



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

Joni Fusinato

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-AMBIENTAL PARA
INCORPORAÇÃO DA ESCÓRIA FÉRRICA NA
PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA COMO AGREGADO MIÚDO**

Dissertação de Mestrado

FLORIANÓPOLIS

2004

JONI FUSINATO

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-AMBIENTAL PARA
INCORPORAÇÃO DA ESCÓRIA FÉRRICA NA
PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA COMO AGREGADO MIÚDO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de
Produção da Universidade Federal de Santa
Catarina como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
de Produção.

Orientador: Prof. Harrysson Luiz da Silva, Dr.

FLORIANÓPOLIS

2004

JONI FUSINATO

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-AMBIENTAL PARA
INCORPORAÇÃO DA ESCÓRIA FÉRRICA NA PAVIMENTAÇÃO
ASFÁLTICA COMO AGREGADO MIÚDO**

Esta Dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção** no **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção** da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 27 de fevereiro de 2004.

Prof. Edson Pacheco Paladini, Dr.
Coordenador

Prof. Harrysson Luiz da Silva, Dr.
Orientador

Banca Examinadora

Prof. Adriana de Medeiros, Dr^a.

Prof. Carlos Henrique Lemos Soares, Dr.

*Dedico aos meus pais, Valdir (in memoriam) e
Realdina, pelo apoio incondicional, incentivo,
compreensão e dedicação permanente em minha
vida.*

AGRADECIMENTOS

Um trabalho técnico-científico é, cada vez mais, uma obra coletiva. Esta dissertação não seria possível sem o auxílio do meu orientador Doutor Harrysson Luiz da Silva e amigos com os quais tive o privilégio de conviver.

Gostaria, no entanto, de destacar algumas pessoas cujo auxílio foi primordial:

Ao Doutor Roland Luiz Pizolatti pela colaboração e apoio dado para que a pesquisa fosse realizada nesta Instituição, assim como pela sugestão do orientador.

À NTA - Novas Técnicas de Asfaltos e Prefeitura Municipal de Joinville – PMJ - pela doação dos materiais relativos ao asfalto e pelo fornecimento de laboratórios para executá-los, bem como, os laboratoristas Luiz Francisco da Silva e Mário Alves, que orientaram a execução dos ensaios relativos à pavimentação e em especial, à solidariedade e a competência do Engenheiro Fernando José Camacho, que auxiliou de forma significativa na realização da maioria dos ensaios e interpretação dos resultados obtidos.

A Britagem Vogelsanger, em especial ao Sr. Mário Vogelsanger, que forneceu equipamentos para britagem do resíduo, assim como os agregados necessários para a elaboração dos corpos de prova.

A Empresa Brasileira de Compressores - Embraco Fundação - pelo fornecimento da escória férrica e pelo patrocínio dos ensaios de caracterização do resíduo, em especial o Sr. José Cambraia de O. Maurício pelo acompanhamento e apoio dado durante a realização deste trabalho.

À SOCIESC pelo apoio em relação à liberação de parte do meu horário de trabalho durante a realização dos créditos no mestrado, e ao uso dos laboratórios para execução de parte dos ensaios.

A todos os funcionários da SOCIESC que tiveram alguma participação direta ou indireta no trabalho. Em especial aos colegas Aerton, Rosineide e Inês pela orientação teórica e inspiração para realizar esta pesquisa e a Dilarimar, que soube entender as ausências que se faziam necessárias para a realização dos ensaios.

Ao meu amigo Osvaldo pelo incentivo, companheirismo e acolhida sem os quais a tarefa teria se tornado mais árdua.

As minhas novas amigas da UFSC, Ester e Márcia, pela simpatia e pelo incentivo nas atividades realizadas.

À Universidade Federal de Santa Catarina, professores e servidores técnico-administrativos do Departamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, pela oportunidade de estudar nesta instituição de ensino gratuita e pelo acolhimento recebido.

A todos os que colaboraram direta ou indiretamente, registro aqui meu agradecimento.

RESUMO

FUSINATO, Joni. **Estudo da viabilidade técnico-ambiental para incorporação da escória férrea na pavimentação asfáltica como agregado miúdo**. 2004. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

A crescente geração de resíduos e os obstáculos que o homem tem encontrado para lidar com ele, vem criando a necessidade da realização de estudos com vistas a melhorar o ciclo produtivo e adequar sua destinação. Neste sentido, a reciclagem se apresenta como uma boa alternativa. Em razão disso, nesta pesquisa é estudada a possibilidade de reciclagem da escória de ferro, partindo-se da hipótese que é viável sua utilização como agregado miúdo para pavimentação, na mistura para concreto betuminoso usinado a quente. É estudada uma composição de agregados com diferentes teores de betume, para encontrar os parâmetros que atendam aos estabelecidos pela norma DNER 313/97. A análise dos resultados permite concluir que a composição com teor ótimo de betume em 5,5% atende aos requisitos da norma. Também foram verificadas a caracterização e a classificação ambiental, tanto do resíduo, quanto das misturas de asfalto com e sem escória, conforme NBR 10004. O resíduo apresenta no extrato solubilizado, teores elevados de ferro e manganês. Quando usado no pavimento, o extrato solubilizado apresenta teores elevados de dureza e fluoreto. No asfalto sem escória, verifica-se a presença de fenol e fluoreto acima do estabelecido por norma. A presença de fluoreto não está diretamente relacionada ao resíduo, mas sim, aos componentes da mistura asfáltica, cabendo aos órgãos ambientais validar, ou não, o seu uso.

Palavras-chave: Pavimento betuminoso, reciclagem, agregado de escória férrea.

ABSTRACT

FUSINATO, Joni. **Estudo da viabilidade técnico-ambiental para incorporação da escória férrea na pavimentação asfáltica como agregado miúdo**. 2004. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

The growing rate of waste and the great many drawbacks that man has come about in dealing with it has brought about the need in carrying out studies that focus on how to recycle it and on how to dispose of it in an appropriate destination. Due to this, recycling waste is a good option as well as a solution for making a safer environment. Therefore this study shows the possibility of recycling steel slag. This study arose from the hypothesis that the use of steel slag is viable as fine aggregate for Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures. The study deals with a composition of aggregates that differ in proportions of bitumen in order to find the parameters which meet DNER 313/97 standard. The analysis of the results shows that 5,5% composition with fine proportions of the bitumen meet the requirements of this standard. This study has also verified the environmental characterization and classification as well as in the waste as in the mixture for road pavement with/without steel slag according to NBR 10004 standard. The waste presents elevated proportions of iron and manganese in solubilized extract. When used in paving mixtures the solubilized extract presents elevated proportions in hardness and fluoride. In paving mixtures without waste the rate of phenol and fluoride are above the rate allowed by NBR 10004 standard. The presence of fluoride is not directly related to the waste, but actually related to the pavement mixture's components. The use or not of this material as fine aggregate depends upon receiving approval from environmental agencies and/or laws which allow to do so.

Key Words: Bituminous paving mixtures, recycling, steel slag aggregate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Design e perspectiva da pesquisa	27
Figura 2: Representação esquemática do teste de estabilidade na prensa Marshall	89
Figura 3: Representação esquemática do teste de fluência na prensa Marshall	90
<i>Figura 4: Análise gráfica de parâmetros para determinação do teor ótimo de Betume</i>	<i>111</i>

LISTA DE FOTOS

Foto 1: Carga do britador primário com 4 toneladas de escória.....	74
Foto 2: Entrada da escória no britador para redução do diâmetro	74
Foto 3: Britagem da escória e separação dos resíduos	75
Foto 4: Resíduos encontrados após a britagem. Nota-se a presença de grumos de ferro e pedaços de madeira	76
Foto 5: Escória granulada após a britagem	76
Foto 6: Retirada dos agregados da estufa, aquecidos a 150 °C, para mistura com ligante	84
Foto 7: Preparação da mistura dos agregados com ligante a 150 °C	84
Foto 8: Resfriamento dos corpos de prova	85
Foto 9: Retirada dos corpos de prova após resfriamento	85
Foto 10: Corpos de prova preparados e identificados com os respectivos teores de ligante	86
Foto 11: Preparação dos corpos de prova em banho-maria	91
Foto 12: Montagem do dispositivo para o ensaio Marshall	92
Foto 13: Prensa utilizada para ensaio Marshall (estabilidade e fluência).....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação granulométrica da escória férrica	78
Quadro 2: Densidades dos agregados e da mistura	88
Quadro3: Resultados dos ensaios realizados com a escória férrica.....	100
Quadro 4 : Análise do solubilizado da escória férrica	101
Quadro 5: Teste de lixiviação da mistura de asfalto com escória	103
Quadro 6: Análise do solubilizado da mistura de asfalto com escória	104
Quadro 7: Teste de lixiviação da mistura de asfalto sem escória	106
Quadro 8: Análise do Solubilizado da mistura de asfalto sem escória	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição das escórias de alto-forno	34
Tabela 2: Composição química básica das escórias LD geradas em alguns países	44
Tabela 3: Composição química básica das escórias de aciaria de fornos elétricos geradas em alguns países	45
Tabela 4: Concreto asfáltico: mistura a quente e densa	67
Tabela 5: Classificação granulométrica dos agregados 3/4 “a 3/8” e 3/8 “a fundo”	79
Tabela 6: Ensaio do equivalente de areia da mistura	80
Tabela 7: Distribuição percentual nas peneiras dos agregados e da escória de acordo com estudo granulométrico para enquadramento na Faixa C.....	81
Tabela 8: Distribuição da massa nas peneiras dos agregados e da escória de acordo com estudo granulométrico para enquadramento na Faixa C	81
Tabela 9: Composição final dos corpos de prova para os estudos Marshall da mistura de agregados e CAP (DNER-ME 107/94)	83
Tabela 10: Valores da estabilidade e fluência em função do percentual de ligante.....	91
Tabela 11: Densidade teórica máxima em função do ligante.....	94
Tabela 12: Densidade aparente em função do ligante	95
Tabela 13: Percentagem de vazios da mistura (% V_v) em função do ligante.....	96
Tabela 14: Percentagem de vazios do agregado mineral (%VAM) em função do ligante.....	97
Tabela 15: Relação Betume – Vazios em função do ligante.....	98

Tabela 16: Distribuição percentual dos agregados	108
Tabela 17: Composição da mistura dos corpos de prova	109
Tabela 18: Determinação do teor ótimo de betume	112
Tabela 19: Comparativo entre o traço encontrado e a especificação do DNER	113

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Concreto Asfáltico
CAF	Cimento de Alto-Forno
CAN	Cimento Asfáltico Natural ou Nativo
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COSIPA	Companhia Siderúrgica Paulista
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
EMBRACO	Empresa Brasileira de Compressores
FATMA	Fundação de Amparo a Tecnologia e Meio Ambiente
GANAA	Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
LD	Linz e Donawitz
MB	Macadame Betuminoso
NORIE	Núcleo Orientado para Inovação da Edificação
NTA	Novas Técnicas de Asfaltos
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
PMF	Pré-Misturado a Frio
PMJ	Prefeitura Municipal de Joinville
RILEM	Réunion International des Laboratoires d'Essais et Matériaux
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente

SOCIESC	Sociedade Educacional de Santa Catarina
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial Simples
TST	Tratamento Superficial Triplo
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Apresentação do tema	18
1.2 Problemática	21
1.3 Objetivos	22
1.3.1 Objetivo geral.....	22
1.3.2 Objetivos específicos	22
1.4 Descrição do objeto da pesquisa	23
1.5 Justificativa e motivação	24
1.6 Limitações do trabalho	26
1.7 Concepção da pesquisa	27
1.8 Estrutura do trabalho	28
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 Escórias siderúrgicas e sua utilização na construção civil	29
2.1.1 Escórias de alto-forno	32
2.1.1.1 Composição química das escórias de alto-forno.....	34
2.1.1.2 Utilização da escória de alto-forno na construção civil.....	35
2.1.1.3 Utilização da escória de alto-forno como adição e fabricação do cimento	35
2.1.1.4 Utilização das escórias de alto-forno como agregado.....	38
2.1.2 Escórias de aciaria.....	44
2.1.2.1 Utilização de escória de aciaria na construção civil	46
2.2 Alto forno utilizado para a fusão do ferro	49
2.3 Legislação Ambiental básica aplicável a resíduos sólidos	50

2.4 Conceito de pavimento	56
2.4.1 Definição de material betuminoso	57
2.4.2 A utilização do asfalto através da História	58
2.4.3 Cimentos Asfálticos	60
2.4.3.1 Cimento Asfáltico Natural (CAN).....	61
2.4.3.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	61
2.4.4 Pré-misturados	63
2.4.4.1 Pré-misturados a quente.....	64
2.4.4.2 Pré-misturados a frio.....	65
2.4.4.3 Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).....	65
2.4.5 Camadas do pavimento	67
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	70
3.1 Materiais	72
3.2 Fases do estudo	73
3.2.1 Fase preliminar: preparação da amostra de escória férrica	73
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	77
4.1 Fase 1: Ensaio dos agregados - Resultados	77
4.1.1 Classificação granulométrica	77
4.2 Fase 2: Composição da mistura de agregados	79
4.3 Fase 3: Determinação de densidade, estabilidade e fluência	86
4.3.1 Determinação das densidades dos agregados graúdos, miúdos e finamente pulverizados.....	87
4.3.2 Determinação da estabilidade e fluência	88
4.3.3 Determinação do teor ótimo de betume (ligante)	93
4.4 Caracterização da Escória Férrica <i>in natura</i>	98

4.5 Estudo da viabilidade técnica	108
4.5.1 Classificação granulométrica da escória.....	108
4.5.2 Composição da mistura	109
4.5.3 Determinação do equivalente de areia.....	109
4.5.4 Determinação do teor ótimo de betume (ligante)	110
4.6 Estudo da viabilidade ambiental	113
4.6.1 Análise do risco de contaminação ambiental do pavimento com adição de escória férrica dos fornos de indução.....	113
4.6.2 Resíduo <i>in natura</i>	114
4.6.3 Mistura do asfalto com escória	115
4.6.4 Mistura do asfalto sem escória	115
4.6.5 Comparativo entre mistura do asfalto com e sem escória	116
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	117
5.1 Considerações	117
5.2 Recomendações	119
REFERÊNCIAS	121
APÊNDICES	128
ANEXOS	152

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema

A questão ambiental, particularmente desde o final da década de 80, do século passado, tem mobilizado a opinião pública e vem sendo discutida em foros nacionais e internacionais de grande repercussão, assumindo um papel importante na sociedade contemporânea.

O conceito de sustentabilidade, como sendo o melhor aproveitamento das matérias-primas, o reaproveitamento de resíduos e a disposição adequada dos que estão impróprios para uso, passou a ser entendido como uma alternativa plausível à degradação ambiental. A proteção do solo e água, a limitação de geração de resíduos e a sua reutilização são itens chave no conceito do chamado “Desenvolvimento Sustentável¹”. Este conceito foi criado em março de 1991 pela European Commission Directive 91/156/EEC (PERA, 1996).

Muitas empresas vêm investindo cada vez mais em equipamentos e formação de quadros técnicos para eliminar a “cultura do desperdício” e consolidar a cultura da redução de perdas, reciclagem e reutilização dos resíduos. Não só porque os resíduos provocam danos ambientais negativos, como também a sua redução e aproveitamento podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos, implicando normalmente em menor dispêndio econômico.

Outro aspecto importante dentro do contexto ambiental é a legislação, que estabelece critérios para que a produção não venha provocar danos significativos ao meio ambiente. Muitos países têm, cada vez mais, exigido das indústrias uma

¹ John (2000, p. 12) apresenta uma discussão aprofundada deste conceito.

adequação dos processos produtivos às diretrizes básicas do controle ambiental. A União Européia, importantes organizações não governamentais e renomadas instituições científicas vêm conjuntamente, elaborando mecanismos de certificação da qualidade ambiental dos produtos comercializados na Europa. Deste modo, cabe aos países aprimorarem suas práticas de gestão ambiental, de modo a garantir a certificação de seus produtos e serviços junto às normas internacionais consolidadas na ISO 14000, que pretende conciliar os procedimentos aplicáveis mundialmente, com o objetivo de estabelecer requisitos fundamentais das boas práticas de gerenciamento ambiental.

Barroso (1995) afirma que muitos especialistas consideram a legislação brasileira das melhores e mais modernas do mundo. Em 1994 foi criado, no âmbito da ABNT, o Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANA) (1994), formado por profissionais de diversas áreas, cujo objetivo é avaliar os impactos da ISO 14000 sobre as atividades brasileiras e propor alternativas que atendam aos interesses nacionais, considerando os preceitos de conservação e recuperação ambiental.

A redução de emissão de resíduos é uma meta. Mas existe, em vários processos produtivos, apesar do grande esforço dos profissionais envolvidos, a impossibilidade de eliminá-los totalmente.

Uma alternativa para o problema de geração de resíduos seria a sua reciclagem, que possibilita a conservação de recursos naturais e permite uma economia de energia, sobretudo na área de construção civil. De acordo com Sjostrom (apud JOHN, 2000), a construção civil consome entre 14% a 50% dos recursos naturais que são extraídos na Terra. Um bom exemplo é a substituição de parte do clínquer² por cinzas volantes e escórias possibilitando uma redução de 28%

² Calcário e silicato semifundidos e aglutinados de que se obtém o cimento por moagem.

no consumo de combustível na indústria cimenteira (YAMAMOTO et al apud JOHN, 2000).

Muitas instituições públicas e privadas no mundo inteiro têm desenvolvido estudos com vistas à utilização de resíduos. Cada vez mais vem crescendo o número de conferências, seminários e *workshopp*, cujo tema principal é a reciclagem de resíduos, a exemplo da “*International Conference on Solid Waste Technology and Management*”, nos Estados Unidos; “*International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology*”, no Canadá; “*Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil*”, em São Paulo; dentre outros. Também tem se verificado um grande número de artigos publicados sobre este tema em periódicos de circulação internacional como *ACI Materials Journal*, *Cement and Concrete Research*; *Magazine of Concrete Research*, dentre outros. Dentro deste contexto foi desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), esta dissertação de mestrado, visando investigar a utilização da escória férrica como agregado miúdo para pavimentação. A escória de ferro estudada é um resíduo do processo de fusão do ferro em fornos à indução, em Joinville, Santa Catarina.

No parque industrial joinvillense há aproximadamente 120 empresas que trabalham com a fusão do ferro, sendo algumas conhecidas tanto nacional quanto internacionalmente. Dentre muitas pode-se destacar: Fundição Tupy, Embraco Fundição, Wetzels e Schulz.

Estima-se que em Joinville são fundidas aproximadamente 450 mil toneladas de “peças boas” (peças comercializadas) por ano. Isto equivale a aproximadamente 735 mil toneladas de metal líquido. Uma fundição que utiliza fornos à indução produz aproximadamente de 8 a 10 kg de escória por tonelada de

metal líquido produzido (MANSKE, 2003) ou seja, temos uma produção de escória estimada em 7,35 mil toneladas ano, excluindo-se o passivo ambiental, uma vez que esta atividade vem sendo exercida desde 1926, quando a cidade já contava com 18 fundições e oficinas mecânicas (TERNES, 1986).

Uma parte significativa desta escória está sendo depositada em aterro industrial (os dados não foram disponibilizados pela empresa que administra o aterro industrial, sob sigilo de contrato) ou em pátios e terrenos próximos as empresas. Por outro lado, a malha viária da cidade ainda é constituída, em grande parte, por ruas calçadas com paralelepípedos ou, sem calçamento, apesar do esforço que a Prefeitura Municipal vem fazendo para a sua pavimentação.

Dentro deste enfoque, ocorre a possibilidade de se iniciar um estudo para verificar se a escória oriunda dos fornos à indução reúne as propriedades que a tornam possível de ser utilizada como agregado miúdo na composição do asfalto para pavimentação de ruas, dando-lhe assim, uma destinação final, com possibilidade de redução de custo para as empresas fundidoras, que devem dar uma destinação adequada ao material, com possível redução do volume depositado em aterro. Daí a relevância desta pesquisa.

1.2 Problemática

Fica evidente a necessidade de estudos para verificar se há possibilidade de reciclar este material, possibilitando assim o desenvolvimento de técnica que auxilie as empresas fundidoras a agregar valor ao resíduo, bem como para

disponibilizar às empresas de pavimentação da região, uma fonte complementar de agregados às já existentes.

Partindo do exposto acima, podemos formular as seguintes proposições:

1. Há possibilidade técnica e ambiental para incorporar a escória de ferro dos fornos à indução como agregado miúdo à pavimentação?
2. Se for possível a incorporação deste resíduo, o volume a ser reciclado pode reduzir o passivo ambiental e agregar valor a este produto?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

- ❖ Verificar a viabilidade técnico-ambiental da utilização da escória férrica proveniente dos fornos à indução na pavimentação asfáltica, como agregado miúdo.

1.3.2 Objetivos específicos

Pretende-se, também, a fim de alcançar o objetivo geral, atingir os seguintes objetivos específicos:

- ❖ Caracterizar a escória de ferro, para definir possíveis aplicações na construção civil;

- ❖ Definir as aplicações a serem estudadas para a escória de ferro, levando em consideração potencialidades do ponto de vista do impacto ambiental, e possibilidades de maior valor agregado no tipo de uso a ser dado;
- ❖ Definir e realizar os ensaios que possam avaliar o material no qual será utilizada a escória de ferro, no que se refere às características mecânicas e ambientais.

1.4 Descrição do objeto da pesquisa

Bittencourt (1992) conceitua a escória como sendo uma fase líquida homogênea formada por um ou mais compostos químicos, de vários óxidos, presente nos processos pirometalúrgicos, que se separa da fase metálica por ser insolúvel e de menor densidade. As escórias desempenham uma grande variedade de funções químicas e físicas, sendo desde receptoras de parte de metais e óxidos não reduzidos numa extração primária, até reservatório e absorvedor de impurezas extraídas em processo de refino pirometalúrgico (GALDEANO, 1994). Elas também protegem o metal da oxidação e diminuem as perdas de calor. Em fornos elétricos são, também, freqüentemente usadas como resistência de aquecimento (LENZI, 1986).

O resíduo estudado é sólido, com odor fraco e de cor cinza, oriundo da limpeza do forno depois da retirada do metal fundido da Empresa Brasileira de Compressores (Embraco), situada na rua Dona Francisca, 12.500, Joinville.

Quanto ao asfalto utilizado optou-se pelo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) por proporcionar melhor adesividade entre os componentes da mistura.

1.5 Justificativa e motivação

A inexistência de um padrão e de critérios de testes para avaliar a potencialidade de aplicação dos resíduos restringe suas aplicações. No resíduo pesquisado, além das dificuldades já citadas, soma-se a diversidade de escórias geradas em função do processo produtivo, exigindo desta forma uma amostragem cuidadosa. Por essa razão, as referências verificadas nos trabalhos realizados enriquecem o escopo metodológico desta pesquisa, colaborando para o estudo da possibilidade de reciclagem deste material. Seu uso para pavimentação não é realizado nesta região até o momento, fato este, que constitui o objeto desta pesquisa.

A cidade de Joinville, situada entre a Serra do Mar e o Oceano Atlântico, dentro do domínio da mata atlântica, com uma população de 429.604 habitantes (IBGE, 2000) e um dos maiores pólos industriais do Sul do país, possui um perfil que deveria determinar políticas urbanas exemplares na conservação do meio ambiente, defendendo o município e os seus cidadãos da degradação da qualidade de vida que sempre acompanha o crescimento caótico das cidades.

Muitas empresas da cidade de Joinville vêm investindo cada vez mais na consolidação da cultura de redução de perdas, reciclagem e reutilização dos resíduos. Não só porque provocam impactos ambientais negativos, mas também

porque, a sua redução e aproveitamento podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos, implicando normalmente em maior economia.

Outro aspecto importante dentro do contexto ambiental é a legislação, que estabelece critérios para que a produção não venha provocar danos significativos ao meio ambiente. Por haver muitas empresas exportadoras nesta região a questão ambiental não passa despercebida, fazendo parte do planejamento estratégico de muitas delas, uma vez que muitos países têm exigido das indústrias uma adequação dos processos produtivos às diretrizes básicas do controle ambiental.

Notadamente, a Comunidade Econômica Européia, vem procedendo à elaboração de mecanismos de certificação da qualidade ambiental dos produtos comercializados na Europa. Deste modo, cabe às empresas exportadoras aprimorarem suas práticas de gestão ambiental, de modo a garantir a certificação de seus produtos e serviços junto às normas internacionais consolidadas na ISO 14000, mantendo e ampliando seu acesso a este e outros importantes mercados.

Com a crescente urbanização e industrialização que se apresenta em Joinville, o estudo da reciclagem da escória férrica dentro da área de Gestão Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pode dar uma contribuição importante neste momento. Em conformidade com os resultados obtidos, o presente estudo pode gerar ações mais abrangentes tanto através de estudos acadêmicos mais aprofundados quanto do incentivo a adoção de novas práticas no âmbito da reciclagem deste material, seja para esta região ou outras regiões que enfrentam problemas semelhantes.

Esta pesquisa busca contribuir com informações para as indústrias da área da siderurgia do ferro, apontando possíveis soluções para o resíduo de escória por elas gerada.

1.6 Limitações do trabalho

Visando alcançar o objetivo estabelecido no presente trabalho, fundamental se faz limitar a natureza do estudo. Tais limitações são impostas, principalmente, pelo escopo e pelo *Desing* da pesquisa.

Dado a diversidade de escórias geradas em função do processo de produção, faz-se necessário delimitar o material a ser usado. No desenvolvimento desta pesquisa optou-se pelo uso do resíduo proveniente da limpeza dos fornos à indução da Embraco Fundição – Empresa Brasileira de Compressores S. A. Isto ocorre devido à constância do resíduo gerado. Quanto à inserção deste resíduo na composição do asfalto, a empresa Novas Técnicas de Asfaltos (NTA), através de seu engenheiro Fernando José Camacho, forneceu os subsídios necessários para a execução dos ensaios. Quanto aos ensaios complementares, sua execução ocorreu através da Sociedade Educacional de Santa Catarina (SOCIESC).

O estudo da viabilidade econômica, apesar de promissor esta ausente. Isso se deve a existência de variáveis³ cuja quantificação não é conhecida adequadamente. Quanto a viabilidade técnica, a pesquisa restringe-se ao atendimento dos parâmetros impostos pela norma DNER ES 313/97.

³ Variáveis: a) O uso em escala industrial do resíduo depende da licença do órgão ambiental. Caso tenha subsídio das empresas que o produzem, a quantificação dos valores pode ter alterações não previstas inicialmente. b) Por sigilo de contrato, a administradora do aterro não divulga o valor pago por tonelada para depositar o material.

O estudo da viabilidade ambiental baseia-se nos resultados obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização e sua classificação conforme NBR 10004. A avaliação das implicações ambientais ao longo do tempo, com a adição da mistura asfáltica em diferentes tipos de solo e clima e conseqüentemente o seu monitoramento, não é objeto de pesquisa neste momento.

Portanto, a presente pesquisa delimita-se ao estudo da incorporação da escória de ferro do forno à indução como agregado miúdo para pavimentação, com vistas à redução dos problemas relativos a sua disposição final e agregação de valor ao produto final.

1.7 Concepção da pesquisa

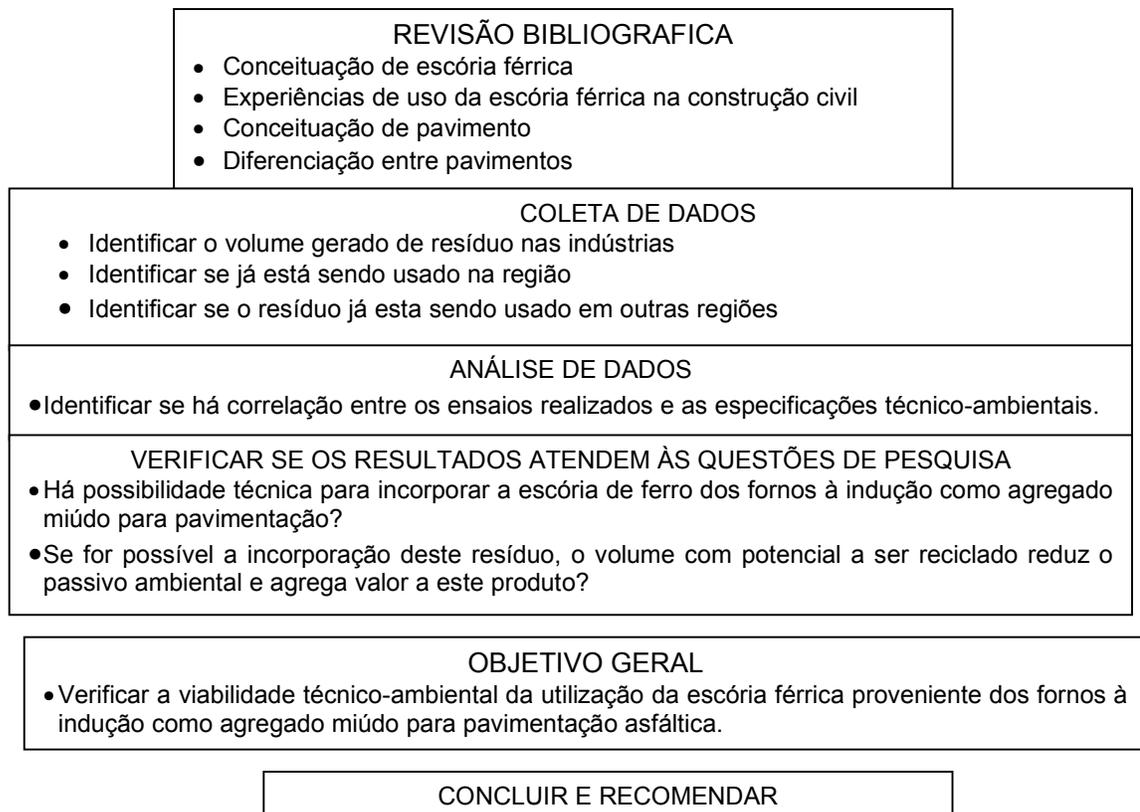


Figura 1: Design e perspectiva da pesquisa

1.8 Estrutura do trabalho

A pesquisa foi estruturada em cinco capítulos, descritos a seguir.

O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema, contextualizando-o sob o aspecto ambiental para evidenciar a sua importância. São apresentados, também, os objetivos, a delimitação e estrutura da pesquisa.

No segundo capítulo é feita, através de revisão bibliográfica, uma abordagem sobre as escórias siderúrgicas que vêm sendo estudadas para utilização na construção civil. São tratados os aspectos relativos ao processo de geração, volume gerado, características principais e formas de aplicação na construção civil. Também é feita abordagem sobre a pavimentação asfáltica, citando características do pavimento que serão avaliadas na parte experimental. Trata, ainda, da parte experimental no que se refere ao estudo da utilização da escória férrica como agregado miúdo.

O terceiro capítulo são apresentadas as metodologias adotadas para cada ensaio e resultados obtidos.

No quarto capítulo, apresenta-se a análise e discussão dos resultados obtidos experimentalmente.

O quinto capítulo apresenta as conclusões tiradas do estudo para sua utilização como agregado miúdo e feitas algumas sugestões para outros estudos do aproveitamento deste resíduo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Escórias siderúrgicas e sua utilização na construção civil

É consenso, no meio técnico, de que a construção civil se revela como o setor com grande potencial para utilização de resíduos, principalmente pelo grande volume de matéria-prima que consome. Por sua vez, os materiais convencionais de construção civil consomem significativo volume de energia e recursos que, dependendo da região, já estão em escassez e geram grandes volumes de resíduos. Daí a importância de se buscar a utilização de resíduos que possibilitem a redução do consumo de combustível no processo de obtenção de novos produtos.

Castilhos (1996) diz que além da vantagem ecológica, os materiais alternativos podem viabilizar, como consequência, construções com menor custo.

Por sua vez, John (2000) adverte que a inexistência de um padrão e de critérios de testes para avaliar a potencialidade de aplicação dos resíduos são causas que restringem a sua aplicação, além de ser necessária uma amostragem cuidadosa para determinar a variabilidade envolvida na geração dos mesmos. O autor também afirma que a viabilidade de reciclagem de um resíduo depende de fatores, tais como:

- Proximidade da instalação de processamento;
- Custo de transporte dos resíduos;
- Volume de resíduos disponível para reprocessamento;
- Custo de estocagem do resíduo no local de geração ou afastado da origem.

O estudo da viabilidade técnica da reciclagem de um determinado resíduo pressupõe basicamente as seguintes etapas:

- Levantamento de dados sobre a disponibilidade do resíduo;
- Caracterização quanto à sua composição química;
- Identificação das propriedades físicas e mecânicas;
- Seleção de possíveis aplicações;
- Identificação das propriedades do produto final.

Atualmente, existem no Brasil e no mundo muitos centros de pesquisa que estudam possíveis utilizações para resíduos com usos ainda não consagrados, e outros parâmetros que envolvem os produtos derivados de resíduos cujos usos já o estão.

Cincotto (1988) mostra que estudos desenvolvidos pela *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD) e *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et Matériaux* (RILEM) estabeleceram uma proposta de critério geral de avaliação do resíduo para uso na construção civil:

- a) a quantidade de resíduo disponível deve ser suficientemente grande para justificar o desenvolvimento de sistemas de manuseio, processamento e transporte ;
- b) as distâncias de transporte envolvidas devem ser compatíveis com as dos materiais convencionais ;
- c) o material não deve ser potencialmente nocivo durante a construção ou posteriormente à sua incorporação ao produto final.

A OECD propõe uma classificação dos resíduos em cinco grupos, que é utilizada internacionalmente:

- Grupo 1 – Resíduos e subprodutos de mineração;

- Grupo 2 – Resíduos e subprodutos metalúrgicos;
- Grupo 3 – Resíduos e subprodutos industriais;
- Grupo 4 – Resíduos e subprodutos municipais;
- Grupo 5 – Resíduos e subprodutos agrícolas e florestais.

De acordo com estes critérios, e verificadas as compatibilidades técnicas, os materiais poderiam ser distribuídos em quatro classes de acordo com a potencialidade de sua aplicação na construção civil (CINCOTTO, 1988):

- Classe 1 – materiais com potencial de aplicação máxima;
- Classe 2 – materiais com bom potencial de aplicação, mas inferior aos da classe 1;
- Classe 3 – materiais com baixo potencial de aplicação ;
- Classe 4 – materiais com muito pouco potencial de aplicação.

Já a NBR 10004 (1987) classifica os resíduos de acordo com o risco que oferecem em :

- Classe I – Resíduos perigosos ;
- Classe II – Resíduos não inertes ;
- Classe III – Inertes

Masuero et al (1998) afirma que as escórias siderúrgicas são resíduos gerados em maior volume no mundo.

Conforme a maneira de obtenção, Senço (2001) as classifica em:

- Escória de alto-forno: obtidas em alto-forno, a uma temperatura da ordem de 1.500 °C, quando a escória flutua na superfície do ferro em

fusão. As escórias de alto-forno são geradas no processo de fabricação do ferro-gusa.

- Escória de aciaria: pode ser considerada uma mistura por fusão de óxidos e silicatos, que se forma na produção e beneficiamento do aço.

Devido à diferença entre estas duas escórias apresentaremos primeiramente as possibilidades de utilização da escória de alto-forno e posteriormente as de aciaria.

2.1.1 Escórias de alto-forno

As escórias são subprodutos da fabricação do aço.

A proporção, em alto-fornos a coque, entre geração e produção de ferro-gusa é de 0,30 a 0,40 tonelada de escória por tonelada de ferro, dependendo da concentração de ferro minério. Moura (2000) comenta que a *Steel Industry and the Environment* (1997) cita 0,324 toneladas de escória por tonelada de ferro.

De acordo com Masuero et al (1998), a geração mundial de escória de alto-forno é estimada em 120 milhões de toneladas para uma produção anual de 700 milhões de toneladas de aço.

Dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) (1999), informam que no Brasil são gerados em torno de 5,7 milhões de toneladas de escória de alto-forno por ano.

Dependendo da forma de resfriamento obtém-se o resíduo com características diferentes:

a) Resfriamento brusco em água

A escória, ao sair do forno, passa por um recipiente onde a água é injetada, depois é vertida num reservatório contendo água. Ela também pode ser pelletizada através de uma caneleira onde circula uma corrente de água. Daí sua forma vítrea com aproximadamente 0,2 mm de diâmetro. Essa escória é comumente chamada de escória granulada (LOUZADA, 1991).

No Brasil, cerca de 88% das escórias de alto-forno são resfriadas de forma granulada. Destas, em torno de 5 milhões de toneladas são utilizados na fabricação de cimento (MOURA, 1999).

b) Resfriamento ao ar

A escória é vertida em potes e depois lançada em fossas, cristalizando-se devido ao resfriamento lento. Posteriormente, procede-se a britagem em granulometrias variadas.

c) Resfriamento na água ou a vapor

A escória é vertida num lastro de concreto poroso, onde depois de saturada, é submetida a vários jatos de água sob pressão. Esse processo faz com que a escória incorpore ar e expanda, formando uma estrutura alveolar. Posteriormente é britada e separada em várias classes granulométricas. A massa

específica desta escória varia entre 0,6 a 0,9 kg/dm³, sendo portanto, equivalente a um agregado leve (LOUZADA, 1991).

2.1.1.1 Composição química das escórias de alto-forno

A composição química e a estrutura física das escórias de alto-forno podem variar de acordo com a eficiência de operação do forno, do teor de minérios utilizados e do método de resfriamento.

Na Tabela 1 estão apresentadas as faixas de variação dos elementos químicos que constituem as escórias de alto-forno brasileiras e as faixas citadas na literatura.

Constituintes	Teores citados na literatura (%)	Teores das escórias brasileiras (%)
SiO ₂	23 - 55	30 - 35
CaO	27 - 55	40 - 45
Al ₂ O ₃	5 - 55	11 - 18
MgO	2 - 12	2,5 - 9
MnO	0,5 - 3	-
Fe ₂ O ₃	-	0 - 2
FeO	0,5 - 2	0 - 2
S	0,4 - 1,2	0,5 - 1,5

Fonte: Battagin (apud CINCOTTO et al. 1994).

Tabela 1: Composição das escórias de alto-forno.

2.1.1.2 Utilização da escória de alto-forno na construção civil

A escória de alto-forno pode ter aplicações como matéria-prima para fabricação de cimento, como adição na execução de concreto, como agregado para fabricação de concreto, pré-moldados e pavimentação, como agregado leve na fabricação de concreto e lã de escória para isolamento térmico (KRUGER, 1995).

2.1.1.3 Utilização da escória de alto-forno como adição e fabricação do cimento

É atribuído a Lorient a primeira referência do valor hidráulico de uma escória, em 1774. Em 1865 foi lançado, na Alemanha, um ligante hidráulico constituído por uma mistura de cal e escória. Em 1882, também na Alemanha, Prussing possibilitou a fabricação industrial do cimento Portland adicionado com escória. Porém, entre 1880 e 1890 é que as propriedades deste novo produto ficaram mais conhecidas. Entretanto, encontrou muita resistência no meio técnico e por parte dos fabricantes de cimento (COUTINHO, 1997).

A reatividade da escória de alto-forno é a principal propriedade que possibilita a sua utilização como adição. Por sua vez, a reatividade depende da composição química, do teor da fase vítrea e da finura. Busca-se avaliar esta reatividade de diversas maneiras. A NBR 5735 (1991) estabeleceu um critério baseado na seguinte relação:

$$H = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{SiO}_2) > 1$$

H – índice de hidraulicidade

De acordo com Taylor (apud BAUER, 1994), ao entrar em contato com a água é formada em torno do grão da escória uma camada envoltória que é pouco permeável, e para que aconteçam novas reações faz-se necessário que haja dissolução desta camada e dos íons Si (silício) e Al (alumínio) da fase vítrea da escória. Isso só é possível em pH elevado. A fase aquosa da hidratação do cimento Portland é um meio apropriado, já que os hidróxidos Na^+ , K^+ e Ca^{2+} suprem íons OH^- que são necessários para a quebra das ligações Si-O e Al-O da fase vítrea.

A escória reage com os hidróxidos alcalinos, em seguida com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento Portland, formando-se C-S-H (NEVILLE, 1997).

A adição de escória de alto-forno pode provocar melhorias nas características do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A mistura é mais coesiva e a fluidez é aumentada, devido a melhor distribuição das partículas de escória e à sua superfície lisa, que absorve pouca água. A adição de escória proporciona um desprendimento de calor mais lento, devido à velocidade das reações de hidratação. A microestrutura da pasta de cimento hidratada é mais densa, devido à maior formação de C-S-H, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade em longo prazo (NEVILLE, 1997).

A maior densidade da matriz proporcionada pela escória de alto-forno aumenta a resistência do concreto à penetração de cloretos e ao ataque por sulfatos. Também permite maior controle da reação álcali-silica, devido à redução na mobilidade dos álcalis.

Por outro lado, no que se refere a carbonatação do concreto, alguns estudos mostram que a adição de escória de alto-forno aumenta a profundidade de

carbonatação. A redução da reserva alcalina é preponderante ao efeito do refinamento dos poros (BAUER, 1994; LITVAN; MEYER, 1986; OSBORNE, 1986).

A escória de alto-forno pode ser moída separadamente do cimento, à finura adequada e posteriormente misturada em proporções que variam entre 36% e 70%, para formar o cimento Portland de Alto-Forno (CP III), NBR 5735 (1991). Também pode ser moída em conjunto com o clínquer Portland, em proporções que variam entre 15% e 35% para formar o cimento Portland composto com escória (CPII E), NBR 11578 (1992).

Outro aspecto importante que dá relevância à adição de escória de alto-forno no cimento é o ambiental. De acordo com John (1995), a adição de 65% de escória reduz a energia gasta na produção do cimento de 3,53 GJ/t para 1,67 GJ/t, incluindo a energia para a secagem e moagem da escória.

Alguns estudos vêm sendo desenvolvidos com vistas à utilização de escória granulada de alto-forno, moída a uma finura adequada, como material cimentício. Como a escória tem uma hidratação muito lenta, faz-se necessária a adição de um ativador. A ativação consiste na aceleração da dissolução da escória, seguida da precipitação dos produtos hidratados. Os ativadores reagem com os íons solubilizados da escória e modificam a composição química dos produtos hidratados. A velocidade de dissolução depende da área de contato com a solução. Daí a importância da eficiência da moagem da escória (CINCOTTO et al., 1994).

No Brasil, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), foram realizadas algumas pesquisas utilizando escória moída em diversas finuras e a cal hidratada, a soda cáustica e a gipsita, como ativadores. Os resultados indicaram boas possibilidades, desde que se encontre o teor adequado de ativadores (CINCOTTO, 1990).

John (1995) realizou estudos para a produção de cimento de escória ativada por silicatos de sódio. Neste estudo foi feita uma avaliação profunda da influência da ativação da escória granulada de alto-forno sobre indicadores de desempenho do cimento. O autor conclui que os cimentos de escória apresentam boas possibilidades de mercado, principalmente em aplicações em que não é recomendável o uso de cimento Portland, por exemplo, em matrizes de baixa alcalinidade para reforço com fibras sensíveis à alcalinidade.

2.1.1.4 Utilização das escórias de alto-forno como agregado

As escórias de alto-forno podem ser moídas e graduadas para uso como agregado miúdo ou britadas para serem utilizadas como agregado graúdo. As escórias mais utilizadas para este fim são as de resfriamento lento.

As propriedades do agregado variam com sua composição e a velocidade de resfriamento. As escórias de resfriamento lento apresentam uma estrutura vesicular ou celular, de massa específica entre 2,0 e 2,8 kg/dm³ e massa unitária entre 1,12 e 1,36 kg/dm³. Situam-se, portanto, na faixa entre o agregado normal e o leve estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Estes autores chamam à atenção para o fato da escória poder apresentar um teor excessivo de sulfeto de ferro, que poderá ocasionar problemas de manchamento e afetar a durabilidade do concreto. O sulfeto pode se converter em sulfato e possibilitar o ataque ao concreto. Daí as especificações das normas, como as britânicas, por exemplo, que limitam o teor de SO₃ solúvel e de enxofre total como sulfeto nas escórias, em 0,7% e 2%, respectivamente.

Quanto ao seu uso para pavimentação, Senço (2001) as classifica em granulada e bruta. O mesmo autor também apresenta informações técnicas relevantes para a utilização deste material para a pavimentação, as quais serão apresentadas a seguir.

A escória granulada pode ser utilizada como base ou sub-base de pavimentos, desde que misturada com brita e cal, enquanto a escória bruta, que é composta de grãos com as dimensões habituais das britas utilizadas em pavimentação, pode ser empregada na construção de bases e sub-bases de pavimentos, apenas com adição de cal.

A utilização da escória em pavimentação, embora não possa ser considerada rotineira, já é freqüente em países em que a produção do aço atingiu níveis elevados, como os Estados Unidos, Alemanha, Japão, França e Reino Unido. A produção de escória nesses países ultrapassa cem milhões de toneladas anuais.

Na Inglaterra, as especificações sobre o uso da escória de alto-forno permitem uma resistência mecânica desse material inferior à resistência exigida para os agregados britados de rocha. A grande preocupação quanto ao uso da escória é a sua estabilidade química, quando utilizada para agregado de concreto.

São tomados cuidados especiais também quanto às impurezas, principalmente as de enxofre:

- Ácido sulfúrico solúvel..... $H_2SO_4 \leq 0,7\%$
- Enxofre total..... $S \leq 2,0 \%$
- Impurezas de ferro: a escória não deve apresentar sinais de desintegração após 14 dias de imersão em água.
- Escamação e pulverização: a escória é considerada isenta destas falhas, se apresentar composição química com as restrições:

$$\%CaO + 0,8 (\%MgO) < 1,2 (\%SiO_2) = 0,4 (\%Al_2O_3) + 1,75 (\%S) \text{ ou}$$
$$\%CaO < 0,9 (\%SiO_2) + (\% Al_2O_3) + 1,75 (\%S)$$

O mesmo autor faz menção do uso da escória em pavimentação na Austrália e Hungria. Na Austrália, a escória de alto-forno pulverizada (cinza volante) tem propriedades das pozolanas, servindo como aglutinante que reage com a cal, formando componentes cimentantes. Na Hungria, a escória de alto-forno granulada foi utilizada como base de pavimento na forma de cascalho rolado, tratado com 20% de escória granulada e 2% de cal hidratada, compondo uma camada de espessura final de 26 centímetros.

O trecho pavimentado foi submetido ao tráfego durante os meses de inverno para depois ser superposto por uma camada de binder de 11 centímetros e camada de rolamento de concreto asfáltico de 4,5 centímetros de espessura. Exames posteriores evidenciaram o bom desempenho do pavimento, o que levou as autoridades a elaborar normas para a execução desse tipo de serviço.

Porém, é na França que se encontra, não só um volume maior de obras com o uso da escória, mas também, bibliografia mais vasta e concludente sobre o comportamento dos pavimentos com base, sub-base ou revestimento usando-a como agregado. No final dos anos 60, o próprio laboratório de *Ponts et Chaussés* passou a centralizar o controle do fornecimento de escória granulada para algumas regiões da França, inclusive recebendo e distribuindo escória importada da Bélgica (SENÇO, 2001).

Com o apoio de equipes especialmente treinadas para orientar a aplicação, o uso da escória passou a ser rotineiro, entrando como integrante de projetos-tipo de pavimento nos catálogos que tanto têm contribuído para

uniformização dos processos executivos neste país, como mais uma opção à disposição dos engenheiros projetistas. Venuat (apud LOUZADA, 1991) diz que na França a escória de alto-forno utilizada como agregado para enrijecimento das camadas de base de pavimentos de estradas e auto-estradas é composta por agregado natural, de 5% a 20% de escória granulada e 1% de cal.

De acordo com Lima (1999), algumas das características da escória, como agregado miúdo, já estão normalizadas neste país.

No Brasil, a utilização da escória de alto-forno em pavimentação ainda é incipiente, principalmente no Estado de São Paulo, onde é vendida à indústria de cimento para fabricação de Cimento de Alto-Forno (CAF). A própria Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA), limita a utilização da escória à pavimentação de ruas internas da fábrica. Senço (2001) frisa a importância da limitação do teor de chumbo, especialmente no que tange a questão ambiental.

Mesmo assim, o uso da escória em obras rodoviárias é objeto de algumas normas e especificações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), que tem os seguintes prefixos:

- DNER – ES – P – 16 – 71 – Tratamento Superficial Simples (TSS)
- DNER – ES – P – 17 – 71 – Tratamento Superficial Duplo (TSD)
- DNER – ES – P – 18 – 71 – Tratamento Superficial Triplo (TST)
- DNER – ES – P – 20 – 71 – Macadame Betuminoso (MB)
- DNER – ES – 313/97 – Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).

Essas especificações destinam-se a orientar melhor a execução de revestimentos, mesmo no caso do macadame betuminoso, que pode funcionar como camada de revestimento, desde que superposto por tratamento superficial simples e mesmo lama asfáltica. Para Senço (2001) o que mais chama a atenção é a

especificação para o concreto betuminoso usinado a quente, por se tratar de um produto nobre na hierarquia dos revestimentos, indicando uma possibilidade de uso da escória como agregado de misturas betuminosas para tráfego intenso e vias de alto padrão, não se limitando a vias de pouco tráfego e de condições técnicas precárias.

No caso brasileiro, não é possível ainda a apresentação de exemplos marcantes da utilização da escória de alto-forno em pavimentação, o que não impede de se encarar com algum otimismo esse emprego, tendo em vista a produção nacional de aço e a tendência de se utilizar ao máximo os materiais abundantes nas proximidades dos serviços. A alternativa pode vir a ser uma solução mais econômica para a pavimentação de vias, principalmente nas proximidades das grandes indústrias siderúrgicas.

Cincotto et al. (1994) realizaram estudos com escória resfriada ao ar e britada, como agregado graúdo, utilizando-a, inclusive, em concreto armado na construção de um edifício. Os pesquisadores relatam que os estudos não avançaram.

Silva e Almeida (1986) realizaram estudos utilizando escória granulada de alto-forno como agregado miúdo para argamassa e concreto. Os resultados indicaram que o desempenho da escória é compatível com o da areia.

Scandiuzzi e Battagin (apud CINCOTTO, 1994), desenvolveram estudos utilizando escória de alto-forno granulada, como agregado miúdo, para produção de argamassa, em comparação com argamassas produzidas com areia natural e com areia normal brasileira, NBR 7214 (1990). Os resultados mostraram que a argamassa com escória apresenta resistência menor nas primeiras idades. Porém, ao longo do tempo, esta diferença vai diminuindo. Esse comportamento é explicado

devido a maior demanda de água por parte da argamassa com escória. Os autores constaram, também, que a aderência pasta-agregado é maior na argamassa com escória, em idades mais avançadas. Entretanto, não especificaram estas idades.

As escórias resfriadas sob vapor d'água dão origem a agregados leves, que são utilizados para a fabricação de concreto leve e enchimento em pavimentações.

As escórias ricas em sílica podem ser refundidas com adição de calcário, dolomita ou cascalho e areia, e resfriadas rapidamente para a obtenção de lâ de vidro, utilizada como isolante térmico e acústico (LOUZADA, 1991).

Quanto às escórias de aciaria, são geradas no processo de fabricação do aço, através da fusão de óxidos e silicatos. Após o resfriamento, apresenta-se sob a forma de blocos porosos de grandes dimensões, que podem perder a forma quando trabalhados por causa dessa estrutura porosa ou celular, que retém os gases nos vazios, ficando sujeita a pressões internas após o resfriamento. Trata-se de material bastante resistente à abrasão, quando comparado com agregados comuns. No ensaio de abrasão Los Angeles, os resultados de desgaste – material passado na peneira n. 12 (1,68 mm), após 500 rotações do tambor – fica entre 20% e 30% (SENÇO, 2001).

Podem ser oriundas de diferentes processos. Destacam-se as geradas nos conversores a oxigênio LD⁴ e em fornos elétricos a arco. As escórias de conversores LD são formadas durante as operações de refino do ferro-gusa (RUBIO; CARRETERO apud LIMA, 1999).

⁴ As iniciais LD referem-se às aciarias austríacas Linz e Donawitz, que utilizaram pela primeira vez este processo em escala industrial no mundo.

2.1.2 Escórias de aciaria

As escórias de aciaria LD geralmente são formadas predominantemente por óxidos de cálcio, silício e ferro. Mas sua composição varia em função do tipo de forno, das matérias-primas utilizadas, e tipos de aço fabricados.

A Tabela 2 apresenta a composição química básica das escórias de LD que são geradas em alguns países do mundo.

Composto	Brasil (%)	Austrália (%)	China (%)	Espanha (%)	França (%)
CaO	6 – 45	>35	45	48	47
SiO ₂	7 – 16	<20	10,5	16	13
Al ₂ O ₃	1 – 4	<5	2,7	1,2	1
FeO	8 – 30	<25	35	16	25
P₂O₅	-	Traços	1,05	0,5	2

Fonte: Lima (1999).

Tabela 2: Composição química básica das escórias LD geradas em alguns países.

As escórias de aciarias elétricas são geradas na fusão da sucata, em fornos elétricos a arco e nas operações de refino do aço na metalurgia da panela. Essas escórias geralmente são mais homogêneas e possuem menor quantidade de cal livre, em relação às escórias de conversores.

Na Tabela 3 apresenta-se a composição química básica das escórias de aciarias de forno elétrico que são geradas em alguns países do mundo (GEYER et al., 1994).

Em nível mundial, a geração de escória de aciaria é em torno de 84 milhões de toneladas por ano (MASUERO et al. 1998).

No Brasil, a geração de escória de aciaria, em 1997, foi de 3,2 milhões de toneladas, sendo 68% deste total proveniente do processo LD.

Composto	Brasil (%)	EUA (%)	Japão (%)	Itália (%)	Alemanha (%)
CaO	33	41	40	41	32
SiO ₂	18	17	25	14	15
Al ₂ O ₃	6	8	5	7	4
FeO	30	18	19	20	31
MgO	10	10	4	8	10
MnO	5	4	7	6	4
S	-	0,2	0,06	0,1	0,1
P₂O₅	-	0,6	-	0,9	1,4

Fonte: Gumieri (2000).

Tabela 3: Composição química básica das escórias de aciaria de fornos elétricos geradas em alguns países.

De acordo com Assis et al. (1997), são geradas de 70 a 170 kg de escória por tonelada de aço líquido.

As escórias de aciaria são utilizadas geralmente como agregado, embora alguns estudos têm sido desenvolvidos objetivando sua utilização como adição ao concreto.

A escória de aciaria na forma líquida é lançada em um tanque para resfriamento. Assim, ela se resfria lentamente, solidificando-se de forma cristalina. Em seguida, geralmente, ela é britada para retirada da fração metálica, através de eletro-ímã. Após este processo ela é empilhada para ser usada como agregado graúdo.

2.1.2.1 Utilização de escória de aciaria na construção civil

Devido às suas características mecânicas, as escórias de aciaria vêm sendo empregadas como agregado graúdo para concreto asfáltico, base e sub-base de rodovias, lastro de ferrovias e estabilização de solos. Estas aplicações já são consagradas em vários países. Louzada (1991) diz que levantamentos realizados nos Estados Unidos mostram que 77% da escória de aciaria gerada é utilizada em rodovias, estabilização de solos, aterros, lastro de ferrovias e pavimentação asfáltica. No Aeroporto Internacional de Pittsburg, por exemplo, foram utilizados 600 m³ de escória de aciaria como agregado para concreto asfáltico à quente.

De acordo com publicação do Ministério dos Transportes (1988), em alguns países, a exemplo dos Estados Unidos, Polônia, Inglaterra, França e Rússia, já existem normas sobre o uso de escórias de aciaria.

Dentre as vantagens que as escórias de aciaria apresentam com relação aos agregados convencionais, Gumieri (2000) destaca menor custo, maior resistência ao desgaste, maior densidade própria, forma dos grãos, conferindo melhor consistência e adesividade às misturas asfálticas, por exemplo.

Gumieri (2000) cita vários trechos de rodovia em Minas Gerais em que foi utilizada escória de aciaria como base e sub base.

No Rio de Janeiro, empresas de consultoria de diversas prefeituras no estado têm recomendado a utilização da escória de aciaria para misturas asfálticas à quente, base e sub base de pavimentação, e como material drenante. Apesar destas recomendações serem acatadas por algumas prefeituras, de acordo com o Instituto Brasileiro de Siderurgia, as utilizações da escória de aciaria ainda são pequenas.

Há que se considerar, na utilização da escória de aciaria, o fenômeno da expansão que apresenta, devido ao teor de óxidos de cálcio e magnésio livres. Estes óxidos, ao hidratarem, formam compostos expansivos.

De acordo com Motgomery e Wang (apud GUMIERI, 2000), a principal causa do aumento de volume verificado na escória de aciaria é o excesso de CaO livre, principalmente na presença de solução sólida contendo pequenas quantidades de FeO (wustita).

Masuero (1998) apresenta casos de obras tanto de concreto de cimento Portland, como concreto asfáltico, em que se verificaram problemas devido à expansão provocada pela escória de aciaria. Gumieri (2000) também apresenta exemplos de obras que apresentaram problemas de expansão provocados pela escória de aciaria.

Uma recomendação prática que se faz para evitar o problema da expansão da escória de aciaria é submetê-la a um tratamento denominado de envelhecimento. Neste tratamento, a escória é empilhada e exposta ao meio ambiente, durante pelo menos 6 meses, para que os óxidos de cálcio e magnésio possam hidratar-se previamente.

Um grupo de pesquisa vem desenvolvendo, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE), estudos aprofundados a respeito do fenômeno de expansão. Uma das alternativas que se tem buscado é a alteração do processo de resfriamento, que passaria a ser igual ao executado nas escórias granuladas. Resultados preliminares de estudos desenvolvidos por Masuero (1998) têm apontado boas perspectivas para sanar o problema da expansão destas escórias, através deste processo.

Lima (1999) realizou, na Espanha, estudos utilizando escória de aciaria de forno elétrico, como agregado miúdo e graúdo para concreto. Os resultados mostraram um melhor desempenho, quanto às resistências mecânicas, dos concretos com agregado de escória em relação ao agregado convencional. Foram realizados ensaios de durabilidade: ataque por sulfatos, carbonatação, efeitos da água do mar e reação álcali-agregado. Os concretos com agregado de escória apresentaram bom desempenho frente a estes ensaios.

Louzada (1991) estudou a utilização de escória de aciaria como agregado na produção de blocos de concreto para alvenaria de vedação. Foram estudadas várias misturas, com diferentes proporções de escória de aciaria e escória de alto-forno. Os melhores resultados foram alcançados para mistura de 62% de escória de aciaria e 32% de escória de alto-forno. Os resultados obtidos foram compatíveis com as especificações das normas brasileiras.

Murphy et al (apud GUMIERI, 2000), dizem que apesar de algumas escórias de aciaria possuírem os mesmos elementos do cimento Portland, a variabilidade na sua composição química dificulta o seu uso como adição ao cimento. Segundo estes autores, as escórias vítreas, obtidas através do resfriamento brusco, possuem boas propriedades cimentícias quando hidratadas. Vários outros pesquisadores como: Montgomery; Wang (1991); Duda; Bauwesen (1987); Gutt; Nixon (1972); dentre outros estudaram as propriedades cimentícias das escórias de aciaria.

No Brasil, Masuero (1998) vem estudando a escória de aciaria de forno elétrico como adição ao concreto. Os resultados preliminares mostram um bom desempenho dos concretos com adição, quanto às propriedades mecânicas (MOURA et al., 1999).

Geyer et al (1997) estudaram a influência nas propriedades do concreto da substituição de 5% de cimento por escória de aciaria de forno elétrico. Foi verificado um bom desempenho quanto à resistência à compressão. Aos 28 dias, a resistência do concreto com adição de escória chegou a ser 24% superior à do concreto sem adição.

Vale salientar que a possível heterogeneidade da escória, devido ao processo de geração, justifica que não sejam feitas generalizações a respeito de seu uso, necessitando que sejam realizados estudos de suas características antes da aplicação.

2.2 Alto forno utilizado para a fusão do ferro

Nas indústrias siderúrgicas de Joinville os fornos mais comuns utilizados para a fusão do ferro são os fornos cubilô e de indução.

O forno cubilô utilizado em muitas fundições é um forno de cuba vertical.

Este forno consiste essencialmente num cilindro de placas de ferro revestido em seu interior com ladrilhos refratários, que é sustentado por apoios ou colunas.

Para acionar o forno, procede-se a um aquecimento preliminar e gradual. Este aquecimento prévio tem por objetivo eliminar a umidade evitando com isto a deterioração do revestimento refratário (TORRES, 1975).

Em seguida, carrega-se de coque, que deve formar uma capa que atinja o nível de um metro, acima dos canais de ventilação. Para finalizar, estando o forno

quente, começa-se o carregamento. Os materiais normalmente utilizados são: ferro gusa, sucatas de ferro fundido, sucatas de aço e retornos (rebarbas).

Quanto aos fornos de indução, o seu funcionamento baseia-se na indução eletromagnética. Sendo muito usado para fusão de materiais condutores, formam-se nestes materiais correntes de Foucault (correntes induzidas em massas metálicas) que produzem grande elevação de temperatura. Se os materiais forem magnéticos, haverá também o fenômeno da histerese⁵, que contribui para o aumento de temperatura. O forno consiste basicamente num transformador com o secundário em curto-circuito e constituído apenas por uma espira.

2.3 Legislação Ambiental básica aplicável a resíduos sólidos

A partir da década de 60, nos países desenvolvidos, e a partir da década de 80 do século passado, no Brasil em particular, intensificou-se a atuação de vários atores sociais interessados na questão ambiental.

Fonseca (2002) afirma que apesar das diferentes temporalidades e ritmos históricos, a atuação destes atores sociais frente à questão ambiental é um fenômeno complexo, envolvendo a interação entre indivíduos e grupos situados em distintos setores sócio-culturais, com diferentes graus de informação, valores, práticas e poder de decisão.

No Brasil em particular, é produzida uma vasta legislação ambiental, principalmente federal, que inclui o meio ambiente como capítulo constitucional. Foi criado o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), estabelecendo os órgãos

⁵ Histerese (do grego hysteresis = atraso). Imantando-se uma substância ferromagnética, ela pode permanecer imantada, ainda que seja retirada a causa da imantação (RAMALHO, 2003).

de controle ambiental e o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) - e seus correspondentes conselhos estaduais e municipais, dotados de poder normativo que estabelecem a obrigatoriedade do licenciamento ambiental e do estudo prévio de impacto ambiental e, mais ainda, dá a entidade civis a possibilidade de uma fácil ação judicial contra os agressores do meio ambiente através de lei de defesa dos ambientes difusos. Por tudo isso, o Brasil é um dos países mais avançados do mundo em termos de legislação ambiental.

De acordo com a carta Rio 92 “É o dever de todos deixar às gerações futuras o que recebemos de nossos antepassados”. É isto que está em jogo no mundo dos fatos e nos termos das definições constitucionais.

A Constituição Federal do Brasil de 1988 estabelece os *princípios* da política nacional do meio ambiente. No capítulo VI (“Do Meio Ambiente”), Artigo 225, é colocado o princípio:

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

A mesma preocupação com o meio ambiente é observada no artigo 170 que trata sobre a ordem econômica, através do inciso VI que expressa claramente o princípio de defesa do meio ambiente.

Desta forma, a sociedade brasileira através de sua Constituição reconhece a idéia do desenvolvimento sustentável e a responsabilidade para com as gerações futuras estabelecendo os princípios legais que incentivam as práticas para a diminuição da produção de resíduos.

Dando prosseguimento ao ordenamento jurídico, a Lei Federal 6.938/81, regulamentada pelo Decreto 99.274/90, define a política nacional do meio ambiente

e regula a estrutura administrativa de proteção e de planejamento ambiental através do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA).

O legislador buscou compatibilizar o desenvolvimento industrial com o meio ambiente estabelecendo os critérios e normas de qualidade ambiental, sendo que estes critérios são básicos para responsabilizar as pessoas e as empresas conforme segue o texto abaixo:

Essa lei introduz alguns instrumentos de planejamento ambiental e determina a responsabilidade e penalidade para casos de poluição.

Art. 2º – A Política Nacional do Meio Ambiente tem por objetivo”:
A preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no país, condições de desenvolvimento sócio-econômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana, atendidos os seguintes princípios: [...]:
I - ação governamental na manutenção do equilíbrio ecológico, considerando o meio ambiente como um patrimônio público a ser necessariamente assegurado e protegido, tendo em vista o uso coletivo;
V - controle e zoneamento das atividades potenciais ou efetivamente poluidoras;
VII - acompanhamento do estado da qualidade ambiental;
VIII – recuperação de áreas degradadas;

Art. 4º – A Política Nacional do Meio Ambiente visará: [...]
VII – à implantação, ao poluidor e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados [...].

O Artigo 3º, Inciso II, define: “Para os fins previstos nesta lei entende-se por: [...]. II – degradação da sua qualidade, a alteração adversa das características do meio ambiente”.

De acordo com o Art. 14, IV, § 1, o responsável pela poluição tem a obrigação de reparar os danos causados por suas atividades, ao meio ambiente ou a terceiros, ou deve pagar indenização correspondente.

Art. 14, IV, § 1º – Sem obstar a aplicação das penalidades previstas neste artigo, é o poluidor obrigado, independentemente da existência de culpa, indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros, afetados por sua atividade [...].

O Art. 6º estabelece o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e determina a estrutura hierárquica das entidades responsáveis da União, dos Estados

e dos Municípios, bem como as funções atribuídas pelo Poder Público. Os Estados devem criar órgãos de controle ambiental, os *Órgãos Seccionais*, e os Municípios criam as suas entidades responsáveis: os *Órgãos Locais*.

Cabe aos Estados e aos Municípios elaborarem normas e padrões, observando as normas do nível superior respectivo.

Art. 6º, VI – Órgãos Seccionais: os órgãos ou entidades estaduais: Responsáveis pela execução de programas, projetos e pelo controle e fiscalização de atividades capazes de provocar a degradação ambiental; [...].

VII – Órgãos Locais: os órgãos e entidades municipais responsáveis pelo controle e fiscalização dessas atividades, nas suas respectivas jurisdições.

§ 1º – Os Estados, na esfera de suas competências e nas áreas de sua jurisdição, elaborarão normas supletivas e complementares e padrões relacionados com o meio ambiente, observados os que foram estabelecidos pelo CONAMA.

§ 2º – Os Municípios, observadas as normas e os padrões federais e estaduais, também poderão elaborar as normas mencionadas no parágrafo anterior.

Em se tratando de critérios e parâmetros, estes por serem muito técnicos não são estabelecidos em lei, mas em resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), sendo um detalhamento da lei.

As resoluções deste conselho tem a força de lei, sendo suas atribuições definidas através do artigo 8 da Lei 6.938/81.

A referida lei, também estabelece os instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente através do artigo 9, que em seus incisos, estabelece os padrões de qualidade ambiental, a necessidade da avaliação de impacto ambiental e do licenciamento ambiental.

Estando o empreendimento licenciado ou não, o artigo 14 em seu parágrafo primeiro deixa claro que o poluidor independentemente de ter culpa ou não, este deverá reparar os danos causados ao meio ambiente.

Estas licenças estarão sob a responsabilidade de órgão estadual competente integrante do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), que, em

Santa Catarina, é a Fundação de Amparo a Tecnologia e Meio Ambiente (FATMA), responsável pela liberação destas licenças e sua fiscalização. Esta entidade pode, se necessário, fazer convênios com os órgãos de meio ambiente municipais para empreendimentos de pouco impacto ambiental.

Como a maior parte dos empreendimentos industriais que produzem resíduos necessita passar por três níveis de licença, nos quais devem apresentar os impactos que sua atividade terá sobre o meio ambiente, o empreendedor se vê obrigado a mitigar os impactos ou a buscar novas tecnologias visando adequar-se à lei.

Da mesma forma, a Lei nº 9.605/98 vem dispor sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.

Esta lei procura dar uma sistematização seja na ordem penal ou administrativa, buscando identificar a “culpa ou dolo” do infrator, estabelecendo penas restritivas de direito, segundo as quais o infrator poderá ser punido com a prestação de serviços à comunidade, perda temporária dos seus direitos à liberdade, suspensão das atividades e pagamento de multa.

As infrações administrativas por sua vez estão relacionadas com uma advertência, passando pela apreensão dos produtos e equipamentos, suspensão da atividade, além da multa que pode ser diária.

O Decreto nº 3.179/99 vem complementar a Lei 9.605/98 dispondo sobre a especificação das sanções aplicáveis às condutas e as atividades lesivas ao meio ambiente.

A referida Lei estabelece o valor das multas, definindo em seu artigo 41 que: “Incorre em multa quem: parágrafo 1 inciso V: Lançar resíduos sólidos, líquidos

ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis e regulamentos.”

O mesmo artigo estabelece que a multa é compartilhada pelo gerador do resíduo, por quem transporta e quem armazena produtos em desacordo com as normas de segurança, independente das sanções penais e administrativas, incidindo sobre elas também a ação Civil Publica prescrita na Lei nº 7.347/85.

O âmbito desta lei está na responsabilidade por danos morais e patrimoniais causados ao meio ambiente conforme seu artigo primeiro inciso I, em que a ação será proposta pelo poder público ou, através da sociedade civil organizada, sendo a indenização revertida a um fundo gerido por um conselho Federal ou Estadual em que necessariamente participará o Ministério Público.

Cada Estado poderá através de Leis ou decretos, estabelecer de forma mais clara os pontos da legislação Federal, contribuindo desta forma para as diretrizes de proteção e melhoria da qualidade ambiental, que serão formulados em normas e planos administrativos, destinados a orientar a ação do governo do Estado e dos Municípios quanto às atividades empresariais públicas ou privadas.

Em Santa Catarina, a Lei nº 5.793/80, antecipando-se à constituição de 1988, já previa a melhoria da qualidade ambiental, estabelecendo que o gerador deveria fazer a gestão dos seus resíduos através do artigo 3º, pois a atividade industrial é responsável pelos seus resíduos conforme decreto estadual nº 14.250/81, clareando a legislação superior do estado, Lei 5.793/80, estabelecendo inclusive o licenciamento ambiental no seu artigo 70.

Os resíduos industriais são abordados no Decreto Lei nº 1.413/75 que trata sobre o controle da poluição do meio ambiente provocado por atividades industriais.

As indústrias instaladas ou, que vierem a se instalar no território nacional, têm que obedecer às normas instituídas pelo poder público, exigência esta, que vem inserida dentro do licenciamento ambiental.

Já, a resolução do CONAMA nº 313/02 dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, que é parte integrante do processo de licenciamento ambiental. O Inventário Nacional de Resíduos Sólidos passa a ser um conjunto de informações sobre a geração, características, armazenamento, transporte, reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final dos resíduos gerados pelas indústrias do país, o que possibilitará futuramente o estabelecimento de uma política nacional de resíduos sólidos.

A caracterização destes resíduos quanto a sua periculosidade será feita através da normalização específica estabelecida pela Associação Nacional de Normas Técnicas (ABNT), conforme norma NBR 10.004.

2.4 Conceito de pavimento

De acordo com Santana (1993), pavimento é

uma estrutura construída sobre uma superfície obtida pelos serviços de terraplenagem com a função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto, que devem ser conseguidos sob o ponto de vista da engenharia, isto é com a máxima qualidade e o menor custo. Subleito é o terreno de fundação do pavimento, aquele que irá suportar o pavimento. Sua superfície superior é denominada de leito. Na engenharia, o projeto de terraplenagem prevê um material de melhor qualidade para a camada superior do subleito.

2.4.1 Definição de material betuminoso

Materiais betuminosos são “hidrocarbonetos de cor, dureza e volatilidade variáveis, que se encontram, às vezes, associados a materiais naturais. Em geral, são solúveis no bissulfeto de carbono (S_2C)” (PETRUCCI, 1995; BAUER, 1994; SENÇO, 1997).

Betumes são combinações de hidrocarbonetos produzidos naturalmente ou por combustão, ou por ambos associados, encontrados freqüentemente acompanhados por derivados não metálicos e sempre completamente solúveis no bissulfeto de carbono. Em geral, o termo betume engloba asfaltos e alcatrões. (SENÇO, 1997; PETRUCCI, 1995).

“Asfaltos são materiais aglutinantes de consistência variável, cor pardo-escura ou negra e nos quais o constituinte predominante é o betume, podendo ocorrer na natureza em jazidas ou ser obtido pela refinação do petróleo” (BAUER, 1994; SENÇO, 1997).

Bauer (1994) classifica os materiais betuminosos quanto a sua natureza como:

- Rochas Asfálticas ou Arenito Betuminoso: são rochas que contêm, distribuídas nos seus vazios internos, gotículas de asfalto que lhes dão certa flexibilidade e impermeabilidade. Como exemplos, podem ser citados a gilsonita e o xisto.
- Asfaltos Nativos ou Naturais: são encontrados em depósitos naturais e originários do petróleo, no qual se encontram dissolvidos. Por processo natural de evaporação, os depósitos de petróleo que ocorrem em depressões da crosta terrestre transformam-se em lagos de asfalto, como em Trinidad e Bermudas. Para torná-los aptos a serviços de

pavimentação é necessário que sejam purificados e fluxados com óleos de petróleo.

- Asfaltos de Petróleo: são asfaltos obtidos pela refinação do petróleo de base asfáltica, do qual são obtidos isentos de impurezas. São quase completamente solúveis no bissulfeto e no tetracloreto de carbono e se constituem, hoje em dia, no produto mais empregado em o todo mundo, nos serviços de pavimentação.

2.4.2 A utilização do asfalto através da História

Senço (1997) faz um levantamento sobre a utilização do asfalto através da história. Diz que segundo a tradição, o asfalto é o mais antigo material impermeabilizante utilizado pelo homem. Cita que no Gênesis, capítulo 6, Heróis antediluvianos, encontra-se, na história de Noé, versículo 14 a ordem do Criador: “Faze para ti uma arca de madeira alisada. Farás nela uns pequenos repartimentos e betuma-la-ás por dentro e por fora”.

Na Mesopotâmia, escavações revelaram o emprego de betume como aglutinante de tijolos utilizados nas construções dos muros, edifícios e no piso das ruas. Segundo também a tradição, os tijolos da Torre de Babel receberam esse tratamento.

Outras citações indicam a utilização do betume no Egito, nos trabalhos de mumificação; em Roma, na impermeabilização de aquedutos e, também, costume herdado dos gregos, era usado em grandes bolas de fogo lançadas por catapultas dentro das muralhas inimigas.

Segundo o mesmo autor, a palavra asfalto vem do grego que quer dizer firme, estável. O vocábulo betume vem do Sânscrito jatu-crit, que os romanos transformaram em gritu-men ou pix-tumen, que significa criador de piche.

Dessa origem etimológica, vê-se que, enquanto a palavra betume estava ligada a um corpo cujas características se enquadravam no piche – impermeabilizantes e vedatórias – o asfalto era qualificado como uma espécie de cimento estável que servia para aglutinar pedras e outros materiais.

Mais recentemente, utilizando asfaltos naturais provenientes de jazidas, os franceses, em 1802, os americanos em 1838, e os ingleses, em 1869, executaram pavimentações de ruas e pátios. Em 1870, os americanos construíram, em Washington D. C., o primeiro pavimento com mistura de textura fina, o *sheet asphalt*, também com asfalto natural.

A obtenção do asfalto de destilação do petróleo iniciou-se nos Estados Unidos, em 1902, e sua utilização mais intensa, em serviços de pavimentação começaram em 1909, sendo as misturas dosadas por práticos que utilizavam teores de asfaltos de acordo com a vivência que tinham nesse campo. Uma patente tornou as misturas betuminosas alvo de cobrança de *royalties*, o que limitava seu uso. Na cidade de Topeka, foi utilizada uma mistura betuminosa com agregado de granulometria diferente da patenteada, o que levou a justiça americana a quebrar o monopólio que a patente existente permitia.

Em 1920, Prevost Hubbard e F.C Field passaram a dosar as misturas utilizando um ensaio de extrusão, deixando de lado o empirismo que até então predominava.

A produção de asfalto no Brasil iniciou-se em 1944, na refinaria Ipiranga, com petróleo importado geralmente da Venezuela. Até então, segundo Senço (1997), utilizava-se nos serviços de pavimentação, asfalto importado de Trinidad.

Senço (1997) e Bauer (1994) entre outros, resumiram as principais propriedades que resultaram na preferência pelos pavimentos betuminosos:

- Adesividade entre betume e os agregados, que permite a ligação entre as pedras;
- Impermeabilidade;
- Durabilidade das misturas e manutenção das propriedades do betume por muitos anos;
- Possibilidade de trabalho a diversas temperaturas;
- Preço competitivo e, em muitos casos, vantajoso em relação a outros materiais utilizados em pavimentação, principalmente na capa de rolamento.

2.4.3 Cimentos Asfálticos

Os cimentos asfálticos são materiais provenientes do asfalto, porém, podem ser de duas maneiras de acordo com o processo no qual é obtido (BAUER, 1994; SENÇO, 1997):

- Cimento Asfáltico Natural ou Nativo (CAN);
- Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

2.4.3.1 Cimento Asfáltico Natural (CAN)

Como visto anteriormente, o cimento asfáltico é classificado de acordo com a sua obtenção, que nesse caso, vem a ser através de lagos naturais no estado líquido ou semilíquido.

Após a extração do material, que é feita através de vagonetes, a mistura é chamada de *asfalto cru*, iniciando então o processo de refinação. Depois de refinado o material é comercializado, recebendo o nome de *cimento asfáltico*, sendo classificado pela norma EB-94 em nove tipos: CAN 30-40, CAN 40-50, CAN 50-60, CAN 60-70, CAN 70-85, CAN 85-100, CAN 100-120, CAN 120-150 e CAN 150-200.

2.4.3.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

A Especificação Brasileira EB-78 do Instituto Brasileiro de Petróleo e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (IBP/ABNT – EB-78), que tem o título *Cimentos Asfálticos Preparados de Petróleo*, assim define o cimento asfáltico de petróleo:

Cimento asfáltico de petróleo é o asfalto obtido especialmente para apresentar as qualidades e consistências próprias para uso direto na construção de pavimentos, tendo uma penetração a 25° C entre 5 e 300 decímetros de milímetro, sob uma carga de 100 g, aplicada durante 5 segundos.

A classificação antiga dos cimentos asfálticos identificava 10 tipos, de acordo com a penetração, utilizando ainda as iniciais AC de *asphalt cement*: cimentos asfálticos de penetração 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-85, 85-100, 100-120, 120-150, 150-200 e 200-300.

Senço (1997) afirma que a utilização prática revelou que para um clima como o do Brasil e para serviços de pavimentação, apenas alguns desses tipos de cimento asfáltico apresentavam interesse. Com o nome de cimento asfáltico de petróleo, CAP, os tipos foram reduzidos para apenas quatro: CAP 50-60, CAP 85-100, CAP 100-120 e CAP 150-200, sendo os números referidos também à penetração. Os solventes adicionados aos cimentos asfálticos visam melhorar ou facilitar a ação do aglutinante, sendo produtos meramente intermediários. Após um determinado tempo, que varia de acordo com o solvente utilizado restará na mistura asfáltica apenas o cimento asfáltico original.

Esse tipo de asfalto possui suas propriedades inteiramente ligadas à natureza do petróleo de origem, e também ao processo de sua obtenção.

No Brasil, a classificação dos CAPs depende da categoria das refinarias, ou seja, as empresas que trabalham com petróleos mais pesados utilizam como método de classificação o ensaio de penetração, já as refinarias que trabalham com petróleos mais leves utilizam mais freqüentemente o ensaio de viscosidade.

A EB-78 designa o cimento asfáltico de petróleo pelas letras CAP, seguidas de dois números que se referem ao valor de penetração ou o de viscosidade, sendo alguns deles:

Viscosidade:

- CAP – 07
- CAP – 20
- CAP – 40

Penetração:

- CAP – 30/45

- CAP – 50/60
- CAP – 85/100
- CAP – 150/200

É interessante verificar outros tipos de CAPs, como por exemplo, quando o CAP ainda se encontra na fase líquida na torre de destilação, a uma temperatura de 200°C. Dessa forma, pode-se obter o asfalto soprado ou oxidado, ou seja, um dos métodos utilizados é a passagem de uma corrente de ar.

Após o processo de obtenção desse tipo de asfalto, observa-se que sua consistência é semi-sólida na temperatura ambiente, tem menor sensibilidade a temperaturas altas, menor adesividade, e maior resistência a intemperismos. Porém, para haver uma boa mistura faz-se necessário à utilização de agregados aquecidos. A mistura asfáltica resultante necessita ser espalhada e compactada a quente (SILVA, 1991; SANTANA, 1993).

2.4.4 Pré-misturados

Dá-se o nome de pré-misturado à mistura de agregado graúdo, agregado miúdo e material betuminoso, obedecendo-se às exigências estabelecidas de acordo com as modalidades específicas de cada caso.

Entre essas modalidades, Senço (1997) diferencia Pré-Misturado a quente, Pré-Misturado a Frio (PMF) e Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), também conhecido como Concreto Asfáltico (CA).

Pode-se dizer que os processos anteriormente citados possuem a mesma finalidade, ou seja, são modalidades de estrutura largamente empregadas no planeta para construção de vias, porém com métodos de aplicação diferentes (BAUER, 1994).

Algumas propriedades e processos de execução são comuns a todas as combinações decorrentes das classificações mencionadas, entre elas, o controle da mistura é extremamente importante, sobretudo nos pré-misturados a quente; o transporte, espalhamento e compactação da mistura incluem-se entre as etapas dos serviços comuns aos casos mencionados, variando esta mistura de forma sensível, quando se trata de pré-misturado a quente ou pré-misturado a frio.

2.4.4.1 Pré-misturados a quente

Bauer (1994) o define como o produto resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de um ou mais agregados minerais e cimento asfáltico de petróleo, espalhado e comprimido a quente.

Pode ser utilizado como camada de regularização, como base de pavimento ou como revestimento.

Senço (1997) cita como principal diferença entre o concreto asfáltico e a pré-mistura a quente o foco da qualidade, sendo de maior rigor nas especificações e no controle da dosagem para o concreto asfáltico.

2.4.4.2 Pré-misturados a frio

Petrucci (1995) o define como produto resultante da mistura, em usina, de agregados minerais – gráúdo e miúdo – e asfalto diluído ou emulsão asfáltica, comprimida a frio.

Pode ser utilizada como revestimento, como camada regularização e mesmo como base de pavimento. Todavia, seu maior emprego ainda se destina a execução de camada intermediária de regularização e reforço da estrutura do pavimento, e de serviços rotineiros de conserva do tipo tapa-buracos.

Devido à facilidade de produção, estocagem, transporte, aplicação e manuseio no campo, é uma excelente solução para vias de tráfego leve e médio.

2.4.4.3 Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)

Pode ser definido como o revestimento flexível resultante da mistura a quente, de agregado mineral graduado, material de enchimento (*filler*) e material betuminoso, espalhado e comprimido a quente. Senço (1997) o cita como o mais nobre dos revestimentos flexíveis.

A granulometria usada para compô-lo, pode ser classificada em três frações: agregados gráúdos, agregados finos e *filler*.

O agregado gráúdo é constituído normalmente de pedra britada ou seixo rolado com pelo menos uma face britada. Deve ainda obedecer as seguintes condições:

- Fragmentos duráveis, de superfície rugosa e forma angular;

- Inexistência de torrões de argila e matéria orgânica;
- Não ter excesso de pedras lamelares alongadas para não prejudicar a trabalhabilidade da mistura e a inalterabilidade da granulometria;
- Ter boa adesividade com o asfalto utilizado.

O agregado miúdo pode ser constituído de areia, pó de pedra ou mistura de ambos. No ensaio Equivalente de Areia, deve apresentar um valor igual ou superior a 55%.

Quanto ao *filler*, pode ser constituído de cimento, pó de pedra, pó de calcário e similares.

A granulometria da mistura de agregados deve satisfazer a uma das graduações constantes da Tabela 4, onde os tipos A e B se referem ao agregado graúdo e os tipos C e D, ao agregado miúdo. Completa-se a especificação com as faixas prováveis de teores de asfalto, em peso. O teor definitivo é obtido através da realização de um ensaio próprio, como por exemplo, o ensaio Marshall (SENÇO, 1997).

Peneira		Porcentagem que passa			
		Tipo Agregado Graúdo		Tipo Agregado Miúdo	
(")	(mm)	Graduação A	Graduação B	Graduação C	Graduação D
2	50,8	100	--	--	--
1 ½	38,1	95-100	100	--	--
1	25,4	75-100	95-100	--	--
¾	19,1	60-90	80-100	--	--
½	12,7	--	--	85-100	100
3/8	9,52	35-65	45-80	75-100	90-100
Nº 4	4,76	25-50	28-60	50-85	70-100
Nº 10	2,00	20-40	20-45	30-75	60-90
Nº 40	0,42	10-30	10-32	15-40	30-70
Nº 80	0,20	5-20	8-20	8-30	10-40
Nº 200	0,074	1-8	3-8	5-10	5-12
Betume (%)		4,0 – 7,5	4,5 – 8,0	4,0 -10,0	4,5 – 11,0

Fonte: Senço (1997).

Tabela 4: Concreto asfáltico: mistura a quente e densa.

Quanto às condições de estabilidade, fluência e vazios não preenchidos, a mistura agregado-asfalto deve obedecer aos limites estabelecidos em função do ensaio Marshall DNER - ME 043/95.

2.4.5 Camadas do pavimento

O pavimento pode ser constituído por uma única camada que seja capaz de resistir simultaneamente aos esforços produzidos pelos veículos, e, além disso, proteger o revestimento de possíveis falhas do subleito.

Petrucci (1995) e Bauer (1994) dizem que tais camadas, por razões tecno-econômicas, são geralmente divididas em duas partes: base e sub-base. Em solos de baixa capacidade de suporte agrega-se uma terceira camada conhecida como reforço de subleito. Cada uma dessas camadas terá, normalmente, uma resistência maior à medida que se aproxima do revestimento. Seus custos estão diretamente ligados a essas resistências. Os autores também citam alguns itens relevantes, caso o pavimento seja usado em vias urbanas.

O pavimento para uso urbano deve atender às seguintes exigências:

- Alta resistência às cargas verticais e horizontais ao desgaste, e impermeabilidade para evitar deterioração da base;
- Baixa resistência à circulação dos veículos para diminuir o consumo de combustível;
- Facilidade de conservação;
- Alto coeficiente de atrito para permitir uma boa frenagem, inclusive sob chuva ou geada;
- Baixa sonoridade para não aumentar excessivamente o ruído urbano;
- Cor adequada para que motoristas e pedestres tenham uma boa visibilidade, mesmo à noite ou com nevoeiro.

Os pavimentos sofrem esforços complexos, no qual o mais importante é a resistência às cargas. Senço (1997) os agrupa em duas categorias:

- a) Esforços produzidos pelo tráfego de veículos (compressão, tração, flexão e corte), em ação estática (nos estacionamentos) ou em ação dinâmica (nas faixas de rolamento);

b) Esforços produzidos por variações de umidade e temperatura; a ação devido à umidade em alguns pavimentos é notável, outros perdem resistência com o calor, e outros se contraem acentuadamente com as grandes variações de temperatura.

A repetição e combinação desses esforços, que se verificam continuamente, produzem fadiga nos materiais.

O pavimento sofre deformações e deve ter a capacidade de elasticamente voltar à sua posição normal, quando a carga desaparece. Os pavimentos asfálticos tendem a entrar em fluência lenta, particularmente quando combinado com as cargas e aumento de temperatura em função do clima.

As variações de velocidades ou direção dos veículos dão lugar a esforços de deslizamento das capas superiores, pelo que os elementos pétreos devem ter uma excelente resistência ao desgaste.

Os asfaltos oferecem uma razoável coesão, mas com o tempo as evaporações dos componentes voláteis os tornam quebradiços. Porém, por outro lado, o excesso de componentes leves os faz demasiadamente plásticos e tendem a provocar ondulações perto dos cruzamentos onde o trânsito urbano é mais intenso e pesado (SENÇO, 2001).

Além disso, os pavimentos asfálticos são muito sensíveis à umidade na sua base, a cor escura faz com que as variações de temperatura sejam elevadas nestes materiais, o que faz com que a penetração da umidade na sua massa seja evaporada rapidamente criando-se variações grandes de volume e com ela tensões que facilitarão sua quebra e posterior destruição (PETRUCCI, 1995).

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Entre os diversos tipos de revestimentos, foi selecionado o estudo de dosagem em Concreto Asfáltico Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), com substituição da areia (ou pó de pedra), por escória férrica, como agregado miúdo.

A dosagem de uma mistura de concreto asfáltico consiste basicamente em:

- a) Determinar as porcentagens dos diversos agregados a serem usados e
- b) Determinar o teor ótimo de ligante, de modo a satisfazer as exigências das especificações do DNER ES 313/97.

Podem ser empregados diversos métodos: Metodologia des Hveem (mais usado nos Estados Unidos da América); Método Smith (mais usado em pesquisas científicas) e Método Marshall (mais usado no Brasil). O Método Marshall foi testado pelo U.S Corps of Engineers a partir dos estudos desenvolvidos por Bruce Marshall. Sua utilização é limitada às misturas betuminosas a quente usando cimentos asfálticos de penetração usual e contendo agregados com diâmetro máximo de 25,4 mm (1") (BUZATTI, 1991).

Esta é a metodologia adotada na condução desta pesquisa. Para acompanhamento do método de dosagem, foram identificadas as seguintes fases:

- Fase Preliminar: redução de diâmetro da escória férrica para agregado miúdo.
- Fase 1: ensaios dos agregados.
- Fase 2: composição da mistura dos agregados.
- Fase 3: determinação da densidade, estabilidade e fluência.

- Fase 4: determinação dos vazios da mistura, vazios do agregado mineral e relação betume-vazios para encontrar o teor ótimo de betume (ligante).

Na composição da mistura dos agregados, fases 2, 3 e 4, são montados três corpos de prova para cada teor de betume; totalizando 15 corpos de prova.

Após a realização dos ensaios para determinação do teor ótimo de betume foram feitos ensaios químicos, físicos e ambientais do resíduo utilizado em três etapas:

- Etapa 1: Caracterização e Análise do resíduo *in natura*.
- Etapa 2: Caracterização do resíduo após incorporação no pavimento.
- Etapa 3: Análise comparativa entre pavimento com resíduo e pavimento tradicional.

As etapas 1 e 3 tem por objetivo identificar as substâncias que compõe a escória férrica, o pavimento que a utiliza como agregado miúdo e o pavimento composto por materiais tradicionais. Para tanto, faz-se a análise da massa bruta, do extrato lixiviado e do extrato solubilizado, entre outros.

Uma vez identificadas as substâncias e as respectivas quantidades presentes nas amostras, faz-se um comparativo com os valores permitidos ou recomendados pela norma NBR 10004.

Os ensaios das etapas 1 a 3 foram realizados pela empresa Essencis Soluções Ambientais S.A e gentilmente patrocinados pela empresa Embraco Fundição S.A.

A metodologia de quantificação e preparação das amostras aplicadas, segundo a Essencis, são aquelas mencionadas na literatura, cujas técnicas analíticas estão descritas abaixo:

Parâmetro	Descrição	Método
Cianeto	Colorimetria	4500-CN E
Cloretos	Argentométrico	4500-CI B
Cromo Hexavalente	Colorimetria	3500-Cr – D
Dureza	Titulométrico	2340 C
Fluoreto	Colorimetria	4500-F – D
Hidrocarbonetos Totais	Gravimetria	5520 – F
Índice de Fenóis	Colorimetria	5530 – C
Metais	Absorção Atômica	3110
Nitrato	Colorimetria	4500-NO ₃ ⁻ - E
Óleos e Graxas	Gravimetria	5520 – D
pH	Potenciometria	4500 H ⁺ - B
Sulfato	Colorimetria	4500-SO ₄ ⁻² – E
Surfactantes	Colorimetria	5540 C

3.1 Materiais

Para a realização deste trabalho foram coletadas amostras representativas dos materiais conforme norma DNER – PRO 120/94, que segue as recomendações das normas ABNT NBR 7216 (1987) Amostragem de agregados e seguindo as

recomendações da norma ABNT NBR 9941 (1987) Amostra para ensaios de laboratório como segue:

- 50 kg de Pedriscos 3/8 “; 50 kg de Brita 3/4“ e 20 kg de pó de brita – gentilmente fornecidos pela Britagem Vogelsanger.
- Ligante – Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP -20, produzido pela Petrobrás Distribuidora S. A e gentilmente fornecido pela empresa NTA.
- Escória férrica – resíduo proveniente dos fornos de indução da Empresa Brasileira de Compressores S.A. – Embraco Fundição e gentilmente fornecidos pela mesma.
- *Filler* – Cal Hidratada Chimelli (20 kg, de uso comercial).

3.2 Fases do estudo

3.2.1 Fase preliminar: preparação da amostra de escória férrica

O material proveniente da indústria tem diâmetro médio superior a 1” e vem na forma de patações⁵. Como este material não apresenta resistência adequada para ser empregado como agregado graúdo, é necessário reduzir o seu diâmetro para utilizá-lo como agregado miúdo e realizar o ensaio de granulometria.

O processo de redução do diâmetro da escória férrica foi realizado na Britagem Vogelsanger e aparece ilustrado nas Fotos 1 e 2.

O transporte do material até a Britagem Vogelsanger foi gentilmente realizado pela Embraco.

⁵ Patações: material, com diâmetro médio superior a 2”.



Fonte: O autor.

Data: 08/09/2003.

Foto 1: Carga do britador primário com 4 toneladas de escória.



Fonte: O autor.

Data: 08/09/2003

Foto 2: Entrada da escória no britador para redução do diâmetro.

Após a britagem primária é feita a separação do material fornecido através de esteira vibratória, uma vez que além da escória a amostra contém pedaços de metal e madeira, o que não era esperado.

A informação recebida através do Senhor José Cambraia é que a presença destes materiais ocorre devido à limpeza dos fornos. Como este material ainda não tem utilização definida na região, os resíduos desta limpeza são colocados no mesmo *container*.

A presença destes materiais não nos permite fazer a britagem secundária, na qual a redução do diâmetro é acentuada, pois pode comprometer o britador secundário. Este fato, todavia, não impede a realização dos ensaios, uma vez que a quantidade de agregado miúdo encontrado no final da britagem primária é suficiente para a montagem dos corpos de prova.

O processo de separação dos materiais pode ser acompanhado nas Fotos 3 a 5.



Fonte: O autor.

Data: 08/09/2003.

Foto 3: Britagem da escória e separação dos resíduos



Fonte: O autor.

Data: 08/09/2003.

Foto 4: Resíduos encontrados após a britagem. Nota-se a presença de grumos de ferro e pedaços de madeira.



Fonte: O autor.

Data: 08/09/2003.

Foto 5: Escória granulada após a britagem.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados da pesquisa e a discussão dos mesmos.

4.1 Fase 1: Ensaio dos agregados Resultados

4.1.1 Classificação granulométrica

A classificação granulométrica dos agregados é feita de maneira similar à dos solos. Os resultados podem ser dispostos em tabelas ou apresentados sob forma gráfica. As apresentações dos resultados desses ensaios estão dispostas em tabelas, visando facilitar os cálculos para composição dos corpos de prova.

A ABNT NBR 7211 (1983) define o tamanho dos agregados graúdos e miúdos:

- Agregado graúdo: passa por uma peneira ABNT de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e fica retido na peneira ABNT de 4,8 mm (peneira nº 10).
- Neste estudo são utilizados agregados com tamanho máximo a partir de 19,1 mm (3/4”).
- Agregado miúdo: agregado que passa na peneira ABNT 4,8 mm (peneira nº 10) e é retido na peneira ABNT 0,075 mm (peneira nº 200).
- Material de enchimento (*filler*): material que passa pela peneira ABNT 0,075 mm (nº 200).

Os valores encontrados após a classificação granulométrica realizada conforme norma ABNT NBR 7217 (1987) dos agregados estão dispostos no Quadro 1 e na Tabela 5.

LABORATÓRIO/LABORATORISTA					Vogelsanger / MÁRIO ALVES/ JONI FUSINATO				
DATA DO ENSAIO					10/09/03				
REGISTRO DE LABORATÓRIO					177/03	178/03	179/03	MÉDIA (177/03 E 178/03)	
GRANULOMETRIA (via úmida)	PENEIRA DE MALHA QUADRADA (abertura)	ASTM	3/4"	19,1	75,6	78,5	83,4	77,0	100,0
			1/2"	12,7	68,9	69,7	75,5	69,3	90,0
			3/8"	9,5	64,9	64,7	71,6	64,8	84,1
			N° 4	4,8	52,9	51,5	59,2	52,2	67,8
			N° 10	2,0	40,7	39,1	47,2	39,9	51,8
			N° 40	0,42	24,8	23,7	31,3	24,2	31,4
			N° 80	0,18	13,2	13,2	17,3	13,2	17,1
			N° 200	0,074	4,2	4,4	5,9	4,3	5,6

Observações:

- 1- A amostra da escória em questão submetida a britagem primária apresentou contaminação de partículas metálicas que deve ser eliminada no processo de geração para permitir aproveitamento em pavimentação rodoviária, inclusive com redução de diâmetro.
- 2- Em decorrência do processo de britagem utilizada (apenas primária) e para fins exclusivos dos estudos, a fração retida na malha de 3/4" foi desprezada
- 3- Na determinação da média dos resultados dos ensaios granulométricos foi desprezada a amostra de registro 179/03.

Quadro1: Classificação granulométrica da escória férrica.

Peneira de Malha Quadrada		% PASSANDO, EM PESO ⁶ .			
		BRITAGEM VOGELSANGER		ESCÓRIA	CAL HIDRATADA
ABERTURA		3/4" – 3/8"	3/8" - FUNDO		
ASTM	MM				
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	79,8	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	34,8	100,0	100,0	100,0
N° 4	4,8	3,7	86,2	100,0	100,0
N° 10	2,0	2,4	55,4	98,5	100,0
N° 40	0,42	1,8	26,6	49,3	100,0
N° 80	0,18	1,3	16,1	17,6	98,4
N° 200	0,074	0,8	7,8	2,1	74,7

Fonte: Laboratório: Britagem Vogelsanger.
Laboratoristas: Joni Fusinato e Mário Alves.
Data: 10/09/2003

Tabela 5: Classificação granulométrica dos agregados 3/4 "a 3/8" e 3/8 " a fundo.

4.2 Fase 2: Composição da mistura de agregados

Com base na classificação granulométrica dos materiais disponíveis, são selecionados os mais adequados e com eles compostos a mistura de agregados com enquadramento na faixa C da DNER ES 313/97.

Para dar seqüência aos estudos, torna-se necessário a realização do ensaio para determinação do equivalente de areia da mistura conforme norma DNER – ME 054/97 que segue as recomendações da norma ABNT 12052/92.

⁶ O termo peso, apesar de incorreto quando usado como sinônimo de massa, é amplamente difundido no meio técnico e por isso adotado nesta pesquisa, evitando assim modificação de nomenclatura já consagrada pelo uso.

São realizados três ensaios em misturas proporcionais, visando verificar para uma faixa de rolamento o índice de equivalente de areia igual ou superior a 55% conforme especificação sobre agregado miúdo item 5.1.2.2 da norma do DNER-ES 313/97.

O ensaio de equivalente de areia foi realizado no laboratório da Britagem Vogelsanger (Anexo A) e o resultado obtido está expresso na Tabela 6:

	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Amostra 3 (%)
Brita 3/4" a 3/8" – 15% 3/8" a zero – 48% Escória – 35% Filler (cal hidratada) – 2%	53,8	52,9	55,6
Média (%)	54,1		

Fonte: Laboratório: Britagem Vogelsanger.

Tabela 6: Ensaio do equivalente de areia da mistura

Com base na classificação granulométrica dos agregados, é montada a Tabela 7, relacionando a sua distribuição em valores percentuais para enquadramento na Faixa C do DNER.

FRAÇÕES	% EM PESO RETIDA								
	3/4 – 3/8"		3/8" – 0		ESCÓRIA		CAL HIDRAT.		MISTURA
3/4" – 1/2"	20,2	3,030	0,0	0,000	10,0	3,500	0,0	0,000	6,530
1/2" – 3/8"	45,0	6,750	0,0	0,000	5,9	2,065	0,0	0,000	8,815
3/8" – Nº 4	31,1	4,665	13,8	6,624	16,3	5,705	0,0	0,000	16,994
Nº 4 – Nº 10	1,3	0,195	30,8	14,784	16,0	5,600	0,0	0,000	20,579
Nº 10 – Nº 40	0,6	0,090	28,8	13,824	20,4	7,140	0,0	0,000	21,054
Nº 40 – Nº 80	0,5	0,075	10,5	5,040	14,3	5,005	1,6	0,032	10,152
Nº 80 – Nº 200	0,5	0,075	8,3	3,984	11,5	4,025	23,7	0,474	8,558
Nº 200 – FUNDO	0,8	0,120	7,8	3,744	5,6	1,960	74,7	1,494	7,318
% EM PESO	100,0	15,000	100,0	48,000	100,0	35,000	100,0	2,000	100,000

Fonte: O autor.

Tabela 7: Distribuição percentual nas peneiras dos agregados e da escória de acordo com estudo granulométrico para enquadramento na Faixa C.

Uma vez definida a composição percentual dos agregados, a próxima etapa é calcular o valor das massas (em gramas) que correspondem aos valores percentuais que atendam ao projeto. Estes valores estão na Tabela 8.

FRAÇÕES	Massas (gramas)								MISTURA	
	3/4 – 3/8"		3/8" – 0		ESCÓRIA		CAL HIDRAT.		% EM PESO	
	SIMP	ACUM	SIMP	ACUM	SIMP	ACUM	SIMP	ACUM	RETIDO	PASS
3/4" – 1/2"	36,4	36,4	0,0	36,4	42,0	78,4	0,0	78,4	6,5	93,5
1/2" – 3/8"	81,0	159,4	0,0	159,4	24,8	184,2	0,0	182,4	15,4	84,6
3/8" – Nº 4	56,0	240,2	79,5	319,7	68,5	388,2	0,0	388,2	32,4	67,6
Nº 4 – Nº 10	2,3	390,5	177,4	567,9	67,2	635,1	0,0	635,1	52,9	47,1
Nº 10 – Nº 40	1,1	636,2	165,9	802,1	85,7	887,8	0,0	887,8	74,0	26,0
Nº 40 – Nº 80	0,9	88,7	60,5	949,2	60,0	1.009,2	0,4	1.009,6	84,1	15,9
Nº 80 – Nº 200	0,9	1.010,5	47,8	1.058,3	48,3	1.106,6	5,7	1.112,3	92,7	7,3
Nº 200 - 0	1,4	1.113,7	44,9	1.158,6	27,5	1.182,1	17,9	1.200,0	100,0	0,0
TOTAL	180,0	180,0	576,0	756,0	420,0	1.176,0	24,0	1.200,0		
% EM PESO	15	15	48	63	35	98	2	100		

Fonte: O autor.

Tabela 8: Distribuição da massa nas peneiras dos agregados e da escória de acordo com estudo granulométrico para enquadramento na Faixa C.

As características Marshall da mistura asfáltica contendo um teor ótimo de betume (ligante CAP 20) devem atender a especificação DNER-ES 313/97. Entretanto, para possibilitar tal escolha, são moldados corpos de prova da mistura de agregados a que adicionamos teores variáveis de ligante (chamados traços), partindo de uma estimativa teórica.

Para esta estimativa, pode-se apoiar na experiência do técnico ou em uma série de fórmulas semi-empíricas, baseadas em considerações de superfície específica (BUZATTI, 1991).

No estudo realizado, é adotada a recomendação de teores que variam entre 4,5% a 6,5% para realização do traço. Estes valores são adotados com base na experiência do Engenheiro Camacho bem como na experiência obtida pela Usina de Asfalto da Prefeitura Municipal de Joinville (PMJ) e da Usina de Asfalto e Terraplanagem Vogelsanger, que confeccionam corpos de prova para os materiais da região, ficando o teor ótimo de betume para projetos similares, entre 5% e 6%.

A relação dos valores percentuais dos agregados e betume (ligante CAP 20) e as massas (em gramas) utilizadas para preparo dos corpos de prova estão descritos na Tabela 9.

COMPONENTES	%	M1	M2	M3	M4	M5
3/4" – 3/8	15	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00
3/8" – Fundo	48	576,00	576,00	576,00	576,00	576,00
Escória Férrica	35	420,00	420,00	420,00	420,00	420,00
Filler - Cal Hidratada	2	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Total Agregados	100	1.200,00	1.200,00	1.200,00	1.200,00	1.200,00
Cap 20		56,54	63,16	69,84	76,50	83,42
Total Agregados + CAP 20		1.256,54	1.263,16	1.269,84	1.276,60	1.283,42
% CAP Por Fora (Agregado = 100 %)		4,71	5,26	5,82	6,38	6,95
% CAP Por Dentro (Agregado + CAP = 100 %)		4,50	5,00	5,50	6,00	6,50
TEMPERATURA DE MOLDAGEM (°C)		150	150	150	150	150

Fonte: O autor.

Tabela 9: Composição final dos corpos de prova para os estudos Marshall da mistura de agregados e CAP (DNER-ME 107/94).

Com as misturas conforme indicado na Tabela 9, são preparados, para cada teor de ligante, três corpos de prova, visando a realização do Ensaio Marshall, com energia de compactação de 75 golpes por face.

Os corpos de prova foram gentilmente moldados na Usina de Asfalto da Prefeitura Municipal de Joinville com o auxílio do laboratorista Luiz Francisco da Silva.

As Fotos 6 a 10 ilustram o processo de preparo dos corpos de prova.



Fonte: O autor.

Data: 19.03.2003.

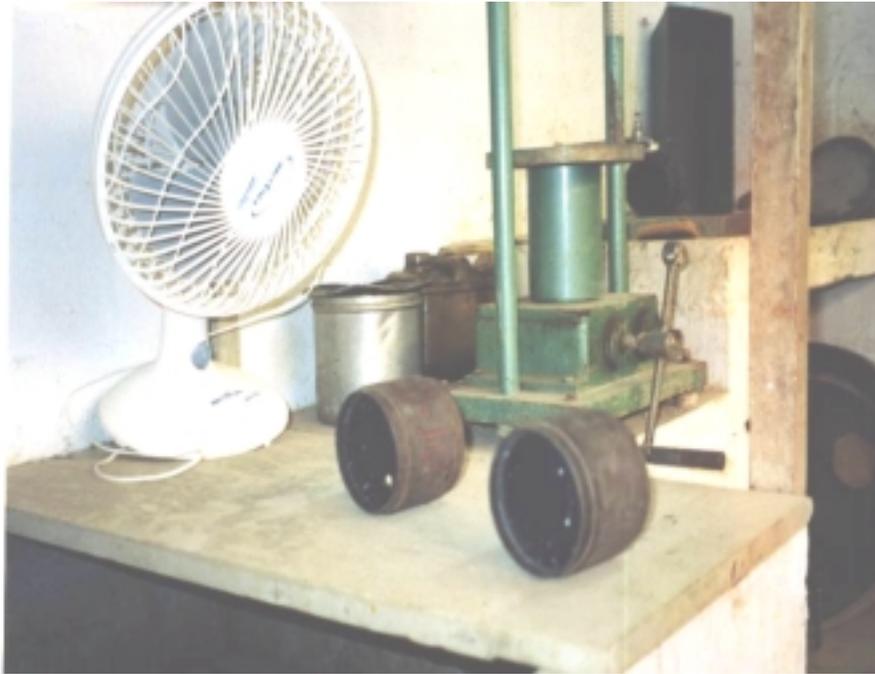
Foto 6: Retirada dos agregados da estufa, aquecidos a 150 °C, para mistura com ligante.



Fonte: O autor.

Data: 19.09.2003.

Foto 7: Preparação da mistura dos agregados com ligante a 150 °C.



Fonte: O autor.

Data: 19.09.2003.

Foto 8: Resfriamento dos corpos de prova



Fonte: O autor.

Data: 19.09.2003.

Foto 9: Retirada dos corpos de prova após resfriamento.



Fonte: O autor.

Data: 19.09.2003.

Foto 10: Corpos de prova preparados e identificados com os respectivos teores de ligante.

4.3 Fase 3: Determinação de densidade, estabilidade e fluência

Nesta fase são determinadas as densidades de todos os agregados que compõem a mistura e a dos corpos de prova. A determinação das densidades é importante para o cálculo de parâmetros que determinam o teor ótimo de betume. Posteriormente, é verificado o valor da estabilidade e fluência dos corpos de provas.

4.3.1 Determinação das densidades dos agregados graúdos, miúdos e finamente pulverizados

Ramalho (2003) define as densidades dos materiais através da relação entre sua massa e volume nas condições ambientes.

Buzati (1991) confirma que para cada tipo de agregado se emprega uma técnica diferente, cada uma chegando a um resultado final que, mesmo no caso de materiais de mesma natureza, podem apresentar diferenças consideráveis.

Após a confecção dos corpos de prova são feitas as determinações das densidades real e aparente⁷ dos seus componentes e posteriormente a determinação da densidade média da mistura, não considerando valores nitidamente discrepantes (BUZATTI, 1991; CAMACHO, 2003⁸).

Devido a quantidade de ensaios para a determinação das densidades, opta-se por apresentar os valores médios encontrados no Quadro 2, deixando o detalhamento dos mesmos para o Apêndice A.

⁷ É a relação entre a massa de certa porção de agregado e o volume ocupado nas condições de compactação em que estiver.

⁸ Informação obtida através de conversa entre o autor e o Engenheiro Camacho.

Densidade Real dos Agregados	
Agregado 3/4" a 3/8"	2,847
Agregado 3/8" a Fundo	2,812
Agregado Escória Férrica	3,055
Agregado Cal Hidratada (<i>Filler</i>)	2,476
Densidade Aparente dos Agregados	
Agregado 3/4" a 3/8"	2,694
Agregado 3/8" a Fundo	2,791
Agregado Escória Férrica	2,947
Agregado Cal Hidratada (<i>Filler</i>)	0,0
Densidade Média dos Agregados	
Agregado 3/4" a 3/8"	2,770
Agregado 3/8" a Fundo	2,802
Agregado Escória Férrica	3,001
Agregado Cal Hidratada (<i>Filler</i>)	2,476
Densidade Média da Mistura	
	2,856

Fonte: O autor.

Os valores das densidades estão expressos em g/cm³.

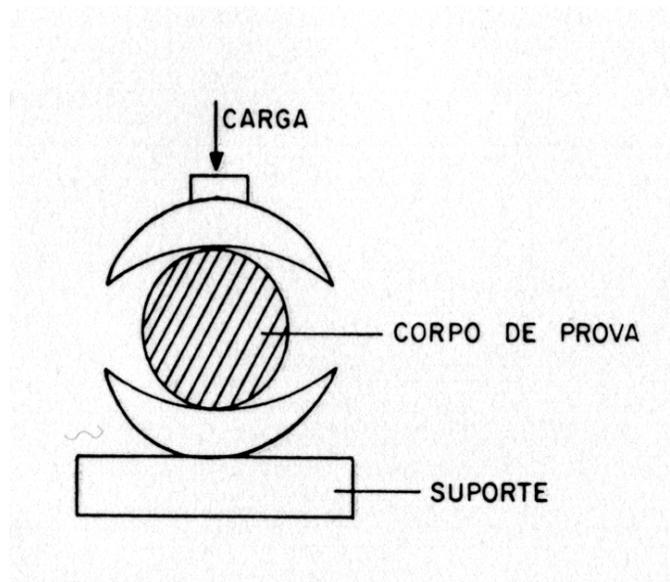
Os ensaios, métodos, cálculos e Normas utilizados para a determinação das densidades estão no Apêndice A.

Quadro 2: Densidades dos agregados e da mistura.

4.3.2 Determinação da estabilidade e fluência

A Norma DNER - ME 043/95 define a Estabilidade Marshall como sendo a resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo de prova, quando moldado e ensaiado de acordo com o processo estabelecido neste método, expresso em N (newton) ou kgf (quilograma-força).

A Figura 2 mostra esquematicamente como é aplicada a carga ao corpo de prova:

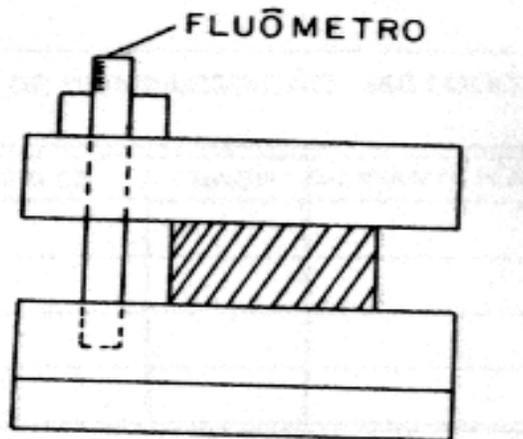


Fonte: Buzatti (1991).

Figura 2: Representação esquemática do teste de estabilidade na prensa Marshall.

Quanto à fluência, a mesma norma a define como sendo a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial até a aplicação da carga máxima, expressa em centésimos de polegada (0,01") ou em milímetros (mm).

A Figura 3 mostra esquematicamente como é realizado o teste de fluência no corpo de prova:



Fonte: Buzatti (1991).

Figura 3: Representação esquemática do teste de fluência na prensa Marshall

Para iniciar o ensaio de Estabilidade e Fluência, os corpos de prova são colocados em banho-maria a uma temperatura de 60 °C por um período de 30 a 40 minutos, sendo colocado em seguida no molde de compressão.

A prensa é então operada de tal modo que seu êmbolo se eleva a uma velocidade de 5 cm por minuto, até o rompimento do corpo de prova, o que é observado no deflectômetro pela indicação de um máximo. A leitura deste máximo nos fornece a estabilidade Marshall. Este valor deve ser corrigido para a espessura do corpo de prova ensaiado, multiplicando-o por um fator de correção que é função da espessura do mesmo.

A fluência é obtida simultaneamente ao teste da estabilidade, através da leitura do deflectômetro.

As leituras do deflectômetro e cálculos para encontrar o valor da estabilidade e fluência estão no Apêndice B.

Os valores obtidos para a estabilidade e fluência estão expressos na Tabela 10:

Ligante (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
4,5	905,75	2,72
5,0	1007,6	2,82
5,5	1333,0	3,56
6,0	1069,4	4,06
6,5	1014,6	4,42

Tabela 10: Valores da estabilidade e fluência em função do percentual de ligante.

As Fotos 11 a 13 ilustram a realização destes ensaios no laboratório da usina de britagem Vogelsanger:



Fonte: O autor.

Data: 22.09.2003.

Foto 11: Preparação dos corpos de prova em banho-maria.



Fonte: O autor.

Data: 22.09.2003.

Foto 12: Montagem do dispositivo para o ensaio Marshall.



Fonte: O autor.

Data: 22.09.2003.

Foto 13: Prensa utilizada para ensaio Marshall (estabilidade e fluência).

Após esta etapa é feito o cálculo teórico das densidades para cada corpo de prova. Esses valores nos permitem encontrar a porcentagem de vazios da mistura (% V_v), a porcentagem de vazios do agregado mineral (%VAM) e a relação betume – vazios (%RBV) necessários para o estabelecimento do teor ótimo de betume.

4.3.3 Determinação do teor ótimo de betume (ligante)

Para a determinação do teor ótimo de betume calcula-se:

- a) A densidade máxima;
- b) A densidade aparente;
- c) Vazios da mistura;
- d) Vazios do agregado mineral;
- e) Relação betume-vazios

a) Cálculo da densidade máxima

É por definição, a densidade da mistura considerada sem vazios. Para obtê-la, é utilizado o processo teórico, que consiste no cálculo da densidade máxima a partir das densidades de cada componente da mistura (agregado e ligante). Neste caso, a densidade máxima é chamada de teórica e sua expressão é, conforme Buzatti (1991).

$$Dt = \frac{100}{\frac{\%Aggreg}{DM} + \frac{\%CAP}{Dcap}}$$

Onde:

Dt = Densidade teórica do corpo de prova

% agreg = Percentual da mistura dos agregados

% CAP = Percentual do ligante (CAP 20)

DM = Densidade da mistura

Dcap = Densidade do ligante = 1,020 g/cm³

A Tabela 11 mostra a relação entre a densidade teórica e o teor de ligante dos corpos de prova. O cálculo necessário para encontrar a densidade teórica máxima está no Apêndice A.

Ligante (%)	Densidade teórica máxima (g/cm ³)
4,5	2,641
5,0	2,619
5,5	2,598
6,0	2,577
6,5	2,556

Fonte: O autor.

Tabela 11: Densidade teórica máxima em função do ligante

b) Densidade aparente

Buzatti (1991) traz como definição de densidade aparente a relação entre a massa de certa porção de agregado e o volume ocupado nas condições de compactação em que estiver.

A Tabela 12 mostra a relação entre a densidade aparente e o teor de ligante dos corpos de prova. O cálculo necessário para encontrar as densidades aparentes está no Apêndice A.

Ligante (%)	Densidade aparente (g/cm³)
4,5	2,416
5,0	2,422
5,5	2,493
6,0	2,479
6,5	2,465

Fonte: O autor.

Tabela 12: Densidade aparente em função do ligante.

c) Percentagem de vazios da mistura (%V_v)

Em uma mistura asfáltica, o volume de vazios do agregado mineral ocupado pelo ar, em percentual (%) do volume total, chama-se vazios da mistura.

Para um determinado agregado, a percentagem de vazios (%V_v) nele existente é função do esforço de compactação empregado no adensamento do mesmo.

Pelo uso, o revestimento sofre um efeito posterior de compactação. Neste caso, se o teor de asfalto for tal que preencha totalmente os vazios, haverá exsudação, bem como aumento na plasticidade e possibilidade de grandes deformações e rupturas do pavimento (PETRUCCI, 1995).

A percentagem de vazios na mistura é dada pela equação:

$$\%V_v = 100 - (d\%)^9$$

Onde:

$\%V_v$ = percentual de vazios

$\%d$ = densidade aparente expressa como % da densidade máxima teórica.

A Tabela 13 mostra a relação entre os vazios da mistura e o teor de betume dos corpos de prova. O cálculo necessário para encontrar os vazios da mistura está no Apêndice C.

Ligante (%)	Vazios da mistura ($\%V_v$)
4,5	8,5
5,0	7,5
5,5	4,0
6,0	3,8
6,5	3,6

Fonte: O autor.

Tabela 13 Percentagem de vazios da mistura ($\%V_v$) em função do ligante.

⁸ A equação apresentada não é única, porém todas levam ao mesmo resultado. O mesmo acontece com o cálculo dos vazios do agregado mineral (VAM) e para a relação betume-vazios (RBV). Neste trabalho opta-se pelo uso das equações utilizadas pelo Consórcio Engepasa cujo uso é amplamente difundido no meio técnico de Joinville e região.

d) Percentagem de vazios do agregado mineral (%VAM)

A percentagem de vazios do agregado mineral é por definição a soma da percentagem de vazios do agregado mais a percentagem ocupada pelo betume (CAP 20). Pode ser calculado através da equação:

$$\%VAM = 100 - \frac{d}{DM} \times (100 - \%CAP)$$

Onde:

DM = Densidade média da mistura

d = Densidade média aparente da mistura

A Tabela 14 mostra a relação entre os vazios do agregado mineral (VAM) e o teor de ligante dos corpos de prova. O cálculo necessário para encontrar esta relação está no Apêndice D.

Ligante (%)	%VAM
4,5	19,21
5,0	19,44
5,5	17,50
6,0	18,41
6,5	19,31

Fonte: O autor.

Tabela 14: Percentagem de vazios do agregado mineral (%VAM) em função do ligante.

e) Relação Betume – Vazios (RBV%)

A percentagem de vazios do agregado cheio com asfalto (relação betume-vazios) é igual a relação entre o volume de asfalto, em percentagem do volume total da amostra. Pode ser calculado pela equação:

$$RBV\% = \frac{\%VAM - \%V_V}{\%VAM} \times 100$$

A Tabela 15 mostra a relação betume-vazios e o teor de ligante dos corpos de prova. O cálculo para encontrar esta relação está no Apêndice E.

Ligante (%)	RBV (%)
4,5	55,7
5,0	61,4
5,5	77,1
6,0	79,4
6,5	81,4

Fonte: O autor.

Tabela 15: Relação Betume – Vazios em função do ligante

4.4 Caracterização da Escória Férrica *in natura*

A amostragem para caracterização do resíduo *in natura*, mistura de asfalto com escória e asfalto com agregados tradicionais é realizada conforme norma ABNT NBR 10007 – Amostragem de resíduos e efetuada pela empresa Essencis Soluções Ambientais S. A – Curitiba, a pedido da Embraco Fundação, que gentilmente patrocina estes ensaios.

Segundo a Essencis, após a amostragem, o resíduo foi encaminhado ao laboratório, onde teve separado as quantidades necessárias à realização das análises de massa e lixiviação, conforme ABNT NBR 10005 – Lixiviação de resíduos, solubilização conforme ABNT NBR 10006 – Solubilização de resíduos e sugeriu sua classificação baseada na ABNT NBR 10004 – Resíduos Sólidos.

Os resultados obtidos estão expressos na seqüência e a discussão dos mesmos é feita no item 4.6 que trata do estudo da viabilidade ambiental.

Escória Férrica				
Testes		Resultados		
pH 1:1		3,70		
Densidade		1,54 g/cm ³		
Líquidos Livres		Ausente		
Umidade		0,11%		
Odor		Fraco		
Cor		Cinza		
Aspecto		Sólido		
Teste de Lixiviação				
pH inicial		7,30		
pH final		5,00		
Volume de Ácido Acético 0,5 N		15,00 ml		
Volume total (lixiviado)		2000 ml		
Massa		100,00 g		
Tempo de Análise		24 h		
Escória Férrica				
Parâmetros	Extrato Lixiviado (mg/l)	Limite máximo (mg/l) NBR 10004	Análise de massa (mg/kg)	Limite Máximo (mg/kg) NBR 10004
Alumínio	-	-	*ND	-
Antimônio	-	-	ND	-
Arsênio	ND	ND	ND	1000
Bário	ND	100	ND	-
Berílio	-	-	ND	100

Cádmio	ND	ND	ND	-
Chumbo	ND	ND	ND	1000
Cianeto	-	-	ND	1000
Cobalto	-	-	ND	-
Cobre	ND	-	155,30	-
Cloretos	-	-	235,66	-
Cromo Hexavalente	-	-	ND	100
Cromo Total	ND	ND	87,18	-
Fenol	-	-	ND	10
Ferro	-	-	102.600,00	-
Fluoretos	0,05	0,05	-	-
Magnésio	-	-	1.073,00	-
Manganês	-	-	9.002,00	-
Mercúrio	ND	ND	ND	100
Molibdênio	-	-	ND	-
Níquel	ND	-	28,51	-
Óleos e Graxas	-	-	162,80	-
Prata	ND	ND	ND	-
Selênio	ND	ND	ND	100
Tálio	-	-	ND	-
Vanádio	-	-	ND	1000
Zinco	ND	-	26,41	-

Fonte: O autor.

ND: Não determinado

Número da amostra: 132/02

Data: 2002.

Quadro3: Resultados dos ensaios realizados com a escória férrica

Teste	Resultados	Limite Máximo (mg/l) NBR 10004
Alumínio	ND	0,20
Arsênio	ND	0,005
Bário	ND	1,00
Cádmio	ND	0,005
Chumbo	ND	0,05
Cianeto	ND	0,10
Cloreto	5,99	250,0
Cobre	ND	1,00
Cromo Total	ND	0,05
Fenol	ND	0,001
Ferro	0,44	0,30
Fluoreto	0,15	1,5
Manganês	1,25	0,1
Mercúrio	ND	0,001
Nitrato	10,0	10,0
Prata	ND	0,05
Selênio	ND	0,01
Sódio	9,27	200,0
Zinco	ND	5,00
Dureza	ND	500,0
Sulfato	10,32	400,0
Surfactantes	0,0027	0,20

Fonte: O autor.

ND: Não determinado

Número da amostra: 132/02

Data: 2002.

Quadro 4 : Análise do solubilizado da escória férrica.

Mistura de asfalto com escória				
Testes		Resultados		
pH 1:1		10,05		
Densidade		1,20 g/cm ³		
Líquidos Livres		Ausente		
Cinzas		94,47%		
Matéria Orgânica		5,32%		
Umidade		0,21%		
Odor		Fraco		
Cor		Preto		
Aspecto		Sólido		
Teste de Lixiviação				
pH inicial		9,59		
pH final		4,79		
Volume de Ácido Acético 0,5 N		20,00 ml		
Volume total (lixiviado)		2000 ml		
Massa		100,17 g		
Tempo de Análise		24 h		
Mistura de asfalto com escória				
Parâmetros	Extrato Lixiviado (mg/l)	Limite máximo (mg/l) NBR 10004	Análise de massa (mg/kg)	Limite Máximo (mg/kg) NBR 10004
Alumínio	-	-	1.263,00	-
Antimônio	-	-	<LQ*	-
Arsênio	<LQ	5,0	<LQ	1000
Bário	<LQ	100	<LQ	-
Berílio	-	-	<LQ	100
Cádmio	<LQ	0,5	<LQ	-
Chumbo	<LQ	5,0	<LQ	1000
Cianetos	-	-	<LQ	1000
Cobalto	-	-	4,80	-
Cobre	0,14	-	30,31	-
Cromo Hexavalente	-	-	<LD	100
Cromo Total	<LQ	5,0	15,60	-
Fenol	-	-	<LQ	10
Ferro	-	-	29.500,00	-
Fluoretos	0,22	150	-	-

Magnésio	-	-	2.240,00	-
Manganês	-	-	469,00	-
Mercúrio	<LQ	0,1	<LQ	100
Molibdênio	-	-	<LQ	-
Níquel	<LQ	-	19,56	-
Óleos e Graxas	-	-	4,84%	-
Prata	<LQ	5,0	<LQ	-
Selênio	<LQ	1,0	<LQ	100
Tálio	-	-	<LQ	-
Vanádio	-	-	<LQ	1000
Zinco	0,05	-	20,60	-
Benzeno	-	-	<0,087	-
Tolueno	-	-	<0,087	-
Etil Benzeno	-	-	<0,087	
Xileno	-	-	<0,087	
1,2 Dicloroetano	-	-	<0,0125	20
Tetracloroeto de carbono	-	-	<0,159	6
Tricloroetano	-	-	<0,146	60
Tetracloroetano	-	-	<0,0162	20
Clorofórmio	-	-	<0,148	60
1,1 Dicloroetano	-	-	<0,121	0,6

Fonte: O autor.

*LQ: Limite de Quantificação.

Número da amostra: 1358/03

Data: Janeiro/2004.

Quadro 5: Teste de lixiviação da mistura de asfalto com escória

Teste	Extrato Solubilizado (mg/l)	Limite Máximo (mg/l) NBR 10004
Alumínio	<LQ*	0,20
Arsênio	<LQ	0,05
Bário	<LQ	1,00
Cádmio	<LQ	0,005
Chumbo	<LQ	0,05
Cianetos	<LQ	0,10
Cloretos	6,95	250,0
Cobre	0,05	1,00
Cromo Total	<LQ	0,05
Dureza (mgCaCO ₃ /l)	556,10	500,0
Fenol	<LQ	0,001
Ferro	0,21	0,3
Fluoreto	2,31	1,5
Manganês	<LQ	0,1
Mercúrio	<LQ	0,001
Nitrato	2,98	10,0
Prata	<LQ	0,05
Selênio	<LQ	0,01
Sódio	5,53	200,0
Sulfato	2,95	400,0
Surfactantes	<LQ	0,20
Zinco	0,03	5,0

Fonte: O autor.

*LQ: Limite de Quantificação.

Número da amostra: 1358/03

Data: Janeiro/2004.

Quadro 6: Análise do solubilizado da mistura de asfalto com escória.

Mistura de asfalto sem escória				
Testes		Resultados		
pH 1:1		9,90		
Densidade		1,20 g/cm ³		
Líquidos Livres		Ausente		
Cinzas		94,83%		
Matéria Orgânica		4,92%		
Umidade		0,25%		
Odor		Fraco		
Cor		Preto		
Aspecto		Sólido		
Teste de Lixiviação				
pH inicial		8,9		
pH final		4,87		
Volume de Ácido Acético 0,5 N		17,00 ml		
Volume total (lixiviado)		1000 ml		
Massa		100,07 g		
Tempo de Análise		24 h		
Mistura de asfalto sem escória				
Parâmetros	Extrato Lixiviado (mg/l)	Limite máximo (mg/l) NBR 10004	Análise de massa (mg/kg)	Limite Máximo (mg/kg) NBR 10004
Alumínio	-	-	1.250,00	-
Antimônio	-	-	<LQ*	-
Arsênio	<LQ	5,0	<LQ	1000
Bário	<LQ	100	<LQ	-
Berílio	-	-	<LQ	100
Cádmio	<LQ	0,5	<LQ	-
Chumbo	<LQ	5,0	<LQ	1000
Cianetos	-	-	<LQ	1000
Cobalto	-	-	4,15	-
Cobre	0,74	-	5,62	-
Cromo Hexavalente	-	-	<LD	100
Cromo Total	<LQ	5,0	15,50	-
Fenol	-	-	0,37	10
Ferro	-	-	5.520,00	-
Fluoretos	0,17	150	-	-

Magnésio	-	-	500,00	-
Manganês	-	-	106,00	-
Mercúrio	<LQ	0,1	<LQ	100
Molibdênio	-	-	<LQ	-
Níquel	0,26	-	16,40	-
Óleos e Graxas	-	-	5,71%	-
Hidrocarbonetos líquidos ou bombeáveis a 80 °C	-	-	3,09%	5%
Prata	<LQ	5,0	<LQ	-
Selênio	<LQ	1,0	<LQ	100
Tálio	-	-	<LQ	-
Vanádio	-	-	<LQ	1000
Zinco	0,13	-	11,30	-
Benzeno	-	-	<0,087	20
Tolueno	-	-	<0,087	-
Etil Benzeno	-	-	<0,087	-
Xileno	-	-	<0,087	-
1,2 Dicloroetano	-	-	<0,0125	20
Tetracloroeto de carbono	-	-	<0,159	6
Tricloroetano	-	-	<0,146	60
Tetracloroetano	-	-	<0,0162	20
Clorofórmio	-	-	<0,148	60
1,1 Dicloroetano	-	-	<0,121	0,6

Fonte: O autor.

*LQ: Limite de Quantificação.

Número da amostra: 1359/03.

Data: Janeiro/2004.

Quadro 7: Teste de lixiviação da mistura de asfalto sem escória

Teste	Extrato Solubilizado (mg/l)	Limite Máximo (mg/l) NBR 10004
Alumínio	<LQ*	0,20
Arsênio	<LQ	0,05
Bário	<LQ	1,00
Cádmio	<LQ	0,005
Chumbo	<LQ	0,05
Cianetos	<LQ	0,10
Cloretos	6,95	250,0
Cobre	0,04	1,00
Cromo Total	<LQ	0,05
Dureza (mgCaCO ₃ /l)	20,04	500,0
Fenol	0,005	0,001
Ferro	0,06	0,3
Fluoreto	2,13	1,5
Manganês	<LQ	0,1
Mercúrio	<LQ	0,001
Nitrato	1,10	10,0
Prata	<LQ	0,05
Selênio	<LQ	0,01
Sódio	1,58	200,0
Sulfato	3,42	400,0
Surfactantes	<LQ	0,20
Zinco	0,006	5,0

Fonte: O autor.

*LQ: Limite de Quantificação.

Número da amostra: 1359/03

Data: Janeiro/2004.

Quadro 8: Análise do Solubilizado da mistura de asfalto sem escória.

4.5 Estudo da viabilidade técnica

4.5.1 Classificação granulométrica da escória

O resultado da classificação granulométrica da escória férrica obtido atende as exigências da Norma DNER ES 313/97 para Faixa C, conforme **Tabela 7**.

A Tabela 16 ilustra a distribuição percentual dos agregados e os valores recomendados pela Norma DNER ES 313/97.

Abertura		% PASSANDO, EM PESO										PROJETO	
ASTM	MM	BRITAGEM VOGELSANGER				ESCÓRIA EMBRACO		CAL HIDRATADA		MISTURA OBTIDA	FAIXA DE TRABALHO	FAIXA C	TOLERÂNCIAS DE PROJETO
		3/4 – 3/8"		3/8" – 0		GRAN	35 %	GRAN	2 %				
		GRAN	15 %	GRAN	48 %								
3/4"	19,1	100,0	15,0	100,0	48,0	100,0	35,0	100,0	2,0	100,0	100	± 7%	
1/2"	12,7	79,8	12,0	100,0	48,0	90,0	31,5	100,0	2,0	93,5	88,5/100	± 7%	
3/8"	9,5	34,8	5,2	100,0	48,0	84,1	29,4	100,0	2,0	84,6	77,6/91,6	± 7%	
N° 4	4,8	3,7	0,5	86,2	41,4	67,8	23,7	100,0	2,0	67,6	62,6/72,6	± 5%	
N° 10	2,0	2,4	0,4	55,4	26,6	51,8	18,1	100,0	2,0	47,1	42,1/52,1	± 5%	
N° 40	0,42	1,8	0,3	26,6	12,8	31,4	11,0	100,0	2,0	26,1	21,1/31,1	± 5%	
N° 80	0,18	1,3	0,2	16,1	7,7	17,1	6,0	98,4	2,0	15,9	13,9/15,9	± 2%	
N° 200	0,074	0,8	0,1	7,8	3,7	5,6	2,0	74,7	1,5	7,3	5,3/9,3	± 2%	

Fonte: O autor.

Tabela 16: Distribuição percentual dos agregados.

4.5.2 Composição da mistura

Ocorre uma pequena variação percentual entre a composição da mistura dos corpos de provas teórico e real. A Tabela 17 apresenta essas variações:

Materiais	Valor teórico (%)	Valor real (%)
Agregado 3/4" – 3/8"	15,0	14,18
Agregado 3/8" a Fundo	48,0	45,36
Escória férrica	35,0	33,07
<i>Filler</i> (Cal hidratada)	2,0	1,89
Ligante CAP 20	-	5,50
Total	100,0	100,00

Tabela 17: Composição da mistura dos corpos de prova

Essas variações são comuns e podem ser atribuídas às dispersões dos ensaios, não comprometendo o resultado obtido.

4.5.3 Determinação do equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia obteve média de 54,1%. A amostra 3 obteve como resultado o valor de 55,6%. A norma DNER –ME 054 recomenda valor igual ou superior a 55%. Pode-se atribuir este resultado a uma dispersão de ensaio, possivelmente influenciado pela solução usada. Normalmente, a solução é feita no laboratório, o que pode acarretar desvios na sua composição durante o preparo. O tempo de estocagem do produto também influencia no ensaio.

O ensaio de equivalente de areia não é condição suficiente para reprovar o pavimento.

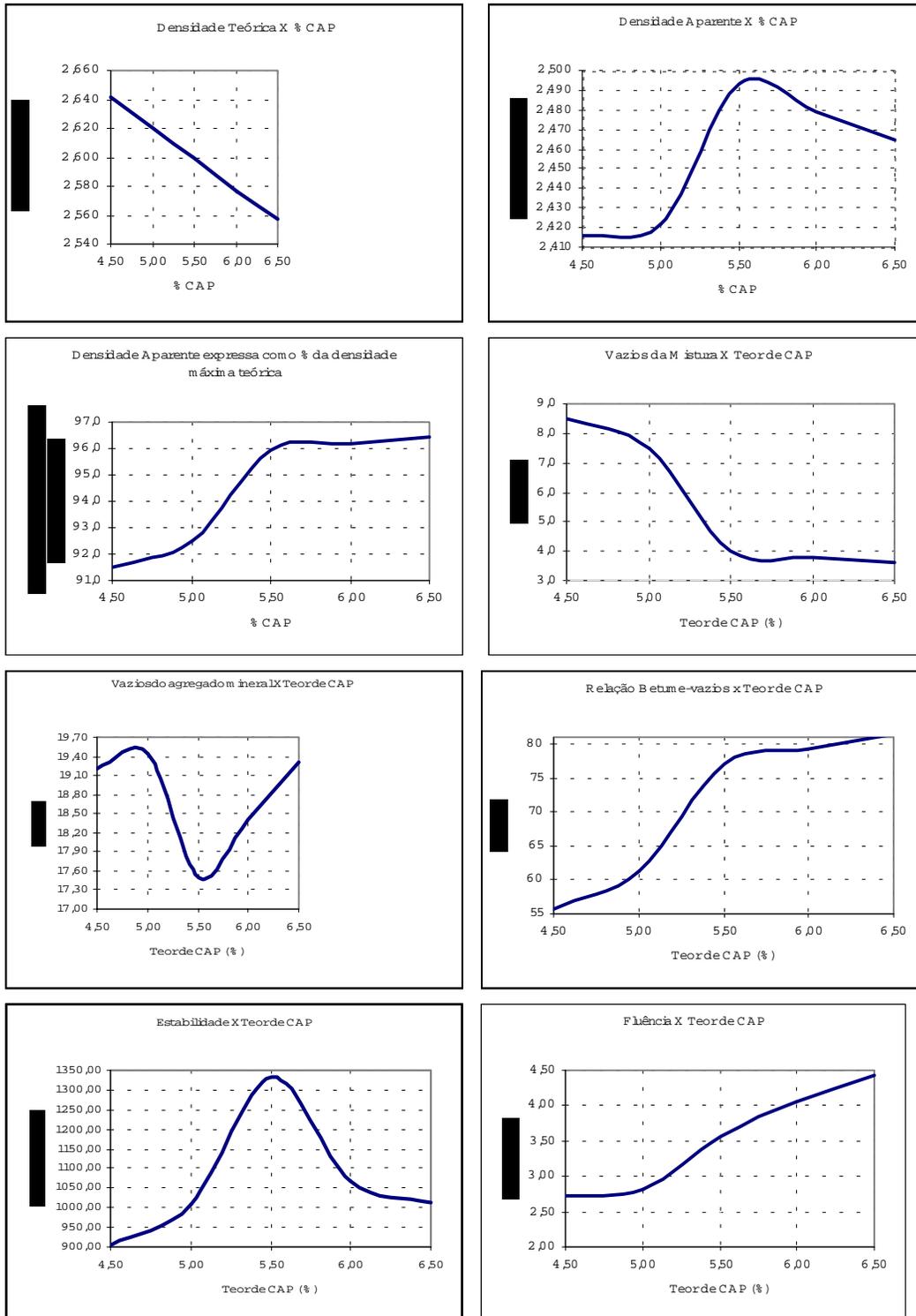
4.5.4 Determinação do teor ótimo de betume (ligante)

Existem diferentes metodologias para a determinação do teor ótimo de ligante. Buzatti (1991) descreve dois métodos utilizados com maior frequência.

No primeiro, constroem-se gráficos que analisam diferentes parâmetros tais como: densidade teórica X teor de CAP, densidade aparente X teor de CAP, estabilidade X teor de CAP, fluência X teor de CAP, entre outros. Posteriormente, faz-se a análise conjunta dos valores obtidos, em relação ao solicitado pela DNER - ES 313/97.

No segundo, o teor ótimo de betume deve ser a média aritmética dos teores obtidos nas curvas para: a) máxima estabilidade; b) máxima densidade; c) média dos limites especificados para os vazios da mistura.

Para a determinação do teor ótimo de ligante nesta pesquisa, é usado primeiramente o critério da análise gráfica de vários parâmetros e, posteriormente, confirmado com a metodologia utilizada pelo consórcio Engepasa.



Fonte: O autor.

Figura 4: Análise gráfica de parâmetros para determinação do teor ótimo de betume.

Pela análise gráfica e baseando-se na DNER 313/97 verifica-se que o teor ótimo de betume obtido é de 5,5%.

Efetuada a verificação através do método proposto pela Engespa temos:

	Parâmetros	Valores	Betume (%)
1	Máxima Estabilidade (kgf)	1.333	5,5
2	Máxima densidade aparente (g/cm ³)	2,493	5,5
3	Média dos limites de fluência (mm)	14,05	5,5
4	Média dos limites de V _v (%)	6,05	5,0
5	Média dos limites de RBV (%)	68,55	5,0
Teor ótimo de betume = (1 +2 + 3 + 4+ 5)/5			5,3

Fonte: O autor.

Tabela 18: Determinação do teor ótimo de betume

O teor ótimo de betume encontrado também pode ser enquadrado em 5,5%, o qual está dentro da faixa de trabalho das pavimentadoras da região.

As características finais do traço e sua comparação com a especificação DNER – ES 313/97 para faixa C encontram-se na Tabela 19:

Características do traço	Valor Encontrado	DNER – ES 313/97
Teor Ótimo de Betume (%)	5,5	-
Densidade Aparente Máxima (g/cm ³)	2,493	-
Densidade Teórica (g/cm ³)	2,598	-
Estabilidade (kgf)	1.333	> 350
Fluência (mm)	3,56	2,0 a 4,5
Volume de Vazios (%)	4,0	3 a 5
Vazios do agregado mineral (%)	17,5	>14
Relação Betume-Vazios (%)	77,1	75 a 82

Fonte: O autor.

Tabela 19: Comparativo entre o traço encontrado e a especificação do DNER

Comparando as características do traço obtido e a especificação DNER – ES 313/97, observa-se que todos os critérios são atendidos.

4.6 Estudo da viabilidade ambiental

4.6.1 Análise do risco de contaminação ambiental do pavimento com adição de escória férrica dos fornos de indução

Para a análise dos riscos de contaminação ambiental, devido à interação da água com produtos contendo resíduos, foi desenvolvida uma grande variedade de testes, baseados nos diferentes testes de lixiviação, o que pode acarretar em dificuldade de aceitação do produto entre regiões que adotam diferentes testes (HILLIER et al., 1999, citado por JOHN, 2000).

John (2000) afirma que no Brasil, há experiência em testes de lixiviação visando analisar a possibilidade de reciclagem é limitada. O ensaio também dificilmente é capaz de simular a complexidade dos fenômenos que ocorrem na

natureza, porém grande esforço de pesquisa está sendo dispendido para verificar a aderência entre os resultados dos testes de lixiviação com os resultados reais de uso.

Apesar do exposto acima, o ensaio de lixiviação e solubilização nos permitem avaliar de forma menos empírica, possíveis conseqüências advindas do uso dos resíduos.

4.6.2 Resíduo *in natura*

A norma brasileira que classifica os resíduos industriais é a NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação que apresenta parâmetros máximos para determinados poluentes na massa bruta, no extrato lixiviado e no extrato solubilizado. De acordo com isso, o resíduo pode ser classificado como Inerte Classe III, Não Perigosos Classe II e como Perigoso Classe I.

Devido à constância do metal utilizado na Embraco Fundição e por conseqüência, da escória gerada, o ensaio de lixiviação e solubilização é realizado em média a cada dois anos. Por esta razão, não foi possível realizar o ensaio apenas da amostra utilizada. Para se certificar que não há variações significantes no resíduo gerado, foi feita comparação com laudos de anos anteriores e verificou-se que os resultados se mantêm próximos, não apresentando variações significativas.

Analisando os resultados obtidos e comparando-os com a ABNT NBR 10004, a escória férrica pode ser classificada como não perigosa – Classe II, pois os teores de ferro e manganês no extrato solubilizado encontram-se acima do especificado (46,7% e 1150% respectivamente).

Essa classificação foi sugerida pela empresa Essencis e confirmada pelo órgão de controle ambiental.

4.6.4 Mistura do asfalto com escória

O resíduo misturado ao asfalto teve queda considerável nos teores de ferro e manganês no extrato solubilizado (45% e 500% respectivamente abaixo do limite máximo da NBR 10004) no extrato solubilizado, estando em conformidade com a NBR 10004, porém a dureza está 10% e o fluoreto está 35% acima do limite máximo dado pela norma.

Quanto à presença do fluoreto e elevação da dureza, verifica-se que não têm relação direta com a adição do resíduo, mas possivelmente, com os materiais usados para asfaltamento.

A empresa Essencis sugere a classificação da mistura como não perigosa – Classe II, devido aos teores de dureza e fluoreto, porém, expressa que cabe ao órgão de controle ambiental definir o tema adequadamente.

4.6.4 Mistura do asfalto sem escória

O asfalto sem adição de escória apresenta teores de fenol e fluoreto acima dos limites especificados no extrato solubilizado (400% e 42% respectivamente), o que sugere sua classificação como não perigoso – Classe II, devido aos teores de fenol e fluoreto encontrados. A presença destes compostos, possivelmente, deve-se

ao do uso de ligante derivado do petróleo. Esta mistura tem a autorização do órgão ambiental.

4.6.5 Comparativo entre mistura do asfalto com e sem escória

Comparando os valores encontrados no extrato solubilizado, pode-se concluir que a adição da escória como agregado miúdo não contribui para a formação de fluoreto e fenol, uma vez que a escória *in natura* não os tem acima dos limites recomendados, e os mesmos estão presentes no asfalto sem adição da escória.

O asfalto contribui de forma significativa para redução dos teores de ferro e manganês, enquadrando o resíduo dentro das limitações propostas pela NBR 10004. Uma explicação possível, é que o asfalto crie um envoltório impermeabilizante ao redor dos grãos, retendo os elementos citados.

Quanto à presença de fenol encontrado acima dos limites no asfalto sem escória e sua ausência quando esta é utilizada, ainda não foi encontrada uma explicação adequada e os estudos devem ser aprofundados.

Quanto às misturas, é válido lembrar que para ambas é sugerida a classificação não perigosa – Classe II.

Cabe ao órgão de controle ambiental julgar se a utilização da escória férrica, como agregado miúdo, tem condições de uso, uma vez que o asfalto sem escória apresenta valores de fenol e fluoreto acima do especificado, mas está sendo utilizado e é liberado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

5.1 Considerações

O presente trabalho teve como objetivo maior verificar a viabilidade técnico-ambiental da utilização da escória férrica proveniente dos fornos à indução, na pavimentação asfáltica, como agregado miúdo.

Com efeito, estabelece-se através da revisão bibliográfica e da pesquisa, que a utilização deste resíduo é viável sob o ponto de vista técnico, não implicando em alteração no processo de pavimentação, porém, quanto à questão ambiental é viável a utilização da escória férrica proveniente dos fornos à indução na pavimentação asfáltica, como agregado miúdo, porém, cabe ao órgão ambiental aprovar ou não o uso da mistura, uma vez que o limite de dureza e fluoreto esta acima do permitido. Quanto à presença do fluoreto, conclui-se que não há correlação direta com o resíduo e sim com os materiais usados, possivelmente o ligante.

A quantidade de resíduo gerado pelas empresas individualmente, apesar de expressivo, não é compatível com a demanda em escala industrial das empresas de britagem e/ou pavimentação.

Como possibilidades têm-se: a criação de uma área adequada com o devido controle ambiental, onde todas as empresas depositem o material até atingir um volume significativo para o processamento ou, a aquisição do resíduo, seja de outras localidades ou através da bolsa de resíduos, para viabilizar seu uso.

Outra possibilidade que não pode ser descartada é a de parceria entre as fundidoras e a administradora do aterro industrial. Como o resíduo atualmente está

sendo depositado neste lugar, o que acaba por comprometer a capacidade do aterro em longo prazo, um acordo entre as partes, em que o gerenciamento e beneficiamento da escória seriam realizados pela administração do aterro, poderiam resultar em ganhos importantes tanto ambientais, quanto econômicos para ambos.

Outra dificuldade significativa diz respeito à qualidade do resíduo. Para torná-lo viável comercialmente, deve-se ter aprovação do órgão ambiental, ter constância na sua composição e fornecimento. Além disso, o material precisa estar na granulometria adequada e ser isento de grumos de ferro e outros materiais oriundos da limpeza dos fornos, particularmente, pedaços de madeira, cuja presença poderia danificar seriamente os britadores, especialmente os secundários e terciários. Este fato poderia afetar a britagem da escória com granulometria constante, afetando a qualidade do produto final.

Como alternativa para a retirada dos metais, pode ser feita uma triagem através de separação magnética. Quanto aos objetos não metálicos, faz-se necessário orientar as pessoas que limpam os fornos para não depositá-los juntamente com a escória.

A obtenção da granulometria correta pode ser resolvida através da compra de um britador de pequeno porte, rateado entre as empresas participantes ou, viabilizando-se o empréstimo de um britador móvel. A empresa de britagem sugere que, caso haja volume suficiente, esta possibilidade é exequível.

A obtenção da licença ambiental para uso como agregado junto aos órgãos ambientais, além de ser obrigatória, pode impulsionar a abertura deste mercado.

Como este material ainda não tem mercado na região, não deve ser descartada a possibilidade de se subsidiar o uso, até plena aceitação pelo mercado consumidor, seja por parte das fundidoras ou por parte da administradora de aterro.

Com a escassez das minas para retirada de rochas acentuando-se, a dificuldade em se encontrar locais para aterro, materiais como a escória podem ser uma alternativa interessante.

5.2 Recomendações

A comunidade científica poderia se dedicar a pesquisar o que segue:

- Avaliar a influência nas condições da mistura da escória férrica dos fornos à indução oriundos de diferentes empresas e validar, ou não, o seu uso como agregado miúdo sob estas condições.
- Monitorar o comportamento do pavimento que utiliza este resíduo ao longo do tempo, caso as sugestões desta pesquisa se efetivarem.
- Efetuar o cálculo financeiro da substituição do agregado miúdo tradicional pela escória férrica e verificar sua viabilidade econômica e comercial.
- Para ter aceitação de uso, deve-se garantir que a mistura de escórias vindas de diferentes empresas e conseqüentemente, com pequenas variações entre si, não prejudiquem a mistura asfáltica, respeitando os parâmetros encontrados nesta pesquisa. Novo estudo utilizando este mix deve ser realizado e aprofundado.

- Para próxima etapa, sugere-se a pavimentação de ruas com extensões entre 50 e 150 m. Isso permite a aquisição de experiência no emprego deste material, especialmente caso apareçam problemas operacionais não detectados na fase da pesquisa e monitoramento do pavimento através do tempo, permitindo traçar um paralelo entre o pavimento com e sem escória.

REFERÊNCIAS

ASSIS, R. M. et al. Algumas questões ligadas ao controle ambiental na siderurgia e suas soluções. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS, 1997, Vitória. **Anais...** Vitória, 1997, p. 15-28.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **O Brasil e a futura série ISO 14000**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 6024**: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento escrito: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6027**: informação e documentação: sumário: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6028**: resumos. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 7216**: Amostragem de agregados. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7217**: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9937**: Agregados: determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9941**: Redução de amostra de campo de agregados para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10005**: Lixiviação de resíduos. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10006**: Solubilidade de resíduos. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12052**: Solo ou agregado miúdo: determinação do equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

BARROSO, L. R. Proteção do meio ambiente na Constituição Brasileira. **Revista Doutrina**. Rio de Janeiro, p. 58-79, nov. 1995.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**: concreto, madeira, cerâmica, metais, plásticos e asfalto: novos materiais para construção civil. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. v. 2.

BITTENCOURT, A. L. B. **Otimização de escória do forno elétrico da Caraíba Metais S.A.**, 1992. 187f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia). Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BUZATTI, DAURO JOSÉ. **Laboratório de asfalto**. 2. ed. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica, 1991.

CASTILHOS JR., A. G. et al. Inventário de resíduos industriais no Estado de Santa Catarina: perspectivas de uso na construção civil. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 1., 1997, Canela, RS 18-21 nov. 1997. ANTAC. p. 27-36.

CINCOTTO, M. A. A utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1988. p. 171-181.

_____. Cimento alternativo à base de escória de alto-forno. **Construção Região Sul**, n. 259, p. 23-26. 1990.

CINCOTTO, M. A. et al. Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado. **Boletim IPT**, São Paulo, v.2, n.65, 1994.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. 3 v.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). DNER-ES 313/97. **Pavimentação**: concreto betuminoso. Rio de Janeiro, 1997.

_____. DNER-ME 043/95. **Misturas betuminosas a quente**: ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

_____. DNER-ME 054/97. **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. DNER-ME 081/98. **Agregados**: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNER-ME 084/95. **Agregado miúdo**: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1995.

_____. DNER-ME 085/94. **Material finamente pulverizado**: determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNER-ME 107. **Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1979.

_____. DNER-PRO 120/94. **Coleta de amostras de agregados**. Rio de Janeiro, 1994.

DUDA, A. ; BAUWESEN, A. Aspects of the sulfate resistance of steelwork slag cements. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 17, n. 3, p 373-384, 1987.

FONSECA, L. GONZAGA. **Pressões da Sociedade**. Apostila das aulas de Planejamento Estratégico Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis: UFSC, 2002.

GALDEANO, O. V. R. et al. A experiência da CSN na reciclagem de resíduos sólidos nas sinterizações da CSN. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS E MATÉRIAS-PRIMAS, 25., 1994. Volta Redonda. **Anais...** Volta Redonda, 1994, p. 48-64.

GEYER, R. M. T. et al. Escórias siderúrgicas: caracterização e aplicações para a indústria da construção civil. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS- PRIMAS, RESÍDUOS NA SIDERURGIA, 25., 1994. **Cadernos Tecnológicos ABM**, Volta Redonda, p.363-381, nov. 1994.

_____. Uso de escórias de aciaria como substituição ao cimento Portland: uma análise da melhoria das propriedades do concreto. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 3., 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: LEME-CPGEC-UFRGS, 1997. p. 241-248.

GUMIERI, A. G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD em materiais de construção civil..** Porto Alegre, 2000, 91 p. [Proposta de Tese, apresentada no NORIE-UFRGS, em março de 2000].

GUTT, W.; NIXON, P. J. Steel-making slag as a skid resistant roadstone. **Chemistry and Industry**, n. 17. London, Jun. 1972, p. 503-504.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS. **Anuário estatístico da indústria siderúrgica brasileira** – 1998. Rio de Janeiro, 1999. 100 p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

_____. Novas tecnologias para a construção habitacional. In: II SIMPÓSIO ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 2. 1995. **Anais...**Bauru, SP, 1995.

_____. **Cimentos de Escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo.

_____. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil In: **SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2. 1999. São Paulo: IBRACON, 1999. v. 1.

_____. Reciclagem de resíduos agro-industriais para uso na construção civil no Brasil: o caso da escória de alto-forno. In: SEMINÁRIO RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL. **Anais...** São Paulo, 1997. p. 76-87.

KRUGER, P. V. Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderurgia. **Revista Metalúrgica & Materiais**, p. 116-118, fev. 1995.

LENZI, J. C. R. **Técnicas de análise estrutural e microestrutural aplicadas ao estudo de escórias siderúrgicas**: uma abordagem sobre a aplicabilidade em escórias de aciaria elétrica. 1986. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIMA, L. A. **Hormigones com escórias de forno elétrico como áridos**: propriedades, durabilidad y comportamiento ambiental. 1999. 243 f. Tese (Doutorado) Univeritat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

LITVAN, G. G.; MEYER, A. Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure. **Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozolans in Concrete**. Detroit: ACI. v. 2, n. 91, p. 1445-1462, 1986.

LOUZADA, D. M. **Contribuição ao estudo da aplicação das escórias siderúrgicas na fabricação de blocos de concreto**. 1991, 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.

MANSKE, EDOMAR G. **Revista do fundidor**. Disponível em: <<http://www.foundrygate.com.br>>. Acesso em: fevereiro de 2003.

_____. Informação acerca da produção de escória. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <jf70@ig.com.br> . 20 mar. 2003.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétricas com vistas a sua utilização como material para construção civil.** Porto Alegre, 1998. 52 p. [Proposta de tese, apresentada para pré-qualificação de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais].

MASUERO, A. B. et al. Utilização de escórias de aciaria e de cobre como adições para concreto. In: INTERNACIONAL CONGRESS OF CONCRETE TECHNOLOGY, 1998, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires, 1998. p. 447-460.

MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MONTGOMERY, D. G.; WANG, G. Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. **Materials Fórum**, n. 15, p 374-382. 1991

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.** 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MOURA, W. A. et al. Concrete performance with admixtures of electrical steel slag and copper slag concerning mechanical properties. In: HIGH PERFORMANCE CONCRETE. PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. **Proceedings, second CANMET.** American Concrete Institute. International Conference. Gramado, Brazil, CANMET/ACI, 1999. p 81-100.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2. ed. São Paulo: PINI, 1997, 828 p.

OSBORNE, G. J. Carbonation of blastfurnace slag cement concretes. **Durability of building materials**, Amsterdam, p. 81-96, 1986.

PERA, J. State of the art report: use of waste materials in construction in Western Europe. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. **Anais...** São Paulo, 1996. p. 1-20.

PETRUCCI, Eládio G. R. **Materiais de Construção.** 2. ed. São Paulo: Globo, 1995.

RAMALHO JR, Francisco et al. **Os Fundamentos da física.** 8. ed. São Paulo: Moderna, 2003. v. 3.

SANTANA, Profº Humberto. **Manual de pré-misturados a frio**. Rio de Janeiro: IBP, 1993.

SENÇO, Wlastermiller. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: PINI, 1997. v. 1.

_____. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: PINI, 2001. v. 2.

SILVA, Moema Ribas. **Materiais de construção**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1991.

SILVA, E.; ALMEIDA, C. Escória de alto-forno granulada como agregado miúdo para argamassa e concreto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1986. p. 255-273.

TERNES, Apolinário. **História econômica de Joinville**. Joinville: [s. n.], 1986.

TORRES, Jorge. Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão. São Paulo: Maxim Behar (Hemus), 1975.

VOLGELSANGER. Terraplanagem e pavimentação. **Resultado do ensaio Equivalente de Areia**. Out. 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Ensaio e cálculos para determinação das densidades dos agregados e da mistura.

Determinação da densidade do agregado graúdo

A determinação da densidade do agregado graúdo é realizada segundo a norma DNER-ME 081/98 que fixa o procedimento e apresenta a aparelhagem, amostragem, ensaio e as condições para obtenção dos resultados. Os pontos relevantes para a realização do ensaio são apresentados a seguir.

Esta norma define densidade real do grão como sendo a relação entre o peso, ao ar, do volume da porção inacessível à água, após 24 horas de imersão de um material, e o peso, ao ar, de igual volume de água destilada à temperatura ambiente.

Já a densidade aparente do grão é definida como a relação entre peso, ao ar, de um dado volume de material, incluindo todos os vazios dos grãos, e o peso, ao ar, de igual volume de água destilada à temperatura ambiente.

O ensaio inicia com a separação, por quartelamento uma amostra representativa, com cerca de 1 kg, rejeitando-se o material que passe na peneira de 2,0 mm.

Lava-se a amostra e a coloque em água à temperatura ambiente durante 24 horas. Após este prazo, seca-se com um pano úmido para retirar a água superficial, evitando-se a perda por evaporação. Determina-se com aproximação de 0,1 g o peso, ao ar, da amostra saturada e superficialmente enxuta.

Tara-se o cesto imerso n'água. Coloca-se nele a amostra saturada e determina-se o peso com aproximação de 0,1 g. Retira-se a amostra e seca-se em

estufa a 105 – 110 °C. Após esta secagem, determina-se o seu peso ao ar, com aproximação de 0,1 g.

Os resultados dos ensaios são considerados quando obtidos pela média de duas determinações, no mínimo, e quando não diferirem de mais de 0,009.

Determinação da densidade do agregado graúdo 3/4” a 3/8”

Peneira de Malha Quadrada		BRITAGEM VOGELSANGER			
ABERTURA		FRAÇÃO GRAÚDA 3/4” – 3/8”			
ASTM	MM	GRAÚDA		MASSA (gramas)	
3/4” – 1/2”	19,1 – 12,7	20,2	21,0	630,00	
1/2” – 3/8”	12,7 – 9,5	45,0	46,7	1.401,00	
3/8” – N° 4	9,5 – 4,8	31,1	32,3	969,00	
TOTAL		96,3	100	3.000,0	
		Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado em g/cm ³
Massa ao ar do agregado seco - Ps		2.989,0	2.988,4	2.984,9	
Massa ao ar do agregado saturado e superficialmente seco - Ph		3.012,0	3.012,0	3.013,0	
Massa ao ar do agregado imerso - Pi		1.939,8	1.940,4	1.936,5	
Densidade real - Dr		2,849	2,852	2,847	2,849
Densidade aparente - Da		2,788	2,789	*2,772	2,788
Densidade do agregado saturado e superficialmente seco - Dss		2,809	2,811	*2,799	2,809
Absorção (%)					0,769
** Dr = $\frac{Ps}{Ps - Pi}$		Da = $\frac{Ps}{Ph - Pi}$		Dss = $\frac{Ph}{Ph - Pi}$	
Ab = $\frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$					

* O valor não foi considerado para cálculo da média conforme recomendação da Norma.

** Este ensaio foi executado conforme Norma DNER-ME 81/98

Data: 05/09/2003

Laboratoristas: Joni Fusinato e Luis Francisco

Laboratório: PMJ - Usina de Asfalto

Determinação da densidade do agregado graúdo 3/8" a Fundo

Peneira de Malha Quadrada		BRITAGEM VOGELSANGER			
ABERTURA		FRAÇÃO GRAÚDA 3/4" – 3/8"			
ASTM	MM	GRAÚDA		MASSA (gramas)	
3/4" – 1/2"	19,1 – 12,7	0,0	-	-	
1/2" – 3/8"	12,7 – 9,5	0,0	-	-	
3/8" – N° 4	9,5 – 4,8	13,8	100	3.000,0	
TOTAL		13,8	100	3.000,0	
		Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado
Massa ao ar do agregado seco - Ps		2.981,2	2.988,0	2.986,4	em g/cm ³
Massa ao ar do agregado saturado e superficialmente seco - Ph		3.039,2	3.044,8	3.038,6	
Massa ao ar do agregado imerso - Pi		1.931,6	1.934,3	1.937,8	
Densidade real - Dr		2,838	2,837	*2,848	
Densidade aparente - Da		2,691	2,690	*2,713	2,691
Densidade do agregado saturado e superficialmente seco - Dss		2,744	2,742	*2,760	2,744
Absorção (%)					1,945
**					
Dr = $\frac{Ps}{Ps - Pi}$		Da = $\frac{Ps}{Ph - Pi}$		Dss = $\frac{Ph}{Ph - Pi}$	
Ab = $\frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$					

* O valor não foi considerado para cálculo da média conforme recomendação da Norma DNER-ME 81/98.

** Este ensaio foi executado conforme Norma DNER-ME 81/98

Data: 05/09/2003

Laboratoristas: Joni Fusinato e Luis Francisco

Laboratório: PMJ - Usina de Asfalto

Determinação da densidade do agregado graúdo - escória férrica

Peneira de Malha Quadrada		BRITAGEM VOGELSANGER			
ABERTURA		FRAÇÃO GRAÚDA 3/4" – 3/8"			
ASTM	MM	GRAÚDA		MASSA (gramas)	
3/4" – 1/2"	19,1 – 12,7	10,0	31,1	933,0	
1/2" – 3/8"	12,7 – 9,5	5,9	18,3	549,0	
3/8" – N° 4	9,5 – 4,8	16,3	50,6	1.518,0	
TOTAL		32,2	100	3.000,00	
		Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado em g/cm ³
Massa ao ar do agregado seco - Ps		2.982,8	2.979,2	2.986,6	
Massa ao ar do agregado saturado e superficialmente seco - Ph		3093,9	3090,3	3098,1	
Massa ao ar do agregado imerso - Pi		1971,3	1.968,8	1.973,9	
Densidade real – Dr		2,949	2,948	2,949	2,949
Densidade aparente - Da		2,657	2,656	2,657	2,657
Densidade do agregado saturado e superficialmente seco - Dss		2,756	2,755	2,756	2,756
Absorção (%)					3,725
** $Dr = \frac{Ps}{Ps - Pi}$		$Da = \frac{Ps}{Ph - Pi}$		$Dss = \frac{Ph}{Ph - Pi}$	$Ab = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$

** Este ensaio foi executado conforme Norma DNER – ME 81/98

Data: 05/09/2003

Laboratoristas: Joni Fusinato e Luis Francisco

Laboratório: PMJ - Usina de Asfalto

Determinação da densidade real da fração miúda

A determinação da densidade real da fração miúda é realizada segundo a norma DNER-ME 084/95 que fixa o procedimento e apresenta a aparelhagem, amostragem, ensaio e as condições para obtenção dos resultados. Os pontos relevantes para a realização do ensaio são apresentados a seguir.

A definição de densidade determinada por este método é a relação da massa de determinado volume de amostra a 25 °C (exclusive vazios) para a massa de igual volume de água destilada ou deionizada à mesma temperatura.

Para o ensaio separa-se, por quartelamento ou repartidor, uma porção representativa do agregado miúdo, de cerca de 1000 g.

Peneira-se a porção representativa nas peneiras de abertura de 4,8 mm e 0,075mm e utiliza-se 500 g do material retido entre estas peneiras, como amostra a ensaiar. Seca-se a amostra em estufa a (105 a 110) °C até massa constante e após resfria-se em dessecador.

Pesa-se o picnômetro vazio, seco e limpo. A massa do picnômetro é designada P_1 . Coloca-se no picnômetro a massa obtida na amostragem. A massa do picnômetro mais a massa da amostra é designada de P_3 .

A seguir, coloca-se água destilada ou deionizada no picnômetro até cobrir, com excesso, a amostra de agregado nele contida, sem enchê-lo. Aquece-se o picnômetro e o conteúdo até a fervura, pelo menos 15 minutos, para expulsar todo ar existente no conteúdo e resfria-se o picnômetro em banho d'água à 25 °C.

Pesa-se o picnômetro e o conteúdo. A massa do picnômetro mais amostra mais água é designada de P_5 . Na seqüência, retira-se cuidadosamente todo o material existente no interior do picnômetro, lava-o e enche-o até o traço de

referência com água destilada ou deionizada a temperatura de 25 °C. A massa do picnômetro mais água é designada de P₄.

O resultado é a média de duas determinações, registrada em número adimensional, com aproximação em centésimos. As determinações não devem diferir de ± 0,02 da média, para um mesmo operador.

Os resultados obtidos estão expressos na seqüência:

Determinação da densidade da fração miúda 3/4" a 3/8

Peneira de Malha Quadrada		BRITAGEM VOGELSANGER			
ABERTURA		FRAÇÃO MIÚDA 3/4" – 3/8"			
ASTM	MM	GRAÚDA		MASSA (gramas)	
N° 4 – N° 10	4,8 – 2,0	1,3	44,8	224,0	
N° 10 – N° 40	2,0 – 0,42	0,6	20,7	103,5	
N° 40 – N° 80	0,42 – 0,30	0,5	17,2	86,0	
N° 80 – N° 200	0,30 – 0,18	0,5	17,3	86,5	
TOTAL		2,9	100,0	500,0	
		Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado em g/cm ³
Peso do Picnômetro – P ₁		128,8	128,8	128,8	
Peso da amostra seca (g) – P ₂		497,9	498,8	499,2	
Peso do picnômetro + amostra seca (g) – P ₃		626,7	627,6	628,0	
Peso do picnômetro + água (g) – P ₄		640,1	636,6	639,0	
Peso do picnômetro + água + amostra – P ₅		963,1	957,4	956,5	
*Densidade real do agregado miúdo a 21 °C		2,790	2,783	2,775	2,783

**Cálculo da densidade real (D)

$$D = \frac{P_2}{(P_4 - P_1) - (P_5 - P_3)}$$

* Os valores das densidades presentes na tabela foram corrigidos para obter seu valor a temperatura de 21 °C através de fatores de correção presentes na Norma citada.

** Este ensaio foi executado conforme Norma DNER - ME 84/95. Data: 05/09/2003

Laboratoristas: Joni Fusinato e Luis Francisco

Laboratório: PMJ - Usina de Asfalto

Determinação da densidade da fração miúda 3/8" a Fundo

Peneira de Malha Quadrada		BRITAGEM VOGELSANGER			
ABERTURA		FRAÇÃO MIÚDA 3/8" A FUNDO			
ASTM	MM	GRAUDA		MASSA (gramas)	
N° 4 – N° 10	4,8 – 2,0	30,8	39,3	196,5	
N° 10 – N° 40	2,0 – 0,42	28,8	36,7	183,5	
N° 40 – N° 80	0,42 – 0,30	10,5	13,4	67,0	
N° 80 – N° 200	0,30 – 0,18	8,3	10,6	53,0	
TOTAL		78,4	100	500,0	
		Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado em g/cm ³
Peso do Picnômetro – P ₁		128,8	128,8	128,8	
Peso da amostra seca (g) – P ₂		498,6	499,4	499,0	
Peso do picnômetro + amostra seca (g) – P ₃		627,4	628,2	627,8	
Peso do picnômetro + água (g) – P ₄		635,0	633,8	636,2	
Peso do picnômetro + água + amostra – P ₅		956,1	952,4	958,2	
*Densidade real do agregado miúdo a 21 °C		2,809	***2,762	2,810	2,810

**Cálculo da densidade real (D)

$$D = \frac{P_2}{(P_4 - P_1) - (P_5 - P_3)}$$

* Os valores das densidades presentes na tabela foram corrigidos para obter seu valor a temperatura de 21 °C através de fatores de correção presentes na Norma citada.

** Este ensaio foi executado conforme Norma DNER – ME 84/95

*** O valor não foi considerado para cálculo da média conforme recomendação da Norma acima citada.

Data: 05/09/2003

Laboratoristas: Joni Fusinato e Luis Francisco

Laboratório: PMJ - Usina de Asfalto

Determinação da densidade da fração miúda - Escória férrica

Peneira de Malha Quadrada		BRITAGEM VOGELSANGER			
ABERTURA		FRAÇÃO MIÚDA 3/4" – 3/8"			
ASTM	MM	GRAÚDA		MASSA (gramas)	
Nº 4 – Nº 10	4,8 – 2,0	16,0	25,7	128,5	
Nº 10 – Nº 40	2,0 – 0,42	20,4	32,8	164,0	
Nº 40 – Nº 80	0,42 – 0,30	14,3	23,0	115,0	
Nº 80 – Nº 200	0,30 – 0,18	11,5	18,5	92,5	
TOTAL		62,2	100	500,00	
		Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado em g/cm ³
Peso do Picnômetro – P ₁		128,8	128,8	128,8	
Peso da amostra seca (g) – P ₂		499,4	498,6	498,9	
Peso do picnômetro + amostra seca (g) – P ₃		628,2	627,4	627,7	
Peso do picnômetro + água (g) – P ₄		636,6	637,0	636,2	
Peso do picnômetro + água + amostra – P ₅		979,1	958,8	977,3	
*Densidade real do agregado miúdo a 21 °C		3,177	3,323	3,162	3,177

**Cálculo da densidade real (D)

$$D = \frac{P_2}{(P_4 - P_1) - (P_5 - P_3)}$$

* Os valores das densidades presentes na tabela foram corrigidos para obter seu valor a temperatura de 21 °C através de fatores de correção presentes na Norma citada.

** Este ensaio foi executado conforme Norma DNER - ME 84/95

Data: 05/09/2003

Laboratoristas: Joni Fusinato e Luis Francisco

Laboratório: PMJ - Usina de Asfalto

Determinação da densidade da fração miúda.

A determinação da densidade real da fração miúda é realizada segundo a norma DNER-ME 085/95 que fixa o procedimento e apresenta a aparelhagem, amostragem, ensaio e as condições para obtenção dos resultados. Os pontos relevantes para a realização do ensaio são apresentados a seguir.

Para a execução do ensaio é utilizado o frasco Le Chatelier, querosene ou nafta livres de água, tendo uma densidade maior que 62 o A.P.I, balança com capacidade de 200 g e termômetro. No ensaio foi utilizado a benzina por ser um líquido não reativo com a amostra utilizada.

Coloca-se no frasco Le Chatelier o líquido mencionado em quantidade tal que seu nível fique entre 0 e 1 ml. Deixa-se em banho d'água e faz-se a primeira leitura do nível superior do líquido.

Retira-se o frasco do banho e coloca-se nele, cerca de 60 g do material em ensaio. Deve-se cuidar para que durante a operação o líquido não ultrapasse a faixa superior da graduação do frasco.

Coloca-se o frasco novamente no banho d'água e faz-se a leitura final.

A permanência do frasco, no banho de temperatura constante, deve ser durante um intervalo de tempo suficiente para que as leituras sejam feitas sem que as temperaturas, do banho e do conteúdo do frasco, difiram de mais de 0,2 °C.

A diferença entre as leituras inicial e final representa o volume do líquido deslocado pelo material ensaiado.

Determinação da densidade da fração miúda do *filler* (cal hidratada).

	Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado em g/cm ³
Temperatura inicial (°C)	22	22	22	
Temperatura Final (°C)	22	22	22	
Leitura Inicial (em ml) – L _i	1,1	0,6	0,8	
Leitura Final (em ml) – L _f	22,0	21,4	21,4	
Volume de líquido deslocado (VLD)	20,9	20,8	20,6	
Peso do material seco – P _s	53,40	52,23	52,12	
Densidade Real - D	2,555	2,511	2,530	

*Cálculo da densidade real (D)

$$D = \frac{P_s}{VLD}$$

* Este ensaio foi executado conforme Norma DNER – ME 85/94 – Método Le Chatelier

Data: 05/09/2003

Laboratorista: Joni Fusinato

Laboratório: Sociesc

Determinação da densidade do material finamente pulverizado 3/8" a fundo

	Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado em g/cm ³
Temperatura inicial (°C)	23	22	22	
Temperatura Final (°C)	23	22	22	
Leitura Inicial (em ml) – L _i	0,2	0,0	0,7	
Leitura Final (em ml) – L _f	21,6	21,7	22,3	
Volume de líquido deslocado (VLD)	21,4	21,7	21,6	
Peso do material seco – P _s	60,52	60,34	60,43	
Densidade Real - D	**2,828	2,781	2,798	

*Cálculo da densidade real (D)

$$D = \frac{P_s}{VLD}$$

* Este ensaio foi executado conforme Norma DNER – ME 85/94 – Método Le Chatelier

** O valor não foi considerado para cálculo da média conforme recomendação da Norma.

Data: 09/09/2003

Laboratorista: Joni Fusinato

Laboratório: Sociesc

Determinação da densidade do material finamente pulverizado 3/4" a fundo

	Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado em g/cm ³
Temperatura inicial (°C)	23	22	22	
Temperatura Final (°C)	23	22	22	
Leitura Inicial (em ml) – L _i	0,3	0,5	0,5	
Leitura Final (em ml) – L _f	20,1	22,2	22,3	
Volume de líquido deslocado (VLD)	19,8	21,7	21,8	
Peso do material seco - P _s	59,79	60,47	60,84	
Densidade Real	**3,020	2,783	2,791	

*Cálculo da densidade real (D)

$$D = \frac{P_s}{VLD}$$

* Este ensaio foi executado conforme Norma DNER – ME 85/94 – Método Le Chatelier

** O valor não foi considerado para cálculo da média conforme recomendação da Norma.

Data: 09/09/2003

Laboratorista: Joni Fusinato

Laboratório: Sociesc

Determinação da densidade do material finamente pulverizado – escória férrica

	Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado em g/cm ³
Temperatura inicial (°C)	23	22	23	
Temperatura Final (°C)	23	22	23	
Leitura Inicial (em ml) – L _i	0,4	0,6	0,5	
Leitura Final (em ml) - L _f	21,8	22,9	22,8	
Volume de líquido deslocado (VLD)	21,4	22,3	22,3	
Peso do material seco – Os	54,69	56,07	55,80	
Densidade Real	**2,556	2,514	2,502	

*Cálculo da densidade real (D)

$$D = \frac{P_s}{VLD}$$

* Este ensaio foi executado conforme Norma DNER – ME 85/94 – Método Le Chatelier

** O valor não foi considerado para cálculo da média conforme recomendação da Norma.

Data: 09/09/2003

Laboratorista: Joni Fusinato

Laboratório: Sociesc

Determinação da densidade do material finamente pulverizado – Filler

	Amostra I	Amostra II	Amostra III	Valor adotado em g/cm ³
Temperatura inicial (°C)	22	22	22	
Temperatura Final (°C)	22	22	22	
Leitura Inicial (em ml) – L _i	0,7	0,6	1,0	
Leitura Final (em ml) - L _f	20,8	20,0	19,9	
Volume de líquido deslocado (VLD)	20,1	19,4	18,9	
Peso do material seco – Os	49,32	47,68	46,41	
Densidade Real	2,454	2,458	2,456	2,456

*Cálculo da densidade real (D)

$$D = \frac{P_s}{VLD}$$

* Este ensaio foi executado conforme Norma DNER – ME 85/94 – Método Le Chatelier

Data: 09/09/2003

Laboratorista: Joni Fusinato

Laboratório: Sociesc

Cálculo da densidade média dos agregados e da mistura.

Uma vez determinada a densidade dos agregados podemos calcular a densidade média da mistura através as equações¹⁰:

$$D_r = \frac{100}{\frac{\%G}{DR} + \frac{\%M}{DT} + \frac{\%F}{\mu}} \quad \text{e} \quad D_a = \frac{100}{\frac{\%G}{DA} + \frac{\%M}{DT} + \frac{\%F}{\mu}}$$

Onde:

D_r = Densidade real da mistura

D_a = Densidade aparente da mistura

¹⁰ As equações utilizadas para o cálculo estão no Manual de Construção do Consórcio Engepasa. Também aparecem nos manuais da Usina de asfalto de Joinville e Vogelsanger.

DR = Densidade real do agregado graúdo

DA = Densidade aparente do agregado graúdo

DT = Densidade do agregado miúdo

μ = densidade do agregado finamente pulverizado

%G = Percentual da fração graúda

%M = Percentual da fração miúda

%F = Percentual da fração finamente pulverizado

Densidade real do agregado 3/4" a 3/8"

%G = 96,3%

%M = 2,9%

%F = 0,8%

Substituindo na equação temos

$$Dr = \frac{100}{\frac{96,3}{2,849} + \frac{2,9}{2,783} + \frac{0,8}{2,787}}$$

$$Dr = 2,847 \text{ g/cm}^3$$

Densidade aparente do agregado 3/4" a 3/8"

Substituindo na equação temos

$$Da = \frac{100}{\frac{96,3}{2,691} + \frac{2,9}{2,783} + \frac{0,8}{2,787}}$$

$$Da = 2,694 \text{ g/cm}^3$$

Densidade Média (Dm) do agregado 3/4" a 3/8"

$$D_m = \frac{D_r + D_a}{2} \quad D_m = \mathbf{2,770 \text{ g/cm}^3}$$

Densidade real do agregado 3/8" a Fundo

$$\%G = 13,8\%$$

$$\%M = 78,4\%$$

$$\%F = 7,8\%$$

Substituindo na equação temos

$$D_r = \frac{100}{\frac{13,8}{2,838} + \frac{78,4}{2,810} + \frac{7,8}{2,789}}$$

$$\mathbf{D_r = 2,812 \text{ g/cm}^3}$$

Densidade aparente do agregado 3/8" a Fundo

Substituindo na equação temos

$$D_a = \frac{100}{\frac{13,8}{2,691} + \frac{78,4}{2,810} + \frac{7,8}{2,789}}$$

$$\mathbf{D_a = 2,791 \text{ g/cm}^3}$$

Densidade Média (Dm) do agregado 3/8" a Fundo

$$D_m = \frac{D_r + D_a}{2} \quad D_m = \mathbf{2,801 \text{ g/cm}^3}$$

Densidade real da Escória férrica

$$\%G = 32,2\%$$

$$\%M = 62,2\%$$

$$\%F = 5,6\%$$

Substituindo na equação temos

$$D_r = \frac{100}{\frac{32,2}{2,949} + \frac{62,2}{3,177} + \frac{5,6}{2,508}}$$

$$D_r = 3,055 \text{ g/cm}^3$$

Densidade aparente da Escória Férrica

Substituindo na equação temos

$$D_a = \frac{100}{\frac{32,2}{2,657} + \frac{62,2}{3,177} + \frac{5,6}{2,508}}$$

$$D_a = 2,947 \text{ g/cm}^3$$

Densidade Média (Dm) da Escória Férrica

$$D_m = \frac{D_r + D_a}{2} \quad D_m = 3,001 \text{ g/cm}^3$$

Densidade real do agregado miúdo *filler* (Cal Hidratada)

$$\%M = 25,3\%$$

$$\%F = 74,7\%$$

Substituindo na equação temos:

$$D_r = \frac{100}{\frac{25,3}{2,535} + \frac{74,7}{2,456}}$$

$$D_r = 2,476 \text{ g/cm}^3$$

Após a determinação das densidades de todos os agregados podemos calcular a densidade média da mistura através da equação:

$$DM = \frac{100}{\frac{W}{G} + \frac{W1}{G1} + \frac{W2}{G2} + \frac{W3}{G3}}$$

Onde:

DM = Densidade média da mistura

W, W1, W2 e W3 são os valores percentuais de cada agregado.

G, G1, G2 e G3 são as densidades de cada agregado.

Agregado 3/4" a 3/8" = 15% = 2,770 g/cm³

Agregado 3/8" a Fundo = 48% = 2,801 g/cm³

Agregado escória férrica = 35% = 3,001 g/cm³

Cal Hidratada = 2% = 2,476 g/cm³

Substituindo na equação temos:

$$DM = \frac{100}{\frac{15}{2,770} + \frac{48}{2,801} + \frac{35}{3,001} + \frac{2}{2,478}}$$

DM = 2,855 g/cm³

Cálculo para determinação da densidade teórica dos corpos de prova e da densidade aparente expressa como % da densidade máxima teórica

$$Dt = \frac{100}{\frac{\%Agreg}{DM} + \frac{\%CAP}{Dcap}}$$

Cálculo da densidade teórica para 4,5% de CAP:

$$Dt = \frac{100}{\frac{95,5}{2,855} + \frac{4,5}{1,020}}$$

$$Dt = 2,641 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo da densidade teórica para 5,0% de CAP:

$$Dt = \frac{100}{\frac{95,0}{2,855} + \frac{5,0}{1,020}}$$

$$Dt = 2,619 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo da densidade teórica para 5,5% de CAP:

$$Dt = \frac{100}{\frac{94,5}{2,855} + \frac{5,5}{1,020}}$$

$$Dt = 2,598 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo da densidade teórica para 6,0% de CAP:

$$Dt = \frac{100}{\frac{94,0}{2,855} + \frac{6,0}{1,020}}$$

$$Dt = 2,577 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo da densidade teórica para 6,5% de CAP:

$$Dt = \frac{100}{\frac{93,5}{2,855} + \frac{6,5}{1,020}}$$

$$Dt = 2,556 \text{ g/cm}^3$$

Densidade aparente expressa como % da densidade máxima teórica

É calculado através da equação:

$$d (\%) = (d/D) \times 100$$

Onde:

d (%) = densidade aparente expressa como % da densidade máxima teórica

D = densidade máxima teórica

Densidade aparente expressa como % da densidade máxima teórica

CAP 20	d (g/cm³)	D (g/cm³)	d (%)
4,5%	2,416	2,641	91,5
5,0%	2,422	2,619	92,5
5,5%	2,493	2,598	96,0
6,0%	2,479	2,577	96,2
6,5%	2,465	2,556	96,4

APÊNDICE B: Ensaio da Estabilidade e fluência Marshall.

Estabilidade (Kgf)					
CAP(%)	Lida	Calculada	Fator de correção	Corrigida	Adotado
4,5%	453,0	896,5	1,00	896,5	905,75
4,5%	431,0	852,9	0,97	*827,3	
4,5%	467,0	924,2	0,99	915,0	
5,0%	442,0	874,7	0,99	*866,0	1007,6
5,0%	496,0	981,6	0,99	971,8	
5,0%	538,0	1064,7	0,98	1043,4	
5,5%	629,0	1244,8	1,04	1294,6	1333,0
5,5%	760,0	1504,0	1,04	*1564,2	
5,5%	693,0	1371,4	1,00	1371,4	
6,0%	534,0	1056,8	1,01	1067,4	1069,4
6,0%	536,0	1060,7	1,01	1071,3	
6,0%	518,0	1025,1	0,99	*1014,8	
6,5%	497,0	983,6	1,00	983,6	1014,6
6,5%	429,0	849,0	0,99	*840,5	
6,5%	513,0	1015,2	1,03	1045,7	

*O valor não foi considerado para cálculo da média conforme recomendação da Norma.

Estabilidade Calculada = Lida X Constante da Prensa

Estabilidade Corrigida = Estabilidade calculada X Fator de correção

Constante da Prensa = 1,979.

Este ensaio foi executado conforme Norma DNER - ME 043/95

Data: 15/10/2003

Laboratoristas: Joni Fusinato e Mário Alves

Laboratório: Britagem Vogelsanger.

Fluência (0,01")					
CAP (%)	Leitura (0,01 mm)		Valor (em 0,01")	Valor Adotado (em 0,01")	Valor Adotado (em mm)
	Inicial	Final			
4,5	184,0	493,0	*12,17		
4,5	204,0	470,0	10,47		
4,5	190,0	466,0	10,87	10,7	2,72
5,0	176,0	470,0	11,57		
5,0	194,0	466,0	10,71		
5,0	196,0	460,0	*10,39	11,1	2,82
5,5	195,0	525,0	12,99		
5,5	204,0	584,0	14,96		
5,5	242,0	522,0	*11,02	14,0	3,56
6,0	218,0	590,0	14,65		
6,0	216,0	536,0	*12,60		
6,0	215,0	635,0	16,54	16,0	4,06
6,5	240,0	668,0	16,85		
6,5	202,0	600,0	*15,67		
6,5	207,0	665,0	18,03	17,4	4,42

*O valor não foi considerado para cálculo da média conforme recomendação da Norma.

** Cálculo da Fluência:

$$(\text{em } 0,01") = \frac{L_f - L_i}{25,4} ; \quad (\text{em mm}) = \text{valor da fluência em } (0,01") \times 0,01 \times 25,4.$$

Este ensaio foi executado conforme Norma DNER – ME 043/95

Data: 15/10/2003

Laboratoristas: Joni Fusinato e Mário Alves

Laboratório: Britagem Vogelsanger.

APÊNDICE C: Cálculo dos vazios da mistura.

A percentagem de vazios na mistura é dada pela equação:

$$\%V_v = 100 - (d\%)^{11}$$

Onde:

$\%V_v$ = percentual de vazios

$\%d$ = densidade aparente expressa como % da densidade máxima teórica.

Utilizando a equação acima com a substituição dos valores já obtidos no

Apêndice A, chega-se aos resultados resumidos abaixo:

Percentagem de vazios da mistura ($\%V_v$)

CAP 20	d (%)	($\%V_v$)
4,5%	91,5	8,5
5,0%	92,5	7,5
5,5%	96,0	4,0
6,0%	96,2	3,8
6,5%	96,4	3,6

¹²A equação apresentada não é única, porém todas levam ao mesmo resultado. O mesmo acontece com o cálculo dos vazios do agregado mineral (VAM) e para a relação betume-vazios (RBV). Neste trabalho optou-se pelo uso das equações utilizadas pelo Consórcio Engepassa cujo uso é amplamente difundido no meio técnico de Joinville.

APÊNDICE D: Cálculo dos vazios do agregado mineral (%VAM)

A percentagem de vazios do agregado mineral pode ser calculada através da equação:

$$\%VAM = 100 - \frac{d}{DM} \times (100 - \%CAP)$$

Onde:

DM = Densidade média da mistura

d = Densidade média aparente da mistura

Utilizando a equação acima com a substituição dos valores já obtidos no Apêndice A, chega-se aos resultados resumidos abaixo:

Percentagem de vazios do agregado mineral (%VAM)

CAP 20	d	DM	%VAM
4,5%	2,416	2,855	19,21
5,0%	2,422	2,855	19,44
5,5%	2,493	2,855	17,50
6,0%	2,479	2,855	18,41
6,5%	2,465	2,855	19,31

APÊNDICE E: Relação Betume – Vazios (RBV%)

A percentagem de vazios do agregado cheio com asfalto (relação betume-vazios) pode ser calculada pela equação:

$$RBV\% = \frac{\%VAM - \%V_v}{\%VAM} \times 100$$

Utilizando a equação acima, com a substituição dos valores já obtidos nos Apêndices C e D obtêm-se os resultados resumidos abaixo:

Tabela 15: Relação Betume – Vazios

CAP 20	%VAM	(%V_v)	RBV (%)
4,5%	19,21	8,5	55,7
5,0%	19,44	7,5	61,4
5,5%	17,50	4,0	77,1
6,0%	18,41	3,8	79,4
6,5%	19,31	3,6	81,4

ANEXOS

ANEXO A -Resultado do ensaio Equivalente de Areia

 TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO		OPERADOR						
		<i>Mario Alves</i>						
		AMOSTRA						
<i>Traco com Escória de Embudo Projeto CBUA</i>								
OBS.: <i>e Agreg. da Brit. Vogelsanger e Cal Hidratado.</i>								
ENSAIO EQUIVALENTE DE AREIA								
INÍCIO DO ENSAIO	Fim do período de 10 minutos reagência Horas	PERÍODO DE 20 MINUTOS DE SEDIMENTAÇÃO		Altura do Topo de argila h 1 - cm.	Altura do Topo de areia h 2 - cm.	Equivalente de areia = $10 \frac{h_2}{h_1}$	Médias	Reg.
		Início Horas	Términos Horas					
DATA	HORA							
<i>13/10/03</i>	<i>14:27</i>	<i>14:37</i>	<i>14:40</i>	<i>15:00</i>	<i>13.0</i>	<i>7.0</i>	<i>53.8%</i>	<i>229/03</i>
<i>13/10/03</i>	<i>14:31</i>	<i>14:41</i>	<i>14:44</i>	<i>15:04</i>	<i>11.9</i>	<i>6.3</i>	<i>52.9%</i>	
<i>13/10/03</i>	<i>14:34</i>	<i>14:44</i>	<i>14:47</i>	<i>15:07</i>	<i>12.6</i>	<i>7.0</i>	<i>55.6%</i>	<i>54/16</i>

