

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

**VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO AREIA DE FUNDIÇÃO (RAF).  
INCORPORAÇÃO NAS MASSAS ASFÁLTICAS DO TIPO C.B.U.Q.**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina  
para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

**IVAN IDERALDO BONET**

Florianópolis, agosto de 2002.

**IVAN IDERALDO BONET**

**VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO AREIA DE FUNDIÇÃO (RAF). INCORPORAÇÃO NAS  
MASSAS ASFÁLTICAS DO TIPO C.B.U.Q.**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de "Mestre em Engenharia", Especialidade em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

---

Prof. Edson Pacheco Paladini, Dr.

Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

---

Prof. Osmar Possamai, Dr.

Orientador

---

Prof. Cláudia Teixeira Panarotto, Dra.

Co-orientador

---

Prof. Washington Perez Núñez, Dr.

## DEDICATÓRIA

**Deste trabalho, a meu filho João Pedro Argenta Bonet, para que também no futuro possa contribuir com trabalhos que tenham como objetivo a proteção do meio ambiente, contribuindo assim com as gerações futuras.**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores, Professor Dr. Osmar Possamai e a Professora Dr<sup>a</sup>. Cláudia Teixeira Panarotto, por seu apoio, por seus sábios conselhos e pela confiança que depositaram em mim durante todo este período.

Quero agradecer de uma forma especial ao Professor Dr. Ademar Galelli, que não mediu esforços, apoiando a todos na realização deste curso.

Também quero agradecer a empresa Toniolo Busnello S/A, seus diretores e colaboradores, pela colaboração recebida durante a realização deste trabalho.

Meus agradecimentos a todos os professores do curso de engenharia de produção, que de um modo ou outro colaboraram na confecção deste trabalho.

Agradeço a Universidade de Caxias do Sul e a Universidade Federal de Santa Catarina, pelo suporte institucional a este trabalho.

A Marisa, minha esposa, e meu filho João Pedro, quero agradecer por muito mais coisas que as palavras possam expressar.

Finalmente meus agradecimentos a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram no desenrolar deste mestrado.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	IX
RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XI
CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Problemática das Empresas .....	1
1.1.1 Definição da Problemática de Pesquisa .....	3
1.2 Objetivos do Trabalho .....	5
1.2.1 Objetivo Geral .....	5
1.2.2 Objetivos Específicos .....	5
1.3 Justificativa do Trabalho .....	6
1.4 Estrutura do Trabalho .....	6
CAPÍTULO 2 – AS AREIAS DE FUNDIÇÃO E A PAVIMENTAÇÃO	
ASFÁLTICA .....	8
2.1 Os Resíduos Areias de Fundação (R.A.F.) .....	8
2.1.1 Geração dos Resíduos Industriais .....	8
2.1.2 A Importância do Gerenciamento dos Resíduos Industriais .....	13
2.1.3 Tecnologias de Gerenciamento de Resíduo .....	24
2.1.3.1 Produção limpa e produção mais limpa .....	25
2.1.3.2 Emissão zero – zero .....	36
2.1.4 Caracterização e Classificação e os Resíduos Sólidos .....	38
2.1.5 Processo de Fundação .....	43
2.1.6 Areias de Fundação .....	49
2.2 Pavimentação Asfáltica .....	54
2.2.1 Pavimento Rodoviário .....	54
2.2.1.1 Revestimento do Pavimento .....	57
2.2.1.2 Base do Pavimento .....	58
2.2.1.3 Sub-base do revestimento .....	59
2.2.2 Revestimentos Asfálticos .....	60

2.2.2.1	Tratamentos Superficiais .....	62
2.2.2.2	Macadames Betuminosos .....	63
2.2.2.3	Pré-misturado a quente – P.M.Q. ....	64
2.2.2.4	Pré-misturado a frio – P.M.F. ....	65
2.2.2.5	Concreto betuminoso usinado a quente (C.B.U.Q.) .....	68
2.2.3	Projetos de Misturas Asfálticas .....	76
2.2.3.1	Projeto .....	77
2.2.3.2	Ensino Marshall .....	80
2.2.3.3	Controle tecnológico .....	84
2.3	Incorporação do Resíduo Areia de Fundição nas Massas Asfálticas – CBUQ .....	87
CAPITULO 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....		92
3.1	Caracterização do Resíduo Areia de Fundição .....	93
3.1.1	Coleta das Amostras .....	93
3.1.2	Mistura e Preparo das Amostras .....	96
3.1.3	Determinação do Teor de Umidade .....	98
3.1.4	Análise Granulométrica dos Resíduos das Areias de Fundição .....	98
3.1.5	Determinação do Teor de Sólidos Voláteis e Fixos .....	99
3.1.6	Classificação e Caracterização das Amostras - Avaliação Ambiental .....	99
3.1.7	Análise Físico-Químicas Realizadas a partir da Massa Bruta de Resíduos e Extratos Solubilizado e Lixiviado .....	100
3.2	Projeto do Concreto Asfáltico Incorporando os R.A.F. ....	103
3.2.1	Requisitos de Projeto – Método Marshall .....	103
3.3	Projeto de CBUQ – Camada de Rolamento .....	106
3.4	Avaliação Ambiental da Massa Asfáltica em CBUQ Incorporada de Resíduo Areia de Fundição .....	106
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS .....		108
4.1	Caracterização e Classificação do Resíduo .....	108
4.1.1	Características Gerais Do Resíduo: Granulometria, Teor De Sólidos Voláteis, Umidade e pH .....	108

4.1.2	Características Gerais do Resíduo: Lixiviação e Solubilização .....	110
4.2	Dimensionamento do Traço em CBUQ, Incorporando os R.A.F. – Método Marshall .....	112
4.3	Característica Marshall – Comparativo dos Resultados Obtidos .....	118
4.4	Avaliação Ambiental da Massa Asfáltica em CBUQ Incorporando Resíduo Areia de Fundição .....	119
4.3	Considerações .....	121
CAPITULO 5 – CONCLUSÕES .....		123
5.1	Conclusões .....	123
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		127

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 – Circulo global dos materiais .....	23
Figura 2.2 – Fluxograma visando produção mais limpa .....	28
Figura 2.3 –Técnicas de minimização de resíduos .....	30
Figura 2.4 –Classificação de resíduos .....	40
Figura 2.5 –Fluxograma das etapas de operação de uma fundição.....	45
Figura 2.6 –Classificação das bases .....	60
Figura 2.7 –Classificação dos revestimentos asfálticos .....	61
Figura 2.8 –Fluxograma da execução dos PMFs .....	67
Figura 2.9 –Fluxograma do reaproveitamento das RAF nos CBUOs .....	91
Figura 3.10 – Foto das amostras de resíduos obtidas no final dos 11 dias de coleta ..	95
Figura 3.11 – Fotos da mistura e preparo das amostras pelo método de quarteamento.	97
Figura 3.12 –Fotos das execução dos testes físicos-químicos .....	102
Figura 4.13 –Gráficos da distribuição Granulométrica da Mistura .....	115
Figura 4.14 – Curvas para estudo de concreto asfáltico .....	117



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Geração de resíduos sólidos industriais classe I por setor industrial no RS .....	10
Tabela 2.2 – Destino dos resíduos sólidos industriais classe I no RS .....	10
Tabela 2.3 – Geração de resíduo sólido industrial classe II, por setor industrial no RS .....	11
Tabela 2.4 – Destino dos resíduos sólidos industriais classe II no RS .....	11
Tabela 2.5 – Método de projeto Marshall .....	78
Tabela 3.6 – Massa de resíduo (kg) coletada por dia em cada linha de produção ....	95
Tabela 3.7 – Análise físico-químicas realizadas para a caracterização do resíduo	102
Tabela 3.8 – Requisitos para projeto (Marshall) .....	104
Tabela 3.9 – Limites da faixa granulométrica .....	105
Tabela 3.10 – Requisitos de qualidade para os agregados .....	105
Tabela 4.11 – Resultados da granulometria das amostras .....	108
Tabela 4.12 – Resultados da umidade, sólidos voláteis e pH das amostras .....	109
Tabela 4.13 – Resultados obtidos nos estes de lixiviação .....	110
Tabela 4.14 – Resultados obtidos nos testes de solubilização .....	111
Tabela 4.15 – Granulometria dos materiais .....	113
Tabela 4.16 – Granulometria da mistura .....	114
Tabela 4.17 – Distribuição granulométrica limites da faixa “B” .....	114
Tabela 4.18 – Cálculo dos parâmetros Marshall para as misturas betuminosas .....	116
Tabela 4.19 – Resultados ensaio Marshall .....	116
Tabela 4.20 – Característica Marshall .....	118
Tabela 4.21 – Resultados dos ensaios de resiliência e resistência a tração .....	119
Tabela 4.22 – Concentrações médias dos metais Ba, Fe, Pb obtidos nos testes de lixiviação - comparação entre R.A.F. e C.B.U.Q. ....	120
Tabela 4.23 – Concentrações dos metais Ba, Cd, Fe, Pb, Cu, Zn e dureza obtidos no teste de solubilização - Comparação entre R.A.F. e C.B.U.Q. ....	121

## RESUMO

Este trabalho analisa a viabilidade técnica do reaproveitamento dos resíduos areia de fundição- RAF, nas massas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente. Para isso, foram coletadas amostras de resíduos de areia de fundição em duas linhas de produção de uma empresa de fundição da cidade de Caxias do Sul. A coleta e seleção das amostras foi realizada de acordo o que determina as normas ABNT. Com o material coletado foi dimensionado um traço asfáltico de Concreto Betuminoso Usinado a Quente- CBUQ, incorporado com o resíduo de areia de fundição, de modo que o mesmo atendesse as faixas granulométricas e as normas de dimensionamento para os pavimentos flexíveis.

Entre as conclusões possíveis de se formular, pode-se destacar que o dimensionamento de um traço asfáltico tipo CBUQ, pelo método Marshall, mostrou-se plenamente adequado. Em relação aos resultados obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização, onde foi comparado o comportamento dos resíduos de areia de fundição, antes e após sua incorporação no CBUQ, também observou-se que o material asfáltico (Cimento Asfáltico de Petróleo- CAP 20), envolveu totalmente os agregados da mistura, evitando que os mesmos fossem liberados a meio ambiente com possível contaminação.

Devido a isto, pode-se afirmar ser uma proposta viável, técnica e ambientalmente, a incorporação dos resíduos de areia de fundição nos CBUQs, como uma forma de proteção ao meio ambiente.

Por fim, o trabalho busca também estimular os empresários e administradores da indústria da fundição, para o reaproveitamento dos resíduos em outros setores ou produtos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável, com vistas a harmonizar os três componentes: crescimento econômico, equidade social e qualidade ambiental.

## ABSTRACT

This search analyses the technical availability of the reusing of the melting sand residue – MSR, on the hot betumed concrete.

For that, were collected samples of melting sand residue in two production lines in Caxias do Sul. The collecting and selection of the samples was made according to the ABNT (Brazilian technical norms association). With the material collected, was dimensioned an asphalt line of hot betumed concrete, gathered to the melting sand residue, as a matter of attending granny lines and the dimension norms for the flexible pavements.

Among the possible conclusion, we can emphasize that the dimension of an asphalt like the hot betumed concrete according to the Marshall method shown adequate.

In relation to the results obtained in the researches where were compared to the comportment of the melting sand residue before and after the adding to the hot betumed concrete, could also be observed that the asphalt material (Petroleum Cement Asphalt) involved all the aggregates of this mix, making impossible for them to be thrown on the environment with a possible contamination.

That is why this research concludes that it's a good propose to include the residue in the hot betumed concrete, as a way to protect the environment.

At last, the search also tries to stimulate the businessmen and administrators of the industry of melting to reuse the residue in other sectors or products contributing for the independent development, trying to harmonize the three main points: economical growth, social equality, and environment.

## **CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1 - Problemática das Empresas**

No início deste século, a preocupação com o meio ambiente, através da busca do desenvolvimento sustentável, que conceitualmente significa atender às necessidades da geração atual, sem comprometer as futuras gerações no atendimento das suas próprias necessidades, trouxe a necessidade de que as empresas compatibilizassem o desenvolvimento econômico com a preservação do meio ambiente. Isto pode ser conseguido através de um Sistema Gestão Ambiental, que é uma faceta da estrutura gerencial de uma empresa, o qual analisa os impactos sobre o meio ambiente, tanto a curto como a longo prazo, das gerações de resíduos dos seus produtos e processos. A implementação de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) dentro de uma empresa, tende a trazer diversas vantagens, como: diminuição da poluição, credibilidade da empresa, redução de riscos ao meio ambiente, aumento da margem de lucro, melhorias no sistema de gerenciamento interno da empresa, facilidade no comércio internacional, etc.

Nos dias de hoje, os aspectos ambientais em qualquer organização ou indústria, são de fundamental importância para o seu planejamento estratégico. Há uma crescente conscientização dos empresários, em proteger o meio ambiente, devido a mudança dos seus consumidores, que estão comprando produtos baseados em aspectos ambientais. Por isso, é necessário que todas as empresas que almejam um lugar nesta economia globalizada, onde há uma crescente competitividade de produtos, tenham uma visão onde os recursos utilizados sejam otimizados e os impactos ambientais decorrentes dos seus processos

minimizados. Neste contexto diz Pablos (2001), “que uma das questões de fundamental importância para a sociedade é a necessidade de reciclar ou reaproveitar lixos, rejeitos e resíduos por ela gerados, como forma de recuperar matéria e energia, preservando recursos naturais, oferecendo uma menor degradação do meio ambiente e proporcionando melhorias nas condições de vida das comunidades.”

Toda atividade econômica industrial, independente de sua escala, pequena ou grande, gera resíduo, e suas complexidades e periculosidades variam conforme as atividades destas indústrias. Os resíduos lançados no meio ambiente, sem um tratamento adequado, constitui-se em um impacto ambiental, que conceitualmente é toda a ação ou atividade de uma organização, quer adversa ou benéfica, que produz alterações em todo o meio ambiente ou apenas em alguns de seus componentes. O ideal de todas as atividades industriais, é que a transformação das matérias-primas em produtos não gerassem resíduos (emissão zero), sendo uma realidade em algumas atividades, porém em pequeno número. Enquanto as tecnologias de emissão zero não estão disponíveis para muitos processos produtivos, o ideal é a redução dos resíduos gerados, através de tecnologias limpas, que intervêm na melhoria dos processos, com conseqüente redução na emissão e resíduos. Outra alternativa é a recuperação e reciclagem dos resíduos, de forma que possam ser utilizados em outros processos produtivos ou produtos.

O crescimento industrial interfere no meio ambiente, principalmente através da extração de matérias-primas, que após passarem pelo processo produtivo das empresas geram resíduos, que muitas vezes são dispostos em aterros sanitários, nem sempre monitoráveis, criando um impacto ambiental indesejado. Para a indústria poluidora, isto é mais grave, pois conforme a lei nº. 9.921, de 27 de julho de 1993, no seu Art. 8 rege que “A coleta, o transporte, o tratamento, o processamento e a destinação final dos resíduos

sólidos de estabelecimentos industriais, comerciais e de prestação de serviços, inclusive de saúde, são de responsabilidade da fonte geradora, independentemente da contratação de terceiros, de direito público ou privado, para execução de uma ou mais dessas atividades.”

Além da questão legal envolvida as empresas necessitam cada vez mais demonstrar aos seus consumidores, que além dos bons preços e da qualidade dos seus produtos, estão tomando atitudes pró-ativas para a preservação do meio ambiente. Por isso, muitas estão se equipando com tecnologias limpas para controlar a geração de resíduos no processo produtivo, e pesquisando outros modos de reaproveitamentos dos seus resíduos em novos produtos.

Assim, as empresas que quiserem continuar atendendo a legislação ambiental e competir no mercado globalizado, atendendo as exigências dos seus consumidores, devem gerenciar seus resíduos, não como lixo, mas como um desperdício passível de eliminação, redução, e também como fonte de matéria-prima para novos produtos. Estas empresas estão tomando consciência que com o tratamento correto dos seus resíduos, estão deixando de perder dinheiro, preparando-se para competir melhor no mercado nacional e internacional, além de respeitar o meio ambiente, no qual está inserida.

#### 1.1.1 - Definição da Problemática de Pesquisa

A indústria da fundição é conhecida como altamente poluidora, talvez, pelo fato de ser confundida com o setor siderúrgico, ou também pelo fato de em décadas anteriores, despejarem seus poluentes na atmosfera, através dos seus fornos de fusão. Hoje, o grande problema das empresas de fundição são os seus resíduos sólidos, constituídos dos excedentes das areias usadas na confecção dos moldes e machos.

A disposição dos resíduos areias de fundição em aterros industriais, quando não monitorado, gera um sério problema ambiental, devido ao volume produzido. Além disso, acarreta um problema adicional, pois os órgãos e regulamentos ambientais, estão obrigando as empresas a destinar seus resíduos em aterros cada vez mais distantes do local gerado, aumentando consideravelmente os custos envolvidos.

Também, não se pode esquecer das restrições aos financiamentos sob forma de condicionantes ambientais, estabelecidos, por exemplo nas Políticas Operacionais do Sistema BNDES que diz: “A análise de todo e qualquer empreendimento apresentado ao sistema BNDES avaliará os impactos de natureza social, ambiental e de suprimento e racionalização de energia. Serão considerados como condicionantes do apoio do sistema as providências para neutralizar eventuais efeitos negativos cujos gastos poderão ser incluídos como itens financiáveis.”

Devido a isso, as empresas do setor de fundição procuram alternativas como: reaproveitamento externo dos seus resíduos, redução dos desperdícios, redução no número de moldes e um tratamento das areias de fundição que seriam descartadas. Este último é obtido removendo e inertizando os contaminantes, para que possibilitem o seu reaproveitamento em novos produtos, com o intuito de não agredir o meio ambiente, diminuir custos do estoque destes materiais e serem competitivas neste mercado globalizado.

Em face do exposto anteriormente, pode-se formular a seguinte pergunta de pesquisa: será possível o reaproveitamento das areias de fundição na composição das massas asfálticas, gerando um menor impacto ambiental? Assim, para poder responder ao problema de pesquisa formulado, apresenta-se a seguir os objetivos do trabalho.

## 1.2 - Objetivos do Trabalho

Os objetivos serão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

### 1.2.1 - Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica e o impacto ambiental gerado com o emprego dos resíduos areias de fundição em misturas asfálticas tipo CB.U.Q.

### 1.2.2 - Objetivos específicos

No sentido de atender ao objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- identificar parâmetros críticos para o traço de uma massa asfáltica em CBUQ, incorporando os resíduos areias de fundição, que atendam as normas de dimensionamento dos pavimentos asfálticos flexíveis;
- estabelecer elementos para avaliação do impacto ambiental do uso deste resíduo, para que não traga prejuízos ao meio ambiente, atendendo a legislação específica em vigor;
- determinar parâmetros de avaliação da eficiência dessa nova massa asfáltica, atendendo as variáveis estruturais e ambientais.



### **1.3 - Justificativa do Trabalho**

Os resultados esperados na realização desse trabalho, é que a liberação da incorporação dos resíduos areias de fundição nas massas asfálticas em CBUQ, pelos órgãos ambientais, contribua na redução dos custos de execução, transportes e monitoramento destes aterros.

Têm-se como justificava atender os seguintes itens:

- preocupação das empresas com o meio ambiente;
- questão ambiental como fator competitivo no comércio globalizado;
- diminuição dos impactos ao meio ambiente;
- mudar a imagem perante a sociedade das empresas do setor de fundição, como poluidoras;
- redução dos custos nos processos de reaproveitamento das areias de fundição;
- alertar e informar aos empresários do setor de fundição da necessidade de se estudar novas opções de reaproveitamento de seus resíduos, ao invés do seu descarte em aterros industriais.

### **1.4 - Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme será apresentado, sendo este o primeiro.

O Capítulo 2 trata dos resíduos areias de fundição, sua geração, classificação e caracterização, bem como os processos produtivos e as tecnologias para o reaproveitamento ou reciclagem destes resíduos. Também, trata da pavimentação asfáltica em CBUQ, dos tipos e estruturas dos pavimentos, e como os resíduos areias de fundição podem ser incorporados nos CBUQs.

O Capítulo 3 trata dos procedimentos experimentais da incorporação dos resíduos areias de fundições nos CBUQs.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos procedimentos experimentais, dimensionamento do traço da massa asfáltica com a incorporação dos resíduos areias de fundição, e a avaliação ambiental desta incorporação.

E, finalmente o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros, tanto de interesse acadêmico como de interesse empresarial.

## **CAPÍTULO 2 – AS AREIAS DE FUNDIÇÃO E A PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA**

### **2.1 - Os Resíduos Areias de Fundição (R.A.F.)**

#### 2.1.1 – Geração dos Resíduos Industriais

Os processos produtivos das empresas brasileiras, estão se aprimorando devido a crescente preocupação com o meio ambiente e com a qualidade. Mas em muitos casos, e principalmente no caso das areias de fundição, mesmo com um reaproveitamento parcial dentro dos processos produtivos, este material precisa ser disposto no meio ambiente, através de aterros industriais. Seu descarte em aterros não é a solução mais indicada, devido a intensa fiscalização dos órgãos ambientais, e também da própria comunidade, que não aceita mais que as empresas lancem seus resíduos sólidos no ambiente. Os empresários sob pressão da opinião pública, de órgãos não-governamentais, dos consumidores em geral e até mesmo dos investidores, vêm-se na obrigação de encontrar soluções para reaproveitar seus rejeitos e repensar suas estratégias de produção industrial. Segundo a FIRST (*Foundry Industry Starts Today*), uma ONG que se dedica a incentivar o aproveitamento das areias, “a reciclagem dessas areias de fundição, une o útil ao agradável, pois pode economizar de US\$ 100 milhões a 250 milhões anualmente para a indústria de fundição mundial”.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), está desenvolvendo um projeto intitulado “Desenvolvimento de Processos de Regeneração de Areias de Fundição Utilizando Unidade Móvel de Tratamento”, que poderá recuperar as areias com um custo estimado entre 20 e 40 reais por tonelada, beneficiando especialmente

as pequenas e médias empresas de fundição. Segundo Cláudio Mariotto (IPT – maio/2000), “em todo o país, as empresas de fundição de metais geram na ordem de 170 mil toneladas por mês de areias contaminadas por metais pesados como chumbo e cobre. Ela é utilizada na produção de moldes para as peças metálicas. Jogá-las fora seria um grande desperdício e ainda maior, um risco ambiental. Depositá-las em aterros especiais custaria até 150 reais por toneladas”. Neste contexto, as empresas (pequenas, médias e grandes) do setor de fundição têm o dever de estudar o reaproveitamento ou reciclagem dos seus resíduos areias de fundição, evitando sua disposição em aterros industriais, gerando com isso uma economia considerável, tornando-as mais competitiva no mercado.

Segundo Leripio (2001, p.2) “a relação meio ambiente e desenvolvimento deve deixar de ser conflitante para tornar-se uma relação de parceria. O ponto-chave da questão passa a ser a necessidade de uma convivência pacífica entre a qualidade do meio ambiente e o desenvolvimento econômico, tendo em vista que são variáveis dependentes entre si”.

No “Diagnóstico Preliminar da Geração e Destinação Final dos Resíduos Sólidos Industriais no Estado do Rio Grande do Sul”, (FEPAM, 1996) no qual foram levantados a geração e destinação dos resíduos Classes I (resíduos perigosos) e Classe II (resíduos não inertes), verificou-se que 41,23% das empresas (47.935 empresas) geram algum tipo de resíduo sólido. De um total de 19.762 empresas geradoras de resíduos sólidos, 59 empresas trabalham no setor de fundição, gerando 10.472 ton/ano de resíduos areia de fundição.

Neste mesmo estudo foi verificado que a geração de resíduos Classe I, foi de 362.751 m<sup>3</sup>/ano, distribuídos conforme mostram as tabelas 2.1 e 2.2.

<b>SETOR INDUSTRIAL</b>	<b>Quantidade média gerada (m<sup>3</sup>/ano)</b>
1 – Indústria Coureiro Calçadista	310.251
2 – Indústria Metal Mecânica	37.453
3 – Indústria Química	4.830
4 – Indústria Petroquímica	4.124
5 – Indústria Moveleira	2.405
6 – Indústria da Celulose e Papel	2.343
7 – Beneficiamento de Fibras	1.089
8 – Outros	245
9 – Indústria Alimentar	12
<b>TOTAL</b>	<b>362.751</b>

**TABELA 2.1** – Geração de resíduos sólidos industriais Classe I por setor industrial no RS. (Adaptada da FEPAM – 1996)

<b>DESTINO</b>	<b>Volume médio (m<sup>3</sup>/ano)</b>
1 - Não informado	176.771
2 – Aterro Particular	71.067
3 – Centrais	48.267
4 – Lixão particular	24.231
5 – Estocagem	19.767
6 – Reaproveitamento	12.182
7 – Outros	10.466

**TABELA 2.2** – Destino dos resíduos sólidos industriais Classe I no RS. (Adaptada da FEPAM – 1996)

Observando-se as tabelas 2.1 e 2.2, verifica-se que a maior geração de resíduo Classe I, é o setor coureiro calçadista com 86% do total, seguido pelo setor metal mecânico com 10%. Quanto a seu destino final, 49% não tem destino conhecido, enquanto que 51% tem seu destino conhecido e licenciado pela FEPAM.

O setor industrial do Estado do Rio Grande do Sul, gera em média 20.951,227 ton/ano, de resíduos Classe II, distribuídos conforme mostram as tabelas 2.3 e 2.4. (FEPAM, 1996)

<b>SETOR INDUSTRIAL</b>	<b>Quantidade média gerada (ton/ano)</b>
1 – Indústria Alimentar	16.361.696
2 – Indústria da Madeira	2.491.482
3 – Indústria Metal Mecânica	1.254.561
4 – Indústria de Bebidas	399.076
5 – Indústria Couro Calçadista	98.047
6 – Indústria da Celulose e Papel	227.990
7 – Beneficiamento de Fibras	46.278
8 – Indústria Química	53.539
9 – Indústria do Fumo	9.455
10- Indústria da Borracha	8.242
11- Indústria do Plástico	961
<b>TOTAL</b>	<b>20.951.227</b>

**TABELA 2.3** – Geração de resíduos sólidos industriais Classe II, por setor industrial no RS (adaptada da FEPAM – 1996).

<b>DESTINO</b>	<b>QUANTIDADE (ton/ano)</b>
1 - Não informado	18.955.585
2 – Reaproveitamento	1.597.415
3 – Centrais de tratamento de resíduos	98.992
4 – Queima	93.379
5 – Incorporação ao solo	91.401
6 – Lixão particular	61.074
7 – Estocagem	24.170
8 – Aterro industrial próprio	14.197
9 – Tratamento biológico	7.775
10- Lixão Municipal	7.240

**TABELA 2.4** – Destino dos resíduos sólidos industriais Classe II no RS (adaptada da FEPAM – 1996).

Conforme as tabelas 2.3 e 2.4, observa-se um fato preocupante, ou seja 90% do destino dos resíduos sólidos industriais Classe II, não é conhecido pela FEPAM. Outro fato preocupante, é que menos de 8% dos resíduos sólidos gerados pelas empresas, tem algum tipo de reaproveitamento, demonstrando que as indústrias estão tendo pouco interesse ou incentivo em pesquisas e tecnologias para o seu aproveitamento.

Já o destino dos resíduos das areias de fundição no estado do Rio Grande do Sul, Segundo a FEPAM (2000), são:

- Aterros licenciados pela FEPAM - 81%
- Aterros particulares - 8%
- Reaproveitamento - 6%
- Aterros Municipais - 3%
- Estocados - 2%

Em vista disso, pode-se supor que praticamente não existe atividade econômica industrial sem impacto ambiental, pois todo e qualquer processo industrial consome matéria-prima ou insumos, que direta ou indiretamente vem da natureza. Esses processos geram resíduos que nem sempre podem ser reaproveitados. Porém, as empresas estão descobrindo que investir no reaproveitamento dos seus resíduos pode ser um negócio rentável, além de ecologicamente correto.

Segundo Mariotto (2001, p.2), estima-se que mais de 80% das peças fundidas produzidas, utilizam moldes feitos de areia aglomerada, sendo o aglomerante mais comum a argila, que é empregada para confeccionar os moldes, que dão forma às faces externas das peças fundidas. Uma vez vazado o metal líquido no interior do molde e solidificado, o mesmo é desagregado (desmoldagem), separando a peça fundida da areia que retorna quase que integralmente para a confecção de novos moldes. Mesmo que esta areia retorne ao processo produtivo para confeccionar novos moldes, há necessidade da incorporação de areia nova, pois as novas tecnologias na confecção dos moldes, requerem areias limpas (areia nova). Esta entrada de areia nova no processo produtivo, gera um excedente, de areia usada, sendo esta descartada na mesma proporção em que a quantidade areia nova entra no processo produtivo.

### 2.1.2 - A Importância do Gerenciamento dos Resíduos Industriais

A implementação de novas tecnologias pelas empresas de fundição, substituindo as poluentes, tem sido buscada para reduzir os problemas ambientais, como também para dar resposta à sociedade e aos órgãos fiscalizadores, de sua política em relação ao meio ambiente, pois a questão ambiental não pode ser vista como um ônus pelas empresas, e sim como uma estratégia para conquistar novos mercados. Encontrar soluções para os problemas ambientais gerados, é visto como uma forma de vantagem competitiva diante dos concorrentes, através de certificações ambientais ou também pela satisfação da sociedade cada vez mais preocupada com o meio ambiente.

Segundo Leripio (2001, p.2) “as organizações de um modo geral não podem mais desconsiderar os aspectos relacionados à proteção ao meio ambiente. Diante disso, a variável ambiental vem se tornando mais um importante diferencial competitivo com o qual as empresas devem se preocupar”.

Alves (Edição nº 369 Rede Vida – Set/2000), diz que a empresa E.P.A. Craf, planeja investir 30 milhões de reais na construção de vinte usinas, em cinco estados brasileiros, para processar a totalidade da areia rejeitada pelas fornecedoras de peças fundidas para a indústria automobilística, já que as areias industriais utilizadas para a construção dos moldes de pequenas peças são hoje o principal passivo ambiental da indústria de fundição. Segundo a Diretoria da Craf, “a demanda por reciclagem de areia industrial será garantida pelas próprias montadoras, que estabelecem prazos para que suas fornecedoras de fundidos se adaptem às normas da série ISO 14000, com limite variando entre os anos 2001 e 2003, significando que todas as fundições serão obrigadas a reciclar seus rejeitos.”



Segundo Valle, *apud* Tocchetto (1995), as soluções encontradas para encaminhar adequadamente os problemas ambientais obedecem uma sequência lógica e natural, expressa nas seguintes providências:

- a) minimização da geração de resíduos, através de modificações no processo produtivo, ou pela adoção de tecnologias limpas, mais modernas que permitam, em alguns casos, eliminar completamente a geração dos resíduos;
- b) reprocessamento dos resíduos gerados transformando-os novamente em matérias-primas ou utilizando para gerar energia;
- c) reutilização dos resíduos gerados por uma empresa, como matéria-prima para outra empresa;
- d) separação de substâncias tóxicas das não tóxicas, reduzindo o volume total de resíduos que devem ser tratados ou dispostos de forma controlada;
- e) processamento físico, químico ou biológico do resíduo, de forma a torná-lo menos perigoso ou até inerte, possibilitando sua utilização como material reciclável;
- f) incineração, com o correspondente tratamento dos gases gerados e a disposição adequada das cinzas resultantes;
- g) disposição dos resíduos em locais apropriados, projetados e monitorados de forma a assegurar que não venham, no futuro, a contaminar o meio ambiente.

Também, segundo o autor, na sequência apresentada, as soluções decrescem em eficácia, pois partem de um conceito de eliminação do problema (o de evitar a geração do resíduo) e terminam na disposição controlada deste resíduo gerado (aterros industriais).

Nas organizações, a palavra de ordem para garantir a sustentabilidade de seus negócios é reduzir desperdícios de seus processos e utilizar de forma “racional” os recursos naturais. Toda forma de poluição deve ser entendida como manifestação de ineficiência dos processos produtivos, representando também uma das maneiras mais oportunas e sustentáveis de agregar valor à organização, (LERÍPIO,2001).

De outra forma, segundo Valle (1995), *apud* Tochetto (2000), existem fatores que não são de ordem técnica, mas que afetam a escolha da solução:

- a) fatores econômicos: custo da tecnologia e dos investimentos necessários, valor dos materiais recuperados, comparação entre os custos de tratamento e de disposição final;
- b) fatores de imagem da empresa: soluções mais limpas, mesmo que sejam mais dispendiosas, decisão de não depender de aterros ou do processamento dos seus resíduos por terceiros;
- c) fatores legais e normativos: soluções proibidas regionalmente, por exemplo, o uso de incineradores ou o co-processamento de resíduos em fornos de cimento, o cumprimento de exigências para a certificação e licenciamento;
- d) fatores relacionados com os riscos na empresa: redução dos prêmios de seguro através da adoção de soluções seguras, menor incidência de acidentes pessoais e de contaminação de funcionários.

A importância de um gerenciamento de resíduos sólidos fica evidente, já que a deposição em regiões povoadas é um problema ambiental complexo, oferecendo elevados custos e expondo o meio ambiente a riscos de contaminação, devido ao grande número de substâncias potencialmente nocivas.

Segundo Mariotto (2001), “no Estado de São Paulo os custos com a disposição da areia em aterros para resíduo Classe I (perigoso) é de até 180 reais por tonelada, e os resíduos Classe II (não-inertes) gira entre 20 a 70 reais à tonelada.” Salienta ainda o autor, que estes custos tendem a crescer ainda mais devido ao aumento dos riscos (leis ambientais mais restritivas), e esgotamento de aterros próximos, com conseqüente aumento nas distâncias de transporte.

Ayres *apud* Bello (1998), destaca que há três tipos de tecnologias para reduzir desperdícios e emissões: conservação de energia e materiais, extensão da vida do produto (*re-use, repair, renovation, re-manufacturing, recycling*), e minimização de resíduos – “utilização dos resíduos em produtos utilizáveis”. Ainda segundo o autor, do ponto de vista gerencial, existem quatro elementos chave identificados a seguir:

- 1) fornecer serviço real baseado nas necessidades do consumidor ou cliente;
- 2) assegurar a viabilidade econômica para a empresa;
- 3) adotar um sistema do ponto de vista de ciclo de vida, com respeito a processos e produtos, e;
- 4) reconhecer o nível da política (diretrizes) da empresa, que o ambiente é finito, a capacidade de suporte da Terra é limitada, e que a empresa cria algumas responsabilidades, considerando o meio ambiente.

O autor ainda saliente que os itens 1 e 2 têm permanecido firmemente no domínio gerencial das organizações, porém os itens 3 e 4, um ponto de vista e reconhecimento, podem não ser suficientes para assegurar que as ações da empresa sejam consistentes com os imperativos de sustentabilidade global.

No movimento representado pela Eco/92, realizado no Rio de Janeiro, o qual gerou o documento chamado Agenda 21 (1992), é destacado a mudança dos padrões não sustentáveis de produção e consumo, fazendo com que o manejo dos resíduos sólidos seja integrado com a proteção ambiental. Na época, oficializou-se uma postura política para a minimização dos resíduos sólidos, desde a prevenção (redução na fonte), até a reutilização e a reciclagem. Os objetivos do gerenciamento dos resíduos sólidos, segundo a Agenda 21 (1992), deveriam se concentrar em quatro principais áreas: redução ao mínimo da geração de resíduos; aumentar ao máximo a reutilização e reciclagem dos resíduos; promoção do depósito e tratamento ambientalmente correto dos resíduos, e ampliação dos serviços que se ocupam dos resíduos.

Pelo princípio da precaução, considera ser de responsabilidade do produtor, os produtos e serviços por ele ofertado, desde a criação até o seu descarte. A adoção do princípio do poluidor pagador, onde o gerador dos resíduos é responsável pelo manejo, tratamento e destino final dos seus resíduos, e também direito do consumidor à informações sobre o potencial degradador dos seus produtos e serviços, devendo-se observar as seguintes etapas:

- a) prevenção e/ou redução da geração dos resíduos na fonte;
- b) minimização dos resíduos gerados;
- c) recuperação ambiental segura de materiais ou de energia dos resíduos ou produtos descartados;
- d) tratamento ambientalmente seguro dos resíduos;
- e) disposição final ambientalmente segura dos resíduos;
- f) recuperação das áreas degradadas pela disposição inadequada dos resíduos.

As empresas devem incorporar aos seus sistemas de gestão o reaproveitamento de matéria-prima, reduzindo as quantidades de resíduos por ela gerado e incentivando a reciclagem, buscando com isso a melhoria da qualidade ambiental.

Há a necessidade de um sistema de gerenciamento ambiental dos resíduos sólidos, que inclua em sua análise desde a extração da matéria - prima até o descarte dos resíduos no meio ambiente, de forma a integrar os componentes econômicos com os ambientais. Segundo Mariotto (2001, p.2), “o total de excedentes de areia de fundição gerados no Estado de São Paulo atinge 1 milhão de toneladas anuais, requerendo a mineração de igual quantidade de areia nova, e considerando os demais Estados, esses números duplicam.”

Teixeira (2000), diz que “Um sistema de gerenciamento de resíduos passou a ser prioridade para as empresas buscarem a diminuição da quantidade de resíduos descartados. Sua minimização tornou-se obrigatória em qualquer gerenciamento moderno, assim como o reaproveitamento energético dos mesmos”.

Segundo Tochetto (2000), um sistema de gerenciamento de resíduos prevê um processo estruturado para atingir a melhoria contínua, e deve ser sistematizado através de:

- a) estabelecimento de uma política própria;
- b) identificação dos aspectos ambientais oriundos das atividades existentes ou planejadas dos produtos e dos serviços da organização para determinar os impactos de significância;
- c) identificação dos requisitos legais e regulatórios pertinentes;
- d) identificação das prioridades e estabelecimento de objetivos e metas ambientais apropriadas;

- e) análises críticas das atividades para assegurar tanto o cumprimento como a manutenção adequada dos sistemas de gerenciamento, o que facilita o planejamento, o controle e o monitoramento das ações corretivas.

Os resíduos devem ser encarados como perda de produção, por isso a necessidade de um gerenciamento destes conforme os cinco itens anteriores, de modo que o seu destino final afete o menos possível o meio ambiente.

O Brasil produz em torno de 240 mil toneladas de lixo por dia e o destino de 75% desses restos tidos como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, ainda são os lixões a céu aberto. Os aterros controlados recebem 13% deste volume, nos aterros sanitários são depositados 10% e apenas 1% é encaminhado para tratamento. Para o autor esta é uma estatística muito pobre para um lixo avaliado como um dos mais ricos do mundo. (MUNIZ, Estado de Minas – Abril/1999)

Para minimizar os custos de disposição do resíduo areia de fundição em aterros industriais, as fundições poderiam adotar medidas que favorecessem a utilização externa dos resíduos das areias de fundição, por exemplo, em substituição parcial do agregado fino nos concretos de baixo custo e nos pavimentos asfálticos. As fundições também devem regenerar as areias, através de tratamentos mecânicos e/ou tratamentos térmicos, com o objetivo de reconduzir a areia usada a uma condição semelhante à de uma areia nova, permitindo a sua reutilização no processo sem afetar a qualidade dos moldes produzidos.

Regan *et al* (Modern Casting, v.87, 1997, p.45-47), afirmam que mais de 90% de toda a areia de fundição gerada, ainda é disposta em aterros industriais a um custo elevado para as empresas. Em face disso, as fundições têm que mudar sua percepção, tendo uma visão do resíduo, não como um desperdício, mas como um produto. Os mesmos autores sugerem um nome para comercializar o resíduo como: Agregado de Fundição Fino (FFA), onde os finos se referem ao tamanho do grão relativo a outros agregados de construção. Ainda segundo os autores, a Pensilvânia e outros estados americanos, impõem

condições para o uso dos resíduos areias de fundição, ou seja: que tenham características físicas, químicas e de desempenhos semelhantes ao material que se está substituindo. Como exemplo, para que os resíduos de areias de fundição possam substituir um dos agregados da mistura do concreto, devem ter tamanho e fração do material a ser substituído na mistura. Como os concretos necessitam de partículas arredondadas, pois com isso requerem menor relação água/cimento, os resíduos de areias de fundição devem ter a

mesma força à compressão, resistência à tração e durabilidade, comparado às areias normais.

O reaproveitamento dos resíduos das areias de fundição como matéria-prima para a produção de outros produtos, deve ser feito com cuidado, pois pode acarretar danos ao meio ambiente, mais graves do que se fossem dispostos em aterros industriais adequados. Teixeira (1993), supõe que existe uma dissociação entre as ciências dos materiais e as ciências do ambiente, no sentido que novas substâncias são geradas e após seu descarte, podem causar várias perturbações no ambiente, pela escassez de conhecimento científico e tecnológico e também de recursos humanos que desenvolvam formas de processamento na mesma velocidade que as mesmas são geradas. Por isso, segundo a autora, fechar o ciclo, considerando uma escala em poucos anos, é uma tarefa difícil.

Neste sentido, a produção maciça de compostos e a falta de previsão, no que diz respeito ao seu destino, pode ser considerado um processo antrópico, que segundo Branco,

...ao longo de todo o processo de industrialização há geração de antropia, uma vez que o processo se apóia na realização de trabalho a partir de aplicação de energia, desde o processo de extração de matérias-primas, de industrialização, das atividades de mercado, dos bens e dos

serviços gerados; nos processos de consumo e na eliminação de resíduos resultantes. Em cada uma destas etapas há perdas de energia na forma de calor dissipado e na eliminação de subprodutos. (BRANCO, 1989)

Gandola (1983) afirma não existir tecnologias que permitam a eliminação ou reciclagem total de resíduos. Por isso é inevitável a existência de aterros sanitários para a disposição de parte do resíduo, devendo existir tratamentos para a redução da quantidade (incineração, compostagem, separação ou recuperação), anteriormente destinada à disposição final. (TECHOBANOGLUS, THEISEN & ELIASSEN,1977), dizem que as medidas de ação deveriam seguir a sequência hierárquica: não gerar, diminuir a geração, recuperar, tratar e dispor.

No diário de Pernambuco/Maio de 1999, Rosa Falcão afirma que a Indústria Brasileira, descobriu o “grande filão”: a reciclagem, não apenas por consciência ecológica ou postura politicamente correta, mas porque as empresas estão buscando a redução dos custos de produção, principalmente com a energia elétrica, matéria-prima e mão de obra.

As discussões sobre questões ambientais, inseridas no conceito de Desenvolvimento Sustentável, ganharam maior intensidade no final do século passado, refletindo uma tendência para este milênio. As empresas precisam de uma política de Gestão Ambiental para buscar benefícios internos e externos. Os benefícios internos das empresas que adotam um sistema de gestão ambiental, já podem ser medidos economicamente, incluindo a reciclagem, onde sua maior vantagem é a economia de energia e matéria-prima. Os benefícios externos refletem a imagem que a empresa constrói perante ao seu consumidor, que passa a optar por produtos que causem menores impactos ambientais.

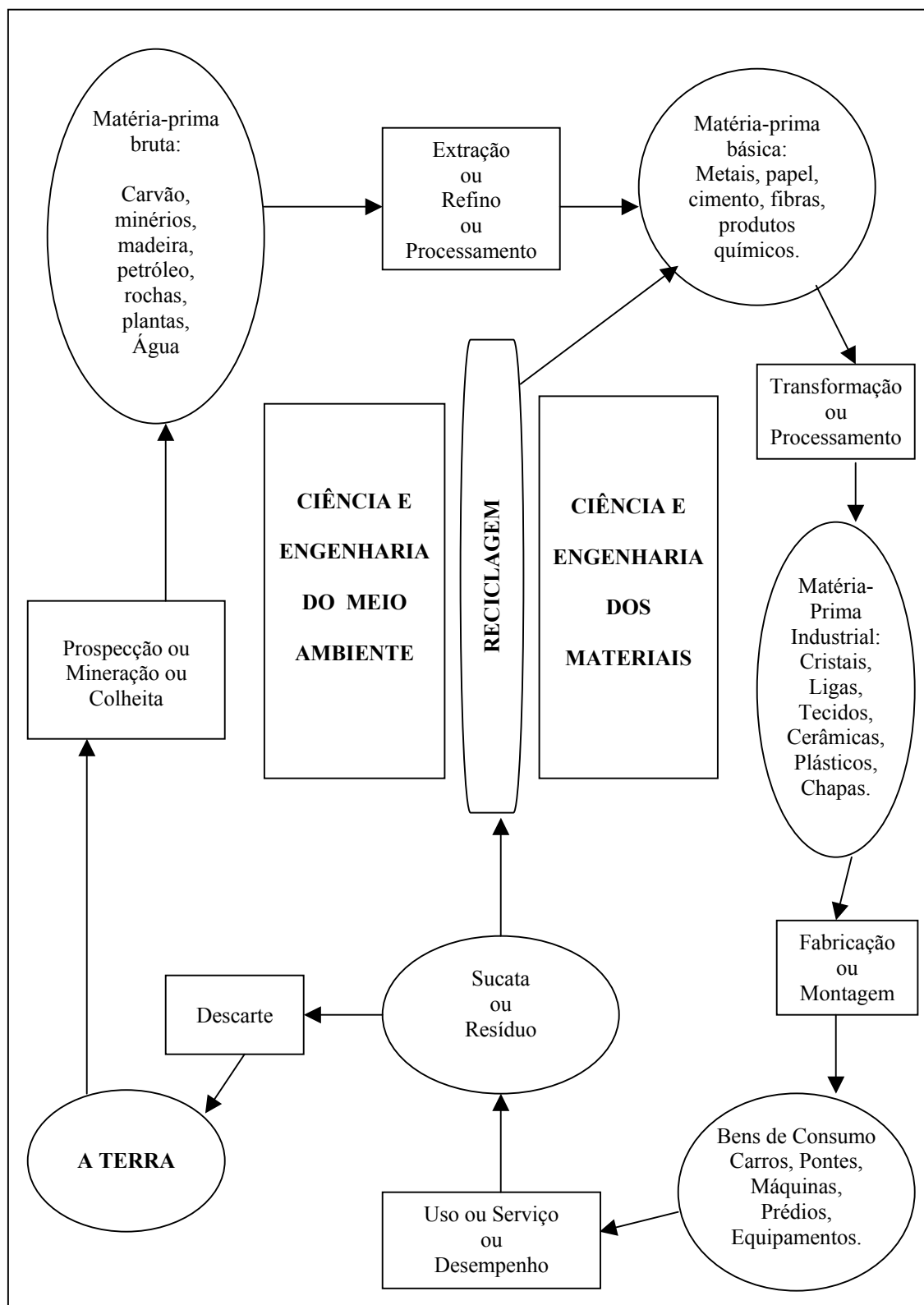


A reportagem “Reciclagem atrai novos empreendimentos” (CEMPRE, 2001), informa que empresas brasileiras, tendo em média entre três e sete anos de existência, são protagonistas da transformação de lixo em matéria-prima, dando origem a incontáveis produtos, que em função do seu visual e preço competitivo, disputam mercado, com produtos assemelhados, mas confeccionados com matéria-prima virgem. Afirma ainda, que nos Estados Unidos, Europa e Japão este fenômeno é mais intenso, pois a indústria da reciclagem além de conquistar um número crescente de consumidores, já é considerada atividade estratégica na geração de novos empregos.

Da Silva (1986), mostra no fluxograma da figura 2.1 que a falta de tecnologia para o reaproveitamento dos resíduos gerados pelas empresas, causam danos ambientais, pois a falta de conhecimento do que fazer com os resíduos, gera o descarte de resíduos ao meio ambiente.

A figura 2.1, permite observar que após a prospecção do material do ambiente natural, este é transformado em matéria-prima para produzir produtos. Após uma série de reaproveitamentos, é transformado em resíduos, e que com o não aproveitamento em novos produtos é descartado no meio ambiente.

A seguir serão apresentadas, de forma sucinta, as tecnologias que estas empresas podem dispor para auxiliar no bom gerenciamento dos resíduos sólidos.



**FIGURA 2.1** – Ciclo Global dos Materiais. (DA SILVA, 1996)

### 2.1.3 – Tecnologias de Gerenciamento de Resíduos Sólidos

Conforme o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), tecnologia limpa significa aplicar de forma contínua, uma estratégia ambiental aos processos e produtos de uma indústria, a fim de reduzir os riscos ao meio ambiente e ao ser humano. Esta estratégia visa prevenir a geração de resíduos e ainda minimizar o uso de matérias-primas e energia.

A adoção de uma tecnologia limpa não significa que a indústria deva ser inteiramente sucateada ou substituída, mas sim, fazer algumas modificações, em setores críticos das instalações.

A adoção de tecnologias limpas em nível mundial, segundo demonstrou Silva & Silva (1998) *apud* Tocchetto (2000), promove reduções de até 70% das emissões de resíduos em processos industriais e apresentou resultados lucrativos, do ponto de vista tecnológico e econômico. Segundo os mesmos autores, investimentos entre US\$ 10 mil e 6 milhões deram retorno entre 1 e 6 meses e vantagens tecnológicas, ambientais e sócio-econômicas em mais de 600 estudos de caso.

A minimização do uso das matérias-primas, permite a redução da massa de resíduos gerados, em função de uma maior eficiência nos processos e das técnicas de produção, resultando em menores desperdícios.

As tecnologias limpas têm como característica principal, a redução da geração dos resíduos na fonte dos processos, aproximando-se da condição de emissão zero. Já as tecnologias convencionais têm como característica o tratamento dos resíduos e das emissões, após terem sido geradas pelo processo produtivo. Por isso, são chamadas técnicas de fim-de-tubo (*end-of-pipe*).

A implantação das tecnologias limpas pelas empresas, implica geralmente em mudanças nos processos produtivos e nos produtos, requerendo para isso uma avaliação econômica cuidadosa. Do mesmo modo, há de se considerar que uma maior eficiência e uma redução das perdas nos processos produtivos, deve ser o objetivo de qualquer empresa para se manter competitiva no mercado.

#### 2.1.3.1 – Produção limpa e produção mais limpa

Produção Limpa e Produção mais Limpa, são distintas. Segundo Furtado (2001), ambas defendem a minimização da geração de resíduos na base dos processos, a exploração sustentável de fontes de matérias primas, a economia de água e energia e o uso de indicadores ambientais para o gerenciamento das empresas.

Porém, o autor salienta que a Produção mais Limpa apresenta maior abrangência, pois estabelece compromissos para a precaução (não usar, nem gerar produtos com potencial à geração de danos ambientais), visão holística do produto e processo (avaliação do ciclo de vida), controle democrático, e direito de acesso público sobre riscos ambientais de processos e produtos.

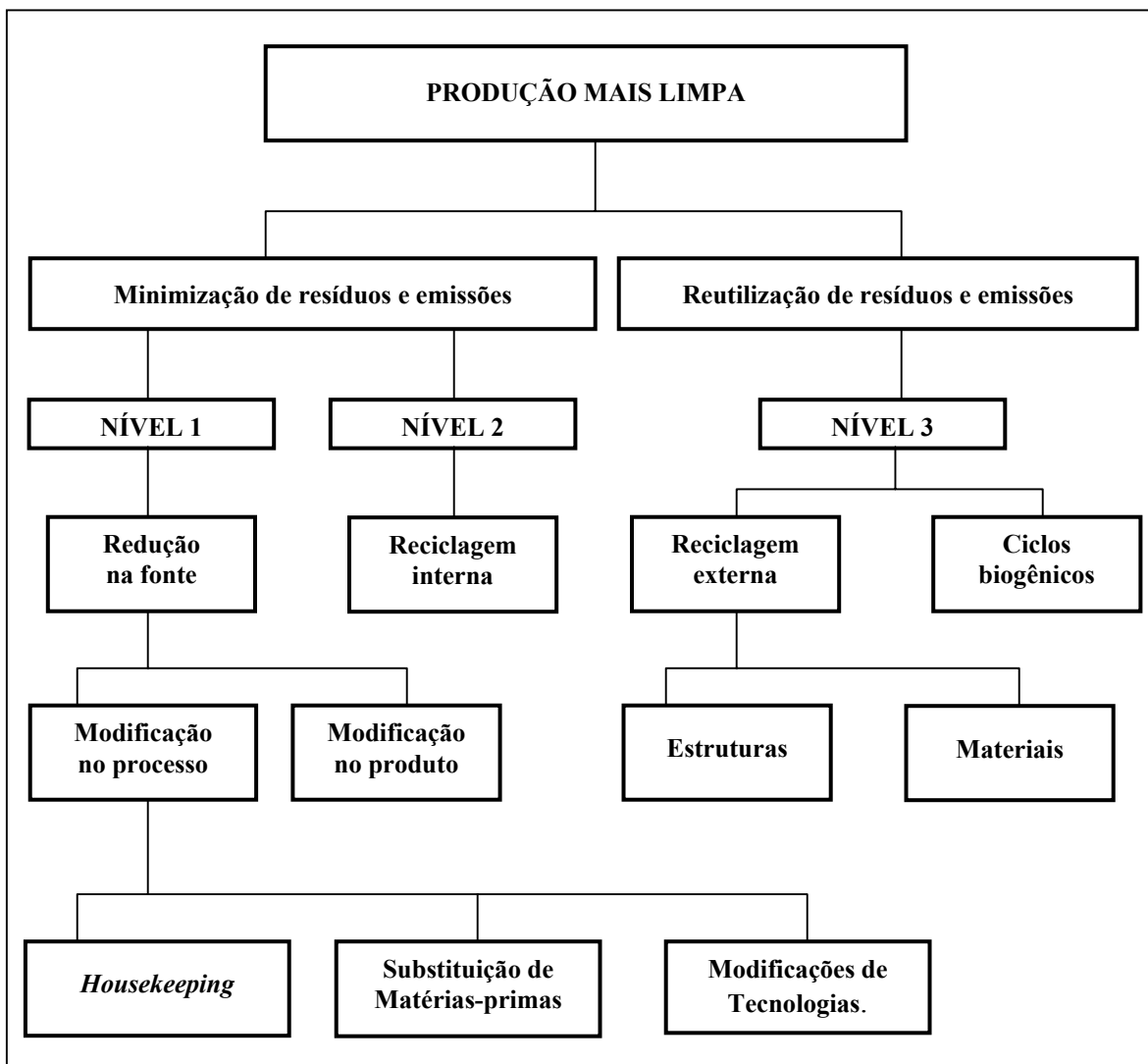
O conceito de Produção Limpa propõe a substituição da “equação industrial linear”, clássica, que se baseia no modelo *end-of-pipe* (fim de tubo), de contenção de resíduos na fábrica, para posterior tratamento e descarte, “pela equação circular”, com maiores preocupações ambientais, minimizando o consumo de água e energia, (LERIPIO,2001). Ainda segundo Leripio (2001), a Produção Limpa está alicerçada em quatro princípios básicos:

- 1) Princípio da Precaução. O propósito da precaução é evitar doenças irreversíveis para os trabalhadores, consumidores e danos irreparáveis ao planeta. Pelo Princípio de Precaução, é o produtor (e não o governo, nem a comunidade) que deverá assumir a responsabilidade e o ônus da prova de que determinado produto, processo ou material não irá causar danos ao homem e ao ambiente;
- 2) Princípio da Prevenção. O princípio da Prevenção propõe a substituição do controle da poluição na fábrica (*end-of-pipe*) por prevenção da geração de resíduos e dos consequentes impactos ambientais. Estabelece a necessidade de avaliação analítica, ao longo do fluxograma, com o objetivo de substituir a abordagem *end-of-pipe* por estratégias de prevenção na fonte, e consequente eliminação ou minimização de danos ambientais decorrentes;
- 3) Princípio da Integração. O conceito abrange dois tópicos:
  - a) a aplicação dos princípios de prevenção e precaução em todos os fluxos do sistema de produção;
  - b) a avaliação do ciclo-de-vida (*Life Cycle Assessment*) do produto;
- 4) Princípio do Controle Democrático. As estratégias para Produção Limpa dependem da participação de empregados, moradores nas vizinhanças da empresa, consumidores e demais segmentos da sociedade, sujeitos aos efeitos dos produtos e processos da produção de bens e serviços.

É essencial que os interessados tenham acesso às informações sobre tecnologias, segurança, níveis de riscos e danos ao ambiente e saúde pública. Independente do respeito ao código ambiental, as empresas consideram, em geral, que a revelação de

certas informações podem comprometer as vantagens competitivas e seu desempenho econômico no mercado.

Já, a Produção mais Limpa, segundo a ABNT 10520, significa a aplicação contínua de uma estratégia econômica, ambiental e tecnológica integrada aos processos e produtos, a fim de aumentar a eficiência no uso de matérias-primas, água e energia, através da não geração, minimização ou reciclagem dos resíduos gerados, com benefícios ambientais e econômicos para os processos produtivos. Caracteriza-se também, por uma implementação de ações dentro das empresas, com objetivo de tornar o processo produtivo mais eficiente no gerenciamento dos seus insumos, fazendo com isso, a geração de mais produtos e menos resíduos, possibilitando a identificação das tecnologias limpas mais adequadas ao seu processo produtivo, (ver figura 2.2).



**FIGURA 2.2** – Fluxograma visando Produção mais Limpa. (C.N.T.L.)

Conforme a figura 2.2, na Produção mais Limpa, há uma hierarquia de situações possíveis. inicialmente (nível 1), deve-se evitar a geração de resíduos, segundo (nível 2), não sendo possível evitar a geração de resíduos, deve-se reintegrá-los ao processo produtivo da empresa, e terceiro (nível 3), na impossibilidade de atingir os dois níveis anteriores, deve-se tomar medidas para uma reciclagem fora da empresa.

No nível 3, quando da impossibilidade do reaproveitamento dos resíduos dentro do próprio processo produtivo, é que as empresas devem tomar atitudes para o

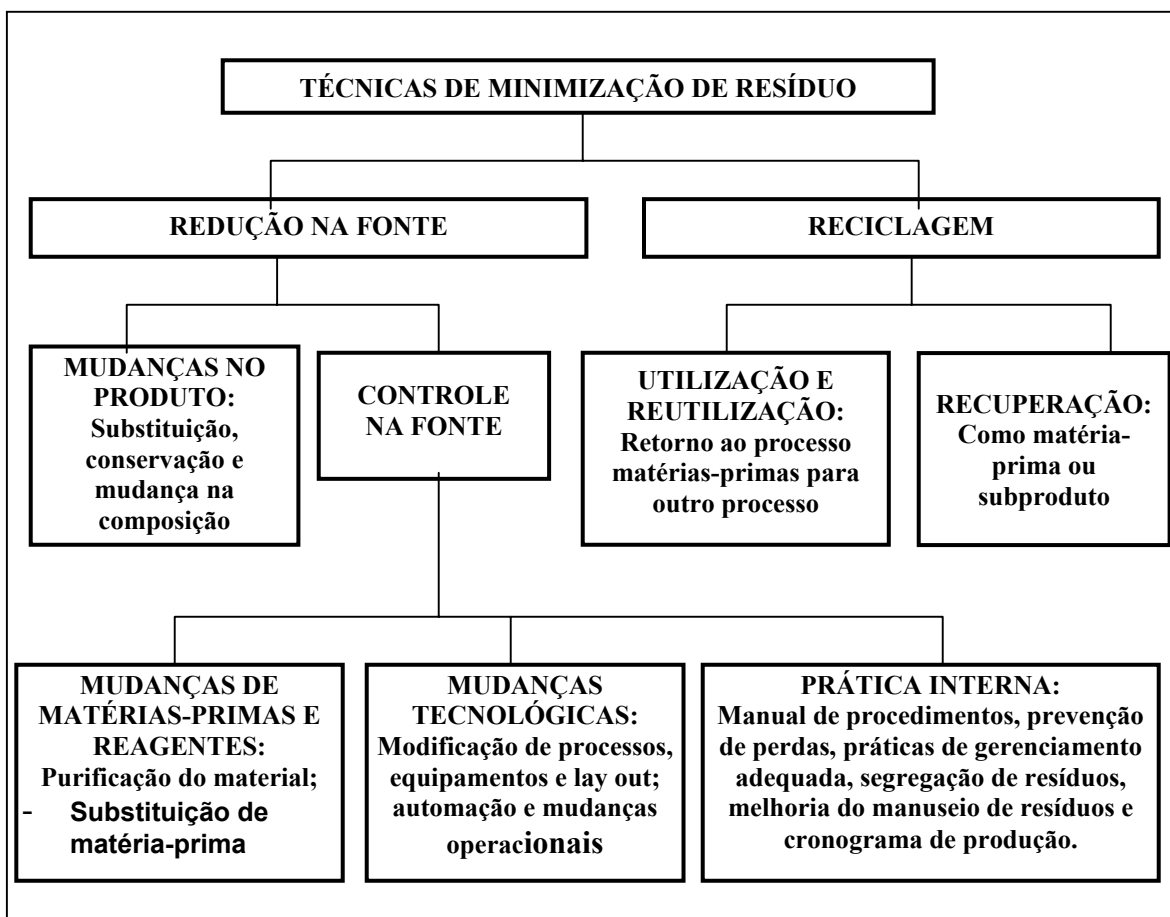
encaminhamento de seus resíduos visando empregá-los, se possível, como matéria-prima em outras empresas, mesmo em setores diferentes do seu.

É neste nível que se encontra a realização deste trabalho, no qual se busca reaproveitamento dos resíduos areias de fundição nos Concretos Betuminosos Usinados a Quente.

Uma produção eficaz (poluição zero) pode ser vista como uma estratégia da Produção mais Limpa. Isto propicia reduzir o desperdício com conseqüente menor investimento para a resolução de problemas ambientais. O objetivo de qualquer empresa que utiliza um sistema de Produção mais Limpa é produzir produtos e serviços sem gerar resíduos.

A figura 2.3 estabelece um roteiro para a implantação de uma sistemática, visando a redução da geração de resíduos. Porém, segundo Tocchetto (2000), estes procedimentos devem ser ajustados a cada caso específico.





**FIGURA 2.3** – Técnicas de minimização de resíduos. (Tocchetto, 2000)

Parkinson *apud* Tocchetto (2000), afirma que o sucesso da minimização da geração de resíduos depende de cinco elementos chave: compromisso, entendimento do problema, um plano de desenvolvimento, responsabilidade e comprometimento e auditoria de resultados.

A implantação de um gerenciamento de resíduos sólidos, pelas empresas de fundição, segundo Teixeira (2001), deve ter duas prioridades: a minimização dos resíduos gerados e a recuperação energética:

- Minimização dos resíduos – Visa diminuir a quantidade de resíduos gerados pelas empresas de fundição, o seu potencial de contaminação, e também

evitar tratamentos e disposições finais, que além de um custo elevado dos aterros, envolvem riscos ambientais a longo prazo. Isto pode ser conseguido através da redução de geração na fonte, reutilização e reciclagem dos resíduos. A minimização da geração de resíduos, mais do que uma solução, constitui-se numa sistemática de trabalho que deve envolver os responsáveis pela operação da empresa. Como esta sistemática deve competir com outras ações e prioridades na gestão da empresa, é importante que as economias obtidas possam ser quantificadas e comparadas com o custo de outras alternativas de tratamento e disposição dos resíduos, (TOCCHETTO,2000).

A minimização de resíduos pode abranger:

- Redução na fonte – É a redução da geração de resíduos na origem do setor produtivo. Pode ser conseguido através da mudança de hábitos, processos e materiais. Está em amplo desenvolvimento em todos os setores industriais, devido a necessidade de se pesquisar novas tecnologias para a redução de resíduos, com conseqüente diminuição nos danos ambientais e custos de produção. Segundo Tocchetto (2000), redução de resíduos na fonte, consiste no desenvolvimento de estratégias para minimizar ou eliminar a geração de um resíduo de processo, produzindo mercadorias mais duráveis, através de alteração de matérias-primas, alteração de tecnologias, e mudanças de procedimentos e práticas operacionais;
- Reutilização – Consiste em aproveitar o resíduo conforme foi descartado pela empresa, submetendo-o, por vezes, a algum tratamento. A reutilização dos resíduos areia de fundição deve ser absorvida pelas empresas de

fundição, de modo a diminuir os custos com aterros industriais, proporcionando uma melhor competitividade da empresa no mercado. A meta de todas as empresas deve ser a de recuperar ou reutilizar todos os seus resíduos, independente de sua rentabilidade, pois necessitam apresentar um serviço benéfico para toda a sociedade. O tratamento e destino final dos resíduos, em muitos casos, apresentam um custo muito elevado. Uma forma alternativa de reaproveitar o resíduo, pode resolver o problema de descarte no meio ambiente, e ainda conseguir uma fonte de renda adicional com a venda dos resíduos. Do ponto de vista dos órgãos de proteção do meio ambiente, essa prática é muito conveniente, pois diminui a quantidade de resíduos lançados no meio ambiente, além de contribuir para a conservação dos recursos naturais, CETESB (1985);

- Reciclagem – A reciclagem é o processo pelo qual o resíduo é transformado em matéria prima. Segundo Teixeira (2001), “ com a reciclagem obtém-se um resgate daqueles resíduos que ainda podem ter utilidade e, desta forma, reduz-se a quantidade de resíduos que terão que ser adequadamente dispostos”. Ainda, segundo este autor, acaba-se retirando da massa de resíduos a ser disposta, aqueles materiais mais resistentes a um tratamento biológico e/ou que seriam problemáticos para um tratamento térmico, como exemplo os plásticos”. As principais vantagens de reciclar, segundo Carvalho (1993) *apud* Tocchetto (2000), são a diminuição da carga poluente enviada ao meio ambiente, de menores investimentos em instalações de tratamento de rejeitos, diminuição dos custos de produção e maior competitividade e produtividade das empresas. Segundo a Gazeta Mercantil

(1996), “a reciclagem é o processo pelo qual se torna viável a reutilização de um material, cuja matéria-prima é retirada da natureza, poupando-se gastos energéticos até a obtenção do produto final.” A opção por priorizar a redução global dos níveis de lixo requer permanente busca de alternativas tecnológicas, para que sejam aperfeiçoadas as técnicas mais adequadas ao tratamento de resíduos sólidos, conduzindo, portanto a uma elevação do grau de recuperação de materiais e sua reintrodução no processo produtivo (reciclagem). (CHERMONT e MOTTA, 1996). Ainda, segundo os autores, a reciclagem somente será economicamente viável e socialmente desejável e como alternativa de gerenciamento de resíduos sólidos, se forem constatadas suas vantagens em termos de eficiência econômica e ambiental. Reciclar, segundo Roth (1996) apud Tocchetto (2000), é uma exigência do mundo moderno e passou a ser um procedimento adotado pelos países ricos e, principalmente pelos países que possuem poucos recursos naturais, que sofrem com a crise energética ou estão em desenvolvimento;

- Recuperação energética – A recuperação energética dos resíduos pode ser obtida a partir da: incineração, pirólise, aterros sanitários, digestores anaeróbios, reciclagem, compostagem e vermicompostagem:
  - a) Incineração – A incineração é um processo térmico, que consiste na queima de materiais em temperaturas superiores a 1000 °C, com quantidade apropriada de ar e durante um tempo pré-determinado. Tem como objetivo a redução de peso e volume do resíduo através da combustão controlada. Tem sido muito criticada pelos órgãos ambientais, por ser um processo poluidor. Os sistemas de

incineração mais modernos, além do forno, há um tratamento dos gases gerados, proporcionando desta forma um sistema de incineração que atende os padrões ambientais;

- b) Pirólise – A pirólise é um tratamento térmico, por ação do calor, na ausência de oxigênio. É um processo endotérmico e a fonte de calor pode ser externa ou, mesmo, através de uma fase no reator onde ocorre a combustão (TEIXEIRA, 2000). É considerado como o mais promissor dos métodos de tratamento térmico. A recuperação energética é conseguida através de seus sub-produtos que tem alto teor energético;
- c) Aterro Sanitário – O aterro sanitário é uma forma de disposição dos resíduos sólidos, que deve ter como características: - impermeabilização de fundo e laterais, além de:
- drenagem e tratamento de chorume;
  - drenagem e tratamento de gases;
  - drenagem de águas pluviais;
  - compactação;
  - cobertura diária dos resíduos;

A recuperação energética é conseguida, quando há um reaproveitamento dos gases obtidos por processo anaeróbico. A opção pelo aterro sanitário vem sendo rejeitada, devido a preocupação com os efeitos danosos decorrentes deste tipo de disposição. O fenômeno de rejeição aos aterros sanitários tem reduzido a disponibilidade de áreas para sua localização, elevando

substancialmente o custo financeiro desta alternativa. (CHERMONT, MOTTA, 1996). A disposição dos rejeitos em aterros é a solução indicada para resíduos estáveis, não perigosos e com baixo teor de umidade, e que não contenham valores a recuperar, (TOCCHETTO, 2000). Ainda, segundo a autora, a imagem de risco que cerca os aterros é em grande parte aumentada por fracassos ocorridos no passado, motivados por projetos incorretos e operações não monitoradas. Contudo, com os cuidados que estão sendo tomados atualmente, tanto na fase de projeto como durante a vida útil dos aterros, essa solução oferece um adequado grau de confiabilidade;

- d) Reatores de digestão anaeróbia – Com os reatores anaeróbios tem-se a produção do biogás, sendo seu uso pouco comum para o caso dos resíduos sólidos;
- e) Reciclagem – A reciclagem dos resíduos sólidos pode ser entendida como uma forma de recuperação energética, pois com isso, diminui-se a energia para a produção de materiais, comparando-se com matérias-primas virgens;
- f) Compostagem – A compostagem visa transformar resíduos orgânicos em matéria biogênica mais estável e resistente à ação das espécies consumidoras, chamado composto;
- g) Vermicompostagem – É uma técnica de compostagem, utilizando minhocas para a produção do composto, que recebe o nome de vermicomposto ou húmus.

A implantação de um programa Tecnologias Limpas, pode proporcionar às empresas de fundição uma vantagem na implantação de um sistema de gerenciamento ambiental, como por exemplo, baseado na norma ISO 14000.

#### 2.1.3.2 – Emissão zero – zeri

*Zeri (Zero Emissions Research Initiative)* segundo Heden *apud* Bello (1998), envolve a pesquisa científica, através de centros de excelência de todo o mundo, com o objetivo de alcançar as mudanças tecnológicas que facilitarão a produção sem nenhuma forma de desperdício, ou seja, nenhuma contaminação na água ou no ar e nenhum resíduo sólido. Todos os “*inputs*” deverão se incorporar no produto final ou, quando houver resíduo, estes devem ser convertidos em “*inputs*” (de valor agregado) para outras indústrias. Neste contexto é que se insere a justificativa deste trabalho, quando da impossibilidade das areias de fundição retornarem ao processo produtivo das fundições, elas se tornariam “*inputs*” (*matéria-prima*) para as empresas de construção pesada, visando a confecção dos concretos betuminosos usinados a quente.

A iniciativa Zeri, foi lançada pela Universidade das Nações Unidas (UNU – *United Nations University*) no ano de 1994, como parte do programa de Eco-Reestruturação para o Desenvolvimento Sustentável do Instituto de Estudos Avançados (IAS – *Institute of Advanced Studies*), e tem nos seus princípios a mudança de paradigmas, principalmente nos processos produtivos industriais.

O Zeri surgiu como resultado da convergência de três correntes de pensamentos que dominaram o cenário mundial nos últimos 60 anos: a Desenvolvimentista, voltada para o crescimento econômico e a expansão da produção industrial; a Social, atenta ao bem estar

humano individual e coletivo, e a Ecológica, defendendo os sistemas naturais e a qualidade do meio ambiente, (LERIPIO, 2001). Também, segundo o mesmo autor, o Zeri traz a abordagem sistêmica para dentro do conjunto das atividades industriais. Contrapõe-se, assim, a visão linear tradicional da empresa, na qual o processo produtivo se resume em três estágios: insumo, processo e produto. Analisa o processo produtivo interligado e sugere políticas e estratégias de gestão do sistema econômico e social.

A principal ação do programa é a definição do método a ser abordado. Segundo Leripio (2001), este método é apresentado a seguir:

- a) Estudos dos Modelos Completos de Entrada e Saída (entrada total = saída total);
- b) Revisão das empresas e reengenharia de oportunidades em direção ao Modelo completo de Entrada e Saídas (MCES);
- c) Inventário de todas as saídas e identificar subsequêntemente de empresas que podem utilizar o MCES;
- d) Pesquisar o número ideal e o tamanho ótimo das empresas que podem operar economicamente em distritos industriais com emissão zero;
- e) Identificar as tecnologias necessárias para a implementação da filosofia da emissão zero;
- f) Elaborar uma política industrial baseada na colaboração entre as partes integrantes ou influenciadas pela mudança de paradigma, englobando legisladores, empresários e cientistas.

O Zeri tem grande potencialidade de aplicações, já que os recursos naturais estão hoje sob pressão, devido as atividades humanas com a intensa industrialização, que



geram agressões ao meio ambiente. Mesmo com a falta de conhecimento, já que existem poucas literaturas sobre este assunto, a busca de soluções para a implementação da emissão zero, deve ser assumida por toda a sociedade, buscando com isso a conservação do meio ambiente, proporcionando desenvolvimento sustentável.

#### 2.1.4 - Caracterização e Classificação dos Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos areias de fundição (RAF), são gerados durante a desmoldagem das peças metálicas, nos processos produtivos das empresas de fundição.

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), foram padronizados procedimentos para caracterização e classificação dos resíduos sólidos, segundo as normas:

- a) NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação;
- b) NBR 10.005 – Lixiviação de Resíduos – Procedimentos;
- c) NBR 10.006 – Solubilização de Resíduos Sólidos – Métodos de Ensaio;
- d) NBR 10.007 – Amostragem de Resíduos – Procedimentos.

De acordo com estas normas é possível determinar a classificação dos resíduos, baseando-se fundamentalmente em listagens de resíduos e de substâncias, e na determinação de algumas características dos resíduos, tais como:

- a) Listagem 1 – Resíduos sólidos de fonte não especificada;
- b) Listagem 2 – resíduos sólidos de fonte especificada;
- c) Listagem 3 – constituintes perigosos (base para a relação de resíduos das listagens 1 e 2);
- d) Listagem 4 – substâncias que conferem periculosidade aos resíduos;

- e) Listagem 5 – Substâncias agudamente tóxicas;
- f) Listagem 6 – Substâncias tóxicas;
- g) Listagem 7 – Concentração – limite máximo no extrato obtido no teste de lixiviação;
- h) Listagem 8 – concentração – limite máximo no extrato obtido no teste de solubilidade.

O fluxograma da figura 4, apresenta a sistemática a ser adotada para a classificação de um resíduo sólido.

Como mostra a figura 2.4, a pesquisa de classificação de um resíduo sólido deve necessariamente começar pela origem do resíduo. Após, verifica-se a presença de substâncias conforme listagem 1 e 2 ou 5 e 6. Quando não identificados nesta listagens, os resíduos devem ser conferidos em termos de constituintes, através da listagem 4, (são substâncias comprovadamente tóxicas, cancerígenas, mutagênicas ou teratogênicas aos seres vivos e ao homem).

Se após isso ainda não for possível classificar o resíduo, deve-se avaliar sua periculosidade real, através da comprovação de pelo menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade toxicidade ou patogenicidade. Se classificado como resíduo não perigoso, deve-se submeter ao teste de solubilização, comparando os resultados obtidos com os padrões da listagem 8, classificando-os como resíduos inertes ou não inertes, CETESB (1985).

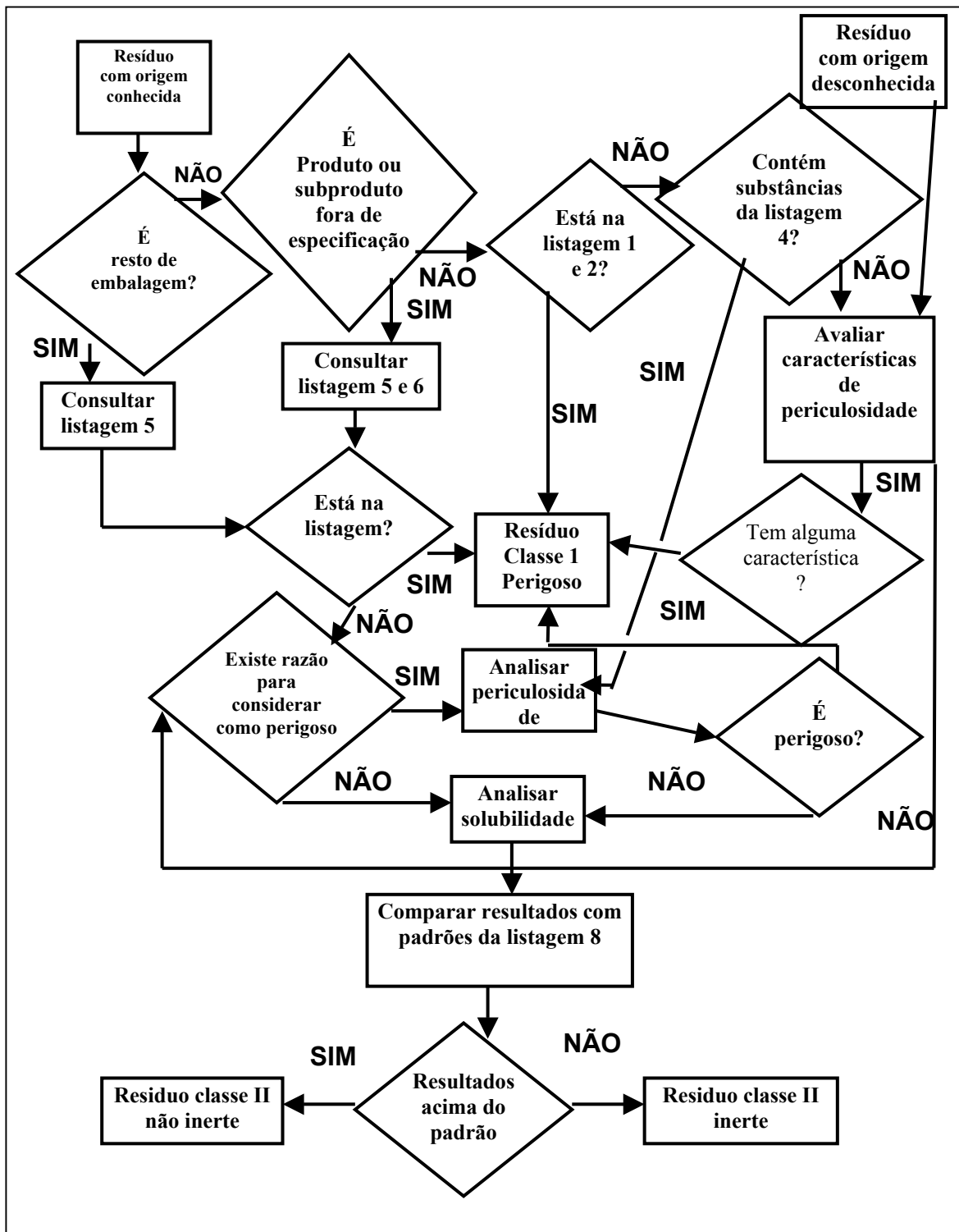


FIGURA 2.4 – Classificação de Resíduo. (CETESB, 1985)

A norma NBR 10.004 (ABNT, 1987), tem como objetivo, classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Para que estes resíduos possam ter manuseio e destino final adequados, a referida norma os classifica como:

- **Resíduos classe I – perigoso.** São aqueles que apresentam periculosidade em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- **Resíduos classe II – não inerte.** São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou classe III, e podem ter propriedades de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;
- **Resíduos Classe III – inerte.** São aqueles que quando submetidos ao teste de solubilidade, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, conforme listagem 8, excetuando os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Conforme a norma NBR – 10.004 (ABNT, 1987), os resíduos sólidos são classificados como tóxicos, se uma amostra representativa, obtida segundo a NBR 10.007 (ABNT,1987) amostragem de resíduos, apresentar as seguintes propriedades:

- 1) (DL50- oral), dose letal para 50% da população de ratos quando administrada via oral;
- 2) (CL50- inalação), concentração de uma substância que quando administrada por via respiratória acarreta a morte de 50% da população exposta;

- 3) (DL50- dérmica), dose letal para 50% da população de coelhos, quando administrados em contato com a pele;
- 4) Quando, segundo a NBR – 10.005 (ABNT,1987), lixiviação de resíduos, contiver contaminantes com concentrações superiores aos valores da listagem 7;
- 5) Quando possuir substâncias da listagem 4;
- 6) Apresentar periculosidade, por apresentar restos de substâncias da listagem 5;
- 7) Resíduos de derramamento ou produto fora de especificação.

Os resíduos são também classificados em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas e da identificação de contaminantes presentes em sua composição. Sua identificação, segundo a CETESB (1985) *apud* Teixeira (1993), é bastante complexa ou até impossível, em inúmeros casos, face às limitações existentes nos laboratórios nacionais. Por isso, e também, por causa das listagens, um conhecimento prévio do processo industrial facilitará sobremaneira a classificação, podendo-se inferir quais substâncias estarão presentes no resíduo e se este será reconhecidamente perigoso. Devido a isso é importante realizar um inventário de resíduo, que segundo Lima (1991) *apud* Teixeira (1993), envolve um levantamento preliminar qualitativo e quantitativo dos resíduos industriais, bem como outras informações sobre as fontes geradoras e produtos utilizados, forma de armazenamento, transporte, transbordo, acondicionamento, tratamento e disposição final. Esta classificação condicionará a necessidade de se adotarem medidas especiais para todas as fases, influenciando decisivamente na elevação dos custos, CETESB (1985).

O processo de moldagem em areia, é um processo largamente utilizado para a obtenção de peças fundidas. Com conhecimento prévio do processo industrial, será possível prover um gerenciamento adequado dos resíduos sólidos areias de fundição, quanto ao seu tratamento e destino final. (ver figura 4).

#### 2.1.5 - Processo de Fundição

O Brasil é o 11º produtor mundial de fundidos, produzindo pouco menos de 1.600.000 toneladas/ano, nas cerca de 1000 empresas, na maioria de pequeno e médio porte, empregando para tal cerca de 40.000 trabalhadores, (ABIFA, 2001). Segundo inventário realizado no ano de 1.993, no pólo metal-mecânico da cidade de Caxias do Sul - RS, o setor produzia aproximadamente 1.300 toneladas/mês de fundidos, utilizando como matéria-prima, areia de fundição formada por, 69% de areia verde, 11,6% de areia fenólica e 10,7% de areia CO<sub>2</sub>, gerando 367 toneladas/mês de resíduos areias de fundição, composta de 37% de areia verde, 29% de areia CO<sub>2</sub>, 20% de areia fenólica e 14% de areia alquídica, (TEIXEIRA, 1993).

O descarte destes resíduos é ainda realizado em aterros industriais, com altos custos, e nem sempre monitoráveis, tornando-se perigoso para a população, e ao meio ambiente. A proposta deste trabalho é viabilizar o reaproveitamento deste resíduo, sem afetar o meio ambiente.

A fundição é um processo de fusão de metais e vazamento dos mesmos em moldes, com a finalidade de produzir formas sólidas requeridas. Tal processo tem-se constituído numa atividade humana há mais de 4000 anos. Esculturas, jóias, ferramentas e peças diversas são alguns dos produtos típicos que são produzidos dessa maneira. Os tipos

de peças fundidas mais representativos atualmente são os componentes de máquinas, automóveis, aviões e foguetes, Kodice *apud* Mariotto, *et al.* (1973).

A fundição vem a ser a conformação do metal no estado líquido. Consiste em aquecer o metal até que ele se funda e se transforme em um líquido homogêneo. Em seguida, este líquido será vertido em moldes adequados, onde, ao solidificar-se, adquirirá a forma desejada, (BRADASCHIA, 1974). Diz ainda o autor que a fundição consiste no caminho mais curto entre a matéria-prima e a peça acabada.

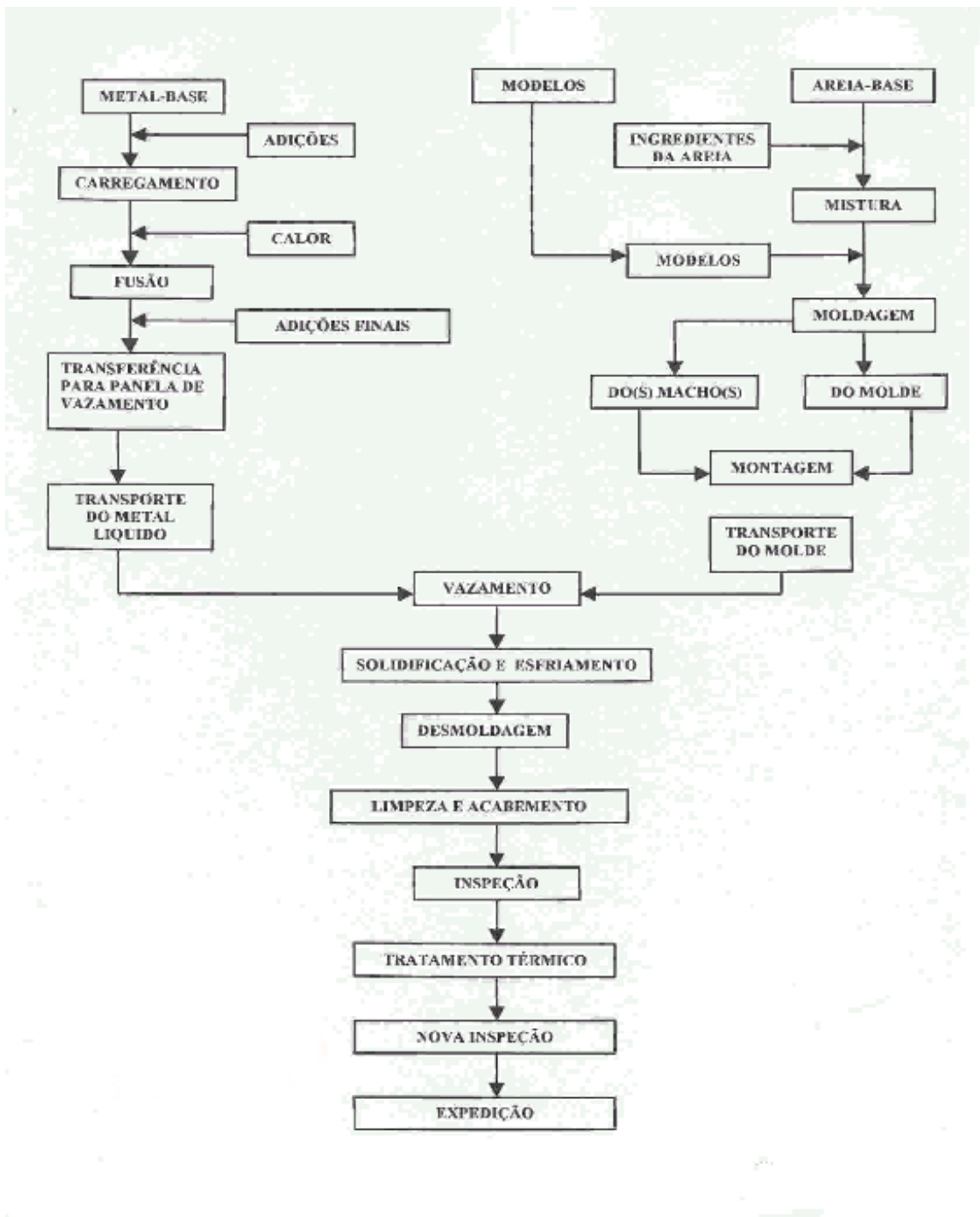
A base de todos os processos de fundição consiste em alimentar o metal líquido, na cavidade de um molde com o formato requerido, seguindo-se um resfriamento, a fim de produzir um objeto sólido resultante da solidificação, (CAMPOS FILHO, 1978).

Segundo Kondic, *apud* Mariotto, *et al* (1973), a solidificação de um líquido metálico é o foco de todo o processo de fundição. Diz, ser o processo de mais curta duração, porém de importância vital. O problema metalúrgico e subsequentemente de examinar e avaliar as propriedades das peças fundidas estão relacionadas com o objetivo e o sucesso do processo de solidificação. O controle metalúrgico da solidificação tem como principal objetivo a obtenção da estrutura metalográfica desejada na peça fundida.

A fundição é um método simples e economicamente viável para se obter uma determinada forma sólida. Suas maiores características são a simplicidade com que se pode obter formas complexas com diversos tipos de metais, e a competitividade no mercado, comparando-se com outros métodos de manufatura.

O conhecimento da fundição de metais cresceu devido a experiências de como melhor fazer os moldes e verter metais, que foi passado de geração a geração, e aperfeiçoada continuamente, sendo que hoje esta prática é um elemento essencial para a qualidade das atividades de fundição.

(BRADASCHIA, 1974), apresenta num fluxograma,(ver figura 2.5) as etapas de operação de uma fundição.



**FIGURA 2.5** – Fluxograma das etapas de operação de uma fundição. (BRADASCHIA, 1974)



Conforme a figura 2.5, que demonstra a sequência das operações na fundição de um metal qualquer em molde de areia, pode-se distinguir as seguintes etapas:

- a) Fabricação de modelos (modelação);
- b) Fabricação dos moldes (modelagem);
- c) Fabricação dos machos;
- d) Fusão do metal;
- e) Vazamento seguido de solidificação;
- f) Operações de desmoldagem;
- g) Operação de rebarbação e limpeza das peças;
- h) Inspeção;
- i) Tratamento térmico;
- j) Inspeção final.

a) Modelos – Um modelo é uma peça feita de madeira, metal ou outro material adequado (cera, poliestireno ou resina epoxi), ao redor da qual é compactado o material de moldação, dando forma à cavidade do molde que receberá o material fundido, (BRADASCHIA, 1974). Primeiro é necessário um modelo do objeto a ser fundido, que pode ser manufaturado em madeira, metais ou outros materiais. O molde é feito por empacotamento de areia em torno do modelo. Toda a estrutura, estando contida numa caixa de moldagem, que pode ser feito em duas partes, quando preenchido pelo metal líquido, que solidifica e transforma-se em uma peça fundida, (CAMPOS FILHO, 1978);

b) Modelagem – Segundo Kondic, apud Mariotto et al, (1973), os requisitos gerais de um molde são: conter uma cavidade que seja uma cópia fiel da forma da peça que

deve ser reproduzida, suportar o processo de enchimento e extrair o calor do metal fundido de maneira a propiciar propriedades ótimas na peça, e poder ser construído e utilizado da maneira mais econômica possível. Diz ainda o autor, que os principais moldes são: os moldes metálicos, que podem ser usados repetidamente, ainda que com vida finita, e os moldes de areia de sílica ou outros materiais, que são quebrados para remover as peças (moldes consumíveis, embora alguns materiais de moldagem sejam, frequentemente reusados). Os processos de fundição, segundo o molde, podem ser classificados em: moldagem em areia, moldagem em casca, moldagem em gesso, moldagem por cera perdida, fundição de molde permanente, fundição sob pressão, fundição em molde cheio e fundição contínua (CAMPOS FILHO, 1978). Segundo Kondic apud Mariotto et al (1973), a moldagem em areia responde pela maior tonelagem de produção de peças fundidas;

c) Machos – Para que se produzam as superfícies internas em certas peças fundidas, colocam-se, no interior dos moldes de areia, peças sólidas conformadas ou machos, feitos de uma mistura de moldagem compatível com o metal a ser vazado e com o tamanho da peça fundida ( KONDIC apud MARIOTTO, 1973);

d) Fusão – Na etapa de fusão, é obtido o estado líquido do metal com a utilização de fornos de fusão como: forno de cadinho, forno de reverberação, conversores, forno cubilô, forno de indução, forno de resistência elétrica e forno de arco elétrico, (CAMPOS FILHO , 1978);

e) Solidificação – Após o processo de fusão, o metal em estado líquido é vazado no molde a uma temperatura adequada e com vazão controlada. A provisão de metal é feita pela alimentação do metal líquido por meio de um sistema de canais de

alimentação existente no molde. Ao mesmo tempo faz-se uma grande abertura rebaixada, denominada de bacia de vazamento, para facilitar a entrada do metal líquido no molde. São abertos canais alargados para permitir que o metal escorra para fora da cavidade do molde após seu preenchimento, mantendo assim uma cabeça metalostática durante a solidificação, (CAMPOS FILHO, 1978). Diz ainda o autor, que no processo de solidificação no molde, pode-se conseguir o controle da direção do crescimento da interface sólido/líquido por meio do controle do fluxo de calor no molde. A solidificação pode ser acelerada no local, pela utilização de resfriadores ou coquilhadores, que se constituem em aletas metálicas, capazes de extrair calor mais rapidamente que o material do molde. Ainda segundo o autor, usando materiais isolantes ou compostos exotérmicos, as condições de fluxo de calor podem ser controlados para permitir maior resfriamento numa região particular do molde. A melhor técnica de vazamento segundo Recusani Filho (1974), consiste na colocação da borda do cadinho ou da panela, o mais perto possível do canal de entrada, diminuindo a distância de queda do metal através do ar;

f) Desmoldagem – Terminada a solidificação, a peça fundida é removida do molde por um processo conhecido como desmoldagem. Em seguida, os machos são extraídos por impacto ou vibração e os alimentadores cortados. No caso da moldagem em areia a areia restante é removida e a peça fundida está pronta para as operações de usinagem superficial, denominada rebarbação, (CAMPOS FILHO, 1978). Depois que o metal é vazado, solidifica-se e resfria-se até a temperatura conveniente para a manipulação. Os fundidos devem ser retirados dos moldes para que a caixa seja levada de volta às máquinas, sendo vários os métodos para remover os fundidos do molde. O método mais

comum é levantar a caixa de moldar superior, por meio de uma talha e bater nas mesmas com marreta ou martelo, (RECUSANI FILHO,1974);

g) Limpeza e rebarbação – A limpeza e acabamento são muito importantes em uma fundição. Os machos ainda aderentes podem ser removidos martelando-se o canal, por uso de banhos, ultra-sons, etc. A limpeza da superfície das peças fundidas é conseguida por jato de areia, granalha de metal ou abrasivo orgânico (madeira, couro, etc), (RECUSANI FILHO, 1974).

A moldagem em areia,corresponde hoje, pela maior produção de peças fundidas. Desta forma, nos processos de fundição após a fusão, vazamento do metal, solidificação e resfriamento do metal no molde, ocorre a desmoldagem da peça, gerando nesta etapa os resíduos sólidos de areia de fundição, que serão estudados mais detalhadamente no próximo ítem.

#### 2.1.6 - Areias de Fundição

A versatilidade e economia do processo de fundição, permite a sua liderança em confronto com os demais processos existentes, (LO RÉ,1978). Ainda segundo o autor, define-se areia de moldagem como o material que constitui o molde. Diz ser um sistema heterogêneo, constituído essencialmente de um elemento granular refratário, que constitui a base (geralmente areia silicosa) e um elemento aglomerante mineral (argila, cimento) ou orgânico (óleos, farinha de cereais, resinas). As areias de moldagem destinam-se à confecção de moldes e machos para fundição. Hoje, areia de moldagem é um termo consagrado, embora ainda sejam usados os termos terras de fundição e areias de fundição

que será utilizado neste trabalho. Ainda segundo o autor, classificam-se segundo os critérios de constituição, como origem, uso, emprego na caixa de fundição e a qualidade do metal:

a) Quanto a origem, as areias podem ser:

- Areias Naturais, que são originadas de arenitos de cimento argiloso ou de alteração de rochas feldspáticas (saibros), que são usados diretamente na moldagem, sofrendo apenas uma correção na umidade;
- Areias Semi-sintéticas, que são resultantes das modificações introduzidas nas areias naturais, por meio de adição de substâncias que visam corrigi-las, melhorando suas qualidades;
- Areias Sintéticas, que são obtidas pela mistura correta da areia-base e aglomerantes em proporção adequada e umidade determinada;

b) Quanto ao uso, podem ser:

- Areia nova, quando utilizada pela primeira vez na fundição;
- Areia usada, quando recuperada de fundições anteriores;

c) Quanto ao emprego na caixa de fundição, podem ser:

- Areia de faceamento, que é a parte da areia que faceia o modelo e entra em contato com o metal de vazamento;
- Areia de enchimento, que é a parte da areia que constitui o restante da caixa de moldagem;
- Areia de macho, que é aquela destinada ao preparo dos machos, conformadores das cavidades internas das peças;

d) Quanto ao estado de umidade da areia, podem ser:

- Areia úmida ou verde, que é a que mantém no momento do vazamento, aproximadamente a mesma umidade do preparo;
- Areia estufada, que é aquela preparada com composição adequada para macho e moldes e que sofrem cozimento em estufa antes do vazamento;

e) Quanto a qualidade do metal, podem ser:

- Areias para metais ferrosos (ferro de fundido cinzento, maleável e aço);
- Areia para metais não ferrosos (bronze e latão, cobre e níquel, alumínio, e magnésio).

Os processos de moldagem de areia mais conhecidos e empregados, de acordo com o molde, segundo (SIEGEL, 1978) são:

- a) processo de moldagem em areia verde, que são constituídos essencialmente por areia, argila e água, podendo ainda conter agentes modificadores ou aditivos. Segundo o mesmo autor é o mais empregado em fundição por ser o mais simples de executar, mais econômico e por aplicar tanto à moldagem de peças isoladas como à produção em grande série. Quando aplicadas com o devido critério, a moldagem a verde permite produzir peças com boa qualidade na maioria dos metais, tanto ferrosos como os não ferrosos. Este processo responde pela maior parcela de peças fundidas produzidas em todo o mundo, sendo que no Brasil 80% das fundições utilizam areias verdes,

(SENAI, 1987). O preparo das areias de moldagem, ainda segundo Bradaschia (1974), é feito em misturadores especiais, cujas principais funções são: misturar homogeneamente areia, argila, água e outros aditivos, friccionar a argila úmida entre os grãos de areia, de modo a dividir e distribuir suas partículas, para desenvolver ao máximo as propriedades aglomerantes. As areias de moldagem, na prática, segundo Siegel (1978) , podem ser compactadas manualmente (com soquete manual ou com soquete pneumático), ou mecanicamente (socamento–impacto–“*jolting*”, compressão, compressão vibratória, sopragem, projeção centrífuga –“*sand slinging*”);

- b) Processo de moldagem em casca (*shell molding*), foi desenvolvido durante a 2ª Guerra Mundial e introduzido no Brasil em torno de 1940. Consiste no emprego de mistura de areia aglomerada com resina sintética polimerizável a quente, com a qual são executados os moldes sob a forma de cascas finas, desde 5 mm de espessura, (SIEGEL, 1978). Na moldagem em casca, a areia de moldagem é coberta com uma resina sintética ligante e posta em contato com uma chapa aquecida. A resina endurece por calor, resultando numa cobertura forte e rígida de 5 a 10 mm de espessura, que é posteriormente destacada da chapa-modelo, formando a base para o molde em casca. São normalmente utilizadas duas cascas, fixadas juntas para formar o molde. As cascas podem ser suficientemente rígidas para suportarem-se sozinhas, e podem ser suportadas por outra forma de fixação numa caixa de molde. Este processo de moldagem permite a automação e a produção de peças fundidas com acabamento superficial muito bom e com boa definição de detalhes. O

aspecto econômico da moldagem em casca é bastante variável, de acordo com o tipo de fundido produzido, e possui melhor aplicabilidade para a produção de peças de tamanho médio. Pode ser empregada com sucesso, tanto na fundição de ferrosos como na de não ferrosos, (CAMPOS FILHO,1978). O processo de fundição em casca é obtido através da mistura de areia seca e resina termoestável em pó. Esta mistura apresenta certas características indesejáveis na fabricação de moldes em casca pelo processo de reservatório basculante, pois segrega a areia e a resina durante a operação de moldagem. Também na produção de machos ou moldes soprados apresenta características indesejáveis, pois ocorre apreciável variação de densidade e a resina tende a ser expelida. Todos esses inconvenientes são eliminados, fazendo-se uma cobertura da areia com resina, que pode ser: cobertura de areia com resina líquida, com resina em pó e um solvente, e com areia quente e resina em escamas, (FINARDI, 1974);

- c) Moldagem pelo processo  $\text{CO}_2$ , este processo, apesar de muito conhecido, somente na última década, vem merecendo interesse por parte dos fundidores. O processo  $\text{CO}_2$  se utiliza em moldes convencionais de areia aglomerados com silicato de sódio, que após sua compactação, são submetidos a um tratamento com  $\text{CO}_2$ , provocando-se passagem de uma corrente de gás através do molde. Devido a reação entre o gás e o silicato de sódio, forma-se sílica-gel, carbonato de sódio e água, resultando no endurecimento do molde em curto período de tempo, (SIEGEL, 1978). Salienta ainda o autor, que neste processo existe a vantagem de dispensar a estufagem para a produção de moldes rígidos comparáveis ou superiores



aos estufados. Este processo, segundo Kondic apud Mariotto et al (1973), pode ser utilizado na fabricação tanto de moldes como de machos e difere da moldagem normal em areia, essencialmente na natureza do ligante usado para aglomerar as partículas do mineral. Após socar o molde ou encher a caixa de macho, o silicato de sódio, que até esse momento proporciona uma fraca ligação, é endurecido pela passagem de gás CO<sup>2</sup> por um curto período de tempo (até 1 min.) após o qual o molde ou macho fica suficientemente resistente para que se efetue a montagem do molde e o vazamento. Neste processo segundo Mariotto (1974), empregam-se misturas de areia base com cerca de 4% de silicato de sódio, que são socados segundo o método tradicional em caixas de macho ou sobre modelos.

Atualmente no pólo mecânico de Caxias do Sul,RS, está se utilizando areia base com resina fenólica com baixos teores de fenol (0,5%), invés de silicato de sódio, que segundo informações obtida nas empresas que utilizam, oferecem um melhor desempenho.

Após uma visão geral sobre o processo de fundição e a geração do resíduo areia de fundição, será apresentado a seguir, os aspectos referentes a pavimentação asfáltica, com vistas a futura utilização dos RAF neste tipo de produto.

## **2.2 - Pavimentação Asfáltica**

### **2.2.1 - Pavimento Rodoviário**

O pavimento rodoviário é uma estrutura, assente sobre uma fundação apropriada, que tem por finalidade propiciar uma superfície de rolamento que permita o

tráfego seguro e confortável de veículos, nas velocidades operacionais desejadas e sob quaisquer condições climáticas.

A norma brasileira de pavimentação, NBR 7207/82 – ABNT, define pavimento como uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto a:

- a) resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- b) melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

SANTANA (1985), define pavimento, como uma estrutura construída sobre o leito, constituída por uma ou várias camadas, que resistindo aos esforços oriundos dos veículos e transmitindo-os ao subleito, de modo a torná-lo compatíveis com sua capacidade de suporte, tem como finalidade propiciar ao usuário segurança e conforto durante sua vida de serviço, de acordo com o princípio básico da Engenharia de máximo benefício com o mínimo custo.

A concepção de um pavimento é feita a partir de quatro dados fundamentais:

- a) disponibilidade de recursos para a construção;
- b) características do tráfego que irá circular sobre o pavimento, uma vez construído;
- c) disponibilidade de materiais para construção do pavimento;
- d) característica da fundação do pavimento: subleito (no caso de pavimento novo), ou estrutura existente (no caso de reforço de pavimento).

Os pavimentos classificam-se em dois tipos principais: pavimentos Flexíveis e pavimentos rígidos. Eventualmente, pode-se considerar uma terceira classificação denominada de pavimentos mistos, ou semi-rígidos:

a) Pavimentos rígidos – São aqueles constituídos por camadas, trabalhando essencialmente à tração, tipificados pelos pavimentos de concreto de cimento;

b) Pavimentos flexíveis – São aqueles pavimentos constituídos por uma camada de revestimento e uma outra de base granular, sobre o subleito.

Segundo Ceratti (1997), os pavimentos asfálticos flexíveis, apresentam uma degradação contínua ao longo do tempo, à partir da abertura do tráfego, que ocorre através do acúmulo gradativo das deformações plásticas e trincas no revestimento, decorrentes da interação entre a ação do tráfego e os efeitos climáticos. Os principais problemas apresentados são:

- a) fissuras que se formam e crescem nas camadas de revestimentos asfálticos devido à fadiga provocada pela repetição das cargas do tráfego;
- b) afundamentos de trilha de roda ou ondulações na superfície ocasionadas por acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas ou localizadas na camada de revestimento, sob a ação das cargas do tráfego;
- c) desgaste e exposição de agregados, com perda da macrotextura superficial do pavimento de corrente da abrasão provocada pelos veículos;
- d) envelhecimento do ligante betuminoso por oxidação, fragilizando a mistura asfáltica e possibilitando seu trincamento e o arrancamento dos agregados.

### 2.2.1.1 – Revestimento do pavimento

O revestimento é a camada do pavimento que receberá diretamente os esforços normais e tangenciais aplicados pelas rodas dos veículos. O revestimento deve ter um bom desempenho mecânico, na compressão de seus materiais e nas flexões sofridas pela camada. O revestimento deve reduzir os esforços atuantes sobre as camadas subjacentes e ter resistência ao desgaste acarretado por polimento e perda de materiais componentes, além de apresentar regularidade superficial (boas condições de rolamento para os veículos), característica anti-derrapante, boa rugosidade (minimização de riscos de “aquaplanagem”) e suficientemente impermeável. Geralmente, o revestimento é considerado a camada mais nobre e cara do pavimento, devido a isso deve ser o mais delgada possível.

(CERATTI, 1997), diz que uma camada de revestimento asfáltico deve ter como funções principais:

- a) impermeabilizar o pavimento, de modo a manter a capacidade de suporte das camadas subjacentes;
- b) oferecer uma superfície resistente à derrapagem, mesmo em pista úmida;
- c) reduzir as tensões verticais que as cargas de roda aplicam na camada de base, de modo a controlar o acúmulo de deformações plásticas nessa camada.

Segundo Santana (1985), quando um revestimento asfáltico é muito espesso costuma-se, por motivos econômicos justificados tecnicamente, subdividi-los em duas camadas:

a) Camada de rolamento ou capa – é a camada de revestimento asfáltico que recebe diretamente os esforços normais e tangenciais oriundo dos veículos e transmite-os às camadas subjacentes, de acordo com a sua capacidade de suporte. Por ser uma camada nobre, tem como propriedade impermeabilizar e/ou melhorar as condições de rolamento;

b) Camada de ligação ou *binder* – é a camada de revestimento asfáltico subjacente à camada de rolamento que, fornecendo o necessário suporte à mesma, transmite à camada subjacente esforços normais compatíveis com a capacidade suporte desta. Não necessita ser impermeável, nem muito resistente à abrasão.

#### 2.2.1.2 – Base do pavimento

É uma camada, típica, granular, e trabalha essencialmente à compressão vertical, e para não sofrer ruptura ou deformações indesejáveis, deve ser suficientemente estabilizada e constituída por materiais resistentes. A camada da base deve ser capaz de resistir aos esforços do tráfego, transmitidos através do revestimento, absorvê-los suficientemente, de forma que a parcela transferida ao subleito seja adequadamente reduzida. É imprescindível à camada de base, como também a todas as camadas da estrutura do pavimento, uma boa densificação – elevado peso específico aparente, através de compactação suficientemente enérgica.

A base é a camada do pavimento subjacente ao revestimento, que fornecendo o necessário suporte ao mesmo, transmite à camada subjacente os esforços normais compatíveis com a capacidade suporte desta, podendo as bases serem granulares ou coesivas. As bases são geralmente mais espessas, e responsáveis pela diluição dos esforços normais.(SANTANA, 1985).

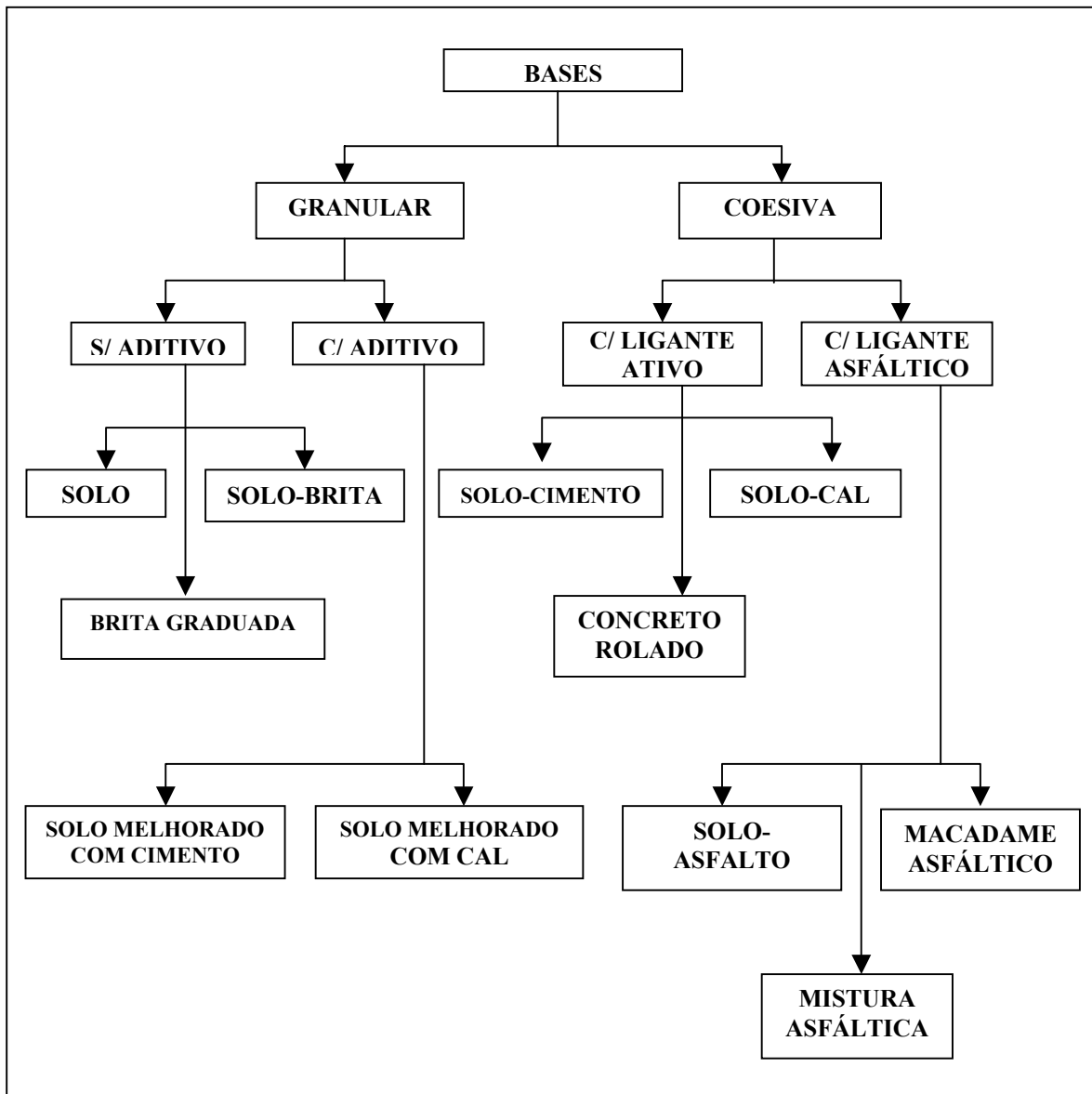
(CERATTI, 1997), diz que a camada de base deve ter as seguintes funções:

- a) reduzir as tensões verticais que as cargas de roda aplicam nas camadas de sub-base e subleito;
- b) reduzir as deformações de extensão que as cargas de roda induzem no revestimento asfáltico, de modo a estender sua vida de serviço quanto ao trincamento por fadiga;
- c) permitir a drenagem de águas que se infiltrem no pavimento, através de drenos laterais longitudinais ou verticais, para uma camada drenante na sub-base.

#### 2.2.1.3 – Sub-base do revestimento

É a camada do pavimento subjacente à base que fornecendo o necessário suporte à mesma, transmite à camada subjacente (sub-leito), esforços normais compatíveis com a capacidade suporte desta, podendo estas sub-bases serem granulares ou coesivas. Geralmente a camada de sub-base é formada por material de capacidade de suporte superior ao do subleito e visa permitir reduções na espessura da camada de base.

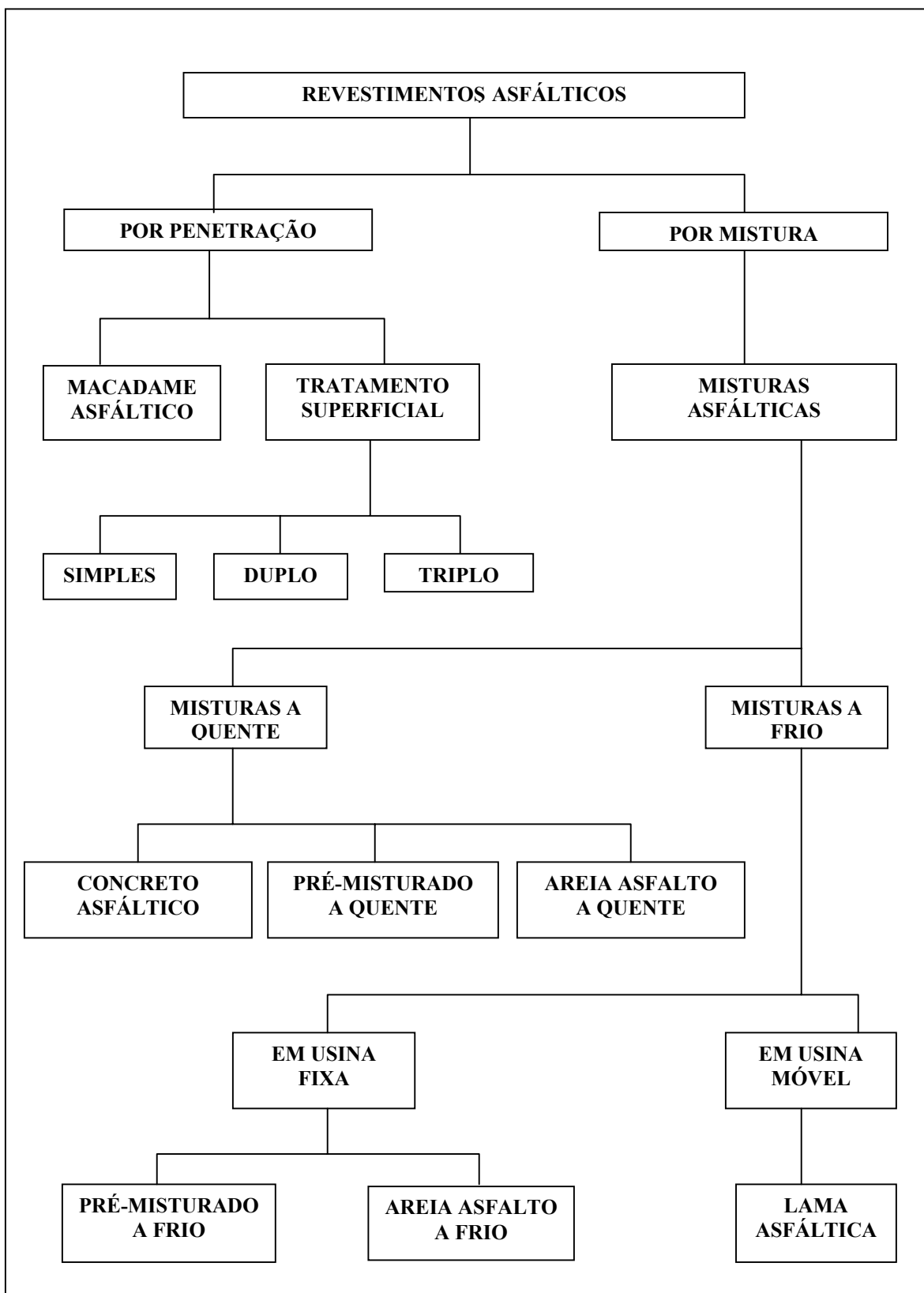
As bases podem apresentar diversas constituições, a figura 2.6 mostra resumidamente a sua classificação.



**FIGURA 2.6** – Classificação das bases (adaptada de SANTANA, 1993).

### 2.2.2 - Revestimentos Asfálticos

Segundo Santana (1993), os revestimentos asfálticos podem ser resumidamente classificados em: revestimentos asfálticos por penetração e por mistura. (ver figura 2.7).



**FIGURA 2.7** – Classificação dos revestimentos asfálticos. (Adaptada de SANTANA, 1993)



Os revestimentos asfálticos apresentam diversas constituições, a figura 2.7, mostra uma classificação resumida dos revestimentos.

#### 2.2.2.1 – Tratamentos superficiais

Tratamentos Superficiais de penetração invertida, constituem um revestimento de material betuminoso e agregado mineral, no qual o agregado é colocado uniformemente sobre o material asfáltico, aplicado em uma só camada (tratamento superficial simples), constituído de duas aplicações de material asfáltico, cobertas cada uma, por agregado mineral (tratamento superficial duplo). Este último é constituído de três aplicações de material asfáltico, cobertas, cada uma, por agregado mineral, (tratamento superficial triplo), e submetido às operações de compressão e acabamento das camadas, IBP (1986).

A primeira aplicação de material asfáltico é feita diretamente sobre a base imprimada, e coberta imediatamente com o agregado graúdo. A segunda e a terceira camada são semelhantes a primeira, usando-se respectivamente, agregados médios e miúdos, especificados.

Segundo Santana (1993), tratamento superficial simples, consiste em se dar um banho de ligante asfáltico na base granular já imprimada, e espalhar uma camada de agregado, e em seguida comprimí-la, com isso o ligante penetra para cima (penetração invertida).

Tratamento superficial duplo consiste em um revestimento asfáltico composto de duas séries de aplicações alternadas de asfalto e agregado, executados sobre uma superfície acabada e imprimada. O envolvimento parcial do agregado pelo ligante em cada

aplicação processa-se por penetração originada pela ascensão do ligante sob a ação de enérgica compressão, DAER-ES-P 15/91 (1991).

Os materiais asfálticos empregados nos tratamentos superficiais, simples, duplo e triplo, podem ser:

- a) cimento asfáltico de petróleo: tipo CAP 7, com viscosidade 20 – 60 seg S. F. a 135 °C;
- b) asfaltos diluídos de petróleo: tipos CR-250, CR-800 e CR-300;
- c) emulsões asfálticas: tipo RR-1C e RR-2C.

As quantidades de materiais (agregado mineral e ligante betuminoso) por metro quadrado, devem ser determinados por projeto e verificadas praticamente no campo.

As temperaturas de aplicação, em graus centígrados, deverão permitir a execução dentro das seguintes faixas de viscosidade:

1. cimentos asfálticos de petróleo : 20 a 60 SSF;
2. asfaltos diluídos : 20 a 60 SSF;
3. emulsões asfálticas : 20 a 100 SSF.

#### 2.2.2.2 -Macadames betuminosos

Macadame betuminoso, consiste em duas aplicações alternadas por camadas de material asfáltico sobre agregados de tamanho e quantidade especificada, devidamente espalhados e compactados. O macadame betuminoso pode ser usado tanto como camada de base, quanto como revestimento.

Os materiais asfálticos empregados nos macadames asfálticos, podem ser:

- a) cimento asfáltico de petróleo: tipo CAP-7;

b) emulsões asfálticas tipos: RR-1C e RR-2C.

As quantidades de material (agregado mineral e de ligante betuminoso), por metro quadrado, podem ser:

- a) material betuminoso, aproximadamente 1,0 l/m<sup>2</sup> por cm de espessura;
- b) Agregado mineral para:
  - Espessura de 2,5 cm = aproximadamente 30 l/m<sup>2</sup>;
  - Espessura de 7,5 cm = aproximadamente 90 l/m<sup>2</sup>;

As temperaturas de aplicações deverão ser as que permitam a execução dentro das seguintes faixas de viscosidade:

- a) cimentos asfálticos de petróleo: 20 a 60 SSF;
- b) emulsões asfálticas : 20 a 100 SSF.

#### 2.2.2.3 – Pré-misturado a quente – P.M.Q.

Pré-misturado a quente é o produto resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de um ou mais agregados minerais e cimento asfáltico espalhado e comprimido a quente. O pré-misturado a quente também pode ser utilizado como camada de regularização, base ou como revestimento. Sua espessura, após acabada e comprimida, pode variar entre 3 a 10 cm, dependendo da granulometria da mistura do agregado.

O material asfáltico utilizado no PMQ, conforme o IBP (1986), deve ser os cimentos asfálticos de petróleo dos tipos CAP 20 e CAP 55.

O cimento asfáltico é um material termoplástico, cuja viscosidade diminui com o aumento da temperatura. A relação entre temperatura-viscosidade, entretanto, pode ser a mesma para diferente fonte ou tipos de material asfáltico. A viscosidade depende de fatores como: tipo de aplicação, características e graduação do agregado e as condições climáticas. A mais alta viscosidade (menor temperatura) deve ser selecionada de maneira que assegure cobertura adequada do agregado e trabalhabilidade apropriada para espalhar e comprimir a mistura.

Os agregados, devem ser aquecidos a uma temperatura entre 10 a 15 ° C. acima da temperatura do cimento asfáltico. A mistura do PMQ não deve ser inferior a 107 ° C, e nem superior a 177 ° C.

A temperatura de compressão recomendável, é aquela na qual o CAP apresenta uma viscosidade *Saybolt Furol* de 140 +- 15 segundos.

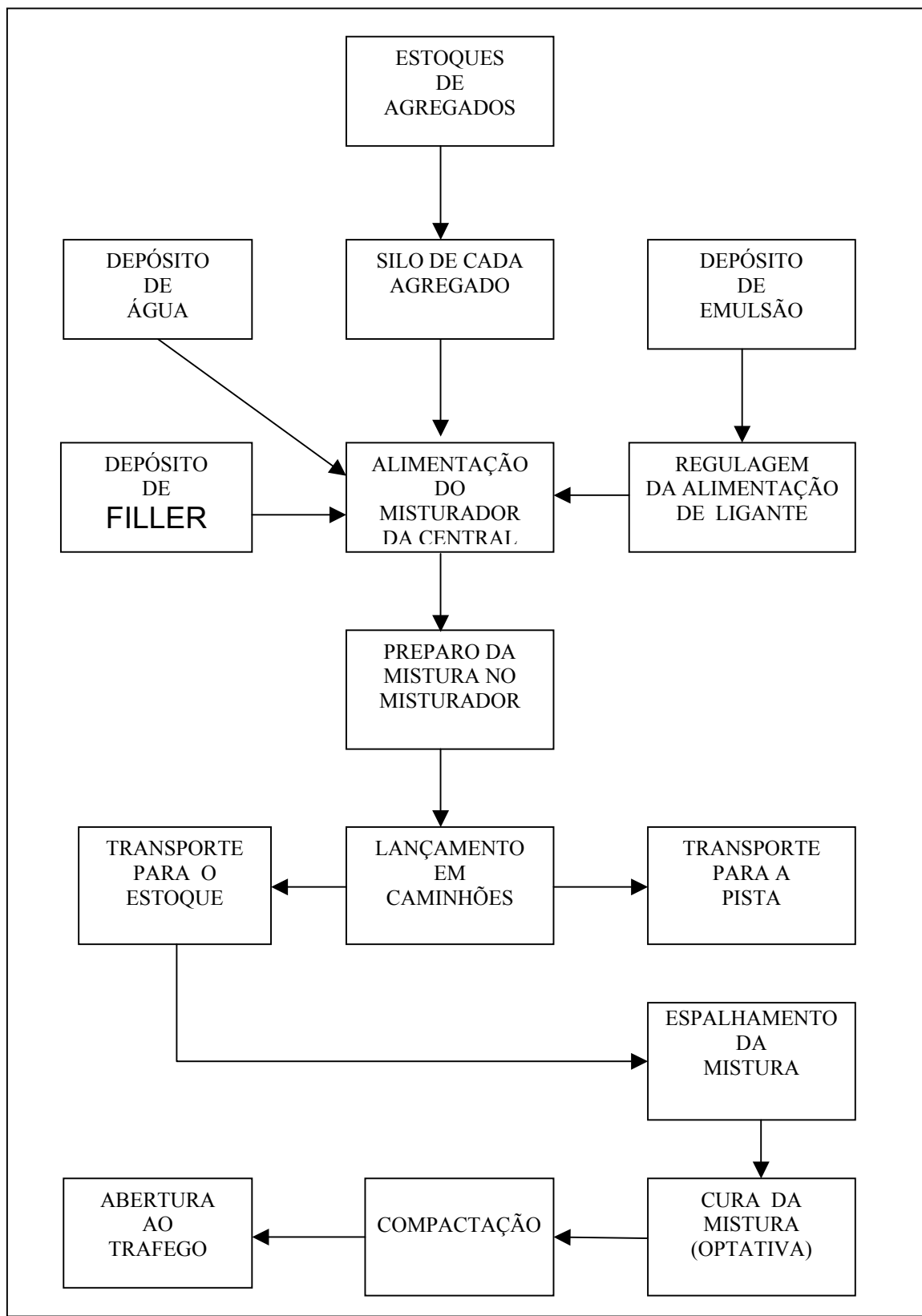
#### 2.2.2.4– Pré-misturado a frio – P.M.F.

Pré-misturado a frio é o produto resultante da mistura, em equipamento apropriado, de agregados minerais e emulsão asfáltica ou asfalto diluído, espalhado e comprimido a frio. Podem ser classificados segundo sua granulometria como abertos e densos. Os pré-misturados podem ser utilizados como camada de regularização, como base ou como revestimento. Suas camadas variam entre 3 a 20 cm de espessura compactadas, dependendo do tipo de serviço e granulometria final da mistura, IBP (1986).

Segundo Santana (1993), os PMFs começaram a se desenvolver nos EUA, na década de 50, e no Brasil, a partir de 1966 em escala industrial para camadas de regularização e de base, e em seguida para revestimentos. Na década de 80 generalizou-se o

emprego de PMFs na forma de graduação mais densa em revestimentos delgados (espessura menor ou igual a 5 cm), sem nenhuma capa selante.

O fluxograma da figura 2.8, mostra a construção das camadas de PMFs, que resumidamente podem ser divididos em quatro partes: misturação, transporte, espalhamento e compactação.



**FIGURA 2.8** – Fluxograma da Execução dos PMFs. (SANTANA, 1993)

Os ligantes utilizados no PMF são geralmente as emulsões asfálticas catiônicas, preferencialmente de ruptura média (RM), e os asfaltos diluídos, preferencialmente CR-250.

#### 2.2.2.5 - Concreto betuminoso usinado a quente (C.B.U.Q.)

Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), é um revestimento flexível, resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (*filler* – eventualmente) e cimento asfáltico de petróleo (CAP) de acordo com proporções definidas previamente em laboratório, de forma a atender os requisitos granulométricos, de densidade, de vazios e de resistência, compatíveis com padrões preestabelecidos. Um concreto betuminoso se caracteriza pelo fato de que a operação de mistura é precedida pelo aquecimento de seus componentes à temperaturas elevadas (entre 140° C e 180° C), e sua distribuição e compactação na pista serem também precedidas estando a mistura em temperaturas entre 80° C e 140° C. Devido a ligação entre agregados, os CBUQs são capazes de resistir bem às ações mecânicas de desagregação produzida pelos os veículos.

O ligante asfáltico utilizado nos concretos asfálticos é o cimento asfáltico de petróleo (CAP), o qual é classificados de acordo com a sua consistência medida pela viscosidade dinâmica ou absoluta, isto é, o tempo necessário ao escoamento de um volume determinado de asfalto através de um tubo capilar, com auxílio de vácuo, sob condições rigorosamente controladas de pressão e temperatura. De acordo com a Especificação Brasileira IBP/ABNT-EB-78, os cimentos asfálticos de petróleo (CAP), são classificados em: CAP7, CAP20 e CAP 55, IBP (1986). Os CAPs são obtidos no fundo da torre de

vácuo, após a remoção dos demais destilados do petróleo, e tem características de semi-sólido a temperatura ambiente. Seu elemento ativo é o Betume, que por definição da *American Society for Testing and Material (ASTM)*, é uma mistura de hidrocarbonetos pesados, obtidos em estado natural ou por diferentes processos físicos ou químicos, com seus derivados de consistência variável e com poder aglutinante e impermeabilizante, sendo solúvel em dissulfeto de carbono.

Segundo o IBP (1986), o CAP é um material termoplástico, reológico, tixotrópico, ideal para aplicação em trabalhos de pavimentação, pois além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade, e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis;

Os agregados para o concreto asfáltico serão constituídos de uma mistura de agregado graúdo, agregado miúdo e “*filler*”, quando necessário. Segundo Felipe e Castro (1970), os agregados representam aproximadamente 95 % em peso dos materiais constituintes da mistura de concreto asfáltico. Devido a isso, devem ter características para suportarem as pressões aplicadas pelos veículos sem se fraturarem e resistirem as ações dos agentes do intemperismo sem se alterarem. Os agregados, segundo os autores, são classificados: segundo a natureza, tamanho e distribuição das partículas.

Quanto a Natureza das partículas, podem ser divididos em: agregados naturais e artificiais. O agregados naturais são constituídos por partículas oriundas da alteração das rochas pelos processos de intemperismo ou produzidas por processos físicos, como britagem, lavagem e classificação em que a matéria prima é rocha, blocos de pedra, etc. Distingue-se ainda os seguintes tipos: pedregulhoso, pedregulhoso britado, pedra britada e areia. Os agregados artificiais, são aqueles em que as partículas são provenientes de matéria prima artificial, produzida por transformação física e química do material natural.



O agregado graúdo pode ser de pedra britada, escória britada, seixo rolado, britado ou não. O agregado graúdo deve se constituir de fragmentos sãos, duráveis, livres de argilas e substâncias nocivas, e deve apresentar características de boa adesividade, resistência ao choque e à abrasão Los Angeles (LA) menor ou igual 50%, quando submetido ao ensaio de durabilidade, com sulfato de sódio, e não apresentar perda superior a 12%, em 5 ciclos;

O agregado miúdo pode ser areia, pó de pedra ou mistura de ambos. Suas partículas individuais deverão ser resistentes, e apresentar moderada angulosidade, livres de argilas e substâncias nocivas. Deverá também apresentar equivalente areia superior a 50%;

(LEIDEL, 1993), diz que a indústria de asfalto frequentemente prefere agregados angulares invés da forma arredondada usada nas fundições, e esta é uma característica importante na composição da massa asfáltica, mas que não chega a eliminar o uso dos resíduos de areias de fundição.

Devem ser constituídos por materiais minerais finamente divididos, inertes em relação aos componentes da mistura, tais como o cimento portland, cal extinta, pó calcário, e que o material passante na peneira n°200 seja de no mínimo 65%;

A mistura asfáltica para capa de rolamento, quando dosada pelo Método Marshall, deve satisfazer as características DNER – ME 43/64:

Porcentagem de vazios = 3 a 5 %

Relação betume/vazios = 75 – 82 %

Estabilidade = 350 a 700 Kgf

500 a 1000 Kgf.

As misturas para concreto asfáltico, não devem apresentar variações na granulometria maiores que as especificadas no projeto, e o teor de cimento asfáltico, poderá variar até mais ou menos 0,3 % em relação a massa total.

A dosagem de misturas asfálticas deve ser realizada de forma a assegurar durabilidade, resistência à fadiga e estabilidade à deformação plástica da mistura, face às condições de clima, do tráfego e da estrutura do pavimento, (CERATTI, 1997). Com os agregados minerais disponíveis, agregado grosso, agregado fino, (que pode ser subdividido em brita média, pedrisco e areia), determina-se a porcentagem com que cada fração deve entrar na mistura para se enquadrar na faixa especificada. Dependendo da situação, há necessidade de misturar ou compor, três ou mais materiais em proporções tais que a curva granulométrica da mistura fique dentro da faixa e acompanhe um dos seus limites, não formando patamares ou resaltos Preferencialmente a curva obtida deve se enquadrar no centro da faixa especificada, (FELLIPE e CASTRO, 1970).

Segundo Leidel (1993), a indústria de asfalto define areia, como um material granular com determinadas características físicas e químicas, e não devem ser constituídas por caroços grandes, pó, barro ou sub-produtos de fundição. Ainda segundo o autor, as empresas de fundição costumam usar a representação de areia retida em cada tela. Já a indústria asfáltica usa a representação, porcentagem que passa em cada peneira como uma curva sumária. Então, se as fundições esperam comercializar os seus resíduos de areias, estas devem se adequar às necessidades da indústria asfáltica. Se a areia de fundição tiver uma granulometria que não se enquadre diretamente no traço asfáltico, esse problema pode ser corrigido, misturando-se outro material mais graúdo ou miúdo, que deve e poderá ser considerado pela indústria de asfalto.

Para a que haja uma boa execução dos concretos asfálticos, devem ser previstos os seguintes equipamentos:

- Usinas;
- Acabadoras;
- Rolos compactadores e Caminhões basculantes.

Os depósitos para o ligante betuminoso deverão ser capazes de aquecer o material às temperaturas fixadas pelas especificações. O aquecimento deverá ser feito por meio de serpentinas a vapor ou eletricidade, de modo a não haver contato de chamas com o interior do depósito. Deverá ser instalado um sistema de circulação para o ligante betuminoso, de modo a garantir a circulação, desembaraçada e contínua, do depósito ao misturador, durante todo o período de operação. Todas as tubulações e acessórios deverão ser dotados de isolamento, a fim de evitar perdas de calor. A capacidade dos depósitos deverá ser suficiente para no mínimo três dias de serviço;

Os silos deverão ter capacidade total de, no mínimo, três vezes a capacidade do misturador e serão divididos em compartimentos, dispostos de modo a separar e estocar, adequadamente, as frações apropriadas do agregado. Cada compartimento deverá possuir dispositivos adequados de descarga.

O concreto asfáltico deve ser misturado em uma usina fixa, gravimétrica ou volumétrica. Os agregados podem ser dosados em peso ou em volume. Nas usinas gravimétricas os fluxos dos agregados, do asfalto e conseqüentemente da usina são intermitentes. Estas usinas são também denominadas “descontínuas”. Nas usinas volumétricas os fluxos dos agregados, do asfalto e da mistura são ininteruptos e por esta razão as usinas são denominadas “contínuas”, (FELLIPE e CASTRO, 1970). A usina

deverá ser equipada com uma unidade classificadora de agregados, e após o secador dispor de misturador tipo “pugmill” com duplo eixo conjugado, provido de palhetas reversíveis e removíveis, ou outro tipo capaz de produzir uma mistura uniforme. Deve ainda o misturador possuir dispositivo de descarga, de fundo e ajustável e dispositivo para controlar o ciclo completo. A usina deverá possuir silos de agregados múltiplo, com pesagem dinâmica dos mesmos e deverá ser assegurada a homogeneidade das granulometrias dos diferentes agregados. Os agregados devem ser secados por meio de um tambor secador, o qual é regularmente alimentado por qualquer combinação de correias transportadoras ou elevadores de canecas. O secador deve ser provido de um instrumento para determinar a temperatura do agregado que sai do secador.

O equipamento para espalhamento e acabamento deverá ser constituído de pavimentadores automotrizes, capazes de espalhar e conformar a mistura no alinhamento, cotas e abaulamentos requeridos. As acabadoras deverão ser equipadas com parafusos sem fim, para colocar a mistura exatamente na largura desejada, e possuir dispositivos rápidos e eficientes de direção, além de marchas para frente e para trás. A acabadora deverá apresentar mesa vibratória e dispositivos para aquecimento visando um melhor acabamento e compactação inicial da mistura.

Segundo Felipe e Castro (1970), o equipamento fundamental na execução do revestimento asfáltico é a acabadora, que tem por finalidade:

- a) receber e distribuir a massa asfáltica, de largura da faixa de espalhamento, evitando a segregação;
- b) efetuar o espalhamento de acordo com os perfis estabelecidos;
- c) nivelar a superfície de maneira que se apresente uniforme, sem necessidade de posteriores retoques;

d) realizar uma pré-compactação a mais regular e eficiente possível.

Todo o equipamento de compactação deve ser autopropulsor e reversível, e constituído por rolo pneumático e rolo metálico liso, tipo *tandem*. Os rolos tipo tandem, devem ter uma carga de 8 a 12 toneladas. Os rolos pneumáticos, autopropulsores, devem ser dotados de pneus que permitam a calibragem de 35 a 120 libras por polegada quadrada.

Os caminhões tipo basculante para o transporte do concreto asfáltico, deverão ter caçambas metálicas robustas, limpas e lisas, ligeiramente lubrificadas com água e sabão, óleo parafínico, ou solução de cal, de modo a evitar a aderência da mistura às chapas.

Quando decorridos mais de sete dias entre a execução da imprimação e a do revestimento, ou no caso de ter havido trânsito sobre a superfície imprimada, ou ter sido a imprimação recoberta com areia ou pó de pedra, deverá ser feita uma pintura de ligação.

Segundo (FELLIPE e CASTRO,1970), a execução dos concretos asfálticos compreende as seguintes partes fundamentais: dosagem e mistura, transporte, espalhamento e compactação.

O transporte do concreto betuminoso da usina ao ponto de aplicação, deverá ser feito em caminhões basculante metálicas herméticas, lisas e limpas, que tenham sido tratados internamente com uma quantidade mínima de água ensaboada, ou óleo solúvel, para evitar a aderência da mistura na carroceria, (FELLIPE e CASTRO, 1970). Também segundo os autores, quando a distância de transporte for muito grande, ou a temperatura atmosférica muito baixa, as cargas de misturas deverão ser cobertas com um material isolante térmico, de tamanho suficiente para cobrir toda a carga, para evitar perdas excessivas de calor e permitir que a mistura chegue na pista com a temperatura especificada;

As misturas de concreto betuminoso devem ser distribuídas somente quando a temperatura ambiente se encontrar acima dos 10°C, e com o tempo não chuvoso ou neblina, DAER-ES-P 16/91 (1991). A distribuição do concreto betuminoso deve ser feita por máquinas acabadoras como especificado anteriormente. Imediatamente após a distribuição do concreto betuminoso, tem início a rolagem. Como norma, a temperatura de rolagem é a mais elevada que a mistura betuminosa possa suportar. A temperatura recomendável é aquela na qual o ligante apresenta uma viscosidade *Saybol-furol* de 140+- 15 segundos, para o cimento asfáltico.

No caso de se empregar rolo de pneus de pressão variável, deve-se rolar com baixa pressão, a qual deverá ser aumentada à medida que a mistura for sendo compactada e, conseqüentemente suportar pressões mais elevadas.

Segundo FELLIPE e CASTRO (1970), a compactação das camadas de concreto asfáltico tem as seguintes finalidades:

- a) constância volumétrica, isto é, a camada espalhada e compactada não deve sofrer acentuada compactação pela ação do tráfego, o que produziria deformações, na superfície de rolamento, incômodas aos veículos que se deslocam com velocidades elevadas;
- b) aumento de estabilidade da camada que se reflete no valor estrutural da camada;
- c) impermeabilização da camada que se reflete na durabilidade do pavimento, reduzindo ou eliminando a ação de água sobre o asfalto que aglutina as partículas de agregado. No caso de camadas permeáveis, a água das chuvas poderá saturá-la e a ação do tráfego pesado gerará pressões hidrostáticas que provocam a ruptura do pavimento. Embora a permeabilidade dependa da

composição granulométrica da camada, do seu grau de compactação, e, também da temperatura de rolagem, ela é acentuadamente influenciada pelo equipamento empregado na compactação.

A compressão, será iniciada pelos bordos, longitudinalmente, continuando em direção ao eixo da pista. Nas curvas, de acordo com a superelevação, a compressão deve começar sempre do ponto mais baixo para o mais alto. A operação de rolagem perdurará até o momento em que seja atingida a compactação especificada. Durante a rolagem não serão permitidas mudanças de direção e inversões bruscas de marcha, nem o estacionamento do equipamento sobre o revestimento recém rolado. Os pneus do rolo deverão ser umedecidos adequadamente, de modo a evitar a aderência da mistura, DAER-ES-P 16/91 (1991).

Para a determinação da espessura da camada solta, deve-se multiplicar a espessura prevista compactada , por 1,25.

### 2.2.3 – Projetos de Misturas Asfálticas

Segundo Felipe e Castro (1970), um projeto de uma mistura de concreto asfáltico consiste em determinar o traço da mistura , ou seja:

- a) determinar a porcentagem dos diversos agregados minerais utilizados;
- b) determinar a porcentagem de asfalto, de maneira a satisfazer requisitos mínimos de estabilidade determinada pelas especificações.

Geralmente, os métodos empregados são os métodos de *Hveem*, empregado nos Estados Unidos, o método *Smith*, empregado mais no campo de pesquisa, e o método *Marshall*, empregado mais no Brasil, qual será estudado para neste trabalho.

Para o projeto de uma mistura asfáltica pelo método Marshall, segundo FELIPPE e CASTRO (1970), precisa-se conhecer ou definir os seguintes elementos básicos:

- a) tipo e destino da camada;
- b) granulometria e massa específica real dos agregados disponíveis;
- c) escolha da faixa granulométrica de projeto;
- d) em função do tráfego previsto, escolher a energia de compactação para moldagem dos corpos de prova;
- e) o tipo de asfalto que será determinado em função do clima e do tráfego.

#### 2.2.3.1 – Projeto

Conhecidos os elementos básicos anteriores, faz-se uma composição granulométrica, isto é, determinam-se as porcentagens com que entram na mistura os diversos tipos de agregados. Geralmente, faz-se a moldagem de três corpos de prova com teores de asfalto variando entre 4% a 7%.

Na realização do ensaio Marshall são determinados os seguintes elementos:

- a) Densidade – deve-se obter através do peso pelo volume.  $D = P/V$  (Kg/Dm<sup>3</sup>);
- b) Estabilidade – é a carga expressa em kg, ou libras, que produz a ruptura diametral do corpo de prova;



c) Fluência – é a deformação diametral do corpo de prova, expressa em centésimos de polegadas, medida no momento da ruptura;

Com a densidade, volume, massa específica real dos agregados e asfalto, é possível determinar os vazios para cada teor de asfalto.

Com os valores da densidade, estabilidade, fluência, vazios da mistura, vazios do agregado mineral, relação asfalto-vazios e teor de alfalto, traçam-se gráficos, onde os limites de variação a serem representados nestes gráficos são obtidos conforme a tabela 2.5.

MÉTODO DE PROJETO MARSHALL	TRÁFEGO PESADO		TRÁFEGO LEVE	
	Min	Máx	Min	Máx
Número de golpes em cada face do corpo de prova	75		50	
Fluência (1/100")	8	16	8	16
Vazios de ar (%) Camada de rolamento	3	5	3	5
Camada De Ligação, nivelamento e base.	3	8	3	8

**TABELA 2.5** – Método de Projeto Marshall (DAER – Departamento de Estradas de Rodagens do Estado do Rio Grande do Sul).

A porcentagem de asfalto ótimo é a média aritmética das seguintes porcentagens de asfalto:

- a) % de asfalto correspondente à máxima densidade;
- b) % de asfalto correspondente à máxima estabilidade;
- c) % de asfalto correspondente a porcentagem média de vazios previstas para o tipo de mistura.

A resistência ao cisalhamento ou estabilidade do revestimento é definida pela equação:

$$T = S \operatorname{tang} \phi + c$$
, que é a soma do atrito ( $S \operatorname{tang} \phi$ ) com a coesão ( $c$ )

Nesta equação, a primeira parcela depende das características dos agregados e sua compactação, e a segunda é propiciada pelas características de cimentação da substância empregada. No caso do concreto asfáltico, a substância de cimentação é o asfalto. O asfalto é uma substância que atua, também, como lubrificante, reduzindo o atrito entre as partículas dos agregados. Esta redução se acentua com o aumento do número de partículas envolvidas e com o aumento da espessura das películas que envolvem as partículas, portanto com o aumento da porcentagem de asfalto. (ver Tabela 2.5).

Simultaneamente, o aumento da porcentagem de asfalto se reflete num aumento progressivo da coesão até um valor em que ela progressivamente começa a reduzir.

Na maioria dos materiais o aumento da coesão propiciado pelo asfalto é maior que a redução do atrito entre as partículas, devido a sua ação lubrificante, resultando que a variação da estabilidade com a porcentagem de asfalto é uma curva de forma relativamente parabólica que apresenta um ponto máximo, (FELLIPE e CASTRO, 1970).

Segundo (PUZINAUSKAS apud SANTANA, 1996), a espessura do filme de asfalto que envolve as partículas do agregado de uma massa asfáltica, segundo os tecnólogos de asfaltos, variam de 10 u a 100 u. Ainda segundo os autores, o *filler* agregado, que é na realidade um agregado fino, vai também ser envolvido por uma película de mastic. Admite-se que a menor espessura possível que envolve um agregado fino é uma película de 10 u. Segundo SANTANA (1996), as espessuras das películas que envolvem as partículas de agregado numa mistura asfáltica dependem de vários fatores como: tamanho e superfície específica das partículas, porcentagem do ligante, e grau de

compactação da mistura. Como evidentemente, a compactação vai se dar após a mistura quando todo o agregado já foi envolvido pelo ligante, (já deveriam então estar preliminarmente definidas as espessuras das películas de ligante). Como os autores afirmam que realmente essas espessuras dependem do grau de compactação, conclui-se que durante a compactação vão haver ajustamentos nessas espessuras, difíceis de imaginar que as partículas maiores de filler migrando de películas mais espessa para películas menos espessas, por isso a suposição de que as películas de ligante que envolvem os agregados são homogêneas. Com isso, pode-se então admitir, que os asfaltos envolvem as partículas dos resíduos das areias de fundição de forma homogênea, impermeabilizando-as, não deixando que estas partículas interajam com o meio ambiente.

Duriez apud Santana (1996), considera que todo o asfalto destinado ao *filler* seja para envolvê-lo, ou seja, que é lícito concluir a título de especulação, que o *filler* agregado está compreendido entre 80u. e 3,5 u., e que as partículas abaixo de 3,5 u. constitui o filler ativo, que vão ficar em suspensão nas películas de asfalto sem consumir asfalto.

#### 2.2.3.2 – Ensaio Marshall

O ensaio Marshall é aplicado no projeto de misturas asfálticas densas, à quente, com tamanho máximo do agregado de 1". É empregado no controle de execução do concreto asfáltico, no campo

Para a realização destes ensaios são empregados os seguintes equipamentos:

- a) Termômetro (10° a 230 ° C);

- b) Balança tipo escala tríplice com capacidade de 1600g. e sensibilidade a 0,1g;
- c) Espátula grande ou colher de pedreiro pequena;
- d) Banho-maria com temperatura termostaticamente controlada;
- e) Pedestal de compactação de madeira, dimensão 8" x 8" x 18", capeado com uma chapa de aço de 12"x 12" x 1". O bloco de madeira deve estar preso, por quatro cantoneiras a um sólido bloco de concreto. A chapa de aço deverá ser solidamente ligada ao cepo de madeira. O pedestal deve ser instalado de forma que o bloco de madeira fique a prumo, a chapa de aço em nível e o conjunto todo livre de movimentos durante a compactação;
- f) Prensa para a ruptura dos corpos de prova, para medida da fluência;
- g) Molde de compactação, consistindo de uma placa base, molde e colar de extensão. O molde com diâmetro interno de 4" e altura aproximada de 3", a placa de base e o colar são feitos de modo a poderem ser alternados com qualquer das extremidades do molde;
- h) Soquete com sapata circular, plana de 3 a 7/8" de diâmetro, equipado com peso de 10 libras, capaz de obter a altura de queda livre especificada de 18";
- i) Fixador do molde. Dispositivo destinado a manter o molde na posição, sobre o pedestal de compactação;
- j) Luvas de asbesto;
- k) Lápis de cera para marcação dos corpos de prova;
- l) Haste de aço com meia polegada de diâmetro por 5 cm. de comprimento, tendo as extremidades com formato semi-esférico;
- m) Dispositivos para aquecimento dos moldes e soquetes.

O procedimento de ensaio, deve ocorrer conforme os seguintes passos:

- 1) Cada agregado constituinte da mistura deve ser seco e separado em frações;
- 2) Pesa-se cada fração de agregado, de maneira a resultar uma amostra compactada com a altura de 2,5 mais ou menos 0,05 polegadas. Isto normalmente requer uma amostra de peso aproximado de 1200 gramas. Verifica-se se este peso é suficiente, moldando-se uma amostra pioneira e determinando-se sua altura;
- 3) Aquece-se os agregados a uma temperatura igual a temperatura de mistura + 10 °C;
- 4) Limpa-se completamente molde e a face do soquete aquecendo-os em chapa quente, entre 93 a 149 °C;
- 5) O asfalto deve ser aquecido a uma temperatura que produza a viscosidade de 85 mais ou menos 10 segundos *Saybolt Furol* e 140 mais ou menos 15 segundos *Saybolt Furol*. A temperatura correspondente a 85 SSF é a de mistura e a correspondente a 140 SSF é a de compactação;
- 6) Coloca-se a mistura dos agregados aquecidos numa vasilha e forma-se uma cratera no centro. Coloca-se nesta cratera a quantidade de cimento asfáltico aquecido especificada, e mistura-se completamente o agregado com o asfalto;
- 7) Fixa-se o conjunto do molde no fixador do molde;
- 8) Coloca-se o papel filtro no fundo do molde, antes da introdução da mistura;
- 9) Coloca-se a mistura no molde em três camadas aproximadamente iguais. Aplica-se na primeira camada 20 golpes manuais com a haste, do item 1), de maneira que a ponta toque o fundo do molde. Na 2ª e 3ª camadas são

dados 20 golpes em cada, de maneira que para cada uma a haste apenas ultrapasse a superfície de separação com a camada inferior. Esta compactação destina-se a eliminar a segregação dos agregados e a possível formação de vazios grandes pela superposição de partículas maiores do agregado grosso. Os vinte golpes devem ser distribuídos uniformemente na secção do corpo de prova;

- 10) Emparelha-se a superfície por meio de uma espátula;
- 11) Verifica-se sempre se a temperatura se acha dentro dos limites estabelecidos, antes de iniciar a compactação. Nunca aqueça a mistura;
- 12) Aplica-se 35, 50 ou 75 golpes ( respectivamente para tráfego leve, médio ou pesado) com o soquete. Mantém-se o eixo do soquete de compactação tão perpendicular à base do molde quanto possível;
- 13) Remove-se a placa base e o colar, invertem-se as posições e torna-se a fixar o molde. Aplica-se o mesmo número de golpes na face invertida da amostra;
- 14) Após a compactação, remove-se o conjunto do fixador do molde e deixa-se que a amostra esfrie, até que não resulte qualquer deformação quando de sua retirada do molde. Quando se desejar um resfriamento mais rápido, podem ser usados ventiladores de mesa. Evite o resfriamento por imersão na água;
- 15) Remove-se o corpo de prova do molde por meio de um extrator, macaco ou outro dispositivo, identifica-se com lápis de cêra e coloca-se então sobre uma superfície nivelada e lisa até que se ache em condições de ser

ensaiado. Normalmente os corpos de prova são deixados em repouso de um dia para o outro;

- 16) Após o repouso determina-se a densidade de cada corpo de prova. Para isto, eles são pesados ao ar, e na água. A diferença dessas duas pesagens, pelo Princípio de Arquimedes, fornece o volume. A densidade é obtida dividindo-se o peso ao ar pelo volume;
- 17) Após a determinação de densidades os corpos de prova são aquecidos em Banho-Maria na temperatura de  $60 \pm 1^\circ \text{C}$  durante 30 a 40 minutos;
- 18) Os corpos de prova retirados do Banho-Maria são rompidos diametralmente, com confinamento parcial. O período de tempo, entre a retirada do corpo de prova de dentro do Banho-Maria e a ruptura não deverá ser superior a 30 segundos;

No momento da ruptura determina-se a carga máxima e a deformação máxima.

A fluência é a deformação máxima, expressa em centésimos de polegadas, que sofre o corpo de prova até a ruptura. Já a estabilidade de um concreto betuminoso, é a medida da sua capacidade de suportar os carregamentos oriundos do tráfego sem sofrer deformações plásticas (permanentes e irreversíveis) (COELHO, 1992). É a carga máxima, expressa em quilos ou libras.

#### 2.2.3.3 - Controle tecnológico

Na execução dos revestimentos de concreto asfálticos deverão ser realizados controles tecnológicos de produção da mistura e de execução dos serviços, resultando, portanto, controles de usina e de pista:

a) Controle de usina – Na central de usinagem, deve-se controlar a confecção das massas asfálticas, como:

- Controle de temperatura do asfalto – deverá ser verificada e registrada a temperatura em que se encontra o asfalto no tanque de alimentação à intervalos de uma hora durante o período de operação da usina;

- Controle da temperatura do agregado – deverá ser verificada e registrada a temperatura do agregado na saída do secador, à intervalos de uma hora durante o período de operação da usina;

- Controle da temperatura da mistura de concreto asfáltico – a determinação da temperatura da mistura de concreto asfáltico se processará no caminhão, por ocasião da pesagem na balança localizada junto a usina;

- Granulometria dos materiais – serão feitos ensaios de granulometria de amostras dos silos frios, quentes, e, da mistura de agregados provenientes dos silos quentes sem *filler*, na frequência de uma determinação de cada silo por dia, ou fração, de operação da usina. As amostras coletadas deverão ter peso superior a 20 kg, que por quarteamento serão reduzidas ao peso adequado para o ensaio. Com o agregado proveniente da extração



do asfalto será realizado ensaio de granulometria na frequência de um por turno de operação da usina;

- Equivalente de Areia – com a mistura de agregados provenientes dos silos quentes a qual se adiciona a porcentagem de *filler* indicada no projeto (quando necessário), deverá ser realizado um ensaio de equivalente areia na frequência de um por dia de operação da usina. Poderão ser realizados ensaios de equivalente areia dos materiais isolados;

- Moldagem e ensaio dos corpos de prova – Deverão ser moldados três corpos de prova por turno de operação da usina. Para cada corpo de prova deverá ser coletada uma amostra de aproximadamente 10 kg, retirada da carga depositada no caminhão. Este material deve ser coletado em dois pontos diametralmente opostos, na altura média do cone formado pela massa asfáltica, cortando, antes, verticalmente a parte externa. Estas duas amostras assim coletadas devem ser misturadas e reduzidas por quarteamento até o peso necessário à moldagem do corpo de prova. Com os corpos de prova moldados serão realizados os ensaios de determinação de densidade, estabilidade e fluência;

- Determinação do teor de asfalto – o teor de asfalto pode ser determinado por duas maneiras: pelo ensaio de refluxo, ou pelo consumo médio diário de asfalto;

- Umidade do agregado na saída do secador – diariamente deverá ser determinado o teor de umidade do agregado que sai do secador. A amostra coletada deverá

pesar aproximadamente 10 kg que será reduzida posteriormente a aproximadamente 2 kg, para determinação do teor de umidade. O teor de umidade permitido é de 0,5%.

b) Controle de pista – No local onde será executada a massa asfálticas, deve-se controlar:

- Controles de temperatura e espessura da camada solta – Na pista serão realizados controles da temperatura ambiente, e da mistura asfálticas por ocasião do espalhamento e início da compactação. Deverá ser anotada a espessura da camada solta para cada estaca;

Determinação da densidade do revestimento de concreto asfáltico, e espessura compactada – a determinação da densidade será feita pelo método da amostra indeformada (AASHO T 147, método B) ou pelo método do balão de borracha (AASHO T 205) à intervalos de 200 metros.

### **2.3 – Incorporação do Resíduo Areia de Fundição nas Massas Asfálticas – CBUQ**

LEIDEL, 1993, em seu artigo *Sand Reuse: User Requirements*, diz que em Ontário no Canadá é produzido aproximadamente 11 milhões de toneladas de massas asfálticas a quente, e durante o mesmo tempo, as indústrias de fundições produziram 600 mil toneladas de resíduos de areias. Segundo o autor, assumindo alguns critérios de qualidade, é possível adicionar nas massas asfálticas aproximadamente 15% dos resíduos areias de fundição, significando o reaproveitamento de 1,65 milhões de toneladas, quer dizer,

aproximadamente três vezes mais que o descarte das indústrias de fundições de Ontário. O autor questiona o por quê do não aproveitamento, por parte das empresas de concreto asfáltico, como matéria-prima do sub produto das indústrias de fundições. Diz ainda o autor que o reaproveitamento dos resíduos areias de fundição, não é o negócio das indústrias de asfalto, mas estas, devem estar preparadas para o seu aproveitamento, como matéria-prima secundária, substituindo as areias virgens presentemente utilizadas. O autor ainda salienta, que devam ser conhecidas as especificações de análises químicas, referindo-se principalmente, que os resíduos das areias de fundição devam ser isentos de metal, podendo ser tolerável de 1 a 1,5%, desde que não conduza a uma condição de lixiviação perigosa.

Ainda segundo Leidel (1993), se as indústrias de fundição fizerem todos os beneficiamentos dos seus resíduos areias de fundição, tornando possível de incorporação a massa asfáltica, e transportá-lo até as usinas de CBUQ, poderiam inclusive receber pelo sub-produto, mas, se as indústrias de asfalto fizerem o beneficiamento na sua planta de asfalto, as indústrias de fundição deveriam pagar uma taxa para o seu processamento, além da entrega grátis do material na planta do asfalto. Com isso, o benefício das indústrias de fundição seria visível, pois o custo de manutenção dos aterros industriais, e os riscos ambientais, seria certamente menor que o custo do pagamento para as indústrias de asfalto para sua utilização. Também, haveria uma diminuição nos custos de confecção dos asfaltos, já que a indústria destes, necessita de areias virgens, com granulometria semelhante aos dos resíduos de areias de fundição. O autor também salienta, que a indústria de fundição não é a única a procurar os produtores de asfalto, para estudar o reaproveitamento dos seus resíduos, também os produtores de resíduos plásticos, borrachas, etc, estão procurando estes produtores para viabilizar a incorporação dos seus resíduos nas massas asfálticas,

como forma de diminuição de custos, e redução dos riscos ambientais, já que necessitam se desfazer de tais resíduos.

A areias utilizadas nas fundições para moldar peças, são extraídas da natureza, e a extração destas areias, está ocasionando um impacto ambiental. Devido a isso, deve-se gerenciar os processos produtivos das fundições, de modo a extrair a menor quantidade possível da natureza, e fazendo-se as recuperações das áreas degradadas após a sua extração.

A figura 2.9 mostra um fluxograma do reaproveitamento dos resíduos areias de fundição, desde a sua prospecção, até a sua utilização dos resíduos nas massas asfálticas.

Conforme a figura 2.9, quando na possibilidade do reaproveitamento dos resíduos areias de fundição nos concretos betuminosos, deve-se analisar o resíduo. Quando este for classificado como classe I (perigoso), deve-se fazer a recuperação energética (ex: pirólise), para que este resíduo possa ser incorporado aos concretos betuminosos, sem afetar o meio ambiente. Se o mesmo for considerado classe II ou III, pode ser reaproveitado diretamente nas massas asfálticas.

A gestão dos resíduos de areias de fundição (R.A.F.), parte de um processo, onde as empresas de fundição devem agir de modo a frear a degradação ambiental, desenvolvendo novas técnicas de aproveitamento dos seus resíduos, a fim de melhorar as condições de vida da humanidade.

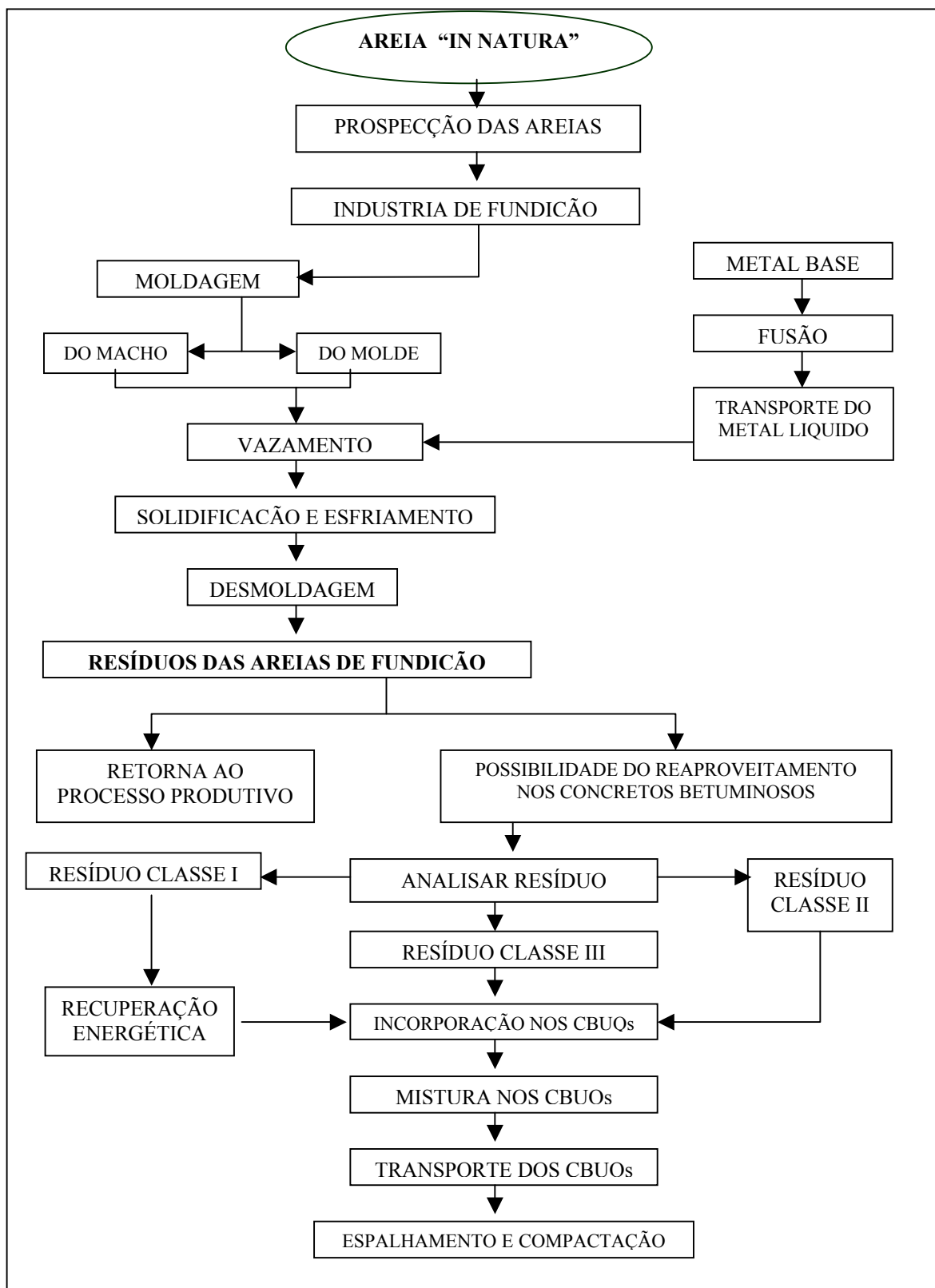
Nos processos produtivos das empresas de fundição, há necessidade de incorporação de areias novas, com isso, ocorre o descarte das areias já utilizadas na mesma proporção da inclusão das areias novas. Devido a isso, a reutilização externa dessas areias de fundição tornou-se a única alternativa viável para a eliminação de passivos ambientais.

Por isso, o estudo do reaproveitamento dos R. A .F. nos Concretos Betuminosos Usinados a Quente, é de fundamental importância para as empresas de fundição, pois além de deixarem de provocar a degradação ambiental, deixam de gastar altas somas em aterros sanitários, tornando-as mais competitivas no mercado.

A incorporação dos resíduos areias de fundição, é uma opção para o setor industrial das fundições, visando diminuir seus custos de deposição final (aterros industriais). Devido a inexistência de tecnologias para a reciclagem de 100% dos seus resíduos sólidos areias de fundição, as empresas de fundição estão partindo para novos estudos do seu reaproveitamento desses resíduos em outros produtos.

Conforme colocou Valle apud Tochetto (2000), quando da impossibilidade da completa eliminação da geração dos resíduos, e do reprocessamento dos seus resíduos transformando-se novamente em matérias-primas, o passo seguinte, é estudar a reutilização desses resíduos gerados pelas empresas como matérias primas para outras empresas, motivando com isso a realização deste estudo.

Este trabalho dá uma opção para o setor da fundição, para o reaproveitamento dos seus resíduos areias de fundição, nos concretos usinados misturados a quente, conforme será estudado no Capítulo 4, onde procura-se mostrar, através de ensaios, a possibilidade de sua incorporação nos CBUQs, sem afetar o dimensionamento estrutural do pavimento, e também sem afetar o meio ambiente, motivo primordial deste trabalho.



**FIGURA 2.9** – Fluxograma do Reaproveitamento dos R .A .F., nos CBUQs. (elaborado pelo autor).

### **CAPITULO 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Tendo em vista os objetivos propostos para este trabalho, os procedimentos experimentais foram organizados em etapas que visaram caracterizar o emprego do resíduo areia de fundição na composição de massa asfáltica em CBUQ. Para isso, torna-se necessário estabelecer um traço de asfalto, incorporando os resíduos areias de fundição, de modo que atenda as normas de dimensionamento dos pavimentos asfálticos bem como tenha um comportamento estrutural e ambiental compatível. Para tanto, foram realizados os seguintes ensaios de laboratório:

- a) Ambientais – Ensaios de Lixiviação e de Solubilização a partir de extrato obtido da massa bruta dos resíduos das areias de fundição, bem como do asfalto com resíduo incorporado.
- b) Estruturais – Dimensionamento do traço ideal com a incorporação do resíduo areias de fundição coletado, conforme preconiza as normas de pavimentos flexíveis, ensaios de fluência, granulometria, estabilidade, índice de vazios, relação betume-vazios (RBV), VAM, módulo de resiliência e resistência à tração.

Os procedimentos experimentais utilizados estão descritos a seguir.

### **3.1 – Caracterização do Resíduo Areia de Fundição**

#### **3.1.1 – Coleta das Amostras**

Das empresas geradoras do resíduo areia de fundição no município de Caxias do Sul, foi escolhida aquela que apresenta a maior geração para a coleta das amostras. Esta empresa tem uma produção de 1.200 toneladas/mês de peças em ferro fundido, consumindo 750 toneladas/mês de areia, gerando 450 toneladas/mês de resíduos areias de fundição.

Para a coleta das amostras, foram selecionadas duas linhas de produção da empresa: processo GV3 e processo Ecolotec. As amostras foram obtidas em tres locais: no ponto de estocagem localizado no final de cada uma das duas linhas de produção (processos GV3 e Ecolotec), e no ponto chamado “jato da granalha”, que é o lugar onde as peças são limpas, sendo a areia retida nas peças retirada, deixando-a pronta para a rebarbação.

No processo GV3 é utilizada a areia de fundição chamada areia sintética do tipo verde. A composição desta areia é basicamente areia de sílica (94 %), argila do tipo bentonita (5 %) e pó de carvão (1 %) como aditivo. A linha GV3 trabalha à base de compressão da areia sobre um modelo da peça metálica a ser reproduzida. Esta areia, após a etapa de desmoldagem é novamente inserida no processo de produção, com uma recuperação de aproximadamente 90 %. Os 10% restantes são liberados do processo, na forma de resíduo (RAF). Nesta linha são produzidos cerca de 90 moldes por hora de tampas para motores elétricos, turbinas, coletores, etc.



No processo Ecolotec/CO<sub>2</sub> a areia utilizada é do tipo aglomerada com resina (0,5 %) e cura a base de CO<sub>2</sub>. A resina utilizada é do tipo fenol-formol. Resalta-se que o percentual de resina é inferior a quantidade utilizada para a produção de machos, conhecido como ciclo de areia fenólica, neste caso a resina utilizada é superior a 3%. A areia misturada com a resina é colocada num molde da peça a ser reproduzida, no qual é injetado CO<sub>2</sub> para a cura da areia. Neste processo aproveita-se em torno de 40 % da areia utilizada, sendo o restante descartado como resíduo. Nesta linha são produzidos cerca de 80 moldes por hora, de carcaças de motores elétricos.

As coletas foram realizadas durante 11 dias, separados em duas semanas. As amostras de cada dia foram coletadas no final de cada linha de produção e no jato da granalha, onde os resíduos ficavam estocados em pilhas. A coleta foi realizada em diversos pontos da pilha, retirando-se sub-amostras do resíduo que foram colocados dentro de sacos plásticos de polipropileno etiquetados, conforme mostra a foto apresentada na Figura 3.1. Após, foram armazenados dentro de uma caixa de madeira totalmente vedada. As quantidades de resíduos coletadas em cada dia, nas três linhas de produção, estão apresentadas na Tabela 3.6. O procedimento de amostragem e preparo das amostras segue as exigências da norma NBR 10007 – Amostragem de Resíduos (ABNT, 1987).



**FIGURA 3.10** – Foto das amostras de resíduos obtidas no final dos 11 dias de coleta.

DATA	MASSA DE RESÍDUO (Kg)		
	LINHA GV 3	LINHA ECOLOTEC CO <sub>2</sub>	JATO DA GRANALHA
09/08/01	4,60	3,70	5,20
10/08/01	5,17	4,50	4,44
13/08/01	4,25	4,34	4,80
14/08/01	5,34	4,27	5,20
15/08/01	4,04	5,15	4,88
16/08/01	5,19	5,91	4,68
20/08/01	5,09	4,46	5,60
22/08/01	4,89	5,17	6,30
23/08/01	5,62	5,00	5,94
24/08/01	5,52	5,10	5,65
05/09/01	4,46	6,15	5,59
<b>TOTAL</b>	<b>54,17</b>	<b>53,75</b>	<b>58,28</b>

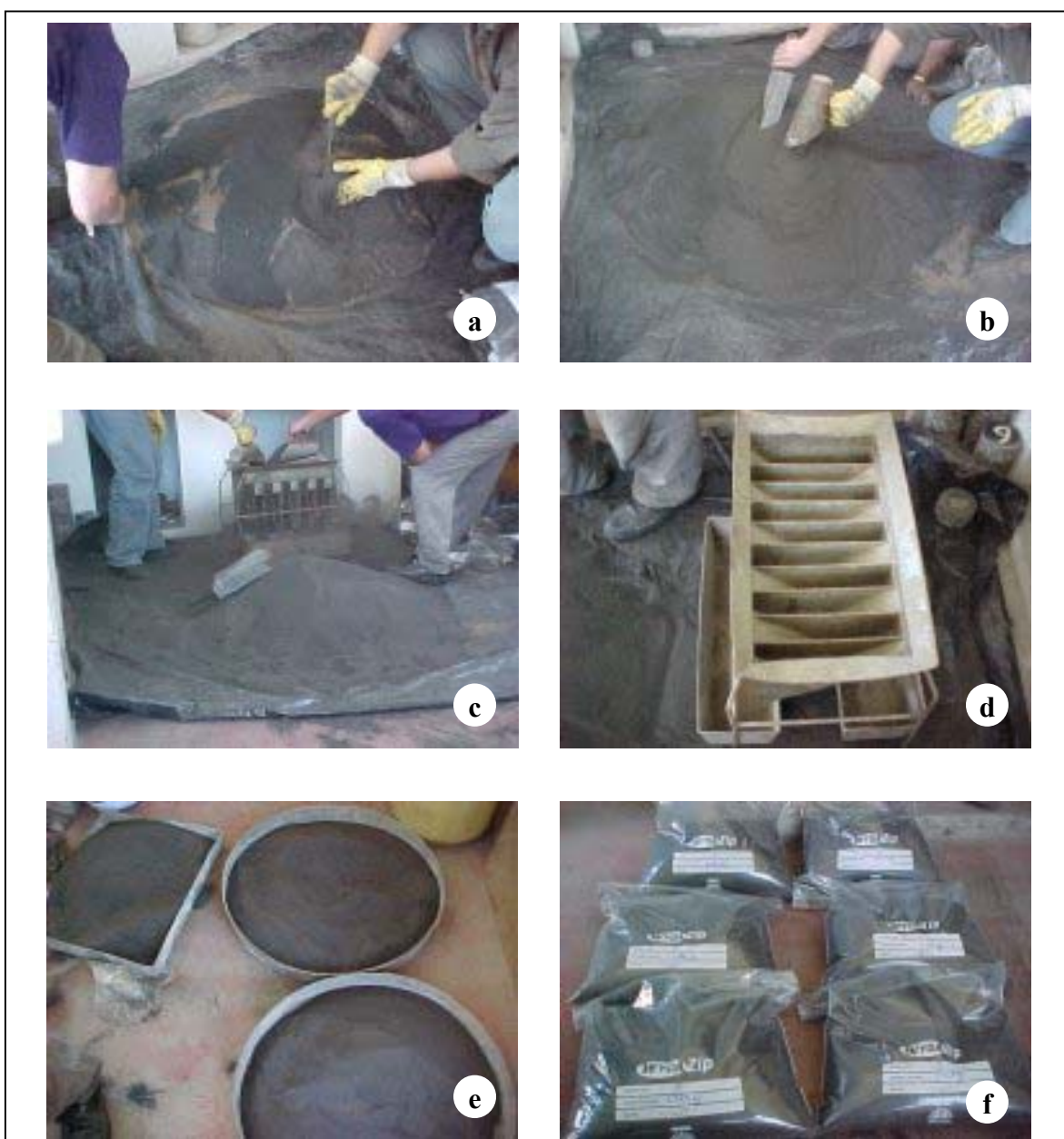
**TABELA 3. 6** – Massa de resíduo (kg) coletada por dia.

### 3.1.2 - Mistura e Preparo das Amostras

O preparo das amostras foi realizado conforme preconiza a especificação DAER EL 101/01 e a norma NBR 10007 (ABNT, 1987). A massa total de resíduos obtida em cada linha de produção e no jato da granalha (Tabela 3.6), foi misturada, e a partir do método de quarteamento, foram obtidas as amostras para serem utilizadas nos ensaios, como mostra a Figura 11 e como descrito a seguir:

- a) toda a amostra, totalizando 166,20 kg, foi misturada aleatoriamente. Os sacos que continham os RAF eram abertos e misturados, pegando-se aleatoriamente as datas e linhas coletadas;
- b) a partir da amostra bem misturada, usando-se pás, foram colocadas porções aleatórias da pilha de material misturado dentro de um quarteador com cinco separadores de cada lado;
- c) os RAF dos dois recipientes foram transferidos para outros dois recipientes em formato de bacias;
- d) os resíduos transferidos para as bacias, foram novamente misturados e, foi repetido o item b, restando duas amostras;
- e) Com o auxílio de uma pá de jardim, foram misturadas sete pás de cada amostra restante, e colocados dentro de um outro recipiente (bacia);
- f) desta última amostra, foram obtidas as 6 amostras para a realização da caracterização e demais ensaios que foram armazenadas em seis sacos plásticos contendo em média, 3 kg cada um;

- g) o material restante (resíduo da areia de fundição), que deu origem a esta última amostra, foi misturado e armazenado dentro de um saco plástico de polipropileno, para ficar de testemunho;
- h) a partir das amostras coletadas e armazenadas no item f, serão realizados os testes estruturais, físico químicos e ambientais, em cinco sub amostras.



**FIGURA 3.11** – Fotos da mistura e preparo das amostras pelo método de quartamento.

### 3.1.3 - Determinação do Teor de Umidade

O teor de umidade foi determinado utilizando-se em média 400 g. de cada uma das 5 amostras restantes, as quais foram pesadas em uma balança com sensibilidade de 0,5 g. As amostras, foram secadas em uma estufa elétrica retilínea de marca Fanem em um intervalo de 20 horas, com uma temperatura entre 105° C e 110° C, conforme determina a especificação DAER EL 002/99. O cálculo do teor de umidade foi realizado segundo a fórmula:

$$H = Pa/Ps \times 100 = ((Ph - Ps) / Ps) \times 100$$

Onde:

H = teor de umidade, em porcentagem;

Pa = peso de água, em gramas, que é calculado pela diferença, entre o peso da areia úmida e o peso da areia seca;

Ph = peso da areia úmida, em gramas

Ps = peso da areia seca pela estufa.

### 3.1.4 – Análise Granulométrica das amostras de RAF.

Após a determinação do teor de umidade, foram realizados os ensaios de análise granulométrica. A análise granulométrica foi realizada segundo a especificação DAER EL 102/01, que determina a granulometria por peneiramento para solos maiores que 0,074 mm (retido na peneira nº 200), seguindo também a especificação DAER EL 501/99, que se refere as peneiras de malhas quadradas para ensaios.

### 3.1.5 – Determinação do Teor de Sólidos Voláteis e Fixos

A partir das amostras secas foi determinado o teor de sólidos voláteis, segundo o método descrito no *Standart Methods for Examination of Water and Waste-Water (APHA)*. Esta análise foi realizada para as amostras dos resíduos das areias de fundição, e também para a massa asfáltica em CBUQ com o resíduo já incorporado. Esta análise foi realizada com o intuito de caracterizar o conteúdo das substâncias orgânicas voláteis presentes nas amostras.

### 3.1.6 – Classificação e Caracterização das Amostras – Avaliação Ambiental

Levando-se em conta os critérios que a Norma NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 1987), apresenta (ver fluxograma apresentado na Figura 2.4), os passos para a classificação do resíduo areia de fundição podem ser descritos como segue: resíduo de origem conhecida; não é resto de embalagem, não é produto ou sub-produto fora de especificação, não está na listagem 1 e 2, contêm substâncias da listagem 4 (fenol e formaldeído); análise de periculosidade (potencial de periculosidade em relação à toxicidade devido a possível presença de fenol); se constatada a toxicidade, é classe I caso contrário, realizar teste de solubilização com base na listagem 8, verificando-se se o resíduo é classe II ou III. Considerando o conhecimento prévio das linhas de produção que deram origem aos resíduos coletados como amostra, os mesmos não apresentam características de periculosidade para serem considerados Classe I – perigosos. A possível periculosidade, devido à toxicidade, é justificada pela utilização de resina fenólica no processo Ecolotec, a qual pode conter teores de fenol livre após o processo de cura, além de contaminantes

metálicos aderidos a areia após o processo de desmoldagem. Salienta-se que a porcentagem de resina utilizada neste processo é baixa (em torno de 0,5 %) e o teor de fenol livre é inferior a 0,06 % (informações fornecidas pelo fabricante).

A caracterização e a classificação do resíduo, segundo a norma em vigor no país, é importante no caso do presente estudo, pois busca-se evidenciar se existe algum risco do resíduo areia de fundição, que vai ser incorporado ao asfalto, que possa causar algum impacto nocivo à saúde e ao meio ambiente.

A seguir estão apresentadas as análises realizadas para a caracterização e classificação das amostras segundo a Norma 10004 – Classificação de resíduos.

### 3.1.7 – Análise Físico-Químicas Realizadas a Partir dos Extratos Solubilizado e Lixiviado

Para a caracterização das amostras, foram escolhidos os parâmetros apresentados na Tabela 3.7. Estes parâmetros foram definidos em função dos processos produtivos geradores conhecidos, e de análises prévias realizadas no resíduo. Observa-se pela Tabela 3.7, que estes parâmetros foram analisados a partir dos extratos obtidos pelos testes de lixiviação e solubilização.

O teste de lixiviação foi realizado segundo a norma NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos (ABNT, 1987), que tem por conceito, a operação de separar certas substâncias contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação. Para tanto foram utilizados 1600 ml de água destilada e 100 g de amostra úmida, respeitando a proporção de 16:1 exigida pela norma. Após iniciada a agitação da amostra, foi corrigido o pH para 5,0 mais ou menos 0,2, mediante a adição de ácido acético de 0,5 N, a primeira correção de pH foi executada após 15 min., a segunda após 30 min e a terceira após 60 min, contados a

partir do final de etapa anterior. Após a correção inicial do pH, a mistura foi agitada por um período de 24 horas. Terminada a agitação foi adicionada água deionizada, e foi feita a separação da fase líquida e sólida, conforme o procedimento descrito em item 4.3.3 da NBR 10.005. A solução obtida constitui-se no “lixiviado” no qual foi submetido a análise química para a verificação da periculosidade do resíduo. Para sua classificação foram comparados os dados obtidos com os dados constantes no anexo G da listagem nº 7 da NBR 10.004 – resíduos sólidos – classificação. Na Figura 3.12 são apresentadas fotos obtidas durante a execução deste.

O teste de solubilização foi realizado segundo a norma NBR 10006 – Solubilização de Resíduos (ABNT, 1987), utilizando-se 250 g de amostra seca e 1000 ml. de água destilada, agitando em velocidade baixa por 5 minutos, após o frasco foi tamponado e deixando descansando por 7 dias. Após os 7 dias, a solução foi filtrada com membrana de 0,45µm de porosidade. Para efeito de classificação de resíduo foram comparados os dados obtidos com aqueles contidos no anexo H – listagem nº8 da NBR 10.004.

A determinação dos parâmetros prescritados na tabela 3.7, foi segundo o método descrito no *Standart Methods for Examination of Water and Waste-Water (APHA)*. A determinação dos fenóis foram realizados conforme método 5530C, os metais conforme o método 3111B e a dureza conforme método 2340C.

Os testes foram realizados no Laboratório de Saneamento e as análises realizadas na Central Analítica da Universidade de Caxias do Sul.



ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	SOLUBILIZADO	LIXIVIADO
Fenol	X	0
Ferro	X	X
Zinco	X	0
Chumbo	X	X
Cádmio	X	0
Bário	X	X
Cobre	X	0
Dureza	X	0

**TABELA 3.7 – Análise físico-químicas realizadas para a caracterização do resíduo.**

OBS: X – Ensaio realizado

0 – Ensaio não realizado



**FIGURA 3.12 – Fotos da execução dos testes Físicos-químicos.**

### 3.2 – Projeto do Concreto Asfáltico Incorporando os R.A.F.

#### 3.2.1 – Requisitos de Projeto – Método Marshall

O projeto de concreto asfáltico com a incorporação dos resíduos areias de fundição, foi realizado pelo método *Marshall*, com diâmetro máximo do agregado de  $\frac{3}{4}$ ".

Para a incorporação dos RAF nas massas asfálticas, foi definido um critério que visou:

- 1) Estabelecer a quantidade ideal de resíduo a ser incorporado ao CBUQ;
- 2) Encontrar a granulometria adequada para a manutenção das características desejadas às massas asfálticas.

A granulometria dos resíduos areias de fundição, utilizada na execução do projeto do concreto asfáltico, foi a média das granulometrias das cinco amostras testadas.

Segundo as especificações DAER ES-P 16/91, a mistura asfáltica consiste em uma mistura de agregados, e cimento asfáltico, de maneira a satisfazer os seguintes requisitos:

- a) a mistura para concreto asfáltico deve ser projetada pelo método *Marshall*, pelo método do Estabilômetro ou por outro método definido pelo projetista;
- b) as misturas para concreto asfáltico não devem apresentar variações na granulometria maiores do que as especificações no projeto. O teor de cimento asfáltico, igualmente fornecido pelo projeto, poderá variar de até mais ou menos 0,3 %;

- c) quando ensaiada pelo Método *Marshall*, da resistência ao Fluxo Plástico das misturas betuminosas, ou pelo Estabilômetro, método de ensaio DAER nº 304, a mistura deve satisfazer os requisitos indicados tabela 3.8.

REQUISITOS DE PROJETO	TRÁFEGO PESADO		TRÁFEGO MÉDIO	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1 – Número de golpes em cada face do corpo de prova	75		50	
2 – Estabilidade (kgf)	800	–	500	–
3 – Fluência (1/100")	8	16	8	16
4 – Vazios de ar (%)				
Camada de rolamento	3	5	3	5
Camada de base	3	8	3	8
5 – Relação betume-vazios (%)				
Camada de rolamento	75	82	75	82
Camada de ligação, nivelamento e base	65	72	65	72

**TABELA 3.8** – Requisitos para Projeto “Marshall”. (DAER RS – Departamento Autônomo de Estrada de Rodagens do RS)

A mistura de agregados para o concreto asfáltico, segundo a especificação do DAER ES-P 16/91, deve satisfazer a uma das faixas granulométricas mostrada na tabela 3.9, e também estar de acordo com os requisitos de qualidade indicados no tabela 3.10.

USO		A	B
		ROLAMENTO	ROLAMENTO, LIGAÇÃO OU NIVELAMENTO
ESPESSURA APÓS COMPACTAÇÃO (cm)		mín. 2,5	mín. 4,0
PENEIRA	(Polegada) (milim.)	% QUE PASSA EM PESO	
3/4"	(19,10)	–	100
1/2"	(12,70)	100	80 – 100
3/8"	(9,52)	80 – 100	70 – 90
Nº 4	(4,76)	55 – 75	50 – 70
Nº8	(2,38)	35 – 50	35 – 50
Nº30	(0,59)	19 – 29	18 - 29
Nº50	(0,257)	13 – 23	13 - 23
Nº100	(0,249)	08 a 16	08 a 16
Nº200	(0,074)	04 a 10	04 a 10

**TABELA 3.9** – Limites da faixa granulométrica. (DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagens do RS)

ENSAIOS	MÉTODO DE ENSAIOS DAER Nº	REQUISITOS
Perda no ensaio de Abrasão	–	–
<i>Los Angeles</i> (após 500 rev.)	211	40% (máximo)
Perda no ensaio de sanidade	214	10% (máximo)
Equivalente de areia	217	50% )máximo)
Índice de Lamelaridade	231	50% (máxima)

**TABELA 3.10** – Requisitos de Qualidade para os Agregados. (DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagens do RS)

Para obtenção da dosagem dos constituintes do traço de asfalto foram utilizadas as curvas granulométricas de cada constituinte ( brita ¾", pó de pedra e R.A.F). A partir do

método das tentativas, ajustados por computador, foi encontrada a quantidade de cada constituinte que permitisse atingir a faixa granulométrica “tipo B” (tabela 3.9), de acordo com a especificação DAER ES-P 16/91 (DAER,1991) para a obtenção do traço a ser incorporado no asfalto.

### **3.3 - Projeto de CBUQ- Camada de Rolamento**

Os elementos de cálculo para dosagem do CBUQ incorporado com os RAF foram obtidos através da moldagem e rompimento de corpos de prova, utilizando-se o método *Marshall*. Após determinação da composição granulométrica da mistura (percentual de cada agregado), foram moldados 3 corpos de prova para cada teor de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 20). Para definir o traço ideal do CBUQ, foram analisados 3 corpos de prova, cada um com percentual de CAP 20 de : 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0% , totalizando 15 corpos de prova. A energia de compactação utilizada neste ensaio foi de 75 golpes por face, definidos na Tabela 3.8, e os resultados serão apresentados no Capítulo 4, Tabela 4.19, conforme requisitos Marshall.

### **3.4 – Avaliação Ambiental da Massa Asfáltica em CBUQ Incorporada de Resíduo Areia de Fundação**

Com o objetivo de avaliar o comportamento da massa asfáltica com o resíduo incorporado, submeteu-se o material retirado de um corpo de prova aos mesmos ensaios realizados para as amostras de resíduos, conforme descrito no item 3.1.7. A justificativa para a realização destes ensaios em corpos de prova, foi para verificar se nas condições

destes testes poderia haver liberação de contaminantes no resíduo para lixiviação. Segundo PUZINAUSKAS apud SANTANA, 1996, existe um filme de asfalto que envolve as partículas do agregado de uma massa asfáltica. Segundo os tecnologistas de asfaltos, essas espessuras variam de 10 a 100 microns. Deste modo, a lixiviação dos resíduos das areias de fundição para o meio ambiente, se houver, deverá causar pouco impacto ambiental, haja vista que o envólucro do filme asfáltico sobre os grãos de areia, a protege do contato com o meio ambiente.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

### 4.1 - Caracterização e Classificação do Resíduo

4.1.1 - Características Gerais do Resíduo: Granulometria, Teor de Sólidos Voláteis, Umidade e pH

Os resultados das análises granulométricas das cinco amostras analisadas com a respectiva média estão apresentados na Tabela 4.11.

PENEIRA Nº	% DA MASSA TOTAL DE RESÍDUO QUE PASSA PELA PENEIRA					
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Média
20	100	100	100	100	100	100
30	98,0	98,2	98,5	98,7	98,2	98,5
50	84,4	83,4	84,0	84,1	84,9	84,2
100	22,9	21,9	23,2	21,4	21,7	22,0
200	6,5	5,8	6,8	5,0	6,3	6,1

**TABELA 4.11** – Distribuição Granulometria das Amostras.

A Tabela 11, demonstra que praticamente não houve variação granulométrica nas cinco amostras de RAF ensaiadas, concentrando-se sua granulometria na peneira de malha 0,149mm (peneira 100). A granulometria dos RAF apresentadas na Tabela 4.11 é

muito semelhante às granulometrias apresentadas pelas areias que normalmente são utilizadas na composição do traço asfáltico, para atingir os limites granulométricos da faixa “B” da especificação DAER,1991.

Na Tabela 4.12, estão apresentados os dados obtidos para a umidade, sólidos voláteis e pH, das cinco amostras.

AMOSTRA	UMIDADE (%)	SÓLIDOS VOLÁTEIS (%)	pH*
1	1,01	1,02	10,3
2	0,76	0,95	10,2
3	0,76	0,91	10,1
4	0,76	0,84	10,1
5	1,01	0,83	10,3
<b>Média</b>	0,86	0,91	10,2

**TABELA 4.12** – Teor de Umidade, Sólidos Voláteis e pH das Amostras.

OBS: ( \* ) dados obtidos a partir do teste de lixiviação antes da correção do pH

Conforme demonstrado na tabela 4.12, as amostras dos resíduos areias de fundição, apresentaram um baixo teor de umidade (média inferior a 1%), apresentando-se desidratado. Isso se justifica devido ao fato de que a geração do resíduo, nos processos de vazamento, ocorre em altas temperaturas, além de, durante o seu manejo o mesmo não entrar em contato com nenhuma fonte de hidratação.



Também o teor de sólidos voláteis apresentaram valores baixos (média inferior a 1%), podendo ser justificado, pois a única fonte oxidável de carbono presente no resíduo é oriunda da resina fenólica, sendo muito baixa neste caso.

Os teores de pH das amostras sofreram pequenas alterações, ficando ao redor de 10,2.

#### 4.1.2 – Características Gerais do Resíduo: Lixiviação e Solubilização.

Na Tabela 4.13, estão apresentadas as concentrações de Ba, Fe e Pb, encontrados nos extratos das amostras de resíduos lixiviados.

AMOSTRAS							
Média	Amostra	Amostra	Amostra	Amostra	Amostra	List.7	
Amostras (mg/l)	1 (mg/l)	2 (mg/l)	3 (mg/l)	4 (mg/l)	5 (mg/l)	NBR 10004 (mg/l)	
<b>Ba</b>	0,13	0,13	0,16	0,13	0,12	0,12	100,00
<b>Fe</b>	22,7	14,30	25,20	15,10	29,30	29,60	N/existe
<b>Pb</b>	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	5,00

**TABELA 4.13** – Resultados Obtidos nos Testes de Lixiviação.

Conforme demonstrado na Tabela 4.13 as concentrações de Ba, Fe e Pb, encontradas nos ensaios de lixiviação das cinco amostras, foram inferiores as concentrações

preconizadas na listagem nº 7 da NBR 10004, demonstrado que tais resíduos não apresentam grau de toxicidade.

Os resultados das análises da solubilização das cinco amostras dos resíduos das areias de fundição e da massa asfáltica, estão representados na tabela 4.14.

AMOSTRAS							
	Média	Amostra	Amostra	Amostra	Amostra	Amostra	List. 8
	A (mg/l)	1 (mg/l)	2 (mg/l)	3 (mg/l)	4 (mg/l)	5 (mg/l)	NBR 10004
<b>Fenol</b>	15	9	10	14	16	26	0,001
<b>Ba</b>	0,13	0,08	0,11	0,13	0,20	0,12	1,00
<b>Cd</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
<b>Fe</b>	3,93	3,48	3,96	3,54	5,71	2,96	0,30
<b>Pb</b>	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05
<b>Cu</b>	0,32	0,33	0,32	0,33	0,30	0,33	1,00
<b>Zn</b>	0,13	0,15	0,11	0,11	0,16	0,10	5,00
<b>Dureza</b>	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	500,00

**TABELA 4.14** – Resultados Obtidos nos Testes de Solubilização.

Verifica-se na Tabela 4.14, que somente os teores de Fenol e Fe, ultrapassaram os limites máximos preconizados na listagem nº 8 da norma NBR 10004, classificando-os como resíduos Classe II – não inerte.

Fazendo-se uma análise comparativa das concentrações de ferro nos dois ensaios (tabelas 13 e 14) observa-se uma diferença importante de concentração deste elemento. Isto pode-se explicar pelo coeficiente de dissolução do Fé, em função do pH. O teste de lixiviação é realizado com pH levemente ácido, entorno de 5 mais ou menos 0,2, enquanto que no ensaio de solubilização é o pH de amostra/água, que no nosso caso ficou na ordem de 10,2.

## 4.2 – Dimensionamento do Traço em CBUQ, Incorporando os R.A.F. – Método

### Marshall

Para se atingir a faixa granulométrica “tipo B”, de acordo com a especificação DAER ES-P 16/91, a partir do método das tentativas ajustados por computador, chegou-se a seguinte composição granulométrica do traço de asfalto incorporado de resíduo:

Brita  $\frac{3}{4}$ ” – 32,0 %

Pó de pedra – 60,0 %

R.A.F. – 8,0 %

Segundo LEIDEL (1993) é possível adicionar nas massas asfálticas, aproximadamente 15% de resíduos areias de fundição. No presente trabalho, foi dimensionado um traço de massa asfáltica em CBUQ, incorporando 8% dos resíduos de areia de fundição, como apresentado anteriormente.

Após definida esta composição, foram realizados os testes para verificar se de fato a mistura atende aos requisitos necessários, segundo o método Marshall.

Os agregados empregados na composição do concreto asfáltico possuem as seguintes massas específicas: Brita  $\frac{3}{4}$ ” 2,709 kg/dm<sup>3</sup>, Pó de pedra 2,636 kg/dm<sup>3</sup>, RAF 2,751kg/dm<sup>3</sup>. As granulometrias dos materiais, a composição da mistura ( brita  $\frac{3}{4}$ ”- 32% ; pó de pedra – 60% e R.A.F. – 08%), assim como as distribuições granulométricas da mistura, estão representadas nas tabelas 4.15, 4.16 e 4.17, respectivamente. Pode-se observar que nas situações analisadas, a distribuição dos tamanhos dos agregados se enquadra dentro dos limites da faixa B – DAER, para os Concretos Usinados a Quente.

Os materiais empregados na composição do concreto asfáltico apresentaram um equivalente areia de 69% e uma absorção de 3%.

As misturas preparadas, foram submetidas a ensaios *Marshall*, cujos resultados estão apresentados na tabela 4.19, Nesta tabela mostra-se que, em cada teor de ligante (CAP 20), afeta o comportamento das misturas betuminosas avaliadas pelas características *Marshall*.

A tabela 4.15 apresenta as granulometrias dos materiais empregados na composição da massa asfáltica, (brita ¾", pó de pedra e dos R.A.F.).

<b>PENEIRA</b>	<b>mm</b>	<b>BRITA ¾"</b>	<b>PÓ DE PEDRA</b>	<b>RAF MÉDIO TAB.11</b>
<b>¾"</b>	<b>19,1</b>	100,0	100,0	100,0
<b>½"</b>	<b>12,7</b>	64,2	100,0	100,0
<b>⅜"</b>	<b>9,5</b>	31,6	100,0	100,0
<b>n 4</b>	<b>4,76</b>	3,5	87,2	100,0
<b>n 8</b>	<b>2,38</b>	1,6	57,7	100,0
<b>N 30</b>	<b>0,59</b>	1,3	25,9	98,5
<b>N 50</b>	<b>0,297</b>	0,8	18,1	84,2
<b>n 100</b>	<b>0,149</b>	0,6	12,7	22,0
<b>n 200</b>	<b>0,074</b>	0,3	9,7	6,1

**TABELA 4.15** – Granulometria dos Materiais

A tabela 4.16, apresenta a granulometria da mistura dos materiais a serem empregados na massa asfáltica, (32% brita ¾", 60% de pó de pedra e 8% de R.A.F.).

<b>% MISTURA</b>	<b>mm</b>	<b>32%</b>	<b>60%</b>	<b>8%</b>
<b>PENEIRA</b>		<b>BRITA ¾"</b>	<b>PÓ DE PEDRA</b>	<b>R.A . F.</b>
<b>¾"</b>	<b>19,1</b>	32,0	60,0	8,0
<b>½"</b>	<b>12,7</b>	20,5	60,0	8,0
<b>⅜"</b>	<b>9,5</b>	10,1	60,0	8,0
<b>N 4</b>	<b>4,76</b>	1,1	52,3	8,0
<b>N 8</b>	<b>2,38</b>	0,5	34,6	8,0
<b>N 30</b>	<b>0,59</b>	0,4	15,5	7,9
<b>N 50</b>	<b>0,297</b>	0,3	10,9	6,7
<b>n 100</b>	<b>0,149</b>	0,2	7,6	1,8
<b>n 200</b>	<b>0,074</b>	0,1	5,8	0,5

**TABELA 4.16 – Granulometria Da Mistura.**

<b>PENEIRA</b>	<b>mm</b>	<b>LIMITE</b>	<b>CENTRO FAIXA</b>	<b>FAIXA DE TRABALHO</b>		<b>MISTURA</b>
<b>¾"</b>	<b>19,1</b>	100	<b>100,0</b>	100,0	100,0	<b>100,0</b>
<b>½"</b>	<b>12,7</b>	80 – 100	<b>90,0</b>	82,5	94,5	<b>88,5</b>
<b>⅜"</b>	<b>9,5</b>	70 – 90	<b>80,0</b>	72,1	84,1	<b>78,1</b>
<b>N 4</b>	<b>4,76</b>	50 – 70	<b>60,0</b>	55,4	67,4	<b>61,4</b>
<b>N 8</b>	<b>2,38</b>	35 – 50	<b>42,5</b>	39,1	47,1	<b>43,1</b>
<b>N 30</b>	<b>0,59</b>	18 – 29	<b>23,5</b>	19,8	27,8	<b>23,8</b>
<b>N 50</b>	<b>0,297</b>	13 – 23	<b>18,0</b>	13,9	21,9	<b>17,9</b>
<b>N 100</b>	<b>0,149</b>	8 – 16	<b>12,0</b>	8,0	12,6	<b>9,6</b>
<b>N 200</b>	<b>0,074</b>	4 – 10	<b>7,0</b>	4,4	8,4	<b>6,4</b>

**TABELA 4.17 – Distribuição granulométrica limites da faixa “B” DAER-RS.**

A tabela 4.17, apresenta a faixa de trabalho dos materiais a serem empregados na massa asfáltica, para as camadas de rolamento, ligação ou nivelamento, conforme a faixa ‘B’ DAER-RS. A figura 4.13 apresenta o gráfico da distribuição granulométrica.

A Tabela 4.17 mostrou que a distribuição granulométrica da mistura incorporada com o RAF, atende a faixa de trabalho, conforme preconiza as Especificações DAER, faixa ‘B’.

A distribuição granulométrica da mistura, encontra-se dentro da faixa de trabalho, conforme demonstra a Figura 4.13.

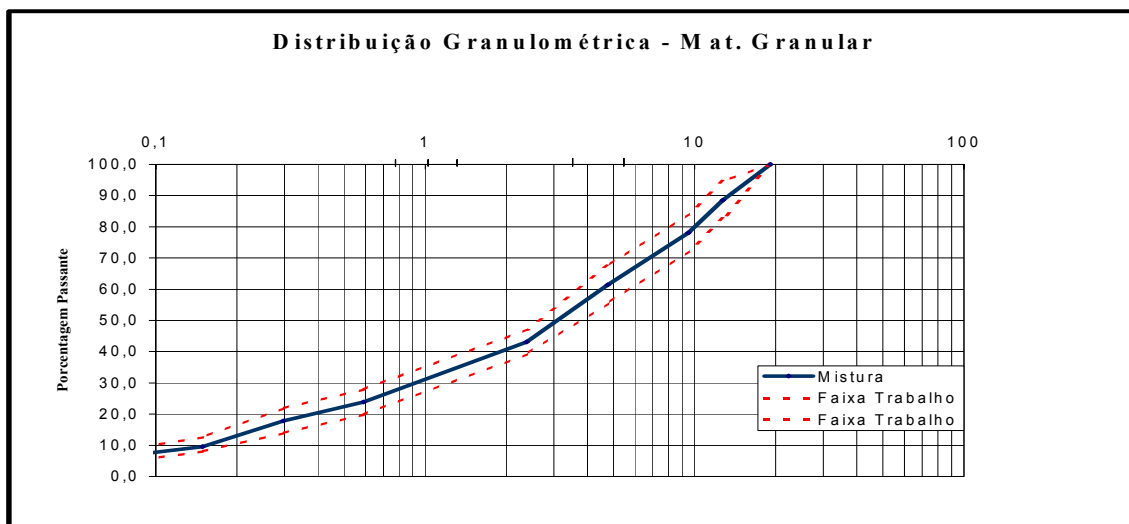


FIGURA 4.13 – Gráfico da Distribuição Granulométrica da Mistura.

A tabela 4.18 mostra os parâmetros Marshall para as misturas betuminosas, os valores das densidades real, aparente e efetiva da mistura ensaiada.

AGREGADOS					
FRAÇÃO	% RETIDA	D real (kg/dm <sup>3</sup> )	D apar. (kg/dm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	
3/4"- n° 10	60,00	2,739	2,526	3	
Pas n° 10	40,00	2,703	–	–	
<b>D<sub>real</sub> mistura:</b> 2,724 kg/dm <sup>3</sup>		<b>D<sub>ap</sub> mistura:</b> 2,594 kg/dm <sup>3</sup>		<b>D<sub>efet</sub> mistura:</b> 2,659 kg/dm <sup>3</sup>	<b>D CAP 20:</b> 1,02 kg/dm <sup>3</sup>

**TABELA 4.18** – Cálculo dos Parâmetros Marshall para as Misturas Betuminosas.

As misturas preparadas, foram submetidas a ensaios *Marshall*, cujos resultados estão apresentados na tabela 4.19, Nesta tabela mostra-se como cada teor de ligante (CAP 20), afeta o comportamento das misturas betuminosas avaliadas pelas características *Marshall*.

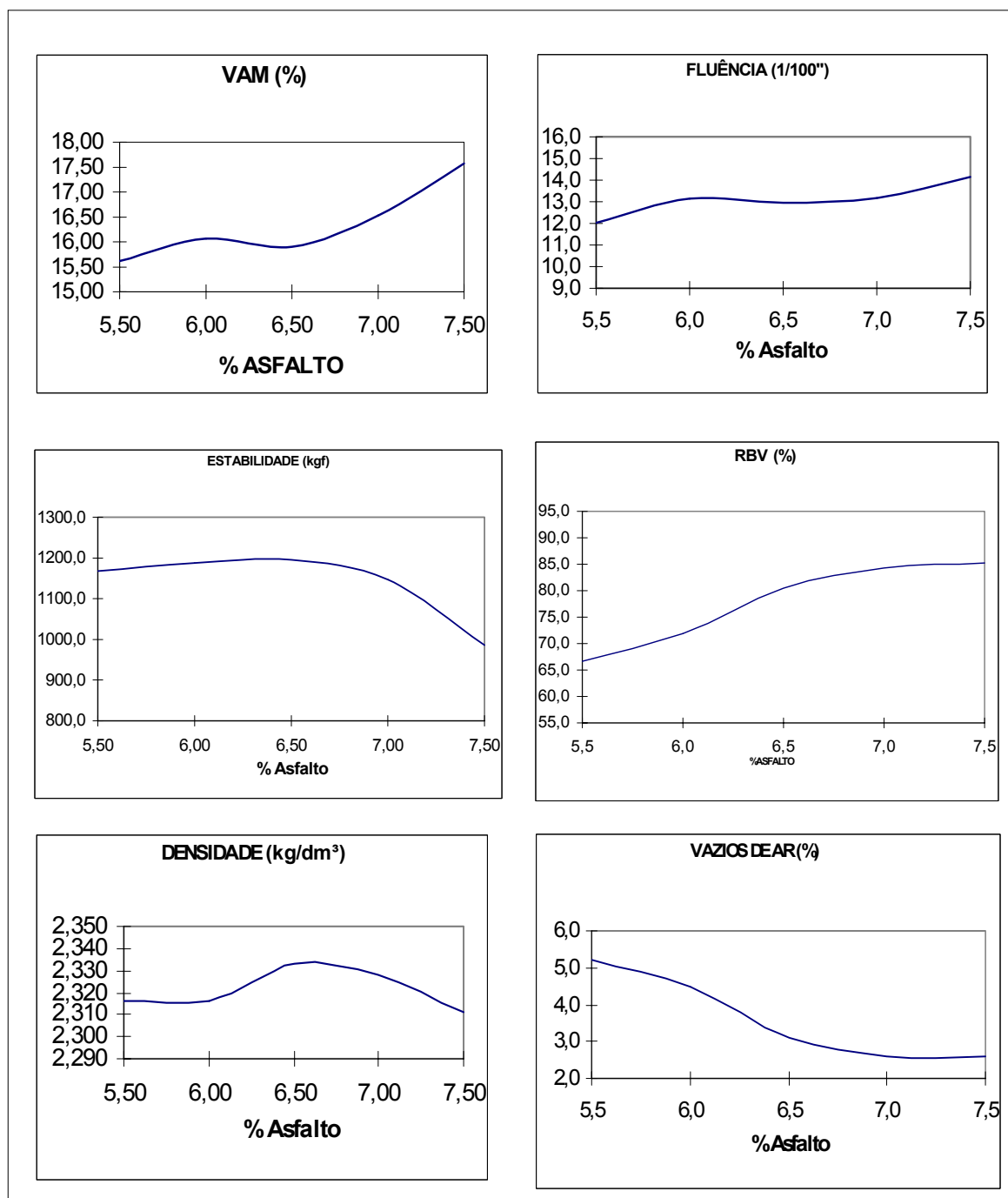
Na tabela 4.19, estão apresentados os resultados corrigidos da estabilidade, fluência, assim como a densidade, índice de vazios, VAM (Vazios de Agregado Mineral) e RBV (Relação Betume Vazios), para cada teor de CAP 20 analisado.

TEOR DE CAP 20 (%)	ESTABILIDADE (kgf)	FLUÊNCIA (1/100")	DENSIDADE (kg/dm <sup>3</sup> )	VAZIOS (%)	VAM (%)	RBV (%)
5,50	1168,0	12,0	2,316	5,2	15,62	66,7
6,00	1187,4	13,1	2,316	4,5	16,06	72,0
6,50	1195,6	13,0	2,333	3,1	15,90	80,5
7,00	1146,5	13,2	2,328	2,6	16,53	84,3
7,50	985,8	14,1	2,311	2,6	17,57	85,2

**TABELA 4.19** – Resultados Ensaio Marshall.

Na figura 4.14, é apresentado as curvas da estabilidade, fluência, densidade, vazios, VAM e RBV, para cada teor de asfalto -CAP 20 (5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5). A partir

destas curvas, será estudado o teor ideal de CAP 20 para o Concreto Betuminoso Usinado a Quente.



**FIGURA 4.14** – Curvas Para Estudo de Concreto Asfáltico.



Conforme demonstra a Figura 4.14, as curvas de estabilidade, fluência, densidade, vazios, VAM e RBV, atendem o que especifica os requisitos para projeto Marshall (Tabela 3.8), onde o valor mínimo para a estabilidade deve ser de 800 kgf, a fluência variando entre 8 e 16%, o índice de vazios entre 3 a 5 % e a relação Betume-Vazios entre 75 a 82 %.

#### 4.3 – Característica Marshall – Comparativo dos Resultados Obtidos.

A porcentagem ótima de asfalto, foi obtida considerando-se o índice de vazios de 4,0 % , conforme requeridos para a camada de rolamento, resultou em 6,2% de CAP 20, com uma tolerância de mais ou menos 0,3%. A densidade será de 97% da densidade de projeto conforme a ESP DAER 16/91. As características *Marshall* do traço, e o comparativo com as especificações DAER-RS, é mostrado na tabela 4.20.

CARACTERÍSTICA	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO DAER
<b>Massa espec. aparente</b>	2322 kg/dm <sup>3</sup>	97% (mínimo)
<b>Estabilidade</b>	1191,00 kg/dm <sup>3</sup>	800 kg/dm <sup>3</sup> (mínimo)
<b>Fluência</b>	13,0%	8 – 16 %
<b>Índice de Vazios</b>	4%	3 – 5 %
<b>RBV</b>	75,4	75 – 82
<b>VAM</b>	16,0	13 (mínimo)

**TABELA 4.20** – Características Marshall da massa asfáltica CBUQ usando RAF.

Conforme mostrado na tabela 4.20, todos os resultados obtidos satisfazem as especificações DAER. Com isso o traço asfáltico incorporado com os RAF satisfaz as características do método Marshall.

Os ensaios de Resiliência e Resistência à tração, foram realizados no laboratório de pavimentação da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para misturas betuminosas, o módulo de resiliência é determinado em ensaios dinâmicos de compressão diametral. Os resultados destes ensaios está demonstrado na tabela 4.21.

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>DIÂMETRO (cm)</b>	<b>ALTURA (cm)</b>	<b>MÓDULO DE RESILIÊNCIA (Mpa)</b>	<b>RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (Mpa)</b>
CAP 6,2 % nº 1	10,19	6,27	4.600	1,108
CAP 6,2 % nº 2	10,20	6,25	4.770	1,089

**TABELA 4.21** – Resultados dos ensaios de resiliência e resistência a tração.

Percebe-se que os resultados obtidos para os módulos de resiliência e resistência a tração, dos corpos de prova analisados com a incorporação dos RAF, estão dentro dos limites dos CBUQs, que segundo Ceratti, devem ficar entre 4.000 a 5.000 Mpa, para o módulo de resiliência, e entre 9,0 a 1,1 Mpa para a resistência a tração.

#### **4.4 - Avaliação Ambiental da Massa Asfáltica em CBUQ Incorporando Resíduo Areia de Fundação**

Conforme mencionado no item 3.4, uma amostra do material retirado de um corpo de prova foi submetido aos mesmos testes ambientais realizados para as amostras de resíduos, com o intuito de verificar a possível lixiviação de substâncias presentes no resíduo.

Em relação ao conteúdo de substâncias orgânicas, o resíduo areia de fundição apresenta baixos teores de sólidos voláteis, média inferior a 1 %, como mostrado na tabela 4.12. Desta forma, o resíduo apresenta baixas concentrações de substâncias orgânicas passíveis de lixiviação. O corpo de prova apresentou 8,0 % em média de sólidos voláteis. Isto se deve ao ligante asfáltico (CAP 20) que é volátil a altas temperaturas.

Os resultados obtidos para os testes de lixiviação e solubilização estão apresentados nas tabelas 4.22 e 4.23, respectivamente.

PARÂMETROS (mg/l)	AMOSTRAS		LIMITE MÁXIMO LISTAGEM 7 – NBR 10004
	R.A.F.	C.B.U.Q	
<b>Ba</b>	0,13	0,05	100,00
<b>Fe</b>	22,7	0,32	–
<b>Pb</b>	<0,05	<0,05	5,00

**TABELA 4.22** – Concentrações dos metais Ba, Fe, Pb obtidos no teste de lixiviação – comparação entre R.A.F. e C.B.U.Q.

Verifica-se nos testes de lixiviação, onde as concentrações médias do metal Fe, nos R.A.F. obtido foi de 22,7 mg/l, enquanto no material retirado do corpo de prova em CBUQ, foi de 0,32 , mais de 700% inferior ao do resíduo. Isso implica em dizer que os metais presentes nos RAF são pouco passíveis de lixiviação, quando adicionado às massas asfálticas CBUQ. Também verifica-se que comparativamente as concentrações de Ba,Fe e Pb nos RAF incorporados nos CBUQs, são significativamente menores que nos ensaios da massa bruta dos RAFs.

PARÂMETROS (mg/l)	AMOSTRAS		LIMITE MÁXIMO LISTAGEM 8 – NBR 10004
	R.A.F.	C.B.U.Q	
<b>Fenol</b>	15	0	0,01
<b>Ba</b>	0,13	<0,03	1,00
<b>Cd</b>	<0,01	<0,01	0,01
<b>Fe</b>	3,93	0,35	0,30
<b>Pb</b>	<0,05	<0,05	0,05
<b>Cu</b>	0,32	0,07	1,00
<b>Zn</b>	0,13	0,02	5,00
<b>Dureza</b>	80,0	65,00	500,00

**TABELA 4.23** – Concentrações médias dos metais Ba, Cd, Fe, Pb, Cu, Zn, dureza e fenol, obtidos nos teste de solubilização – Comparação entre R.A.F. e C.B.U.Q.

Conforme verifica-se na Tabelas 4.23, os resultados comparativos dos resíduos areias de fundição e do CBUQ com o resíduo incorporado, obtidos no ensaio de solubilização, são significativamente mais baixos na massa asfáltica em CBUQ, em comparação aos resíduos areias de fundição. Verifica-se também que nas massas asfálticas – CBUQ não foi detectado nenhuma quantidade de fenol. Estes resultados atestam a afirmação de (SANTANA,1996), de que todos os agregados são envolvidos por uma fina camada de material asfáltico.

Também verifica-se na Tabela 4.23, que a incorporação dos RAF nas massas asfálticas, as concentrações médias dos metais diminuíram sensivelmente, ficando abaixo do limite máximo preconizado pela listagem nº8 da NBR 10004, tornando uma opção viável sua incorporação aos CBUQs, diminuindo com isso a possibilidade de impacto ao meio ambiente, comparando-se com o resíduo natural lançado no ambiente.

### 4.3 - Considerações

Com os resultados apresentados anteriormente, a indústria de asfalto pode, sem restrições técnicas, incorporar os resíduos areias de fundição na produção de massas asfálticas e assim cooperar com a indústria da fundição, na busca da preservação ambiental. Isso não deve ser interpretado como um subsídio por parte das fundições, pois enquanto o custo é importante em qualquer indústria, a condição segura, sem impactos ambientais é igualmente alto. Por isso, a indústria da fundição poderia disponibilizar seus resíduos de areias de fundição no local onde será executada a massa asfáltica, a um custo inferior ao da areia virgem utilizada pela indústria de asfaltos.

A dificuldade da indústria de fundição em estocar seus resíduos em aterros industriais, cada vez mais restritos pelos órgãos ambientais, e distantes das empresas, e a necessidade de proteção ao meio ambiente, motivaram a realização deste estudo. A comprovação da utilização dos RAF nas massas asfálticas, conforme os resultados apresentados, contribuem significativamente com proteção ao meio ambiente.

Enquanto as tecnologias existentes não conseguem regenerar 100% das areias utilizados nos processos de fundições, a alternativa do uso dos RAF nas massas asfálticas, deve ser avaliado.

## **CAPITULO 5 - CONCLUSÕES**

### **5.1 – Conclusões**

Os resultados dos testes realizados no capítulo anterior, permitiu concluir sobre a viabilidade técnica da incorporação dos resíduos areias de fundição para a obtenção de Concreto Betuminoso Usinado a Quente, já que na sua incorporação aos CBUQs, diminuem sensivelmente as concentrações de metais pesados e fenóis.

Não obstante ao resultado satisfatório obtido, deve-se considerar que o reaproveitamento dos RAF, não deve ser visto como uma solução definitiva para o problema dos excedentes de areia. Corroborando o que diz Mariotto (2001), o ideal é que fossem desenvolvidos tecnologias que permitissem regenerar cem por cento das areias utilizadas nos processos de fundição, eliminando com isso a necessidade de extração de areia nova.

Contudo, os resultados ora apresentados, podem oferecer uma alternativa viável para minimizar os problemas de descarte dos RAF e reduzir o passivo ambiental ocasionado pelos mesmos às empresas de fundição.

Com isso, fica demonstrado o atingimento completo do objetivo geral do trabalho, quando dos resultados satisfatórios obtidos com que demonstraram a viabilidade técnica da incorporação de 8% dos RAF no traço de massa asfáltica em CBUQ.

Da mesma forma, o objetivo específico “identificar parâmetros críticos para o traço de uma massa asfáltica em CBUQ, incorporando areias de fundição que atendam as normas de dimensionamento dos pavimentos asfálticos flexíveis”, foi atingido no item

3.2.1, tabelas 3.8 e 3.9, quando dos requisitos para a incorporação dos resíduos de areia de fundição nas massas asfálticas, e do dimensionamento do traço asfáltico pelo método Marshall demonstrados na tabela 4.19.

O segundo objetivo “estabelecer elementos para avaliação do impacto ambiental do uso deste resíduo, para que não traga prejuízos ao meio ambiente, atendendo a legislação específica em vigor”, foi obtido com a realização de ensaios ambientais de lixiviação e solubilização.

O terceiro objetivo específico “determinar parâmetros de avaliação da eficiência dessa nova massa asfáltica, atendendo as variáveis estruturais e ambientais” foi obtido pela realização de ensaios ambientais e estruturais da massa asfáltica incorporada com o resíduo, conforme mostrado nas tabelas 4.13, 4.14 e 4.20, do capítulo 4.

Neste trabalho, demonstrou-se ainda, que a utilização dos resíduos areias de fundição como uma matéria-prima para as empresas de pavimentação asfáltica, pode ser considerado satisfatório, pois atende as especificações de dimensionamento estruturais, e legislação ambiental. O sucesso desta hipótese, fica claro a recomendação deste trabalho, de modo a estimular administradores e colaboradores para o alcance da eficiência econômica e prudência ecológica.

A importância do trabalho ora desenvolvido, pode ser avaliada pelas seguintes informações complementares:

Em um levantamento efetuado em três empresas do setor de pavimentação, nos anos de 1998, 1999 e 2000, as mesmas executaram na região serrana do Rio Grande do Sul, aproximadamente 30.000 m<sup>3</sup> de massa asfáltica, com uma produção média por ano de aproximadamente 10.000 m<sup>3</sup> de massa asfáltica (Toniolo Busnello S/A, Codeca e Coneresul).

Com este volume de produção, estas três empresas de pavimentação asfáltica poderiam estar reaproveitando aproximadamente 800 m<sup>3</sup>/ano de RAF, com a incorporação de 8% dos RAF, conforme demonstrado neste estudo.

De acordo com a FEPAM (1996), no estado do Rio Grande do Sul, há 59 empresas trabalhando no setor de fundição, gerando anualmente pouco mais de 3.800m<sup>3</sup> de resíduo de areia de fundição. Isso implica que somente as três empresas de pavimentação asfáltica da região serrana do estado, consumiriam 21% dos resíduos de areia de fundição geradas pelas empresas do setor de fundição em todo estado do RS.

Este levantamento indica que as empresas de fundição, junto com as empresas de pavimentos asfálticos, podem tratar regionalmente o reaproveitamento dos resíduos areias de fundição, formando cooperativas regionais de estocagem dos RAF diminuindo com isso os custos do transporte destes resíduos, viabilizando o seu aproveitamento junto às empresas de pavimentação asfáltica.

Com o aproveitamento dos resíduos areias de fundição por parte das empresas de pavimentação asfálticas, estas deixariam de prospectar em jazidas de areias virgens, na mesma proporção do reaproveitamento dos resíduos gerados pelas empresas de fundição, e incorporados no CBUQ. Os ganhos ambientais advindos desta iniciativa certamente seriam positivos.

## **5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros**

No decorrer deste estudo, percebeu-se algumas lacunas de conhecimento, que poderiam ser objetos de futuros trabalhos de pesquisa, são eles:



- Estudo de viabilidade técnica e econômica da incorporação do resíduo areias de fundição em pavimentos rígidos, já que sua composição necessita de agregado com granulometria semelhante a deste resíduo;
- Estudo visando desenvolver traço de concreto de baixo desempenho, de modo a utilizar os resíduos das areias de fundição em concretos com menor responsabilidade estrutural;
- Identificar método de preparação de amostras para avaliar se a longo prazo (envelhecimento do ligante, desgaste, possível reciclagem), há riscos da película do ligante desprender-se do agregado RAF, e haver liberação de fenóis e materiais pesados ao ambiente.
- Método de avaliação ao longo do tempo do uso do asfalto com resíduo incorporado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição. **Guia ABIFA de Fundição 2001**. Revista Fundição & Matérias-Primas, São Paulo, 2001.

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição. **Anuário Estatístico da Indústria Brasileira de Fundição**. São Paulo: MIC-CONSIDER/ABIFA/BNDES, 1985

ABNT NBR 10.004. **Resíduos Sólidos – Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p.33, 1987 a.

ABNT NBR 10.005. **Lixiviação de Resíduos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p.10, 1987 b.

ABNT NBR 10.006. **Solubilização de Resíduos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p.2, 1987 c.

ABNT NBR 10.007. **Amostragem de Resíduos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p.25, 1987 d.

BAPTISTA, C. N. **Pavimentação, Revestimentos, Pavimentos rígidos, Conservação dos Pavimentos**. 1.ed. São Paulo: Globo, 1975.

BELLO, C.V.V. **Zeri** : Uma proposta para o desenvolvimento sustentável, com enfoque na qualidade ambiental voltada ao setor indústria. Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – UFSC, Santa Catarina, 1998.

BRADASCHIA C. Apanhado histórico do desenvolvimento da fundição de metais e ligas não ferrosas : Sua importância atual no Brasil e no mundo. IN. **Curso de Fundição de ligas Não Ferrosas**. 3.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais – ABM, 1974.

BRADASCHIA C. Métodos usuais de se dar forma aos metais. Importância relativa da fundição : suas peculiaridades, vantagens e desvantagens. IN. **Curso de Fundição de ligas Não Ferrosas**. 3.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais – ABM, 1974.

BRADASCHIA C. Uma análise geral dos processos de moldagem e de sua aplicação às ligas consideradas. IN: **Curso de Fundição de ligas Não Ferrosas**. 3.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais – ABM, 1974.

BRANCO S. M. **Ecossistêmica** : Uma Abordagem Integrada dos Problemas do Meio Ambiente, São Paulo: Edgard Blucher, 1989, 141p.

CAMPOS FILHO, M. P. **Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1978.

CEMPRE. **Reciclagem atrai novos Empreendimentos**. <<http://www.cempre.org.br/destaca>> Acesso em: 07 jun. 2001.

CERATTI, J. A. **Mecânica dos pavimentos rodoviários flexíveis**. Curso de Extensão. Rio Grande do Sul : Editora da Universidade federal do Rio Grande do Sul, 1997.

CETESB. **Resíduos Sólidos Industriais**. São Paulo: CETESB/ACETESB, v.1, 1985, 182p. (Série Atas).

CHERMONT, L.S.; MOTTA, R.S. **Aspectos Econômicos da Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: Serviço Editorial, 1996, 26p

**Conferencia das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Rio de Janeiro, 1992. Agenda 21. Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 1996.

DA SILVA, J.R.G. **A ciência e a engenharia de materiais**. São Paulo, Ciência e Cultura, 1986.

DAER – Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens-RS. **Especificações Gerais**. Porto Alegre: Unidade de Normas e Pesquisas, 1991.

DAER – Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens-RS. **Especificações Gerais**. Porto Alegre: Unidade de Normas e Pesquisas, 2001.

DAER – Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens-RS. Unidade de Normas e Pesquisas. **Manual de Ensaios**. Porto Alegre, v.2, 2001.

DAER – Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens-RS. Unidade de Normas e Pesquisas. **Manual de Ensaios**. Porto Alegre: EDITORA, v.1, 2000.

FALCÃO, R. Reciclagem transforma lixo em dinheiro. **Diário de Pernambuco**, mai.1999. <<http://www.cempre.org.br/clipping/clipping>>. Acesso em: 07 jun. 2001.

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. **Diretrizes e Destinação de Resíduos**. <<http://www.feema.rj.gov.br/programa/residuos>>. Acesso em: 31 mai. 2001.

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. **Diretrizes de Implantação do Sistema de Manifesto de resíduos Industriais**. <<http://www.feema.rj.gov.br/programa/residuos>>. Acesso em: 31 mai. 2001.

FELIPPE, L.T.P. ; CASTRO, P.C.G.; **Concreto Asfáltico**: Separata do Boletim do DAER. Planus Artes Gráficas, 1970

FEPAM. **Diagnóstico Preliminar da Geração e Destinação Final dos Resíduos Industriais no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1996.

FINARDI, J. Técnica de fundição em casca. IN. **Curso de Fundição de ligas Não Ferrosas**. Associação Brasileira de Metais-ABM. 3.ed. São Paulo, aula n.16, 1974.

FURTADO, J.S. **Produção Limpa**.  
<<http://www.vanzolini.org.br/areas/desenvolvimento/produçãolimpa>>. 03 jun.2001.

FURTADO, J.S. **ISSO 14001 e Produção limpa** : importantes, porém, distintas em seus propósitos e métodos. <<http://www.vanzolini.org.br/pruduçãolimpa>>. Acesso em: 05 jun. 2001.

GANDOLLA, M. **Proposals for future optimizations of sanitary landfills for urban refuse**, Consorzio per l'eliminazione dei Rifiuti del Luganese (CER) Bioggio, Swiss, 1993.

GREENPEACE. **O que é Produção Limpa?** <<http://www.greenpeace.org.br>>. Acesso em: 05 jun. 2001.

KONDIC, V. **Princípios Metalúrgicos de Fundição**. São Paulo: Polígno, 1973.

LEIDEL, D.S. **Sand Reuse** : User Requirements, Modern Casting, Ontário, v.83, p.38-39, july. 1993.

LERIPIO, A.A. **GAIA** : Um método de Gerenciamento de Aspéctos e Impactos Ambientais. Florianópolis, 2001, 161p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). UFSC, 2001.

LO RÉ, V. Areias de Fundição: generalidades, classificação, técnicas de preparo, componentes. IN: **Fundição**. SIEGEL coord., Associação Brasileira de Metais-ABM. 10.ed., aula n.8, 1978.

LO RÉ, V. Equipamentos para o preparo e reconducionamento de areias de moldagem e para confecção de moldes e machos. IN: **Curso de Fundição de ligas Não Ferrosas**. Associação Brasileira de Metais. 3.ed. São Paulo, aula n.15, 1974.

MARIOTTO, L. C. **Regeneração de Areias de Fundição**. São Paulo: IPT, 2001.

MARIOTTO, L. C. Estudo das areias para confecção de moldes e machos; composições, propriedades, aplicações, métodos de ensaio, etc. IN. **Curso de Fundição de ligas Não Ferrosas**. Associação Brasileira de Metais. 3.ed. São Paulo, 1974.

MUNIZ, M. **Riqueza garimpada no lixo**. Estado de Minas, abr. 1999. <<http://www.cempre.org.br/clippin/clippin>>. Acesso em: 07 jun. 1999.

OGURTSOVA, J.; BIRMAN, S.; COELHO, V. **Concreto Asfáltico**. Boletim Técnico n.8. 2.ed. Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná, 1999.

RECUSANI FILHO, A. Estudo das operações de vazamento. Desmoldagem e rebarbação. Aula nº 24. IN: **Curso de Fundição de Ligas Não Ferrosas**. Associação Brasileira de Metais-ABM, 3.ed. São Paulo, 1974.

REGAN, R.W.; HEANEY, M.; DUNKELBERGER, J.A. **Weighing Sand Reuse Options From the Customer's Perspective**. *Modern Casting*, Pennsylvania, v.87, p.45-47, August. 1997.

ROHDE, L.; NUÑEZ, W.P.; CERATTI, J.A.P. **Utilização da escória de aciaria elétrica como material de pavimentação** : variação das características mecânicas em função da composição granulométrica. 33ª Reunião anual de Pavimentação. Florianópolis, 2001.

SANTANA, H. Análise crítica da ABNT TB-7/1953 : Terminologia e classificação de pavimentação – Tendo-se em vista as vias urbanas. IN: **Curso de Concreto Betuminoso Usinado a Quente**. Associação Brasileira de Pavimentação, 1996.

SANTANA, H. Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de filer em misturas asfálticas. IN: **Curso de Concreto Betuminoso Usinado a Quente**. Associação Brasileira de Pavimentação, 1996.

SANTANA, H. **Manual de Pré-Misturados a Frio**. Rio de Janeiro: IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo, 1993.

SANTANA, H. Instruções para a dosagem de Concretos Betuminosos Usinados a Quente. IN: **Curso de Concreto Betuminoso Usinado a Quente**. Associação Brasileira de Pavimentação, 1996.

SCHARF, R. Brasil terá linha de crédito para tecnologias limpas. **Gazeta Mercantil**. São Paulo, 02 jan. 2001.

SENAI – Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de Fundição Aglomeradas com Argila**. 2.ed. Belo Horizonte: SENAI, v. I, II, III, IV, 1987.

SIEGEL, M. Areias de fundição : Generalidades. Classificação. Técnicas de preparo. Componentes. Tintas e revestimentos. Ensaio e controles. Composição e aplicação de areias e tintas. IN: **Fundição**, SIEGEL Coord. 10.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais-ABM, aula n.8, 1987.

SIEGEL, M. Processo de moldagem de areia: Moldagem a verde, moldagem a seco em areia estufada, areia de macho, areia-cimento, etc. Peculiaridades do processo CO<sup>2</sup>. IN: **Fundição**, SIEGEL Coord. 10.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais-ABM, aula n.10, 1987.

SIEGEL, M. Processos de Fundição: Generalidades; Considerações gerais sobre a escolha do processo; Importância relativa dos diversos processos. IN: **Fundição**, SIEGEL coord. 10.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais-ABM, aula n.7, 1987.

TECHOBANOGLIOUS, G. ; THEISEN, H. ;ELIASSEN, R. **Sólid Wastes: Engineering Principles and Management Issues**. McGraw-Hill, inc., 621 p., 1977

TEIXEIRA, C.E. **Ensaio de tratabilidade de Resíduos Sólidos Industrial Areia Fenólica** : Isolamento, identificação e seleção de fungos filamentosos. Campinas-SP, 1993. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Universidade Estadual de Campinas, 1993.

TEIXEIRA, E.N. **Resíduos Sólidos: minimização e reaproveitamento energético**. Palestra. 31 ago. 2000.

TILCH, W.; HASSE, S. Interação entre as areias de macho e a areia do circuito. **Revista Fundação e Serviço**. mai. 1997.

TOCHETTO, M.R.L. **Resíduos Sólidos Industriais** : Gerenciamento e Destinação Final – Módulo 1. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental-Secção RS, 2000, 73p.