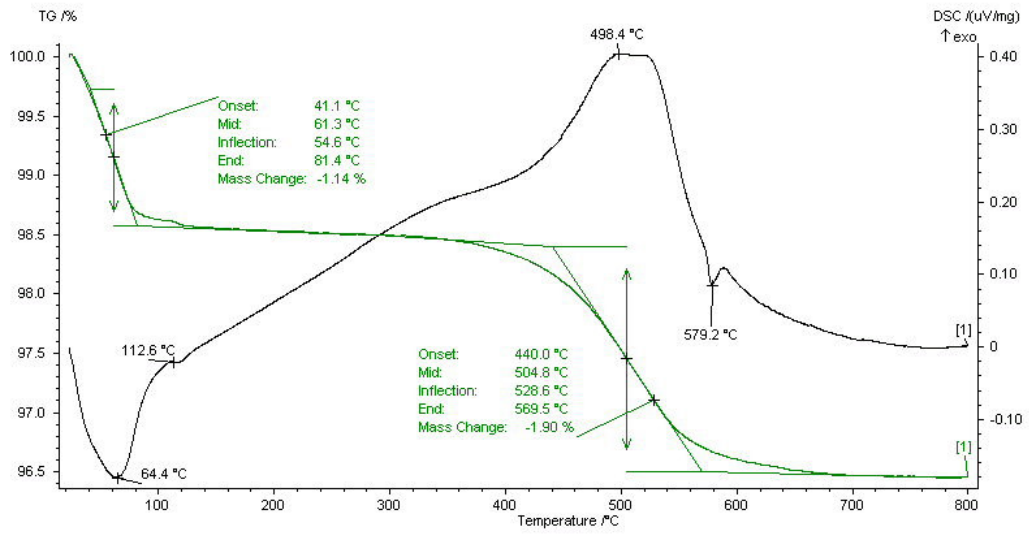
**Figura 25. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da bentonita em atmosfera inerte.**



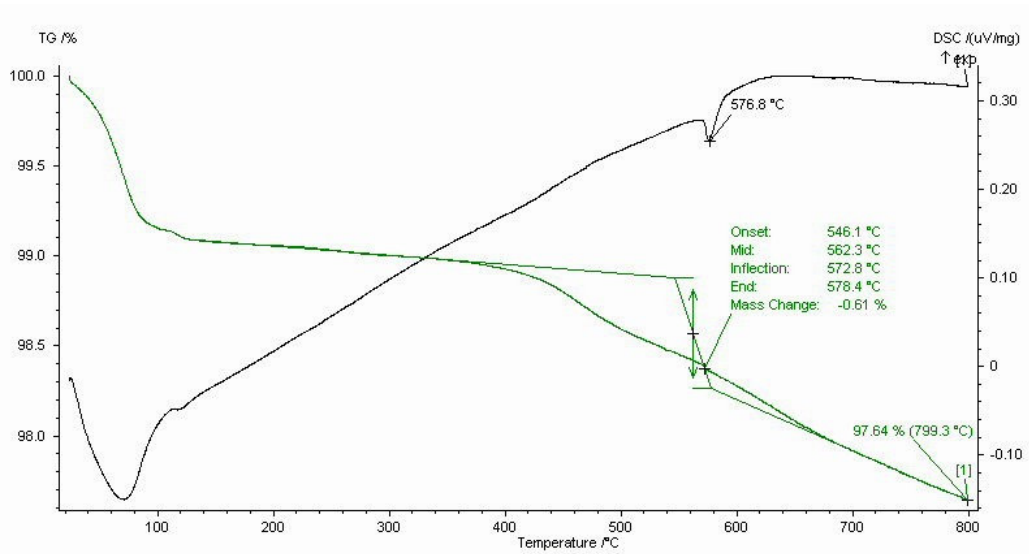
**Figura 26. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do pó de carvão em atmosfera de ar.**



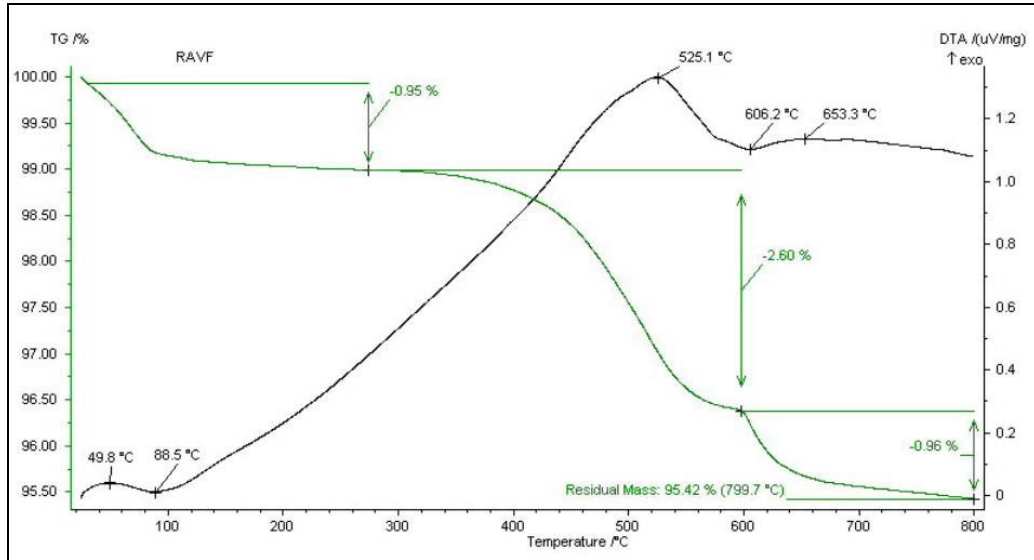
**Figura 27. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do pó de carvão em atmosfera inerte.**



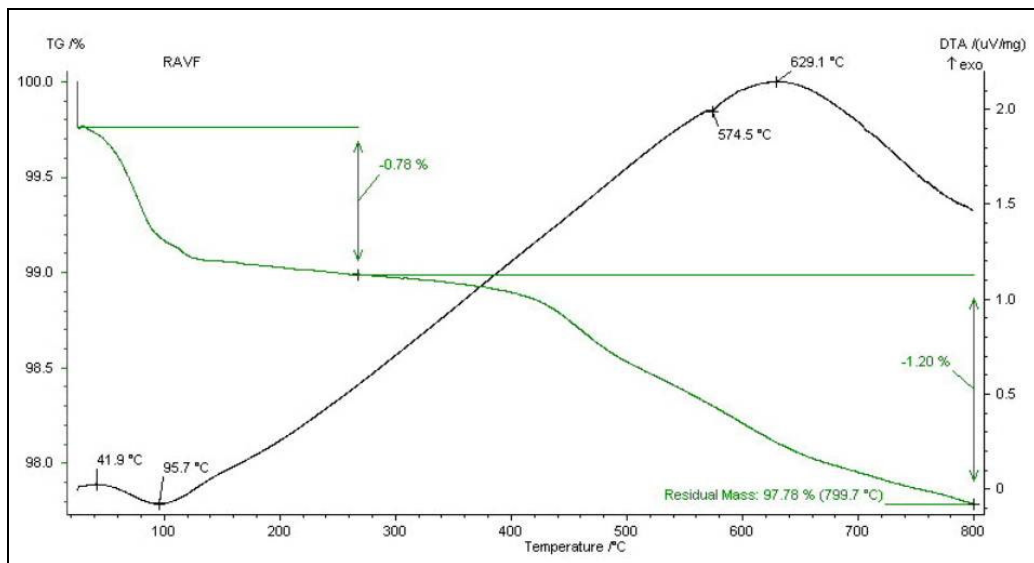
**Figura 28. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da AVF em atmosfera de ar.**



**Figura 29. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da AVF em atmosfera inerte.**



**Figura 30. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do RAVF em atmosfera de ar.**



**Figura 31. Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do RAVF em atmosfera inerte.**



#### **4.4. ANÁLISE DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)**

##### **4.4.1. Análise de infravermelho das matérias-primas constituintes do RAVF e da areia convencional**

O espectro FTIR das amostras secas de AVF, RAVF e matérias-primas podem ser observados na Figura 32. Os espectros de AVF e RAVF são muito similares. Ambos se assemelham ao espectro da areia, sendo que a banda em torno de  $1070\text{ cm}^{-1}$  aparece alargada, devido a superposição com a banda de bentonitas em  $1031\text{ cm}^{-1}$ .

O carvão também possui uma banda nesta região. O estiramento O-H, localizado em  $3632\text{ cm}^{-1}$  no espectro de bentonitas (WILSON, 1994), não é visto no espectro do AVF e nem no do RAVF.

As bandas em torno de  $3450$  e  $1633\text{ cm}^{-1}$  indicam a presença de água em todos os materiais, apesar do procedimento de secagem. A banda de Si-O em torno de  $518\text{ cm}^{-1}$  está presente em todos os espectros, exceto a do carvão.

As bandas características de quartzo em  $784$  e  $690\text{ cm}^{-1}$  são vistas nos espectros da areia, do AVF e do RAVF. A banda de carbonato, que ocorre em  $1440\text{ cm}^{-1}$ , não é observada no espectro da bentonita ativada com carbonato de sódio, indicando que, o carbonato de sódio não contamina a bentonita.

O pó de carvão possui as duas bandas características de vibrações e carbonato em  $1440$  e  $1040\text{ cm}^{-1}$ , indicando a presença de minerais carbonatos no carvão (SCOTT, 1993).

##### **4.4.2. Caracterização da Morfologia das Matérias-primas da AVF da Linha EII e do RAVF**

Foi realizado um estudo de caracterização da morfologia das matérias-primas constituintes da AVF da linha EII da fundição Blocos.

A areia utilizada na linha EII é de origem de depósitos sedimentares e procedentes da Mineração Veiga localizada no distrito de Araquari em Joinville – SC.

A Figura 33 apresenta o comparativo, onde demonstra a morfologia da areia extraída, onde se pode observar o tamanho e forma dos grânulos, com a presença de impurezas,

principalmente de argila que envolve o grânulo da areia da morfologia da areia lavada, onde se verifica uma dispersão no tamanho e no formato dos grânulos.

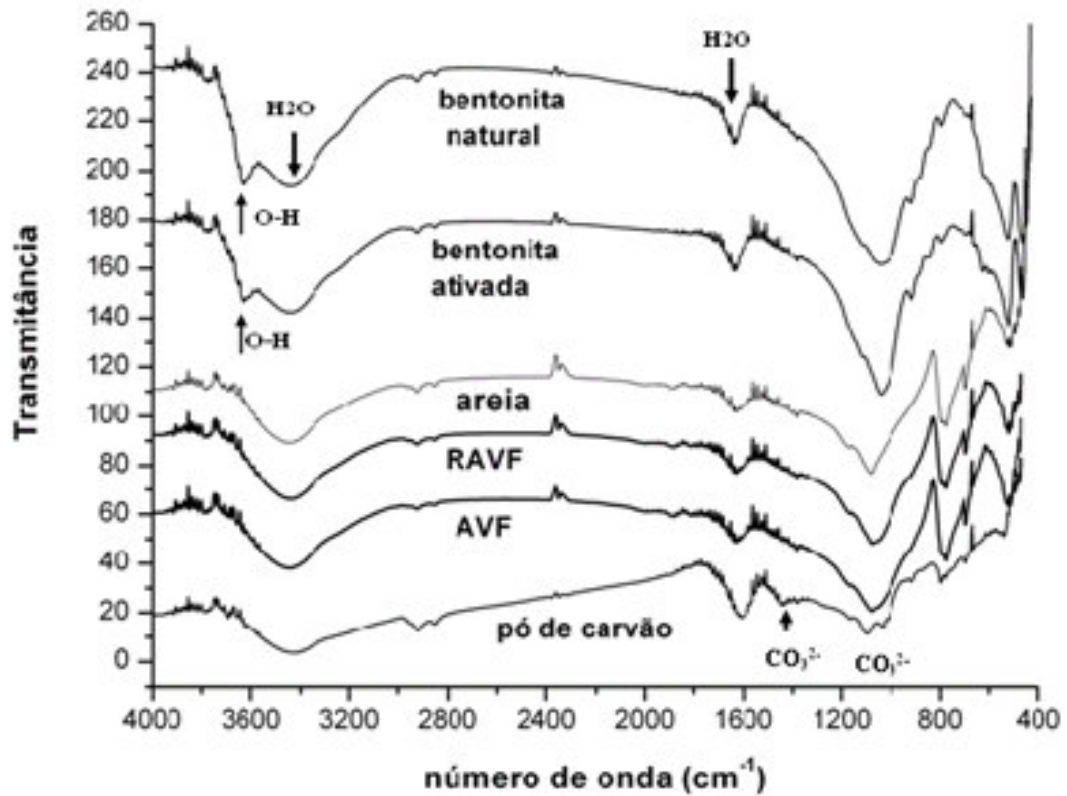


Figura 32. Espectros FTIR das amostras de AVF, RAVF e matérias-primas obtidos em pastilha de KBr.

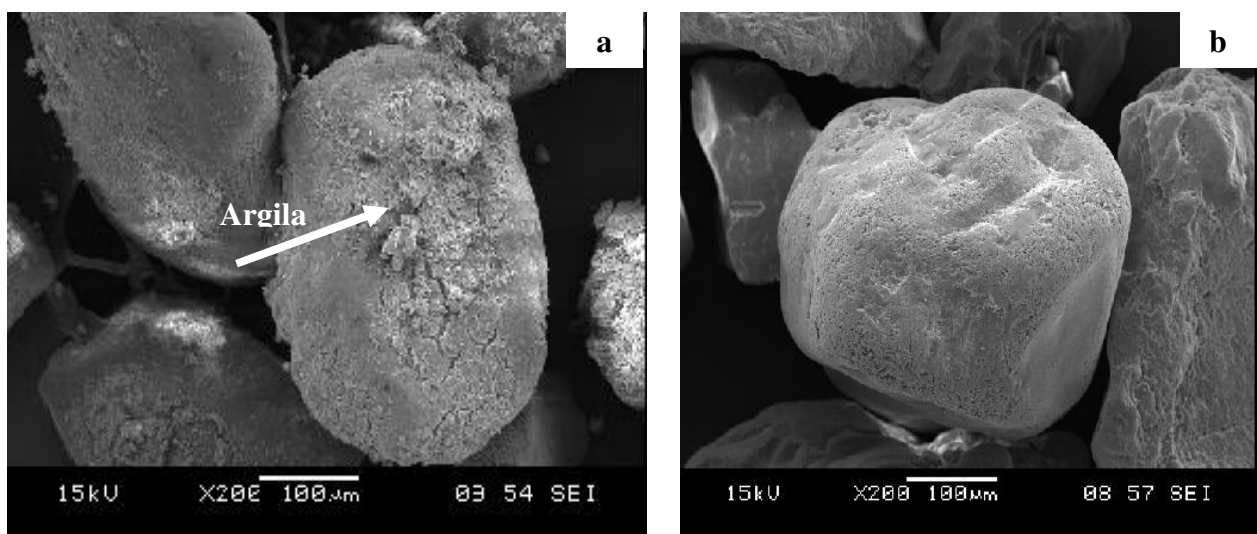
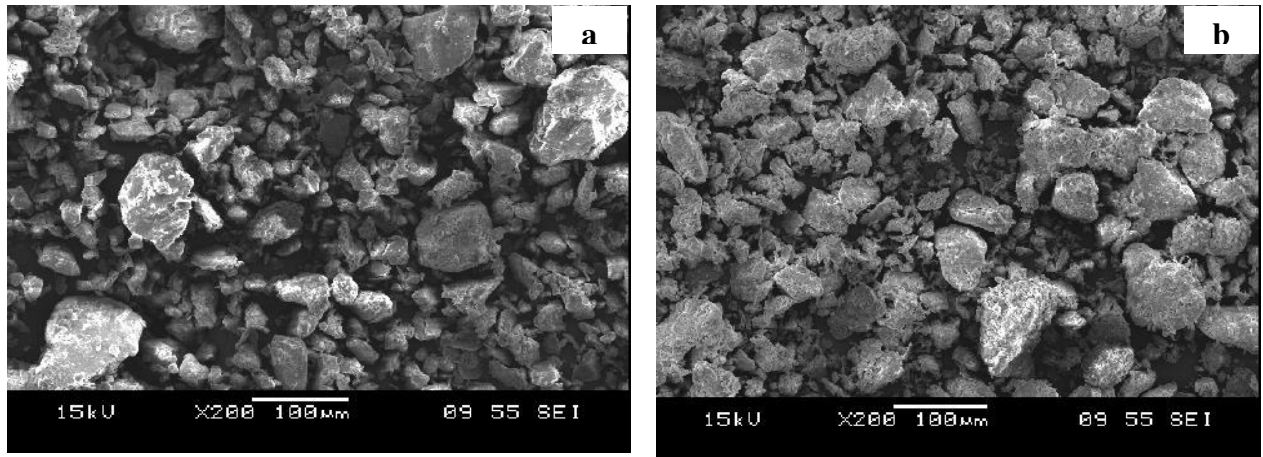


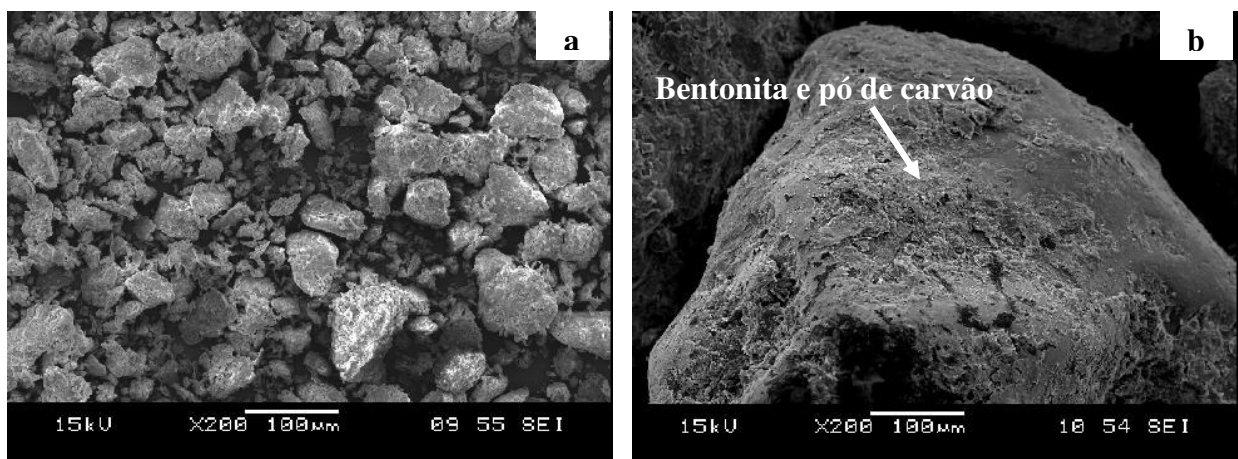
Figura 33. A morfologia da areia não (a) lavada e areia lavada (b).

A Figura 34 apresenta a morfologia da bentonita natural e verifica-se a heterogeneidade no tamanho e na forma dos grânulos. Na morfologia da bentonita ativada há uma variação no formato e tamanho dos grânulos.



**Figura 34. Morfologia da bentonita natural (a) e bentonita ativada (b).**

O pó de carvão apresenta variação na forma e tamanho dos grânulos conforme ilustra a Figura 35(a). A Figura 35(b) apresenta a morfologia do RAVF da Linha EII, na qual se pode observar a variação no formato do grânulo e a bentonita e o pó de carvão que recobrem o grão de sílica.

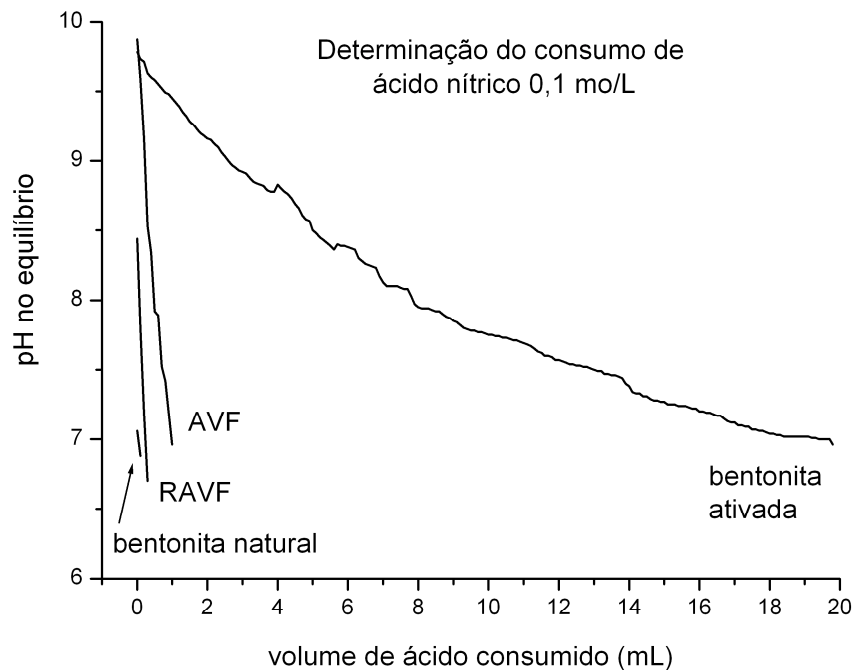


**Figura 35. Morfologia do pó de carvão (a) e do RAVF (b).**

#### 4.5. CONSUMO DE ÁCIDO DE BENTONITAS, AVF E RAVF

Na Figura 36 podem ser vistas as curvas de consumo de ácido nítrico 0,1 mol/L sobre bentonitas, AVF e RAVF para se obter a neutralização em pH 7,00. A AVF e o RAVF apresentam pH inicial de 9,87 e 8,44 respectivamente. A bentonita ativada consumiu 19,7 mL de ácido, já a bentonita natural consumiu 0,1 mL de ácido para ter o pH neutro. A AVF consumiu 1 mL e o RAVF teve o consumo de ácido de apenas 0,3 mL.

Os valores de consumo de ácido revelam claramente a influência do carbonato de sódio no consumo de ácido nítrico da bentonita ativada. Isto pode ser interpretado como sendo decorrente da ativação desta bentonita por carbonato de sódio, conforme descrito anteriormente. Pode-se concluir que a presença da bentonita ativada é o principal fator que determina a basicidade da AVF e RAVF.



**Figura 36. Consumo Ácido da Bentonita Natural e Ativada, da AVF e do RAVF.**

#### 4.6. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

A Tabela 10 apresenta os resultados da caracterização do ligante asfáltico antes e depois do ensaio de envelhecimento (Efeito Calor e Ar - ECA).

O ligante caracterizado antes do ensaio ECA apresentou o índice de suscetibilidade térmica dentro do especificado. As especificações brasileiras mostram que o índice de suscetibilidade térmica pode variar de (-1,5) a (+1,0) sendo que valores maiores que (+1) indicam asfaltos oxidados, ou seja, pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços quando a temperatura é baixa e valores menores que (-1) indicam asfaltos muito sensíveis a altas temperaturas, ou seja, amolecem rapidamente.

Por isso a necessidade em definir uma faixa de temperatura para uma melhor trabalhabilidade das misturas asfálticas, associada a consistência do ligante asfáltico (TRICHÊS, 2004).

Nos ensaios de penetração, viscosidade a 60°C e viscosidade Saybolt Furol os parâmetros foram atendidos. Valores de penetração abaixo de 15 dmm (dmm = 0,1 mm) estão associados a ligantes envelhecidos e quebradiços.

É necessário definir as relações entre a viscosidade e a temperatura com a finalidade de quantificar de forma adequada as temperaturas de trabalho no laboratório e no campo, ou seja, em definir as consistências apropriadas para as operações de mistura, espalhamento e compactação de massas asfálticas. Pois, o aquecimento inadequado do ligante asfáltico pode trazer conseqüências graves, como por exemplo, a ruptura do pavimento.

Sobre a caracterização do ligante asfáltico após o ensaio ECA, ou seja, no material envelhecido se verifica que o ligante asfáltico envelhecido aumenta a consistência, que compreende a viscosidade e ponto de amolecimento, bem como, sob o ponto de vista químico aumenta o teor de asfaltemos e reduz o teor de aromáticos e resinas.

Uma reação que pode ser interpretada como a perda dos componentes mais voláteis (aromáticos e resinas) e a preservação dos componentes menos voláteis (asfaltemos) após o ensaio ECA.

De acordo com TRICHÊS (2004) os saturados têm influência negativa na suscetibilidade térmica, sendo que em maior concentração amolece o produto. Os aromáticos agem como plastificantes, contribuindo para a melhoria de suas propriedades físicas, como a elasticidade.

As resinas têm influência negativa na suscetibilidade térmica, mas contribuem na melhoria da ductibilidade e dispersão dos asfaltenos. Os asfaltenos contribuem para a melhoria da suscetibilidade térmica e aumento da viscosidade.

Foi realizada análise de infravermelho do ligante para detectar os grupos funcionais presentes, foi utilizado o equipamento FTIR-BOMEN.

A Figura 37 ilustra o gráfico obtido da análise de infravermelho, sendo que a Figura 38 mostra o CAP da SHRP usado neste estudo como comparativo.

Segundo o SHRP (1993) o asfalto pode conter grupos funcionais tais como sulfóxido, hidroxila, ácido carboxílico e cetona bem como heteroátomos, sendo que estes foram confirmados na análise de FTIR do CAP-20 da Ipiranga Asfaltos e do CAP Americano. Assim como, são ilustradas as bandas identificadas do CAP da Ipiranga.

Analisando os dados apresentados pode-se concluir que o CAP-20 da Ipiranga Asfaltos possui os mesmos grupos funcionais da SHRP.

**Tabela 10. Caracterização do Ligante Asfáltico da REPLAN.**

ENSAIO	UNID.	ESPECIFICAÇÃO CAP 20	CAP novo	CAP Envelhecido Ensaio ECA
Ponto de Amolecimento	°C	46	50,3	<b>53</b>
Penetração (100g, 5s, 25°C)	Dmm	50 - 70	54	<b>28</b>
Índice de Suscetibilidade Térmica	---	(-1,5) a (+1,0)	- 0,94	---
Viscosidade a 60°C	P	2000 – 3500	1802	3165
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	ssF	mínimo 120	182	207
145°C		---	116	136
177°C		15 – 60	29	36
Ductilidade a 25°C	Cm	60	> 100	> 100
Separação Química (SARA)	%	---		
Saturados			6,7	6,7
Aromáticos			41,8	36,6
Resinas			33,1	35,8
Asfaltenos		18,4	20,9	
Perda em massa	%	máximo 1,0		0,025
Relação de viscosidade a 60°C	%	máximo 4,0		1,76
Relação de Penetração	%	---		51,9

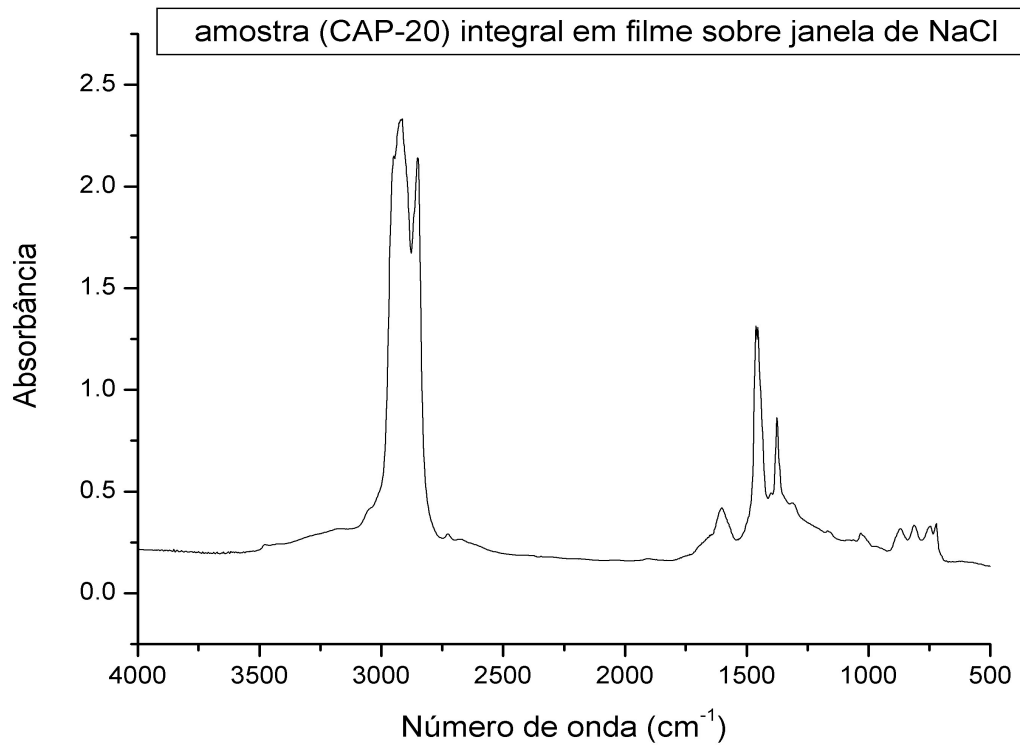


Figura 37. Análise de Infravermelho do CAP-20 da Ipiranga Asfaltos.

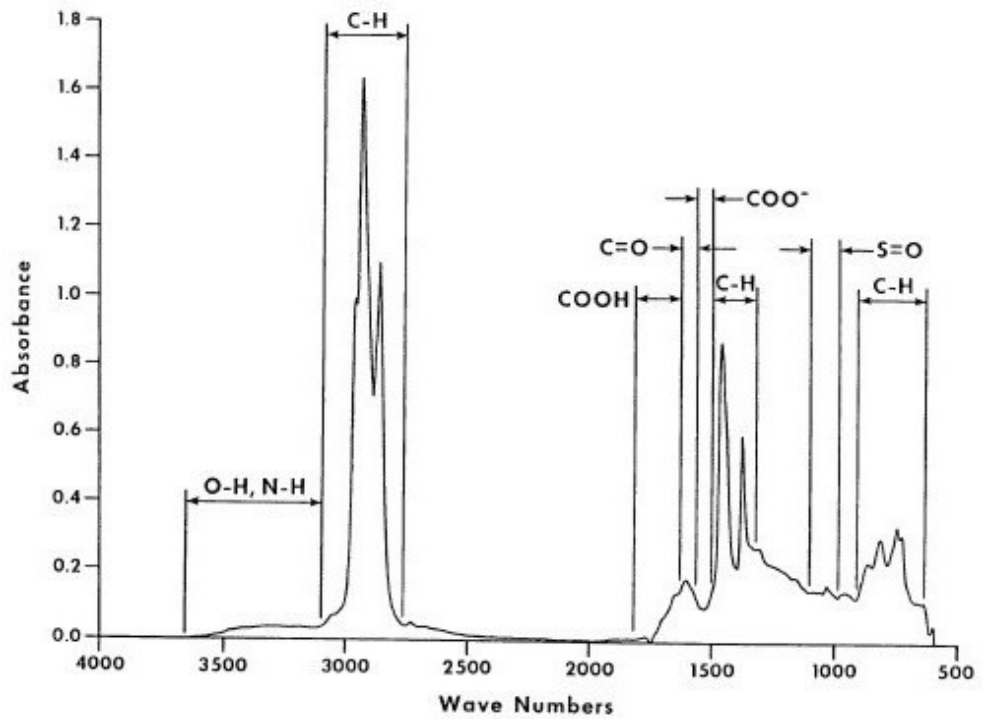


Figura 38. Análise de Infravermelho Típico do CAP usado nos EUA (SHRP,1993).



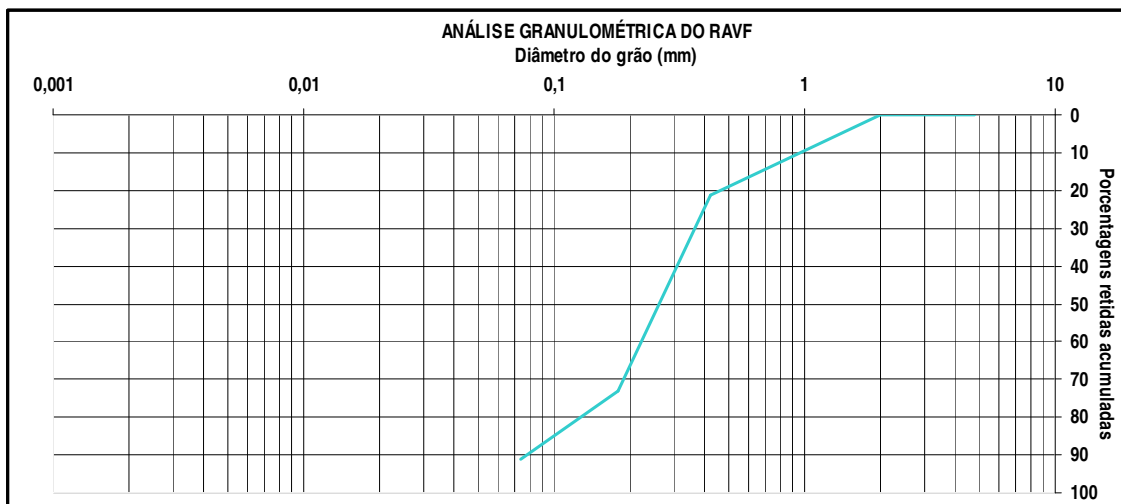
#### 4.7. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os resultados do estudo granulométrico apresentado nesta seção são exclusivamente referentes aos corpos-de-prova para estudo de laboratório.

A Tabela 11 mostra os resultados da análise granulométrica do RAVF e a Figura 39 ilustra os resultados desta análise; conseqüentemente pode-se concluir que se trata de um agregado miúdo (na ordem de 0,08 a 2 mm).

**Tabela 11. Análise granulométrica do RAVF.**

Peneiras	Material Passante
4,8 mm: n° 4	100,0
2,0 mm: n° 10	100,0
0,42 mm: n° 40	78,6
0,18 mm: n° 80	27,0
0,074 mm: n° 200	8,7



**Figura 39. Análise Granulométrica do RAVF.**

As granulometrias dos materiais constituintes da mistura asfáltica (Brita 01, Pedrisco, Pó de brita e RAVF), assim como as distribuições granulométricas da mistura, estão representadas nas Tabelas 12 e 13 respectivamente e na Figura 40. Pode-se observar que nas situações analisadas, a distribuição dos tamanhos dos agregados se enquadra dentro dos limites da faixa C – DNIT, para o CAUQ.

A faixa granulométrica será de acordo com o tipo de camada de revestimento asfáltico que será construído, bem como com o teor de asfalto que será aplicado.

As faixas granulométricas para concreto asfáltico são A, B e C, sendo que a faixa “A” é para o revestimento denominado camada de ligação, contendo um teor de ligante na ordem de 4 a 7%; a faixa “B” é para a camada de ligação ou rolamento que contém de 4,5 a 7,5% de ligante; já a faixa “C” é para a camada de rolamento que deverá ter de 4,5 a 9,0% de ligante asfáltico (BERNUCCI *et al*, 2007).

Para a formulação do traço do CAUQ existe a necessidade da adição de agregados miúdos, para que os espaços vazios entre os agregados graúdos sejam preenchidos para aumentar a área de contato entre os grãos, melhorando assim, a resistência ao cisalhamento e conseqüentemente diminuindo o consumo do ligante asfáltico (TRICHÊS, 2004).

As quantidades de cada material utilizado são decorrentes do enquadramento na faixa granulométrica desejada, em função da composição granulométrica de cada material, resultando assim a curva granulométrica da mistura de agregados.

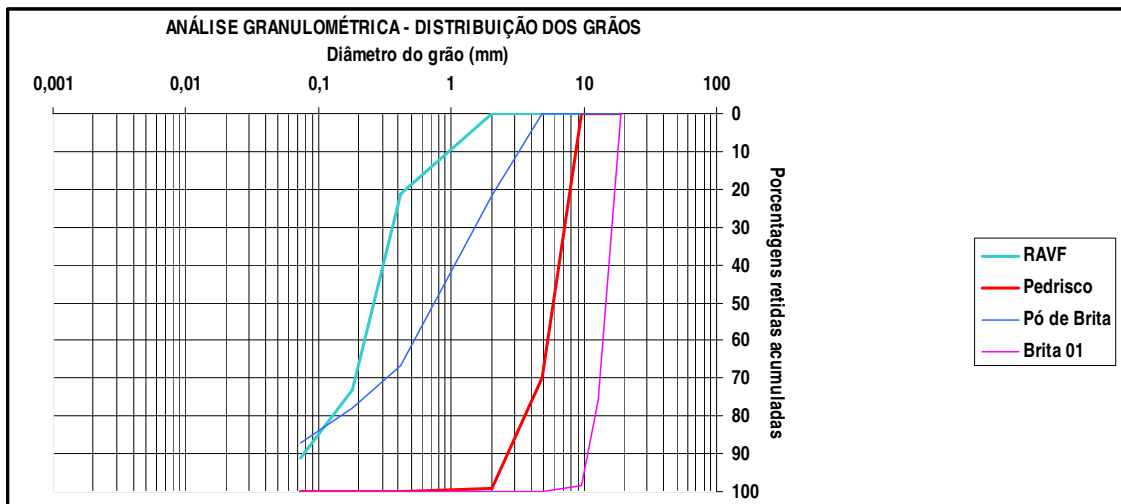
**Tabela 12. Composição Granulométrica para o CAUQ.**

Material	Brita 01	Pedrisco	Pó de Brita	RAVF
19,1 mm: ¾”	100,0	100,0	100,0	100,0
12,7 mm: ½”	24,0	100,0	100,0	100,0
9,5 mm: 3/8”	1,8	100,0	100,0	100,0
4,8 mm: n° 4	0,1	30,1	100,0	100,0
2,0 mm: n° 10	0,1	0,8	78,3	100,0
0,42 mm: n° 40	0,1	0,1	33,3	78,6
0,18 mm: n° 80	0,1	0,1	21,9	27,0
0,074 mm: n° 200	0,1	0,1	13,0	8,7

A análise dos resultados apresentados na Figura 41 mostrou que o traço elaborado está dentro Faixa C do DNIT, conseqüentemente o RAVF atende às exigências normativas brasileiras no quesito granulometria, podendo desta forma ser empregado como agregado em pavimentação.

**Tabela 13. Comparação dos Resultados da Composição Granulométrica da Mistura.**

Peneiras	Traço Elaborado (%)	Faixa "C" DNIT (%)	
		Limite Inferior	Limite Superior
19,1 mm: ¾"	100	100,0	100,0
12,7 mm: ½"	88,6	85,0	100,0
9,5 mm: 3/8"	85,3	75,0	100,0
4,8 mm: n° 4	67,5	50,0	85,0
2,0 mm: n° 10	49,4	30,0	75,0
0,42 mm: n° 40	24,5	15,0	40,0
0,18 mm: n° 80	13,7	8,0	30,0
0,074 mm: n° 200	7,4	5,0	10,0



**Figura 40. Análise granulométrica para o CAUQ.**

As análises granulométricas dos agregados empregados, na execução do trecho experimental se encontram na seção Trecho Experimental.

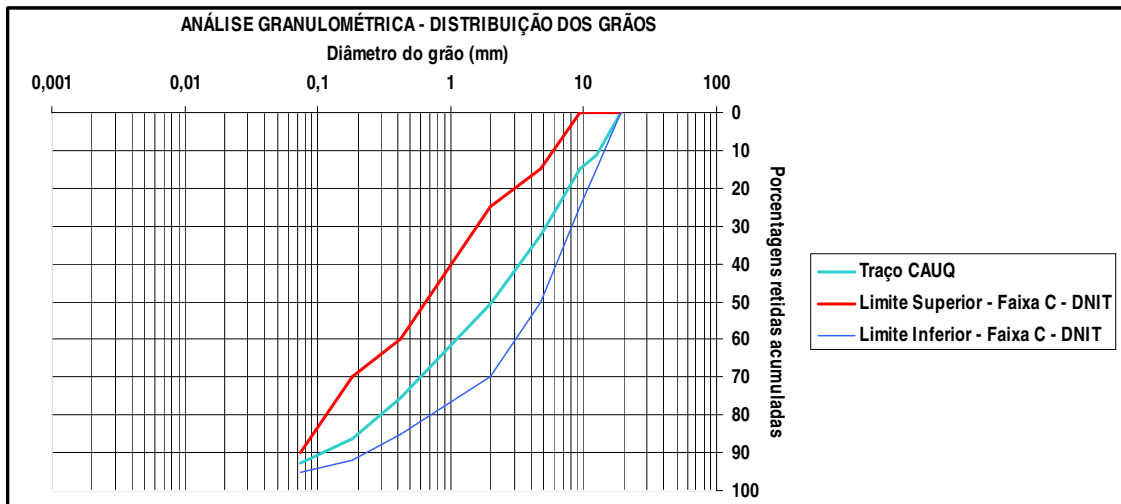


Figura 41. Tolerância do traço – Faixa “C” DNIT da Mistura do CAUQ.

#### 4.8. MISTURAS ASFÁLTICAS (DOSAGEM MARSHALL)

As misturas elaboradas foram submetidas a ensaios Marshall, cujos resultados estão apresentados na Tabela 14, sendo que a porcentagem de teor ótimo de ligante foi da ordem de 5,3.

Foram usados 0, 5, 10 e 15% de RAVF para a elaboração dos corpos-de-prova. O corpo denominado 0% de RAVF contém 15% de areia convencional, o corpo com 5% de RAVF contém 10% de areia convencional, o corpo com 10% de RAVF contém 5% de areia convencional e o corpo com 15% de RAVF não contém areia convencional.

Tabela 14. Resultados da dosagem Marshall.

Parâmetros	0 %	5 %	10 %	15 %	DNIT 313/97
% vazios	4,2	4,2	4,3	4,1	3 a 5
Relação Betume/Vazios (%)	76,1	75,6	75,1	75,1	75 a 82
Estabilidade mínima (Kgf/cm <sup>2</sup> )	1199	1118	1068	1007	350
Fluência (1"/100)	16,8	14,9	15,9	16,0	8 a 18
Vazios Agregado Mineral (%)	16,8	17,3	17,4	17,2	14
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,5540	2,5259	2,5146	2,5118	*

\* Não possui especificação em Norma.

O volume de vazios apresentou um comportamento bastante satisfatório em todos os traços avaliados, com referência ao volume de vazios do agregado mineral apresentou um comportamento bastante regular, em todos os traços avaliados.

Uma das propriedades mais importantes de uma mistura asfáltica é a sua estabilidade, ou seja, sua habilidade em resistir à deformação permanente quando sujeita à passagem de veículos ou mesmo quando sujeita aos veículos estacionados (HILLS, 1973).

A estabilidade das misturas com RAVF ficou significativamente acima das especificações do DNIT, resultado já observado por BONET (2002). Contudo, é necessário salientar que o aumento da adição de RAVF nas misturas a estabilidade tende a cair.

A fluência permaneceu dentro dos limites da norma 313/97 do DNIT.

Os valores da relação betume / vazios caem devido a incorporação do RAVF para um mesmo teor de CAP.

A densidade aparente apresentou um comportamento condizente com o emprego do RAVF, ou seja, a densidade do RAVF é de  $1,56 \text{ g/cm}^3$  e da areia usada em pavimentação é de  $1,63 \text{ g/cm}^3$ , conseqüentemente a densidade da mistura final com a adição de RAVF proporcionalmente diminui.

Os ensaios mecânicos (Marshall) sobre as misturas com RAVF apresentam resultados que atendem as especificações normativas.

#### **4.8.1. Misturas asfálticas com adição de cal (Dosagem Marshall)**

AL-SUHAIBANI *et al* (1992) relatam em seu trabalho que os melhoradores de adesividade são adicionados nas misturas asfálticas com o objetivo de melhorar a estabilidade e a resistência das mesmas, por duas teorias: a primeira é de que suas partículas finas preenchendo os vazios existentes entre os agregados, aumentam a densidade e a resistência da mistura, quando compactada; a segunda defende que as partículas finas dos melhoradores de adesividade ficando em suspensão no ligante asfáltico e absorvendo os componentes asfálticos, aumentam a viscosidade do ligante e conseqüentemente a rigidez da mistura, sendo que essas duas situações ocorrem simultaneamente.

Foi realizado um estudo de incorporação de cal para que melhore as propriedades de estabilidade e fluência do Concreto Asfáltico com RAVF. O melhorador de adesividade utilizado foi a cal hidratado, sendo sua composição de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, fornecido pela Ipiranga Asfaltos localizada em Paulínia – SP.

Assim como, a realização de um estudo comparativo do CAUQ com areia nova. Os resultados desse estudo estão apresentados nas Tabelas 15 e 16.

**Tabela 15. Resultados do Traço do CAUQ com os Teores de 5, 10 e 15% de RAVF e 1; 1,5 e 2% de Cal.**

<b>Parâmetros</b>	<b>5% (2% de cal)</b>	<b>10% (1,5% de cal)</b>	<b>15% (1% de cal)</b>	<b>DNIT 313/97</b>
% Vazios	4,27	3,44	4,33	3 a 5
Relação Betume/Vazios (%)	75,41	79,21	74,87	75 a 82
<b>Estabilidade Mínima (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>1066,0</b>	<b>1086,0</b>	<b>984,0</b>	<b>350</b>
<b>Fluência (1"/100)</b>	<b>15,6</b>	<b>14,9</b>	<b>15,9</b>	<b>8 a 18</b>
Vazios Agregado Mineral (%)	17,37	16,56	17,25	14
Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,52	2,52	2,48	*

\* Não possui especificação em Norma.

**Tabela 16. Resultados do Traço do CAUQ com os Teores de 5, 10 e 15% de Areia Convencional e 1; 1,5 e 2% de Cal.**

<b>Parâmetros</b>	<b>5% (2% de cal)</b>	<b>10% (1,5% de cal)</b>	<b>15% (1% de cal)</b>	<b>DNIT 313/97</b>
% Vazios	4,62	3,77	4,23	3 a 5
Relação Betume/Vazios (%)	73,86	77,67	75,40	75 a 82
<b>Estabilidade Mínima (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>882,0</b>	<b>1016,7</b>	<b>979,0</b>	<b>350</b>
<b>Fluência (1"/100)</b>	<b>16,5</b>	<b>16,0</b>	<b>15,9</b>	<b>8 a 18</b>
Vazios Agregado Mineral (%)	17,69	16,88	17,21	14
Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,51	2,52	2,49	*

\* Não possui especificação em Norma.

Conforme dados apresentados na Tabela 14 todos os resultados obtidos da dosagem Marshall satisfazem as especificações DNIT 313/97. Com isso o traço asfáltico incorporado com o RAVF satisfaz as características do método Marshall. Porém, é recomendado o uso de cal para melhorar os resultados dos parâmetros Marshall, já que os mesmos encontram-se muito próximos dos limites das especificações DNIT 313/97.

Como se pode observar nos resultados apresentados nas Tabelas 15 e 16 o material com RAVF apresentou resultados superiores de estabilidade com relação ao material com areia convencional. Com relação aos resultados de fluência, ambos materiais apresentaram comportamento semelhantes.

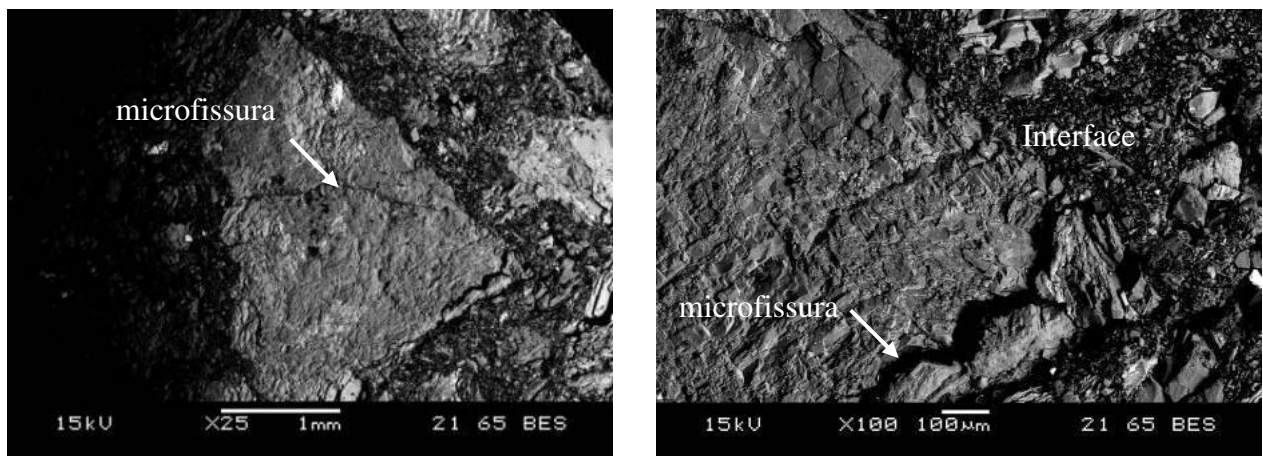
#### 4.8.2. Caracterização da microestrutura do CAUQ

Foi realizada a caracterização da microestrutura dos corpos-de-prova de CAUQ contendo RAVF, para verificar a interface dos agregados e do ligante asfáltico, bem como, observar a presença de microfissuras e outros possíveis defeitos que poderão influenciar nas propriedades mecânicas do pavimento.

No estudo foi analisada a microestrutura do material contendo a areia convencional, sendo realizada em corpos-de-prova previamente submetidos aos ensaios Marshall.

Como resultado da caracterização da microestrutura do material com 0% de RAVF foi constatada a presença de microfissuras no agregado, ocorridas provavelmente durante o ensaio de compressão (Figura 42).

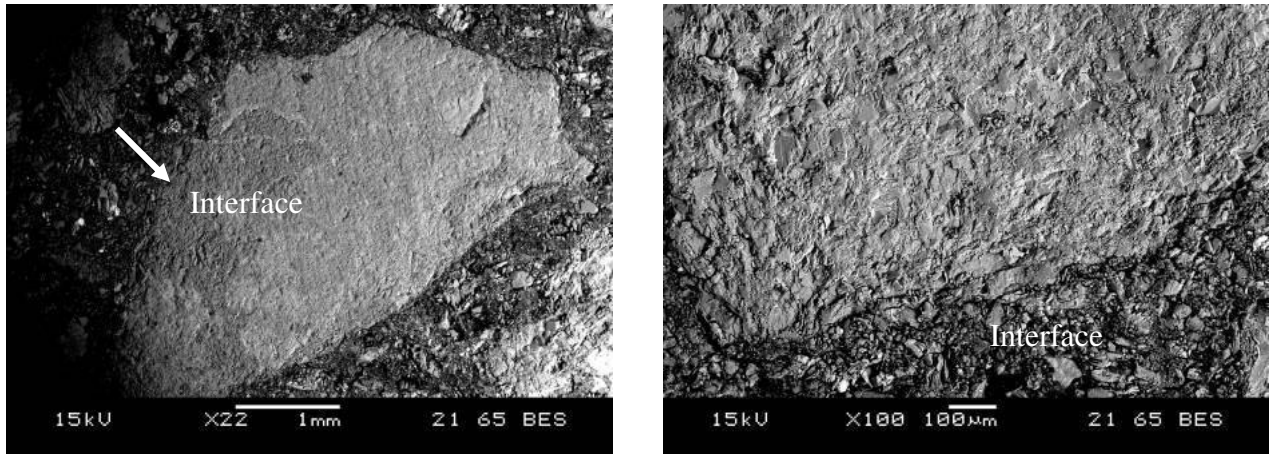
Na Figura 43 é possível visualizar a microfissura, bem como, uma boa interface entre o agregado e o ligante. Para o material com 5% de RAVF, observou-se uma boa interface entre o agregado e o ligante.



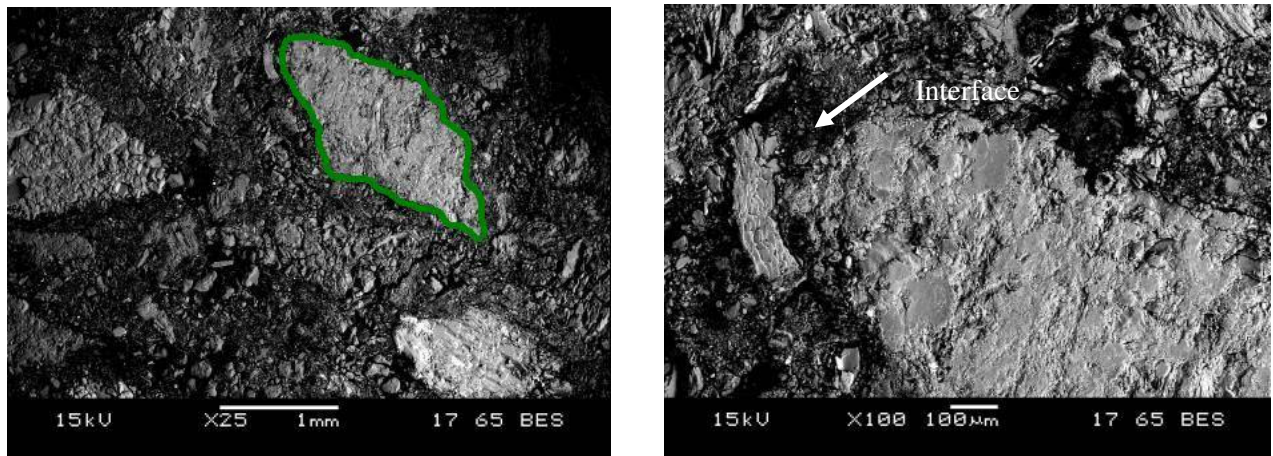
**Figura 42. Micrografia referente a presença de microfissuras (a) e a interface entre o agregado e o ligante (b) do material com 0% de RAVF.**

O material com 10% de RAVF apresentou uma pior interface entre agregado e ligante com relação ao material com 5% de RAVF conforme a Figuras 44. Constataram-se falhas na interface entre o agregado e o ligante do material com 15% de RAVF (Figura 45).

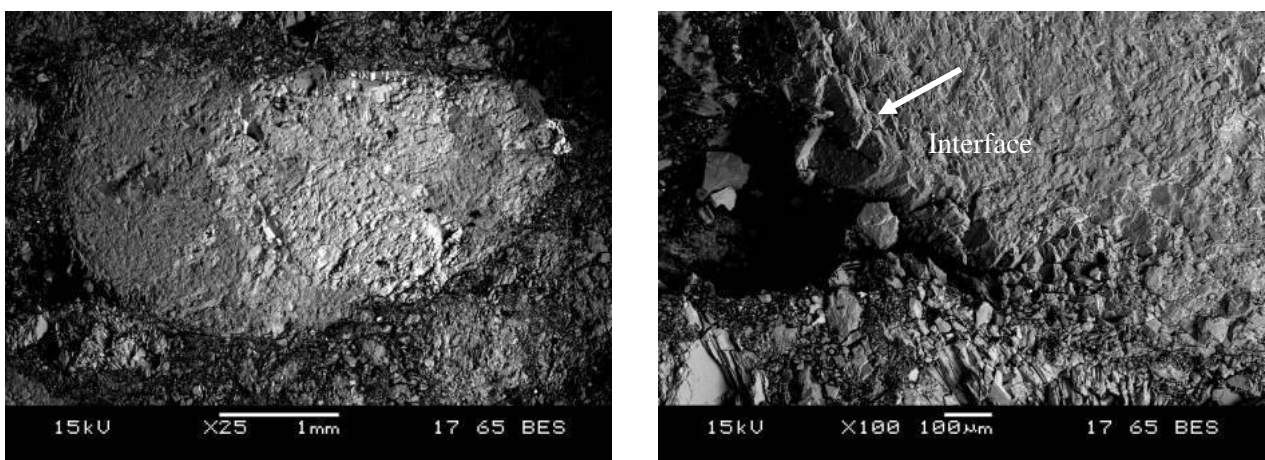




**Figura 43. Micrografia do material com 5% de RAVF e micrografia da interface entre o agregado e o ligante (b).**



**Figura 44. Microestrutura do material (a) e a interface entre o agregado e o ligante do material (b), ambos com 10% de RAVF.**



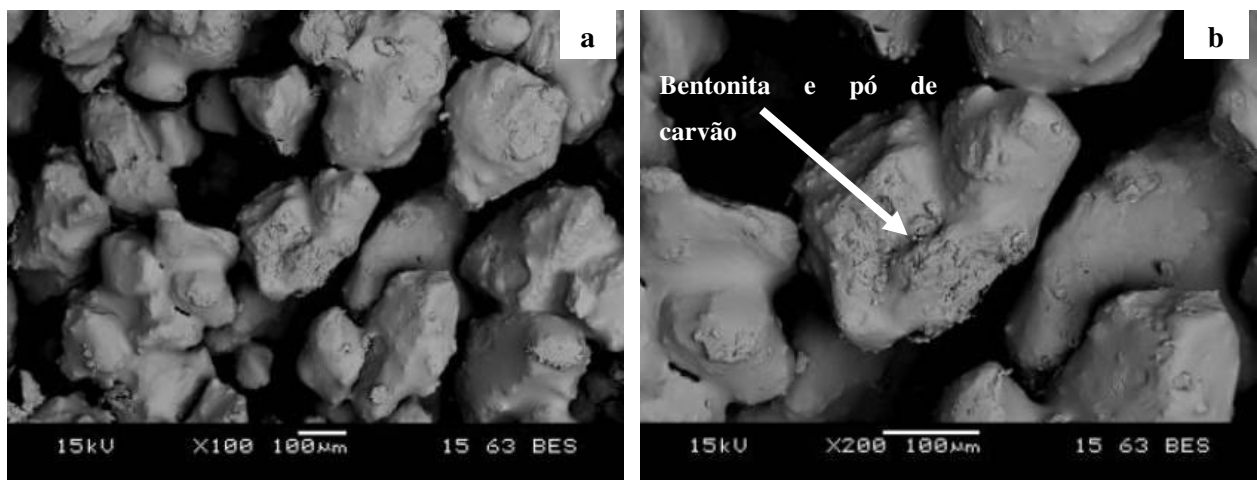
**Figura 45. Micrografia do material (a) e os defeitos na interface entre o agregado e o ligante do material (b) com 15% de RAVF.**



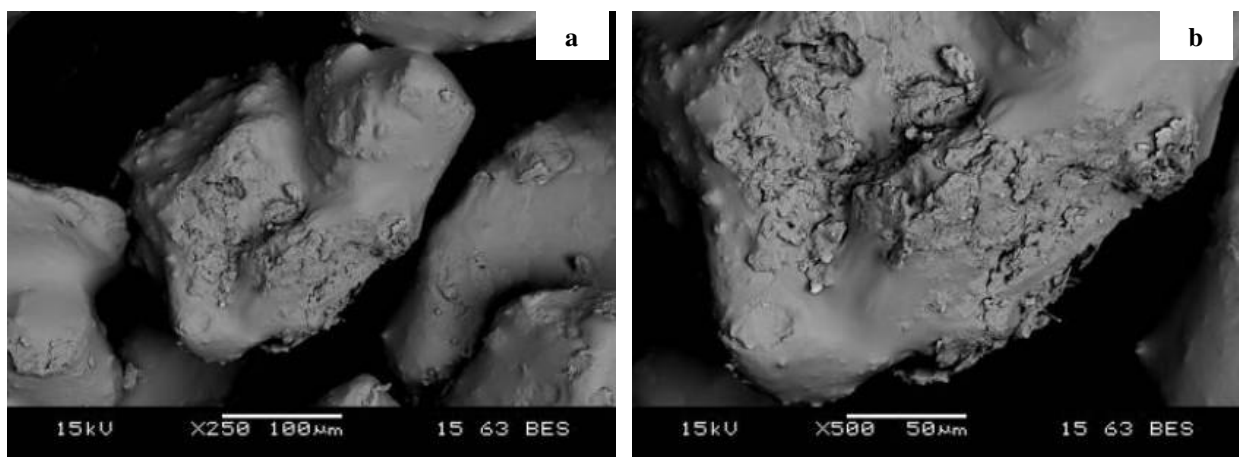
### 4.8.3. Caracterização da interface do RAVF, areia convencional e areia lavada com CAP-20

A Figura 46 mostra que o CAP-20 foi bem aderido na superfície do RAVF. Na Figura 47 é possível visualizar a bentonita e o pó de carvão que recobrem o grânulo do RAVF.

Pelas micrografias apresentadas na Figura 48a é possível verificar a boa adesividade entre a areia convencional e o CAP-20 e perceber que entre a areia lavada e o ligante houve boa aderência entre os materiais (Figura 48b).



**Figuras 46.** Micrografias ilustrando a bentonita e o pó de carvão que recobrem o grânulo do RAVF.



**Figura 47.** Micrografias ampliadas mostrando a bentonita e o pó de carvão que recobrem o grânulo do RAVF.

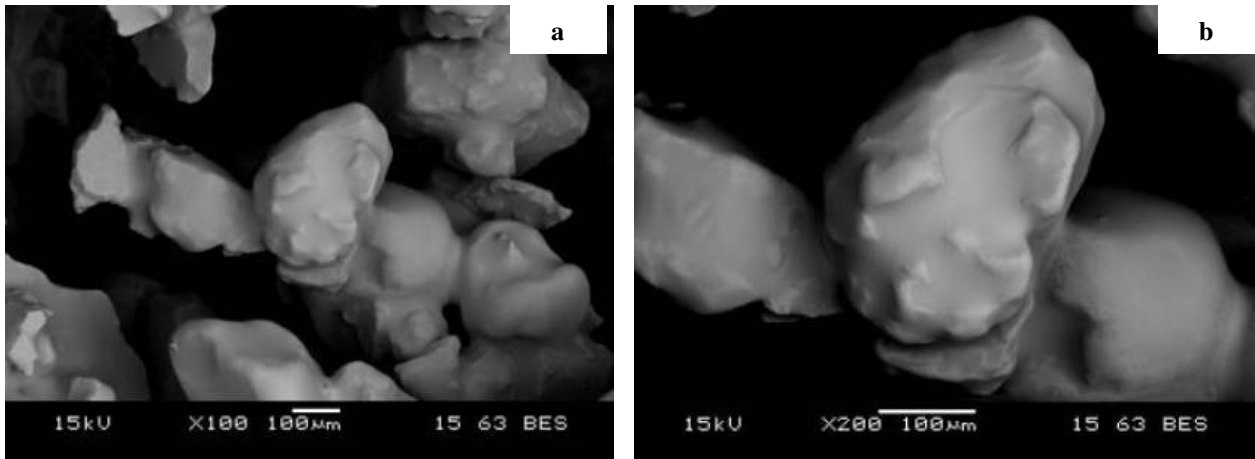


Figura 48a. Micrografias do grânulo da areia convencional.

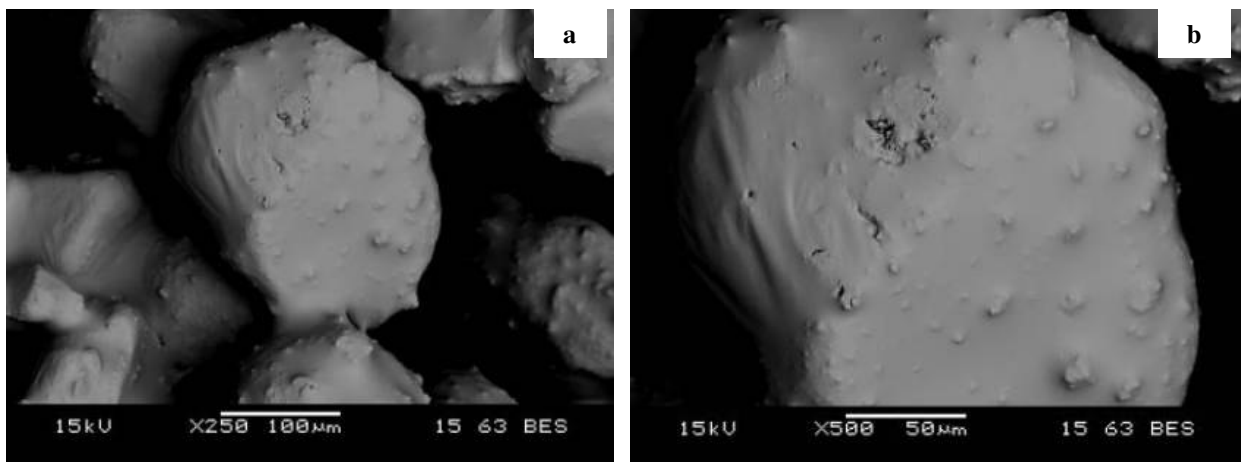


Figura 48b. Micrografias do grânulo da areia lavada.

#### 4.9. CARACTERIZAÇÃO DE INTERESSE AMBIENTAL E TOXICOLÓGICA

Os ensaios de lixiviação e solubilização, de acordo com a norma vigente no Brasil são fundamentais para este estudo. Pois, há o interesse em demonstrar que o reaproveitamento do RAVF, pela sua adição ao concreto asfáltico não causará risco ao meio ambiente ou à saúde pública.

Foram realizados testes de toxicidade com o microcrustáceo *Daphnia magna* e com a bactéria *Vibrio fischeri*, pois estes organismos são considerados como padrões internacionais para testes de toxicidade aguda, além de apresentarem sensibilidade para um grande número de espécies tóxicas.

A seguir serão apresentadas as análises de caracterização de interesse ambiental e análises de toxicidade seguindo as normas vigentes no país.

#### **4.9.1. Ensaio de lixiviação e solubilização**

Os ensaios de lixiviação e solubilização de acordo com a norma de classificação de resíduos NBR 10.004 foram realizados no RAVF (Tabela 17).

Os resultados de classificação do RAVF revelaram que somente cinco parâmetros do extrato solubilizado ultrapassaram os limites máximos permitidos, a saber: alumínio, ferro, manganês, sódio e sulfato. Nenhum dos parâmetros do extrato lixiviado extrapolou os limites. Estes cinco parâmetros do extrato solubilizado serão chamados aqui de "parâmetros críticos do RAVF".

A fim de compreender a influência dos diversos materiais nos parâmetros críticos no RAVF e no corpo-de-prova com RAVF, eles também foram analisados nas matérias-primas (bentonita natural e ativada, pó de carvão e areia lavada) e os resultados podem ser vistos na Tabela 18. Nesta Tabela também consta a análise da AVF, preparada em laboratório e que não passou pelo processo de fundição.

Foram analisados os corpos-de-prova preparados com 15% de areia convencional e os corpos-de-prova com 15% de RAVF. Os resultados podem ser vistos na Tabela 19. Os corpos-de-prova foram triturados, antes do preparo dos extratos, para expor os possíveis contaminantes ao líquido extrator simulando o pior cenário de risco ambiental.

Com o objetivo de realizar um estudo ambiental comparativo com o estudo ambiental das matérias-primas da AVF e do RAVF, foram coletados solos em determinados bairros de Joinville.

A coleta foi realizada conforme especificações da EPAGRI – Empresa de Pesquisas Agropecuárias de Santa Catarina: as amostras foram retiradas da camada superficial do solo, até a profundidade de 20 cm, tendo antes o cuidado de limpar a superfície dos locais escolhidos, removendo as folhas e outros detritos. Tomou-se o cuidado para não retirar amostras de locais próximos a residência, galpões, estradas formigueiros, depósito de adubo, entre outros. Também se tomou o cuidado para que o terreno das amostras dos solos não estivesse encharcado.

Foram coletados solos dos bairros: Pirabeiraba, Centro de Joinville, Boehmerwald, Bom Retiro, Iriirú, Costa e Silva e Itaum (Tabela 20).

O elemento sódio aparece como constituinte natural do solo (Tabela 20), presente na areia lavada utilizada na produção da areia de fundição (Tabela 18). Outra fonte de sódio é a bentonita, o seu teor de sódio é justamente o responsável pela sua utilização no processo de areia de moldagem, uma vez que a hidratação dos íons sódio causa o inchamento entre as lamelas da bentonita.

O sódio é parâmetro de qualidade das águas, pois confere gosto (propriedade organoléptica) a mesma, sabe-se que os parâmetros de solubilização são extraídos dos padrões de potabilidade das águas. Contudo, não é elemento tóxico, tão pouco contamina o meio ambiente.

**Tabela 17. Parâmetros químicos no lixiviado, solubilizado do RAVF pela NBR 10.004 (2004).**

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>
Alumínio				<b>55,45</b>	0,05	0,2
Arsênio	< LQ	0,005	1	0,01	0,005	0,01
Bário	0,476	0,003	70	0,5	0,003	0,7
Cádmio	< LQ	0,03	0,5	< LQ	0,004	0,005
Chumbo	< LQ	0,2	1	< LQ	0,003	0,01
Cloretos				104	1	250
Cobre				0,02	0,01	2
Cromo Total	< LQ	0,08	5	< LQ	0,013	0,05
Fenóis totais				< LQ	0,001	0,01
Ferro				<b>20,7</b>	0,02	0,3
Fluoretos	0,58	0,07	150	1,32	0,07	1,5
Manganês				<b>0,13</b>	0,02	0,1
Mercúrio	< LQ	0,0002	0,1	< LQ	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				1,2	0,3	10
Prata	< LQ	0,05	5	< LQ	0,01	0,05
Selênio				< LQ	0,007	0,01
Sódio				<b>210</b>	0,1	200
Sulfato (expresso em SO <sub>4</sub> )				<b>300</b>	1	250
Zinco				< LQ	0,01	5

<sup>(1)</sup> LQ= Limite de Quantificação. <sup>(2)</sup> VMP = Valor Máximo Permitido.

**Tabela 18. Comparativo dos Cinco Parâmetros Críticos do Solubilizado das Matérias-primas Constituintes da Areia Verde de Fundição - AVF.**

Parâmetros	AVF	Areia Lavada	Bentonita Natural	Bentonita Ativada	Pó de Carvão
Alumínio	<b>2,98</b>	0,044	<b>11,5</b>	<b>6,59</b>	< LQ
Ferro	<b>11,3</b>	< LQ	<b>1,98</b>	<b>3,15</b>	< LQ
Manganês	0,04	< LQ	0,032	< LQ	<b>0,19</b>
Sódio	104	5,64	31,1	7,28	3,58
Sulfato	220	10	48	4	33

Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

**Tabela 19. Comparativo dos Cinco Parâmetros Críticos do Solubilizado da Areia Convencional, do CAP-20 e de Dois Corpos-de-prova com e sem RAVF.**

Parâmetros	Areia Convencional	CAP-20	Corpo-de-prova sem RAVF	Corpo-de-prova c/RAVF
Alumínio	<b>14,9</b>	0,013	0,025	0,17
Ferro	<b>4,55</b>	< LQ	0,041	< LQ
Manganês	0,052	< LQ	0,025	< LQ
Sódio	0,94	0,35	0,72	5,98
Sulfato	4	< LQ	< LQ	< LQ

Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

**Tabela 20. Comparativo dos Cinco Parâmetros Críticos do Solubilizado de Sete Solos de Bairros de Joinville.**

Parâmetros	Solo Pirabeiraba	Solo Itaum	Solo Iririú	Solo Costa e Silva	Solo Centro	Solo Boehmerwald	Solo Bom Retiro
Alumínio	<b>1,13</b>	<b>16,5</b>	<b>37,1</b>	< LQ	< LQ	<b>0,32</b>	< LQ
Ferro	<b>0,3</b>	<b>4,13</b>	<b>8,97</b>	< LQ	< LQ	0,05	*
Manganês	< LQ	< LQ	< LQ	0,03	< LQ	< LQ	*
Sódio	1,38	0,87	1,19	1,03	23,8	0,01	19
Sulfato	5	2	3	< LQ	< LQ	2	25

Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

Os teores de alumínio e sulfato excedem aos limites permitidos no extrato solubilizado da Norma NBR 10.004 e classificam o RAVF como Classe II A (Tabela 17).

As matérias-primas da AVF: bentonita natural e ativada e o pó de carvão (Tabela 20), assim como a areia convencional de pavimentação (Tabela 18), todas de origem mineral, caso fossem consideradas como resíduos sólidos seriam classificadas como Não Inertes pela norma ABNT NBR 10.004.

A comparação entre os parâmetros críticos do RAVF e os do corpo-de-prova com 15% de RAVF permite afirmar que o ligante asfáltico reduziu a extração de todos os íons medidos (Tabelas 17 e 19).

Conforme observado na Tabela 20, os solos de Joinville possuem alumínio, ferro e manganês, no extrato solubilizado, acima do limite máximo permitido pela NBR 10.004. Se fossem resíduos industriais seriam classificados como Resíduo Classe II A – Não Inerte.

#### **4.9.2. Análise da água de abastecimento público**

Para verificar a origem do sulfato encontrado no ensaio de solubilização do RAVF, foi realizada análise da água utilizada na preparação da AVF da linha EII da Fundação de Blocos, sendo o resultado 25 mg/L. Os parâmetros alumínio, manganês e sódio também foram analisados resultando em 0,04 mg/L; 0,0079 mg/L e 2,28 mg/L respectivamente. Estes teores devem ser interpretados tendo em vista que a água de abastecimento público de Joinville sofre tratamento com sulfato de alumínio, hidróxido de cálcio, fluorsilicato de sódio e poliacrilamida.

Foi realizada análise do solubilizado do RAVF de uma fundição da região de Joinville, que utiliza água de poço artesiano no processo de preparação da AVF, para verificar a influência da água de abastecimento público nos parâmetros de sódio e sulfato. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 21.

Outra vertente deste estudo foi a evaporação de 10.000L de água (evaporação em estufa) utilizada no processo de preparação da AVF da Linha EII da Fundação de Blocos, para obter 8 gramas de material contido na água, para posterior caracterização morfológica e elementar, realizada com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura acoplado a uma sonda EDAX.

O aspecto do material obtido da água de abastecimento é visualizado na Figura 49, sendo que a Figura 49a foi obtida por meio de câmara fotográfica digital Marca KODAC e a Figura 49b por meio do MEV da UDESC.

**Tabela 21. Comparativo do Solubilizado da Fundição X.**

<b>Parâmetros</b>	<b>RAVF * Fundição X</b>	<b>RAVF Tupy</b>
Alumínio	<b>2,23</b>	<b>55,45</b>
Ferro	<b>1,79</b>	<b>20,7</b>
Manganês	<b>&lt; LQ</b>	<b>0,13</b>
Sódio	<b>66,5</b>	<b>210</b>
Sulfato	<b>30</b>	<b>300</b>

\* RAVF de fundição de ferro fundido da região de Joinville.

Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

Foi detectada a presença dos seguintes elementos químicos: oxigênio (40,345%); silício (31,567%); carbono (18,346%); cálcio (6,260%). Outros elementos também foram detectados, porém em menores proporções, como no caso do cloro (1,191%); sódio (0,795%); magnésio (0,464%); alumínio (0,452%); enxofre (0,421%) e flúor (0,159%).

Os teores de sódio, alumínio e sulfato no RAVF excedem os valores máximos permitidos (Tabela 17). A fonte destes parâmetros foi a água de abastecimento urbano utilizada na produção da areia verde de fundição - AVF, que é tratada por sulfato de alumínio, hidróxido de cálcio, fluorsilicato de sódio e policrilamida. Os teores originais destes parâmetros na água de abastecimento não são elevados, contudo como a água é adicionada continuamente na areia de fundição, quando de sua evaporação estes constituintes permanecem. Neste contexto, ao longo do tempo há um aumento da concentração destes parâmetros, atingindo os patamares encontrados.

Este processo é semelhante ao da salinização de solos irrigados com água potável. Os parâmetros ferro e manganês no RAVF são provenientes das matérias-primas utilizadas na preparação da AVF e também da água de abastecimento público.

A análise de difratometria de Raios-X foi realizada para identificar os minerais constituintes deste material. A Figura 49c é visualizado o difratograma do material obtido da água de abastecimento público.

As três fases dominantes são:  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  (silicato de cálcio com estrutura de olivina),  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de cálcio com estrutura de calcita) e NaCl (Halita).

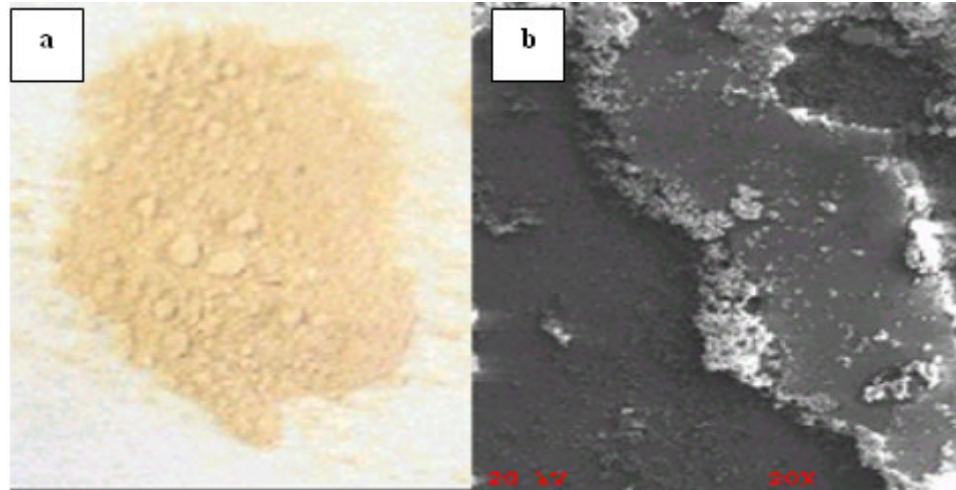


Figura 49a,b. Aspecto do material obtido da água de abastecimento.

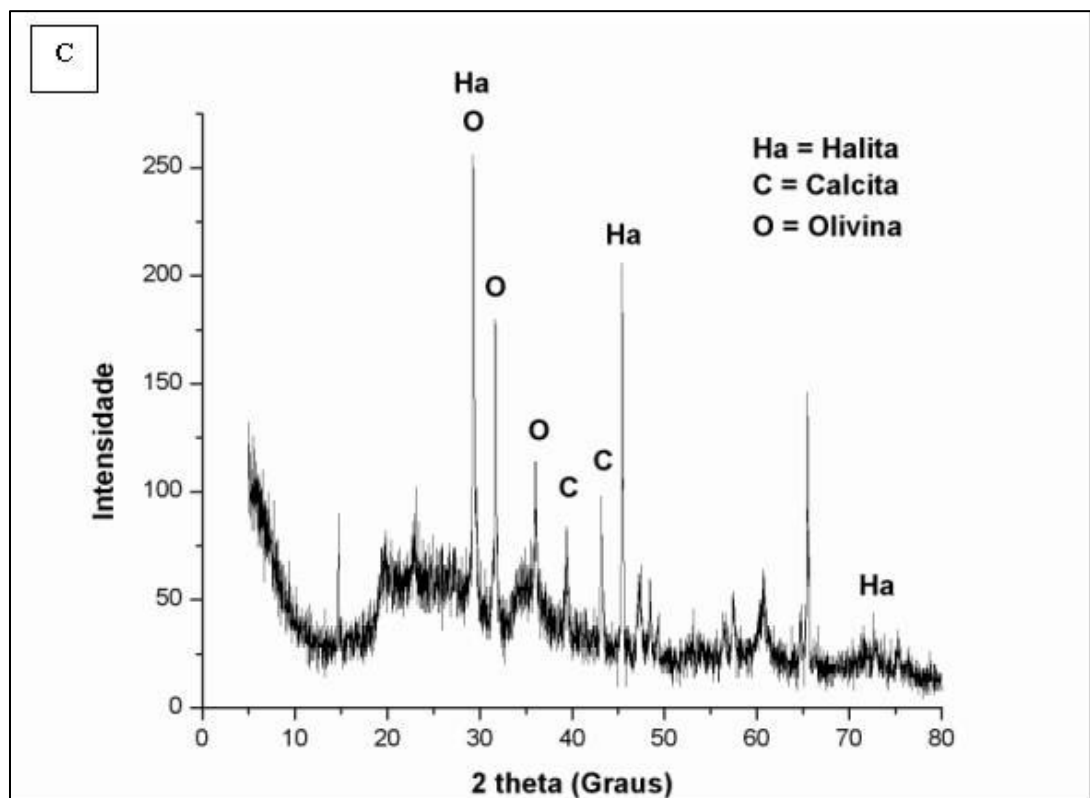


Figura 49c. Difratoograma do material obtido da água de abastecimento.

#### 4.9.3. Análise de interesse ambiental dos corpos-de-prova envelhecidos

O ensaio de envelhecimento em longo prazo é realizado para simular o envelhecimento, que ocorre ao longo da vida em serviço (7 a 10 anos) do pavimento. Foram feitas as análises de lixiviação e solubilização conforme NBR 10.004 (Tabela 22).



**Tabela 22. Comparativo dos Cinco Parâmetros Críticos do Solubilizado dos Corpos-de-prova Envelhecidos.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Corpo-de-prova sem RAVF</b>	<b>Corpo-de-prova com RAVF</b>
<b>Alumínio</b>	<b>0,18</b>	<b>0,25</b>
<b>Ferro</b>	0,1	0,1
<b>Manganês</b>	< LQ	< LQ
<b>Sódio</b>	2,41	13,9
<b>Sulfato</b>	< LQ	13

Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

Conforme os resultados expostos o corpo-de-prova envelhecido contendo 15% de RAVF apresentou o parâmetro alumínio acima do permitido pela norma. Porém, cabe ressaltar que o alumínio extrapolou nas análises dos solubilizados das matérias-primas constituintes da AVF, como também, em alguns solos de Joinville.

#### **4.9.4. Ensaio do Lixiviado e Lixiviado Neutro (CETESB)**

Nesta seção descreve-se a realização do ensaio de lixiviação conforme metodologia explicitada no documento “Decisão de Diretoria da CETESB N°152/2007”.

Conforme se verifica na Tabela 23 todos os parâmetros analisados atendem aos requisitos estabelecidos no Documento de Gerenciamento das Areias Descartadas de Fundação no quesito Lixiviado.

Seguindo os ensaios propostos pela CETESB N°152/2007, realizou-se o ensaio de lixiviado neutro e os resultados estão expostos na Tabela 24. É verificado também que todos os parâmetros atendem as especificações da CETESB N°152/2007.

#### **4.9.5. Ensaio de Toxicidade (*Vibrio fischeri*)**

A metodologia proposta pela CETESB N°152/2007 estabelece que o resíduo areia de fundição será considerado tóxico, quando apresentar resultado superior a 20% da capacidade natatória do microorganismo de referência.

O resultado obtido para o RAVF foi menor que 1% da capacidade natatória do microorganismo *Vibrio fischeri*, concluindo-se que o RAVF não apresenta características de toxicidade.

**Tabela 23. Resultados Lixiviado do RAVF – CETESB N°152/2007.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>VMP <sup>(1)</sup></b>
Arsênio (mg/L As)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição 3111 D	4,100 x 10 <sup>-4</sup>	0,50
Bário (mg/L Ba)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição - 3111E	< 0,20	10,00
Cádmio (mg/L Cd)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição 3111 B	< 0,001	0,10
Chumbo (mg/L Pb)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição - 3111B	< 0,01	0,50
Cromo Total (mg/L Cr)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição 3111 B	< 0,030	0,50
Mercúrio (mg/L Hg)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição 3114 C	<1,000 x 10 <sup>-4</sup>	0,02
Selênio (mg/L Se)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição 3114 C	5,800 x 10 <sup>-3</sup>	0,10
Adição da solução de lixiviação (-)	NBR 10.005	2012,86	-
pH inicial lixiviação (-)	Standard Methods 20	4,94	5,0 - 10,0
pH final lixiviação (-)	Standard Methods 20	5,03	5,0 - 10,0
Volume líquido lixiviação (mL)	NBR 10.005	1900	-
Massa lixiviada (g)	NBR 10.005	100,643	-

<sup>(1)</sup> VMP = Valor Máximo Permitido.

**Tabela 24. Resultados lixiviado neutro do RAVF – CETESB N°152/2007.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>VMP <sup>(1)</sup></b>
Cianetos (mg/L CN)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição 4500 E	0,011	2,0
Cloretos (mg/L Cl)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição - 4500 C	42,54	2500
Cobre (mg/L Cu)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição 3111 B	< 0,005	2,5
Fenóis Totais (mg/L C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> reagem com 4 aminoantipirina	< 0,010	3,0
Ferro Total (mg/L Fe)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição - 3111 B	14,100	15,0
Fluoretos (mg/L)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição - 4500 B	< 0,10	14,0
Manganês (mg/L)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição 3111 D	0,012	0,50
Níquel (mg/L Ni)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição 3111 B	0,011	2,0
Sódio (mg/L Na)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição 3111 B	66,90	2500
Sulfato (mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Método Merck 065 Kit 14791	100,00	2500
Adição da solução de lixiviação (-)	NBR 10.005	1961,95	-
Massa lixiviada (g)	NBR 10.005	98,097	50,000 - 100,000
pH final lixiviação (-)	Standard Methods 20	6,64	-
pH inicial lixiviação (-)	Standard Methods 20	8,42	-
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Edição - 2540 C	1514,0	5000

<sup>(1)</sup> VMP = Valor Máximo Permitido.

#### 4.9.6. Ensaio de Toxicidade (*Daphnia magna*)

Por meio do ensaio de toxicidade aguda, com *Daphnia magna* no RAVF e em corpos-de-prova novos e envelhecidos foi possível observar que os resultados se enquadram com aos da categoria metal-mecânica. Sendo que o corpo-de-prova sem RAVF (0% RAVF) apresentou fator de toxicidade maior que o material contendo RAVF (Tabela 25).

**Tabela 25. Resultados do ensaio de toxicidade aguda com *Daphnia magna*.**

Amostras	Resultado (FT)	VMP <sup>(1)</sup>
RAVF	2	4
Corpo-de-prova c/ 15% RAVF	1	
Corpo-de-prova envelhecido sem RAVF	2	
Corpo de prova envelhecido com 15% RAVF	1	

<sup>(1)</sup>Limites Máximos de Toxicidade Aguda para *Daphnia magna* de efluentes da categoria Metal-mecânica (Portaria N° 017/02 – FATMA de 18/04/2002).

#### 4.10. TRECHO EXPERIMENTAL

Em 2007 foi executado na Rua dos Tenentes na Cidade de Extrema - MG um trecho experimental com revestimento asfáltico tipo CAUQ empregando o ligante tipo CAP 20. Sendo desenvolvido por meio do Convênio Tecnológico acordado entre: Tupy Fundições e Fundação Fagor Ederlan com Departamento Nacional de Infra-estrutura em Transportes – DNIT, Instituto de Pesquisas Rodoviárias-IPR e Instituto Militar de Engenharia – IME. Conforme especificado no Convênio, previa que o desempenho funcional estava sob a responsabilidade do IME e IPR e por isso houve a avaliação de COSTA (2007).

O trecho experimental foi executado pela Prefeitura Municipal de Extrema no período de 09 a 13/04/2007, com o objetivo de obter dados comparativos. O RAVF utilizado foi de procedência da Fundação Fagor Ederlan.

A execução do trecho experimental teve como principal finalidade verificar o desempenho funcional do pavimento, quando este recebe adições de RAVF e o estudo ambiental deste material alternativo.

O IME gentilmente participou da execução da experiência obtida com a construção do trecho experimental para o enriquecimento desta pesquisa, tendo sido possível o acompanhamento da execução do trecho, com a realização de ensaios em laboratório e em campo para a verificação das características funcionais do CAUQ contendo RAVF. Foram realizados ensaios em laboratório e em campo logo após a execução e após seis meses de serviço.

Neste estudo foi feita a comparação entre misturas experimentais com RAVF e uma mistura comparativa com areia convencional, sendo que os dois tipos de mistura foram ensaiados sob as mesmas condições.

Para verificar a resistência mecânica do trecho experimental foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (DNER-ME 138/94), módulo de resiliência de misturas asfálticas (DNER-ME 133/94), todos na temperatura controlada de 25°C, além da caracterização dos materiais empregados na pista estudada.

#### **4.10.1. Caracterização dos agregados utilizados no trecho experimental**

Neste estudo foram empregados agregados de natureza mineral basáltica, sendo a Brita n° 1, procedente da pedreira Basalto V, e o Pedrisco e Pó de pedra da pedreira Basalto II.

Por se tratar de um agregado de boas características físicas e mecânicas, bem como, de uso intensivo na região, este agregado foi escolhido para compor a presente pesquisa.

Os materiais britados foram coletados diretamente dos estoques da pedreira, em diversos pontos para obter uma amostra representativa do material.

Para composição da curva granulométrica do projeto foram selecionadas seis frações: brita 01, pedrisco, pó de pedrisco, RAVF Tupy, RAVF Fagor e areia convencional. As características granulométricas dos agregados graúdos e miúdos são apresentadas na Tabela 26.

Foi observado que o RAVF da Fagor tinha a granulometria menor que o RAVF da Tupy, pois na peneira 0,42 mm o RAVF da Fagor passou 92%, em contrapartida o RAVF da Tupy passou 77% e a areia convencional apresentou uma granulometria maior que os dois resíduos porque na peneira 0,42 mm passou 13%.

#### 4.10.2. Dosagem do CAUQ em laboratório

A dosagem foi realizada no Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, com a utilização do ligante asfáltico CAP 20. Foram adicionados dois diferentes teores de RAVF às misturas asfálticas (CAUQ TUPY com 10 % e CAUQ FAGOR com 8%), comparando a um “traço base” denominado de CAUQ REFERÊNCIA, cujas porcentagens dos materiais foram as seguintes: 20 % de brita 1; 35 % de pedrisco; 35 % de pó de pedrisco e 10 % de Areia Convencional.

Para o CAUQ TUPY foram utilizadas as seguintes porcentagens de materiais: 25 % de brita 1; 30 % de pedrisco; 35 % de pó de pedrisco e 10 % de RAVF.

A curva granulométrica foi escolhida em função da mistura utilizada no trecho experimental adotando-se a Faixa “C”, destinada à camada de rolamento.

A Tabela 27 e Figura 50 demonstram que a composição granulométrica e a curva de distribuição granulométrica contendo o RAVF da Tupy foram enquadradas na Faixa “C” do DNIT, assim como o RAVF da Fagor, de acordo com das análises realizadas (Tabela 27 e Figura 51).

**Tabela 26. Análise granulométrica dos agregados.**

<b>Material</b>	<b>Brita 01</b>	<b>Pedrisco</b>	<b>Pó Pedrisco</b>	<b>RAVF TUPY</b>	<b>RAVF FAGOR</b>	<b>Areia Convencional</b>
76,2 mm: 3”	100	100	100	100	100	100
50,8 mm: 2”	100	100	100	100	100	100
38,1 mm: 1 1/2”	100	100	100	100	100	100
25,4 mm: 1”	100	100	100	100	100	100
19,1 mm: 3/4”	99	100	100	100	100	100
12,7 mm: 1/2”	61	100	100	100	100	100
9,5 mm: 3/8”	18	100	100	100	100	100
4,8 mm: n° 4	1	29	98	100	100	100
2,0 mm: n° 10	1	2	65	100	100	98
0,42 mm: n° 40	1	2	27	77	92	13
0,18 mm: n° 80	1	2	19	17	13	5
0,074 mm: n° 200	1	2	12	4	1	1

Tabela 27. Composição Granulométrica do CAUQ TUPY e FAGOR.

Peneiras	CAUQ TUPY	CAUQ FAGOR	CAUQ REFERÊNCIA	Faixa "C" DNIT (%)	
				Limite Inferior	Limite Superior
19,1 mm: ¾"	100	100	100	100,0	100,0
12,7 mm: ½"	90	90	88,4	85,0	100,0
9,5 mm: 3/8"	80	80	81,3	75,0	100,0
4,8 mm: n° 4	53	53	52,6	50,0	85,0
2,0 mm: n° 10	34	33	34,4	30,0	75,0
0,42 mm: n° 40	18	18	20,2	15,0	40,0
0,18 mm: n° 80	9	9	11,9	8,0	30,0
0,074 mm: n° 200	5	5	6,7	5,0	10,0

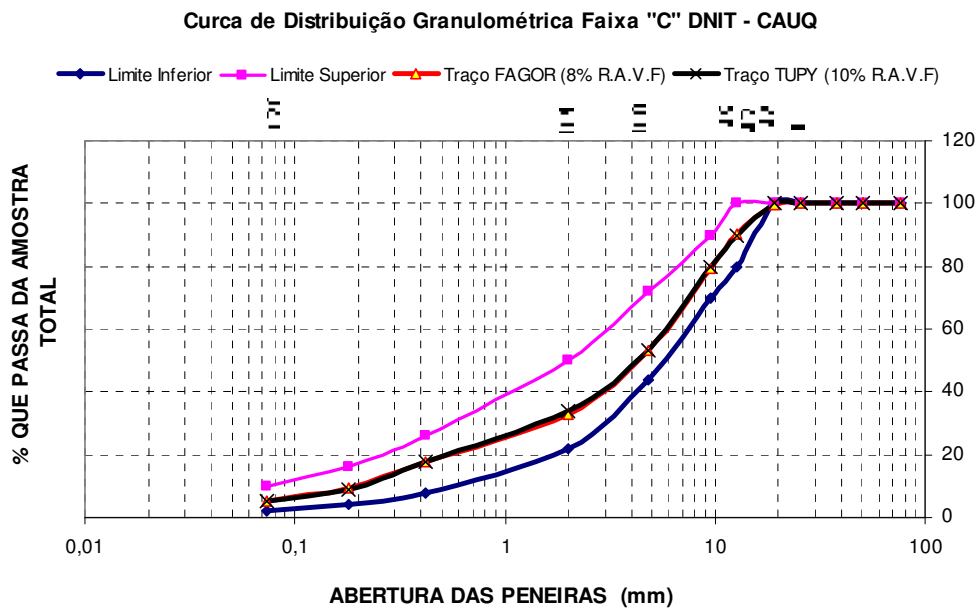
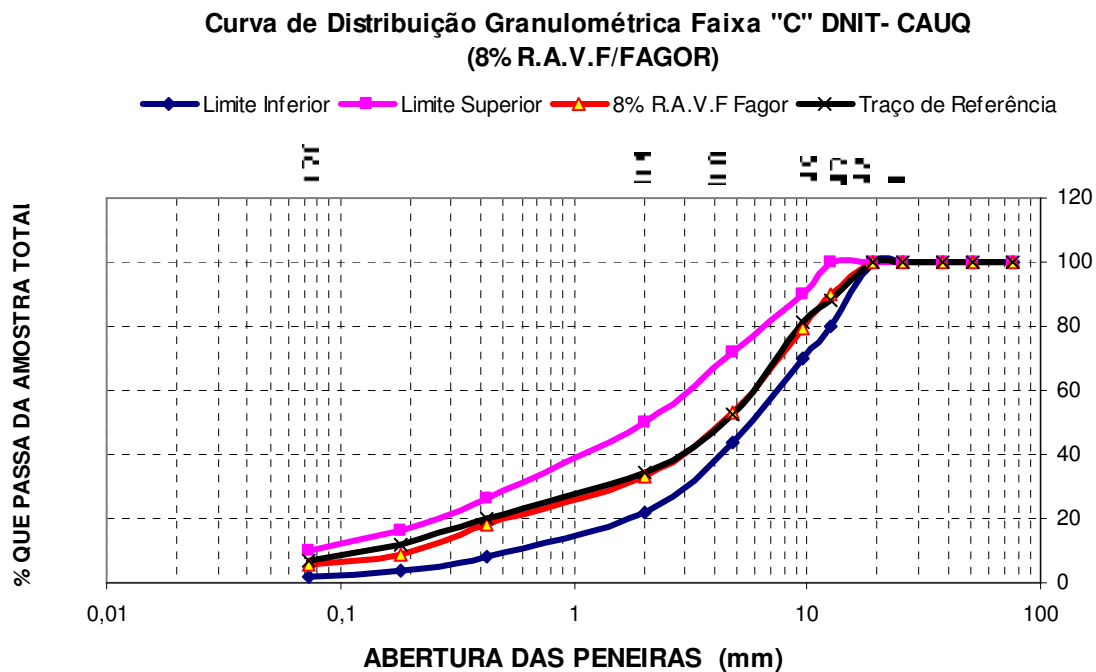


Figura 50. Enquadramento da mistura com RAVF Tupy na Faixa "C" DNIT.



**Figura 51. Enquadramento da mistura com RAVF Fagor na faixa “C” DNIT.**

#### **4.10.3. Caracterização do ligante asfáltico utilizado no trecho experimental**

O cimento asfáltico de petróleo escolhido foi o CAP 20 por ser indicado para aplicação em CAUQ. O material foi fornecido pela Ipiranga Asfaltos localizada em Paulínia – SP, produzido pela refinaria REPLAN. Os resultados da caracterização estão apresentados na Tabela 10.

#### **4.10.4. Elaboração da dosagem em laboratório**

Foram determinados os parâmetros Marshall e o teor ótimo de ligante para a mistura empregando o CAP 20, obtendo-se um teor ótimo de 5,3% (CAUQ TUPY e CAUQ FAGOR). Este teor também foi aplicado na execução do trecho experimental da Rua dos Tenentes. As especificações do DNIT para a camada de revestimento estão na Tabela 28.

Todos os parâmetros Marshall estão dentro da faixa especificada pelo DNIT 031/2006 – ES. A mistura preparada com o RAVF da Fagor apresentou o parâmetro “porcentagem de vazios” muito próximo ao do permitido pela norma.



**Tabela 28. Características das Misturas Obtidas por (COSTA, 2007).**

Características	Revestimento	CAUQ	CAUQ
	Asfáltico	TUPY	FAGOR
Porcentagem de Vazios (%)	3 a 5	3,8	4,8
Relação Betume Vazios (%)	75 - 82	78	77
Estabilidade Mínima (Kgf)	500	916	942
Resistência à Tração (MPa)	0,65	0,92	0,95

#### 4.10.5. Resistência à tração

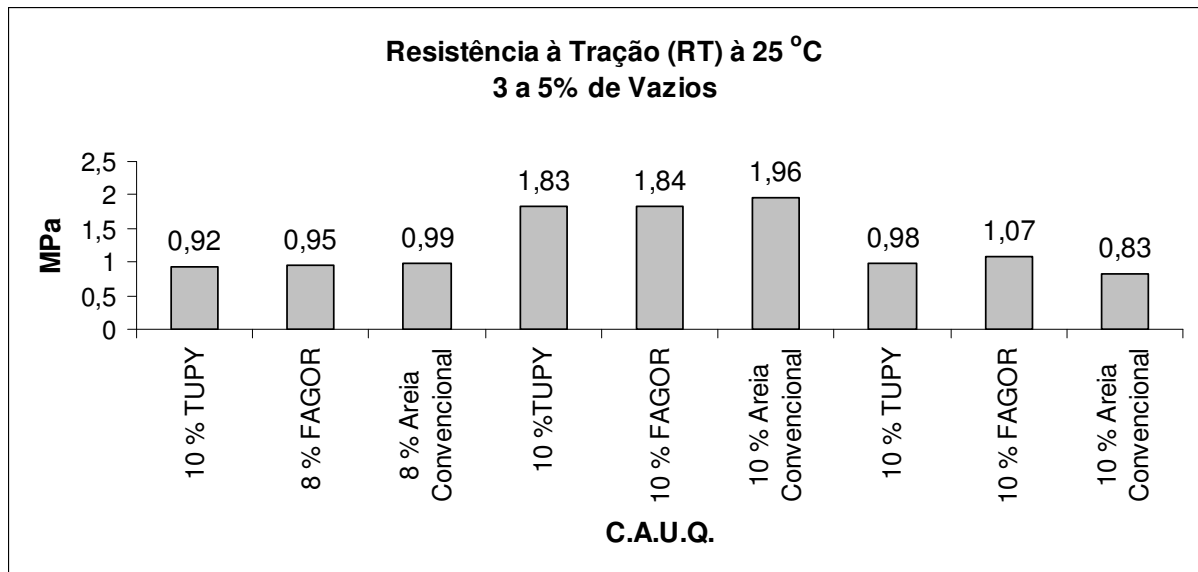
Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) foram realizados em prensa Marshall o laboratório do IPR.

Na Tabela 29 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados em corpos-de-prova confeccionados com 5,3% de ligante asfáltico, para cada mistura estudada. Estes resultados podem ser visualizados na Figura 52.

**Tabela 29. Resistência à tração (RT) obtidas por COSTA (2007).**

Local de Obtenção dos Corpos-de-prova	Corpos-de-prova	RT a 25 °C (MPa)	Desvio Padrão
Moldados em Laboratório	CAUQ (10 % RAVF TUPY)	0,92	0,04
	CAUQ (8 % RAVF FAGOR)	0,95	0,02
	CAUQ (8 % Areia Convencional)	0,99	0,03
Moldados no Trecho Experimental	CAUQ (10 % RAVF TUPY)	1,83	0,05
	CAUQ (10 % RAVF FAGOR)	1,84	0,05
	CAUQ (10 % Areia Convencional)	1,96	0,03
Extraídos do Trecho Experimental	CAUQ (10 % RAVF TUPY)	0,98	0,03
	CAUQ (10 % RAVF FAGOR)	1,07	0,04
	CAUQ (10 % Areia Convencional)	0,83	0,06

Na pesquisa realizada por PINTO (1991) onde foram empregados materiais tradicionais em misturas asfálticas, o mesmo obteve no ensaio de resistência à tração por compressão diametral valores entre 0,657 a 0,941 MPa. As misturas com RAVF apresentaram valores altos, fato também observado por STEFENON, (2003).



**Figura 52. Resistência à tração (RT) das misturas de CAUQ.**

#### **4.10.6. Módulo de resiliência**

A importância do ensaio de resiliência é justificada por ser o mesmo utilizado para o cálculo de tensões e deformações nos pavimentos. Com relação aos resultados dos ensaios de MR (Tabela 30), os valores encontrados foram:

Para os corpos-de-prova moldados em laboratório: Com 10 % RAVF TUPY > Com 8 % Areia Convencional > Com 8 % RAVF FAGOR;

Para os corpos-de-prova moldados no trecho experimental: Com 10 % RAVF TUPY > Com 10 % Areia Convencional > Com 10 % RAVF FAGOR;

Para os corpos-de-prova extraídos do trecho: Com 10 % Areia Convencional > Com 10 % RAVF TUPY > Com 10 % RAVF FAGOR.

Tabela 30. Resultados do módulo de resiliência (MR) das misturas obtidas por COSTA (2007).

Local	Composição do CAUQ	Módulo Resiliente			MR Médio (MPa)
		Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	
Moldados no Laboratório	Com 10 % RAVF TUPY	3533	3500	3506	3935
		4152	3755	3984	
		4643	4056	4187	
	Com 8 % RAVF FAGOR	3178	3336	3040	3216
		3112	3090	2768	
		3462	3514	3442	
	Com 8 % Areia Convencional	3831	3587	3771	3838
		4081	3884	3874	
	Moldados no Trecho	Com 10 % RAVF TUPY	4656	4485	4408
4713			4656	4589	
3840			3941	3914	
Com 10 % RAVF FAGOR		4469	4307	4343	3447
		2170	2323	2145	
		4113	3298	3852	
Com 10 % Areia Convencional		3640	3649	3703	3663
		3918	3991	3821	
		3021	3623	3602	
Extraídos do Trecho	Com 10 % RAVF TUPY	7309	7479	7418	7467
		7263	7298	7252	
		8046	7583	7551	
	Com 10 % RAVF FAGOR	8470	8594	8832	7351
		8030	7493	7065	
		5736	6191	5745	
	Com 10 % Areia Convencional	6969	7030	6896	8171
		9239	9102	9250	
		8698	8297	8055	

A Tabela 31 apresenta as médias dos Módulos de Resiliência (MR) e Resistência à tração (RT) dos corpos-de-prova, tanto os moldados em laboratório como os extraídos do trecho experimental, após 30 dias de abertura ao tráfego comercial. A mistura asfáltica da Tupy apresentou um módulo de resiliência superior ao da FAGOR, conseqüentemente o resultado da relação MR/RT também foi superior.

Os valores correspondentes aos corpos-de-prova de CAUQ dosados no laboratório, conforme foi verificado se mantiveram muito próximos dos valores obtidos das misturas extraídas do trecho experimental, por meio de sonda rotativa.

Os valores encontrados nas misturas contendo RAVF mostraram-se totalmente compatíveis com aqueles usualmente encontrados segundo PINTO, (1991).

As misturas analisadas apresentaram altos valores de MR, possivelmente porque as misturas tenham a flexibilidade necessária para suportar as solicitações do tráfego e resistência para combater as fissuras. Um dos possíveis fatores é que os grãos de RAVF possuem forma e textura diferentes.

**Tabela 31. Média dos MR e RT dos corpos-de-prova do trecho experimental e do laboratório obtidas por COSTA (2007).**

Ensaio	CAUQ TUPY		CAUQ FAGOR		CAUQ sem
	10% RAVF	10% RAVF	8% RAVF	10% RAVF	RAVF
	Moldado em Laboratório	Extraído da Pista após 30 dias	Moldado em Laboratório	Extraído da Pista após 30 dias	Extraído da Pista após 30 dias
MR (MPa)	3987	4494	3179	3575	3673
RT (MPa)	0,92	0,98	0,95	1,07	0,83

Possivelmente, os bons resultados para as misturas contendo RAVF sejam derivados da composição química do resíduo, compostos por elementos como: ferro, cálcio, magnésio e alumínio, que podem melhorar a interação do ligante asfáltico com o agregado.

#### **4.10.7. Estudo de interesse ambiental do trecho experimental**

A análise completa de lixiviação e solubilização do RAVF está exposta na Tabela 19. Conforme os resultados apresentados na Tabela 32, os elementos que ultrapassam os valores máximos permitidos da NBR 10.004 do RAVF da Fagor são alumínio, ferro e manganês. A concentração dos parâmetros alumínio, sódio e sulfato são bem maiores no RAVF da Tupy que no da Fagor sugerindo que estes são influenciados pela salinização do RAVF Tupy com água de abastecimento. Os teores de ferro são parecidos no RAVF de ambas fundições.

**Tabela 32. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do RAVF da FAGOR pela NBR 10.004 de 2004.**

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>
Alumínio				<b>0,45</b>	0,05	0,2
Arsênio	< 0,01	0,005	1	< 0,01	0,005	0,01
Bário	4,80	0,003	70	0,40	0,003	0,7
Cádmio	< LQ	0,03	0,5	< 0,001	0,004	0,005
Chumbo	< LQ	0,2	1	< 0,001	0,003	0,01
Cloretos				83,00	1	250
Cobre				0,31	0,01	2
Cromo Total	0,04	0,08	5	0,05	0,013	0,05
Fenóis totais				< 0,01	0,001	0,01
Ferro				<b>15,45</b>	0,02	0,3
Fluoretos	< 0,20	0,07	150	< 0,20	0,07	1,5
Manganês				<b>1,08</b>	0,02	0,1
Mercurio	< 0,01	0,0002	0,1	< 0,001	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				1,30	0,3	10
Prata	< 0,01	0,05	5	< 0,01	0,01	0,05
Selênio				< 0,01	0,007	0,01
Sódio				92,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO <sub>4</sub> )				104,00	1	250
Zinco				1,02	0,01	5

ND: Não detectado.

Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

<sup>(1)</sup> LQ= Limite de Quantificação.

<sup>(2)</sup> VMP = Valor Máximo Permitido.

#### 4.10.8. Adição de RAVF nas misturas asfálticas do trecho experimental

O corpo-de-prova contendo 10% de RAVF Tupy atendeu todos os requisitos exigidos, sendo, portanto classificado como um material inerte. Na Tabela 33 se encontram os

resultados do ensaio do lixiviado e do solubilizado do corpo-de-prova, contendo 10% de RAVF Tupy.

Os resultados ambientais do CAUQ, com 10% de RAVF da Fagor apresentaram alumínio e ferro acima do permitido conforme se observa na Tabela 34.

Os íons que foram solubilizados do RAVF da Fagor foram Alumínio (0,45 mg/L) e Ferro 15,45 mg/L, porém quando foram adicionados 10 % de RAVF na mistura asfáltica, este apresentou no ensaio de solubilização cerca de 0,25 mg/L de Alumínio e 0,38 mg/L de Ferro e o manganês não foi solubilizado, mostrando que houve uma redução significativa destes íons.

**Tabela 33. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado da amostra de CAUQ com 10% de RAVF da TUPY pela NBR 10.004 (2004).**

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>
Alumínio				0,18	0,05	0,2
Arsênio	< LQ	0,005	1	< LQ	0,005	0,01
Bário	0,15	0,003	70	< LQ	0,003	0,7
Cádmio	< LQ	0,03	0,5	< LQ	0,004	0,005
Chumbo	< LQ	0,2	1	< LQ	0,003	0,01
Cloretos				82,00	1	250
Cobre				< LQ	0,01	2
Cromo	< LQ	0,08	5	< LQ	0,013	0,05
Total						
Fenóis totais				< LQ	0,001	0,01
Ferro				0,23	0,02	0,3
Fluoretos	0,32	0,07	150	0,10	0,07	1,5
Manganês				< LQ	0,02	0,1
Mercurio	< LQ	0,0002	0,1	< LQ	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				< LQ	0,3	10
Prata	< LQ	0,05	5	< LQ	0,01	0,05
Selênio				< LQ	0,007	0,01
Sódio				4,32	0,1	200
Sulfato (expresso em SO <sub>4</sub> )				< LQ	1	250
Zinco				< LQ	0,01	5

ND: Não detectado. <sup>(1)</sup> LQ= Limite de Quantificação. <sup>(2)</sup> VMP = Valor Máximo Permitido.

**Tabela 34. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado da amostra de CAUQ com 10% de RAVF da FAGOR pela NBR 10.004 (2004).**

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>
Alumínio				<b>0,25</b>	0,05	0,2
Arsênio	< 0,01	0,005	1	< 0,01	0,005	0,01
Bário	2,00	0,003	70	0,10	0,003	0,7
Cádmio	0,004	0,03	0,5	< 0,0001	0,004	0,005
Chumbo	0,005	0,2	1	0,003	0,003	0,01
Cloretos				62,00	1	250
Cobre				0,20	0,01	2
Cromo Total	0,03	0,08	5	< 0,01	0,013	0,05
Fenóis totais				< 0,01	0,001	0,01
Ferro				<b>0,38</b>	0,02	0,3
Fluoretos	< 0,20	0,07	150	< 0,20	0,07	1,5
Manganês				0,10	0,02	0,1
Mercurio	< 0,01	0,0002	0,1	< 0,0001	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				0,90	0,3	10
Prata	< 0,01	0,05	5	< 0,01	0,01	0,05
Selênio				< 0,01	0,007	0,01
Sódio				92,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO <sub>4</sub> )				88,5	1	250
Zinco				0,23	0,01	5

ND: Não detectado. <sup>(1)</sup> LQ= Limite de Quantificação. <sup>(2)</sup> VMP = Valor Máximo Permitido.

#### 4.10.9. Análise do percolado do trecho

Foram analisadas as misturas contendo RAVF da Tupy, Fagor e areia convencional e seus resultados são descritos nas Tabelas 35, 36 e 37 respectivamente.

Todas as misturas analisadas apresentaram alumínio e ferro acima do estabelecido para o solubilizado, porém não se pode afirmar que estes íons foram solubilizados somente por influência do RAVF ou da areia convencional.

Pois, a lixiviação envolve alguns fatores como, por exemplo:

Contato das superfícies externas ou internas do material com a água;



Reações químicas complexas influenciadas pela composição da água e seu pH, carbono dissolvido, disponibilidade de oxigênio;

Adsorção superficial dos produtos e transporte da água contendo as espécies lixiviadas para o meio externo.

As prováveis influências nos resultados ambientais do percolado extraído do trecho como a poeira; particulados; chuva e derramamentos; arraste de materiais sólidos e solúveis que caíram sobre o trecho, provenientes de carros ou pelo vento, que podem ter relação com os íons de Alumínio e Ferro e não somente o RAVF.

**Tabela 35. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do percolado do trecho CAUQ com 10% de RAVF da TUPY pela NBR 10.004 (2004).**

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>
Alumínio				<b>1,30</b>	0,05	0,2
Arsênio	ND	0,005	1	ND	0,005	0,01
Bário	2,00	0,003	70	ND	0,003	0,7
Cádmio	ND	0,03	0,5	ND	0,004	0,005
Chumbo	ND	0,2	1	ND	0,003	0,01
Cloretos				85,00	1	250
Cobre				0,66	0,01	2
Cromo Total	0,12	0,08	5	0,12	0,013	0,05
Fenóis totais				ND	0,001	0,01
Ferro				<b>20,16</b>	0,02	0,3
Fluoretos	ND	0,07	150	ND	0,07	1,5
Manganês				ND	0,02	0,1
Mercúrio	ND	0,0002	0,1	ND	0,000 2	0,001
Nitrato (expresso em N)				ND	0,3	10
Prata	ND	0,05	5	ND	0,01	0,05
Selênio				ND	0,007	0,01
Sódio				45	0,1	200
Sulfato (expresso em SO <sub>4</sub> )				96	1	250
Zinco				1,20	0,01	5

ND: Não detectado. <sup>(1)</sup> LQ= Limite de Quantificação. <sup>(2)</sup> VMP = Valor Máximo Permitido.

**Tabela 36. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do percolado do trecho CAUQ com 10% de RAVF da FAGOR pela NBR 10.004 (2004).**

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>
Alumínio				<b>0,95</b>	0,05	0,2
Arsênio	ND	0,005	1	ND	0,005	0,01
Bário	0,80	0,003	70	0,30	0,003	0,7
Cádmio	ND	0,03	0,5	ND	0,004	0,005
Chumbo	ND	0,2	1	ND	0,003	0,01
Cloretos				72,00	1	250
Cobre				0,60	0,01	2
Cromo Total	0,06	0,08	5	0,06	0,013	0,05
Fenóis totais				ND	0,001	0,01
Ferro				<b>34,32</b>	0,02	0,3
Fluoretos	ND	0,07	150	ND	0,07	1,5
Manganês				0,10	0,02	0,1
Mercurio	ND	0,0002	0,1	ND	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				ND	0,3	10
Prata	ND	0,05	5	ND	0,01	0,05
Selênio				ND	0,007	0,01
Sódio				28,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO <sub>4</sub> )				74,00	1	250
Zinco				0,72	0,01	5

ND: Não detectado. <sup>(1)</sup> LQ= Limite de Quantificação. <sup>(2)</sup> VMP = Valor Máximo Permitido.

**Tabela 37. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do percolado do trecho CAUQ com 10% de areia convencional pela NBR 10.004 (2004).**

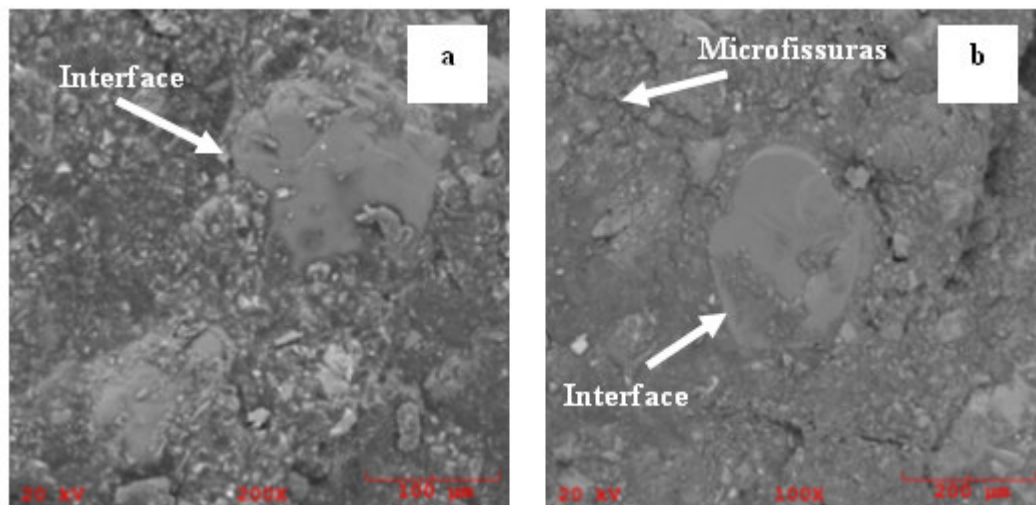
Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>	Resultado	LQ <sup>(1)</sup>	VMP <sup>(2)</sup>
Alumínio				<b>0,72</b>	0,05	0,2
Arsênio	ND	0,005	1	ND	0,005	0,01
Bário	0,80	0,003	70	0,30	0,003	0,7
Cádmio	ND	0,03	0,5	ND	0,004	0,005
Chumbo	ND	0,2	1	ND	0,003	0,01
Cloretos				72,00	1	250
Cobre				0,60	0,01	2
Cromo Total	0,056	0,08	5	0,06	0,013	0,05
Fenóis totais				ND	0,001	0,01
Ferro				<b>16,47</b>	0,02	0,3
Fluoretos	ND	0,07	150	ND	0,07	1,5
Manganês				0,05	0,02	0,1
Mercurio	ND	0,0002	0,1	ND	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				ND	0,3	10
Prata	ND	0,05	5	ND	0,01	0,05
Selênio				ND	0,007	0,01
Sódio				31,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO <sub>4</sub> )				68,00	1	250
Zinco				0,25	0,01	5

ND: Não detectado. <sup>(1)</sup> LQ= Limite de Quantificação. <sup>(2)</sup> VMP = Valor Máximo Permitido.

#### 4.10.10. Microestrutura do corpo-de-prova extraído do trecho

Para verificar a interface agregado/ligante no corpo-de-prova do trecho experimental foi realizado um estudo da microestrutura dos corpos-de-prova

A microestrutura do pavimento do trecho experimental, com 10% de RAVF apresentou uma boa interface entre agregado e ligante. A microestrutura do material com areia usada em pavimentação apresentou microfissuras, ocorridas possivelmente durante o processo de compactação da camada de revestimento asfáltico e também uma boa interface entre o agregado e o ligante (Figura 53).



**Figura 53. Micrografia mostrando a interface entre o agregado e o ligante do material do trecho experimental com 10% de RAVF (a) e a interface entre o agregado e o ligante do material com areia de pavimentação(b)**

## CAPÍTULO 5

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste estudo foi prospectar a viabilidade técnica e ambiental do uso do RAVF na confecção de misturas asfálticas.

Foram realizadas análises de caracterização físico-química para amostras e matérias primas do RAVF, como composição elementar por fluorescência de Raios-X, espectroscopia de infravermelho, difração de Raios-X e análise termogravimétrica.

O estudo de classificação do RAVF segundo a NBR 10.004 para resíduos sólidos demonstrou que de todos os parâmetros no extrato solubilizado, somente cinco (alumínio, ferro, manganês, sódio e sulfato) podem extrapolar os limites máximos. Nenhum dos parâmetros do extrato lixiviado extrapolou os limites, classificando o RAVF como resíduo não perigoso.

Quando o RAVF foi submetido aos ensaios estabelecidos no Procedimento de Gerenciamento de Areia de Fundição da CETESB N°152/2007, o resíduo atendeu todos os requisitos exigidos, podendo ser o RAVF utilizado em concreto asfáltico (CAUQ).

Na preparação da AVF é utilizada água de abastecimento público, sendo que esta água é tratada por sulfato de alumínio, hidróxido de cálcio, fluorsilicato de sódio e poliacrilamida. Estas substâncias acumulam-se na AVF, pois no processo de preparação da AVF adiciona-se água continuamente, porém quando ocorre o vazamento do ferro líquido na caixa de moldagem esta água é evaporada, mas estas substâncias não. Com o tempo há um aumento da concentração destes parâmetros, atingindo os patamares encontrados em um processo semelhante ao da salinização de solos irrigados com água potável.

No estudo da composição elementar por fluorescência de Raios-X foi detectada a influência das matérias-primas: areia lavada, bentonitas, pó de carvão e da água na composição do RAVF, sendo que estas também interferem nos resultados de solubilização, o classificando como Resíduo Classe IIA.

Os estudos de classificação dos corpos-de-prova com RAVF demonstraram que as espécies químicas dos parâmetros críticos foram todas encapsuladas no concreto asfáltico, de tal modo que nenhum deles extrapolou os limites máximos estabelecidos na lei, mesmo quando o corpo-de-prova foi envelhecido e triturado. A única exceção foi o parâmetro

alumínio, que extrapolou ligeiramente o limite máximo no teste de solubilização, realizado no corpo-de-prova envelhecido.

O RAVF e o corpo-de-prova com RAVF não apresentaram toxicidade aguda aos organismos de referência *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri*.

Os ensaios tecnológicos (Marshall, Resistência à tração e Módulo de Resiliência) feitos em laboratório e no trecho experimental demonstraram que o RAVF pode ser incorporado em misturas asfálticas, substituindo o agregado miúdo (atendendo à faixa C do DNIT), sem causar prejuízos à qualidade estrutural do pavimento e até, em alguns aspectos, melhorando o seu desempenho em relação aos agregados convencionais.

As análises ambientais do percolado obtido do trecho não foram significativas, visto que há interferência de vários fatores, como por exemplo, poeira, água da chuva, arraste de materiais dos carros que trafegam sobre o pavimento.

## 5.1. CONCLUSÕES

A pesquisa demonstrou que o encapsulamento dos resíduos com CAP é um processo eficiente para a estabilização dos metais presentes em excesso. As misturas asfálticas contendo RAVF apresentaram propriedades adequadas para a camada de revestimento asfáltico, no que diz respeito aos parâmetros obtidos no ensaio Marshall, resistência à tração e módulo de resiliência.

Diante dos resultados dos ensaios ambientais realizados em corpos-de-prova contendo areia convencional e RAVF, pode ser afirmado que os materiais não apresentam riscos ao meio ambiente.

No entanto, estes ensaios classificam o RAVF como não inerte, ou seja, um resíduo industrial que representa risco ao meio ambiente. Porém, a areia convencional usada em pavimentação apresentou parâmetros acima do permitido pela legislação. Outro fator relevante é que as matérias-primas constituintes do RAVF também apresentaram parâmetros acima do especificado pela norma NBR 10.004. Estes resultados mostram falhas na Norma NBR 10.004 em avaliar o potencial de agressão ao meio ambiente causada por resíduos.

Em contrapartida, por meio dos resultados de classificação de resíduos sólidos realizados nos corpos-de-prova, comprovou-se que a massa asfáltica contendo RAVF, foi classificada como resíduo inerte.

Os resultados das análises ecotoxicológicas indicaram que o RAVF e a massa asfáltica contendo 15% de RAVF não apresentam riscos toxicológicos agudos aos organismos testados.

Foi observado no estudo da interface o bom recobrimento do RAVF pelo CAP-20 coerente com a imobilização dos íons dos parâmetros da norma NBR 10.004.

Quando um resíduo é utilizado como subproduto em outro processo industrial oferece grandes oportunidades para prover o desenvolvimento sustentável, mas necessita de muita pesquisa até que este resíduo seja reaproveitado de forma correta e eficiente.

A interação entre a indústria, universidade e órgãos ambientais é o caminho para equacionar o gerenciamento dos resíduos industriais, tanto pela fonte geradora como para propiciar a mudança cultural para uso e manejo correto dos resíduos com fins de reaproveitamento e a ampliação de investimento privado e público em pesquisas que promovam o desenvolvimento sustentável.

## **5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com base nos resultados expostos neste estudo, seguem as sugestões para futuros trabalhos:

Fazer análise de toxicidade crônica do RAVF e do CAUQ contendo RAVF;

Avaliar a adição do RAVF na composição de material para base, sub-base e reforço do subleito;

Avaliar a adição do RAVF como agregado total e/ou parcial em misturas asfálticas do tipo areia-asfalto.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AL-SUHAIBANIN, A.; MUDAIHEEM, J.; ALFOZAN, F.** Effect of “filler” type and content on properties of asphalt concrete mixes. Effects of aggregates and mineral “filler”s on asphalt mixtures performance. American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1147, p.107-130, 1992.

**AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS.** AASTHO Designation: PP2-00: Standar Practice for Misture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA). Washington, 2000.

**ASPHALT INSTITUTE (MS-4).** The Asphalt Handbook, 1989.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO – ABIFA.** Areias de Fundição de Ferro Descartadas: A Visão da ABIFA. Revista Fundição e Matérias-primas. Edição 78, p. 54 – 61, 2006.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.** Amostragem de Resíduos – Procedimento – NBR 10.007 / 2004. Rio de Janeiro, 2004.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.** Lixiviação de Resíduos – Procedimento – NBR 10.005 / 2004. Rio de Janeiro, 2004.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.** Resíduos Sólidos – Classificação – NBR 10.004/2004. Rio de Janeiro, 2004.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.** Solubilização de Resíduos – Procedimento – NBR 10.006 / 2004. Rio de Janeiro, 2004.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.** Água – Ensaio de Toxicidade Aguda com *Daphnia similis* Claus, 1876 (Cladocera, Crustácea). NBR 12.713. Rio de Janeiro, 1993.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.** Materiais Asfálticos: Determinação do Efeito do Calor e do Ar: Método da Película Delgada. NBR 14736. Rio de Janeiro, 2001.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.** Materiais Betuminosos: Determinação da Viscosidade em Temperatura Elevando Usando um Viscosímetro Rotacional. NBR 15184. Rio de Janeiro, 2004.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.** Misturas Asfálticas: Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. NBR 15087. Rio de Janeiro, 2004.

**BENFELL, Kathy E; BEAMISH, Basil; RODGERS, K.A.** Thermogravimetric analytical procedures for characterizing New Zealand and Eastern Australian coals. *Thermochimica Acta* 286. Elsevier, 1996, pp. 67-74.

**BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa.** Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Petrobrás: ABEDA. Rio de Janeiro, 2007.

**BINA, Paulo; ALVES, José H.; BONIN, André L.; YOSHIMURA, Humberto N.** Metodologia de Análise e Aprovação de Utilização de Rejeitos Industriais na Construção Civil: Estudo de Caso de Uso de Areia de Fundação de Descarte para Pavimentação. Monobeton Soluções Tecnológicas Ltda – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT. São Paulo, 2000.

**BONET, Ivan Iveraldo.** Valorização do Resíduo Areia de Fundação (R.A.F.) Incorporação nas Massas Asfálticas do Tipo C.B.U.Q. Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 127p.

**BONIN, André Luís.** Reutilização da Areia Preta de Fundação na Construção Civil. Congresso de Fundação. São Paulo, p-203-221. Setembro, 1995.

**CAMPOS FILHO, M. P. de.** Solidificação e fundição de metais e suas ligas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.

**CANNON, Fred S.; VOIGT, Robert C.** Non-Incineration Treatment To Reduce Benzene And Voc Emissions From Greensand Systems. Pennsylvania State University. Final Report, 2001, pp 36-41.

**CASTRO, Fernando; VILARINHO, Candida; SOARES, Delfim.** Gestão de Resíduos Industriais por Incorporação em Materiais para Construção Cívil; Valorização de Resíduos; n.1; Abril 2003; pp 11-12; Portugal.

**CHEGATTI, Schirlene.** Aplicação de Resíduos de Fundição em Massa Asfáltica, Cerâmica Vermelha e Fritas Certâmicas. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Dissertação de Mestrado, 2004. 137p.

**COELHO, Antônio Carlos Vieira; SANTOS, Pêrsio de Souza; SANTOS, Helena.** Argilas Especiais: Argilas Quimicamente Modificadas – Uma Revisão. Revista Química Nova, Vol. 30, N° 5, 1282-1294, 2007.

**COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB.** Decisão de Diretoria N° 152/2007/C/E. Procedimentos para Gerenciamento de Areia de Fundição. São Paulo, 2007. 15 p.

**COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB.** Bioensaio de Toxicidade Aguda com Photobacterium Phosphoreum, Sistema Microtox. Método de Ensaio L5.227. São Paulo, 1987.

**COSTA, Clauber.** Misturas Asfálticas Com o uso de Areia de Fundição de Ferro Descartada. 38ª Reunião Anual de Pavimentação 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária 38ª RAPv / 12º ENACOR. Manaus, 2007.

**COUTINHO NETO, B.** Reaproveitamento do Resíduo de Fundição em Misturas Asfálticas. Universidade Federal de São Carlos. Departamento de Transportes. Tese de Doutorado, São Carlos, 2004. 197p.

**CURTIS, C. W., ENSLEY, K.; HEPPS, J.** Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption. Report SHRP-A-341, 1993.

**DANA, J. D.** Manual de Mineralogia, São Paulo: EDUSP, vols. 1 e 2, 1970.

**DELAGE, K. P; BAHIA, Hussain U.; ROMERO, Pedro.** Performance Testing of Hot Mix Asphalt Produced with Recycled Foundry Sand. Paper 01-2844 presented at the 2001 meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, 2001.

**DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.** Ministério dos Transportes, Brasil, ME 083/98 Agregados – Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, 1998, p. 3.

**DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.** Ministério dos Transportes, Brasil, ME 133/94: Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Betuminosas. Rio de Janeiro, 1994.

**DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.** Ministério dos Transportes, Brasil, ME 138/94: Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Rio de Janeiro, 1994.

**DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.** Ministério dos Transportes, Brasil, ME 078/94. Determinação da Adesividade de Agregados Graúdos. Rio de Janeiro, 1994.

**DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.** Ministério dos Transportes, Brasil, ME 079/94. Determinação da Adesividade de Agregados Miúdos. Rio de Janeiro, 1994.

**DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES.** 031 – ES: Pavimentação: Concreto Asfáltico. Rio de Janeiro, 2004.

**DUARTE, I. R. Processo areia verde.** Sociedade Educacional de Santa Catarina - SOCIESC. Joinville, 1996. 32p.

**DUTRA, R. P. S.; PONTES, L. R. A.** Obtenção e Análise de Cerâmicas Porosas com a Incorporação de Produtos Orgânicos ao Corpo Cerâmico. Cerâmica, São Paulo, vol. 48, nº 308, 2002.

**FERREIRA, Gilda Carneiro; DAITX, Elias Carneiro.** A Mineração de Areia Industrial na Região Sul do Brasil. Revista Escola de Minas. Vol. 56, Nº 01, 2003.

**GUESSER, Wilson Luiz.** Estudo sobre as Bentonitas Brasileiras em Areia de Moldagem. Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. São Paulo, 1982.

**GUESSER, W. L.; MASIERO, I; MULLER, M.** Durabilidade de bentonita em areia de moldagem. In: Anais do Congresso Nacional de Fundição. CONAF 93, 1993, p. 45-58.

**GONZÁLES, G.; MIDDEA, A.** Efeito de Resinas e Asfaltenos sobre as Propriedades Superficiais de Partículas de Quartzó, Feldspato e Calcita. Comunicação Técnica SECRES-023/87, PETROBRAS, Rio de Janeiro, Novembro, 1987.

**GOODRICH, J. L., GOODRICH, J. E. e KARI, W. J.** Asphalt composition tests: their application and relation to field performance. Transportation Research Record, vol. 1096, 1985, pp. 146-167.

**GRIM, R.E.** Applied Clay Mineralogy. McGraw-Hill, 1962.

**HILLS, J. F.** The Creep of Asphalt Misces. Journal of the Institute of Petroleum v. 59, n 570, p. 247-262, 1973.

**HUNTER, R. J.** Zeta Potential in Colloid Science, Chapter 6, New York, Academic Press, 1981.

**IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo.** Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos. 6ª ed. Rio de Janeiro, 1999.

**JADA, A; SALOU, M.** Effects of the asphaltene and resin contents of the bitumens on the water-bitumen interface properties. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2002, pp. 185-193.

**JCPDS-ICDD** - International Center for Diffraction Data, June 2001.

**KNIE, J. L.; LOPES, E. W. B.** Testes Ecotoxicológicos: Métodos, técnicas e aplicações. Florianópolis-SC: FATMA/ GTZ, 2004. 289p.

**KONDIC, Voya.** Princípios metalúrgicos de fundição. São Paulo: ed. Polígono, 1973.

**LAMONTAGNE, J.; P. DUMAS; V. MOUILLET; J. KISTER.** Comparison of Fourier Transform (FTIR) Spectroscopy of Different Ageing Techniques: Application to Road Bitumens, Fuel, 2001, v. 80, p. 483-488.

**LEACHING-NET** – [www.leaching.net](http://www.leaching.net)

**LEITE, Leni, F. M.** Estudos Reológicos de Cimentos Asfálticos. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, dezembro, 1990.

**LUCKHAM, P.F.; ROSSI, S.** The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. Advances in Colloid and Interface Science, 82, p.43-92, 1999 .

**LUZ, Adão Benvindo; BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães; OLIVEIRA, Cristiano Honório; ARANHA, Isabele Bulhões.** Caracterização, Ativação e Modificação Superficial de Bentonitas Brasileiras. Comunicação Técnica. Centro de Tecnologia Mineral.Rio de Janeiro, 2004.

**LUZ, Adão Benvindo; SAMPAIO, João Alves.** Bentonita – União Brasileira de Mineração. Comunicação Técnica. Centro de Tecnologia Mineral.Rio de Janeiro, 2002.

**KNIE, J. L. W.; LOPES, E. W. B.** Testes Ecotoxicológicos: Métodos, Técnicas e Aplicações. Florianópolis: FATMA / GTZ, p. 289, 2004.

**KONDIC, Voya.** Princípios metalúrgicos de fundição. São Paulo: ed. Polígono, 1973.

**MARCHEZE, Edmar Saul; MASIERO, Isaías; GUESSER, Wilson Luiz.** Aditivos Carbonáceos e Acabamento Superficial de Peças Fundidas. Metalurgia-ABM, vol. 41, n. 327, 1985, pág. 81-85.

**MARIOTTO, C. L; BONIN, A. L; BARTH, F. R; FRESCHE, A. L. P.** Levantamento e avaliação de tecnologias de regeneração. (Relatório de visitas a usuários e fabricantes de sistemas de regeneração de areias de fundição nos Estados Unidos, na Holanda, da Alemanha, na Suíça e na Itália, efetuadas do período de 2 a 12 de setembro de 1997). 52 p. Associação Brasileira de Fundição – ABIFA. São Paulo, nov. 1997.

**MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira.** Pavimentação: Concreto Asfáltico. Universidade Federal de Juiz de Fora. Notas de Aula. 2007, 17 pág.

**MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira.** Ensaios em Materiais Asfálticos. Universidade Federal de Juiz de Fora. Notas de Aula. 2007, 10 pág.

**MARTINS, Fernanda Machado.** Caracterização Química e Mineralógica de Resíduos Sólidos Minerais do Estado do Paraná. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Química. Dissertação de Mestrado. 158p. 2006.

**MILLER, E.; BAHIA, H.; KHATRI, A.; WINTER, M.** Utilization of Foundry Sand in Hot Mix Asphalt. University of Wisconsin at Madison, July 1998. Final Report submitted to University-Industry Relationships.

**MINCRYST-** Crystallographic and Crystallochemical Database for Mineral and their Structural Analogues. Available at <http://database.iem.ac.ru/mincryst/index.php>

**MURGICH, J., RODRIGUEZ, J. e ARAY, Y.** Molecular recognition and molecular mechanics of micelles of some model asphaltenes and resins. Energy and Fuels, vol. 10,1996, pp. 68-76.

**MURRAY, H. H.** Diagnostic test for evaluation of kaolin physical properties, Acta Mineralogica Petrographica, vol. 24, 1980, pp. 67-77.

**PABLOS, Javier Mazariegos.** Utilização do resíduo sólido gerado pelo descarte em matriz de cimento. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Paulo – USP, 1996.

**PERNYESZI, T., PATZKÓ, A., BERKESI, O. e DÉKÁNY, I.** Asphaltene adsorption on clay and crude oil reservoir rocks. *Colloids and Surfaces A: physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 137, 1998, pp. 373-384.

**PEREIRA, Aerton.** Estudo da viabilidade técnica e ambiental da incorporação de resíduo de areia de fundição em matriz asfáltica. Dissertação de Mestrado. Universidade Regional de Blumenau – FURB, 2004.

**PEREIRA, Raquel Luísa.** Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas. Relatório de doutorado apresentado ao Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas. UFPR, 2005.

**PERINI, Paulo Roberto.** Fundição. Apostila do Curso Técnico Mecânico. Escola Técnica Federal de Santa Catarina:1986.

**PINTO, Salomão.** Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

**REINERT, M. I.** Areias de moldagem verde. Sociedade Educacional de Santa Catarina - SOCIESC. Joinville, 1996.

**RIBEIRO, Roberto Carlos da Conceição.** Relação entre a Interação Asfalto/Brita e a Resistência do Pavimento Asfáltico. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química. Tese de Doutorado, 2006. 222 p.

**ROBERTS, F. L.; Kandhal, P. S. e Brown, E. R.; Lee D. Y. e Kennedy T. W.** Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. NAPA Research and Education Foundation, Lanham, Maryland, 1996, 2 edição. NCAT.

**RODRIGUES, Néborá Liz Vendramin Brasil.** Testes de Toxicidade Aguda Através de Bioensaios no Extrato Solubilizado dos Resíduos Classe II A – Não Inertes E Classe II B – Inertes. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

**SALES, Luis Fernando Pedroso; FARIA, Patrícia de Oliveira.** Origem e Formação dos Solos. Curso de Engenharia Civil. Universidade do Vale de Itajaí. Apostila de aula. 7 pág, 2003.

**SCHULZ, Marco Aurélio.** Valorização de Resíduos Sólidos Provenientes da Indústria de Fundição: Estudo na Produção de Artefatos de Concreto para Construção civil. Universidade

da Região de Joinville. Monografia de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental. 126 pag. 2005.

**SCOTT, Andrew C.** Coal and Coal-bearing Strata: Recent Advances. Imprenta London: The Geological Society, 1993.

**SHELL.** The Shell Bitumen Handbook. 5 Ed. Cambridge, 2003.

**SHRP – Strategic Highway Research Program.** National Research Council, Washington, DC, 1993.

**SILVA, Tatiane.** Comparativo Entre os Regulamentos Existentes para Reutilização dos Resíduos de Fundição. Universidade Federal de Santa Catarina. Monografia de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária. Florianópolis, 2007.

**SOLID WASTE.** Method 9045D-Soil and Waste pH, revision 4, november 2004.

**STEFENON, Fernando.** Incorporação de Resíduos Industriais em Concreto Betuminoso Usinado à Quente. Mestrado Profissional em Engenharia. Universidade de Caxias do Sul, 2003, 101p.

**STUMM, W.** Chemistry of the Solid-Water Interface. John Wiley & Sons, Inc., 428p, 1992.

**TRICHÊS, Glicério.** Comportamento dos Materiais Empregados na Pavimentação. Universidade Federal de Santa Catarina. Apostila de Aula. 2004, 391 p.

**VINHA, A. M.** CAP-DOP Agente Melhorador de Adesividade, Produtos Asfálticos Aplicáveis em Pavimentação Rodoviária. Petrobrás Distribuidora S.A., BR Asfaltos, 1975, p. 8.

**WILSON, M.J.** Clay Mineralogy: Spectroscopic And Chemical Determinative Methods, first ed., Champman & Hall, London, 1994.

**YEN, T. F.** Multiple structural orders of asphaltenes. Asphaltenes and Asphalts, vol. 1, Elsevier, Amsterdam, 1994, pp. 111-123.