



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
**CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

**UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO PROVENIENTE DA SERRAGEM  
DE ROCHAS GRANÍTIICAS COMO FILER NO CONCRETO  
ASFÁLTICO USINADO A QUENTE**

**JOSELITO NOVAES DE SOUZA**

**CAMPINA GRANDE**

**ABRIL-2001**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**CAMPUS II – CAMPINA GRANDE**  
**ÁREA DE GEOTECNIA**

**UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO PROVENIENTE DA SERRAGEM DE  
ROCHAS GRANÍTIICAS COMO FILER NO CONCRETO ASFÁLTICO  
USINADO A QUENTE**

Por:

**JOSELITO NOVAES DE SOUZA**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba Campus II – Campina Grande-PB, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de ***MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL***

Campina Grande – Paraíba

Abril de 2001



**Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca – Campus II**

Souza, Joselito Novaes de

S 729u Utilização do Resíduo Proveniente da Serragem de Rochas Graníticas como Filler em Concretos Asfálticos Usinados a Quente / Joselito Novaes de Souza. – Campina Grande: UFPB, 2001.

108p. : il.

Dissertação (Mestrado). UFPB/CCT

Inclui bibliografia .

1. Resíduo – Serragem de Rochas Graníticas 2. Pavimentação 3. Meio Ambiente.

CDU: 628.54



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**CAMPUS II – CAMPINA GRANDE**  
**ÁREA DE GEOTECNIA**

**UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO PROVENIENTE DA SERRAGEM DE  
ROCHAS GRANÍTIICAS COMO FILER NO CONCRETO ASFÁLTICO  
USINADO A QUENTE**

Por:

**JOSELITO NOVAES DE SOUZA**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba Campus II – Campina Grande-PB, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**

Campina Grande – Paraíba

Abril de 2001

**JOSELITO NOVAES DE SOUZA**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba Campus II – Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de ***MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL***

Área de Concentração – Geotecnia

Prof. Doutor. John Kennedy Guedes Rodrigues  
Orientador

Campina Grande, abril de 2001

"É essencial que sejam propostas políticas e medidas integradas relativas ao resíduo, antes que se consuma os potenciais naturais existentes. Onde já existem esforços para reduzir a geração ou recuperação de materiais pela reciclagem ou reutilização, estas políticas devem apontar para para reforça-los e não inviabiliza-los. O fornecimento destas tecnologias ajudarão a reduzir o volume e o peso destes resíduos antes da deposição final

HARRISON, R. M. "Pollution: Causes, Effects and Control" (1996)

"O gerenciamento de resíduos representa um novo desafio para a proteção ambiental. Encontra-se neste, a necessidade de reconsiderar as propostas de planejamento para resolução de problemas ligados a este ao meio ambiente, com uma reutilização de tais rejeitos, de forma mais racional."

SMITH, L. G. "Impact Assessment and Sustainable Resource Management" (1993)

## FOLHA DE APROVAÇÃO

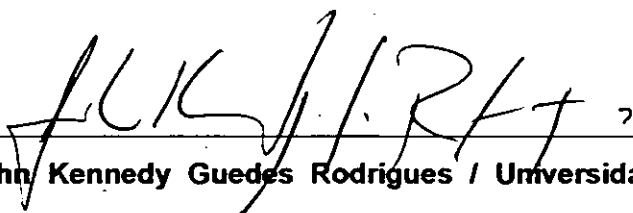
**Autor:** Joselito Novaes de Souza

**Título:** Utilização do Resíduo Proveniente da Serragem de Rochas Graníticas  
como Filer em Concretos Asfálticos Usinados a Quente

**Dissertação Defendida e Aprovada em:** 20 / 04 / 2001

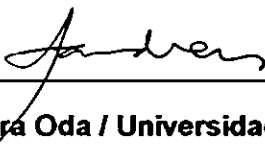
**Pela Banca Examinadora**

**(Assinatura):**



**Prof. Doutor John Kennedy Guedes Rodrigues / Universidade Federal da  
Paraíba - Campus II**

**(Assinatura):**

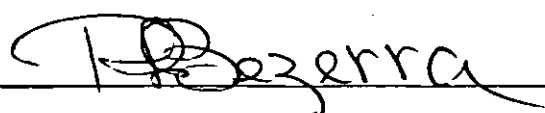


**Prof. Doutora Sandra Oda / Universidade Estadual de Maringá**

**(Assinatura):**



**Prof. Doutor José Afonso Gonçalves de Macêdo / Universidade Federal da  
Paraíba - Campus II**



**Coordenador da Área**

## DEDICATÓRIA

---

Ao meu pai, José de Souza

Minha mãe, Minervina Rosa Novaes



## **AGRADECIMENTOS**

---

Agradeço a Deus, por tomar possível a realização deste trabalho;

Aos orientadores Professor Adjunto Doutor John Kennedy Guedes Rodrigues e Mestre Edmar Brasileiro, pela orientação e direção de aprendizado;

Agradeço a minha segunda família Maria de Assunção, Jamilo Joanes, Tarso, Nilberto, Carlos Ramon, Atailson Sacramento, Alexandre Tadeu, Eilane e Ângela Miranda;

Expresso meus sinceros agradecimentos aos colegas de turma Robson Ferreira, Paula Gracinete, Jules Mouzalas e Nivaldo Mangureira, com os quais dividi momentos inesquecíveis;

Aos amigos, William de Paiva, José Moura, Alex e Euzébio;

Ao coordenador, Professor Doutor Raimundo Leidmar;

Ao Professor Adjunto Phd Olaf Andreas Bake, ao Engenheiro Jaconias e ao aluno de Iniciação Científica Pedro Nogueira PIBIC/CNPq/UFPB que muito ajudaram para obtenção dos resultados;

Aos professores do departamento pela base científica necessária para realização deste trabalho;

Ao apoio financeiro da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES;

A ATECEL – Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior;

Aos funcionários do Departamento, Maurizia, Rui e Nivaldo Sobreira, Marcos e seu Chiquinho;

Finalmente, agradeço a todos que contribuíram para realização deste trabalho.

# SUMÁRIO

---

SUMÁRIO.....	I
LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE TABELAS.....	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
CAPÍTULO 1	
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
CAPÍTULO 2	
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 PRODUÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	4
2.2 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E GEOLÓGICAS DO GRANITO.....	5
2.3 EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO DAS ROCHAS GRANÍTICAS.....	6
2.3.1 Extração dos Blocos do Granito.....	6
2.3.2 Desdobramento dos Blocos do Granito.....	6
2.4 O REJEITO GERADO NO DESDOBRAMENTO DOS BLOCOS DE GRANITO.....	9
2.5 MEIO AMBIENTE E O REJEITO DOS BLOCOS DE GRANITO.....	10
2.6 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DA SERRAGEM DO GRANITO.....	15
2.6.1 Caracterização Química.....	15
Caracterização Morfológica e Microestrutural.....	16
2.6.3 Caracterização Granulométrica.....	17
2.7 UTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAL ALTERNATIVO.....	17
2.8 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO.....	20
2.8.1 Classificação dos Cimentos Asfálticos.....	21
2.8.2 Equipamentos Utilizados para Caracterização e Classificação de Cimentos Asfálticos.....	27
2.8.2.1 Dynamic Shear Rheometer (DSR).....	27
2.8.2.2 Rotational Viscometer/Rheometer & "Thermosel".....	28
2.8.2.3 Rolling Thin Film Oven (RTFO).....	28
2.8.2.4 Pressure Aging Vessel (PAV).....	28
2.9 FILER.....	29
2.9.1 Uso da Cal Como Filer nos Concretos Asfálticos Usinados a Quente.....	33
2.9.2 Uso do Amianto como Filer no Concretos Asfálticos Usinados a Quente.....	34
2.10 O CONCRETO ASFÁLTICO.....	35
2.10.1 Método de Dosagem do Concreto Asfáltico com Resultados Obtidos no Ensaio Marshall.....	37
2.10.2 Fatores que Influem nos Resultados do Método Marshall.....	40

2.11	DEFEITOS NO CONCRETO ASFÁLTICO .....	45
2.11.1	Deformação Permanente .....	45
2.11.2	Parâmetros Influentes na Deformação Permanente .....	47
2.12	CONSIDERAÇÕES SOBRE A MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	50
2.12.1	Sistema de Dosagem de Concreto Asfáltico do Programa SHRP .....	52
<b>CAPÍTULO 3</b>		
3.	MÉTODO PARA O TESTE DE UMA HIPÓTESE .....	55
<b>CAPÍTULO 4</b>		
4.	MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS .....	57
4.1	MATERIAIS .....	57
4.1.1	Agregado Graúdo .....	57
4.1.2	Agregados Miúdos .....	57
4.1.3	Materiais de Enchimento (Fileres) .....	59
4.1.4	Cimento Asfáltico de Petróleo .....	60
4.2	MÉTODOS .....	61
4.2.1	Mistura dos Materiais .....	61
4.2.2	Experimento .....	63
4.2.2.1.	Fase 01 - "Projeto Piloto" .....	63
4.2.2.2.	Fase 02 - "Verificação do Comportamento Mecânico das Misturas Asfálticas" .....	63
4.2.2.3.	Fase 03 - "Variabilidade do Teor de Filer e seus Efeitos" .....	64
<b>CAPÍTULO 5</b>		
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	66
5.1	Fase 01 - "Projeto Piloto" .....	66
5.2	Fase 02 - "Verificação do Comportamento Mecânico das Misturas Asfálticas" .....	68
5.2.1	Massa Específica Aparente .....	68
5.2.2	Estabilidade Marshall .....	73
5.2.3	Fluência Marshall .....	77
5.2.4	Relação Betume - Vazios .....	81
5.2.5	Volume de Vazios .....	84
5.3	Fase 03 - "Variabilidade do Teor de Filer e seus Efeitos" .....	88
5.3.1	Massa Específica Aparente .....	89
5.3.2	Estabilidade Marshall .....	90
5.3.3	Fluência Marshall .....	91
5.3.4	Relação Betume - Vazios .....	92
5.3.5	Volume de Vazios .....	93
5.4	Combinação Granulométrica de um Projeto Estrutural Segundo Metodologia SUPERPAVE .....	97
<b>CAPÍTULO 6</b>		
6.	CONCLUSÕES .....	99
<b>CAPÍTULO 7</b>		
7.	SUGESTÕES .....	101
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>102</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>108</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TRANSFORMAÇÃO DO BLOCO EM PLACA UTILIZANDO MISTURA ABRASIVA .....	7
FIGURA 2 - TANQUE DE DEPOSIÇÃO FINAL DA EMPRESA POLYGRAM S. A. ....	10
FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÕES DOS TAMANHOS DOS GRÃOS DOS FILERES ESTUDADOS .....	60
FIGURA 4 - VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO MARSHALL, COM O TEOR DE CIMENTO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PARA OS FILERES CAL, CIMENTO E RESÍDUO.....	67
FIGURA 5 - VARIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER CAL EM FUNÇÃO DO TEOR DE ASFALTO.....	69
FIGURA 6 - VARIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER CIMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ASFALTO .....	69
FIGURA 7 - VARIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER RESÍDUO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ASFALTO .....	70
FIGURA 8 - TENDÊNCIAS DAS CURVAS DE AJUSTES PARA VARIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE "FILERES CAL, CIMENTO E RESÍDUO" .....	72
FIGURA 9 - VARIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER CAL .....	73
FIGURA 10 - VARIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER CIMENTO .....	74
FIGURA 11 - VARIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER RESÍDUO .....	74
FIGURA 12 - TENDÊNCIAS DAS CURVAS DE AJUSTES PARA VARIAÇÃO DA ESTABILIDADE "FILERES CAL, CIMENTO E RESÍDUO" .....	76
FIGURA 13 - VARIAÇÃO DA FLUÊNCIA DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER CAL .....	77
FIGURA 14 - VARIAÇÃO DA FLUÊNCIA DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER CIMENTO .....	78
FIGURA 15 - VARIAÇÃO DA FLUÊNCIA DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER RESÍDUO .....	78
FIGURA 16 - TENDÊNCIAS DAS CURVAS DE AJUSTES PARA VARIAÇÃO DA FLUÊNCIA "FILERES CAL, CIMENTO E RESÍDUO" .....	80
FIGURA 17 - VARIAÇÃO DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER CAL .....	81
FIGURA 18 - VARIAÇÃO DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER CIMENTO .....	82
FIGURA 19 - VARIAÇÃO DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER RESÍDUO .....	82
FIGURA 20 - TENDÊNCIAS DAS CURVAS DE AJUSTES PARA VARIAÇÃO DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS "FILERES CAL, CIMENTO E RESÍDUO" .....	84
FIGURA 21 - VARIAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER CAL .....	85
FIGURA 22 - VARIAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER CIMENTO .....	85
FIGURA 23 - VARIAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O FILER RESÍDUO .....	86
FIGURA 24 - TENDÊNCIAS DAS CURVAS DE AJUSTES PARA VARIAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS "FILERES CAL, CIMENTO E RESÍDUO" .....	88
FIGURA 25 - VARIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PARA OS TEORES 4%, 6% E 7% DO FILER RESÍDUO .....	89
FIGURA 26 - VARIAÇÃO DA ESTABILIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PARA OS TEORES 4%, 6% E 7% DO FILER RESÍDUO .....	90
FIGURA 27 - VARIAÇÃO DA FLUÊNCIA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PARA OS TEORES 4%, 6% E 7% DO FILER RESÍDUO .....	91
FIGURA 28 - VARIAÇÃO DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PARA OS TEORES 4%, 6% E 7% DO FILER RESÍDUO .....	92
FIGURA 29 - VARIAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PARA OS TEORES 4%, 6% E 7% DO FILER RESÍDUO .....	93
FIGURA 30 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (FASE 3) - METODOLOGIA SUPERPAVE.....	98

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DA POLPA.....	8
TABELA 2 - IMPACTOS DURANTE O BENEFICIAMENTO DAS ROCHAS DE GRANITO [FONTE: IBRAM (1992)].....	12
TABELA 3 - ESPECIFICAÇÕES SOBRE PORCENTAGENS DE GRÃOS QUE PASSAM DO FILER.....	33
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO.....	61
TABELA 5 - ENSAIOS EMPREGADA PARA A MISTURA ASFÁLTICA UTILIZADOS NA PESQUISA.....	62
TABELA 6 - ENSAIOS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E FILERES UTILIZADOS NA PESQUISA.....	62
TABELA 7 - DISTRIBUIÇÃO DOS TAMANHOS DOS GRÃOS DOS AGREGADOS, FILERES E LIMITES PERCENTUAIS DA FAIXA "C" DO DNER.....	62
TABELA 8 - VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA COM SUAS VARIABILIDADES "CAL".....	70
TABELA 9 - VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA COM SUAS VARIABILIDADES "CIMENTO".....	71
TABELA 10 - VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA COM SUAS VARIABILIDADES "RESÍDUO".....	71
TABELA 11 - VALORES MÉDIOS DE ESTABILIDADE COM SUAS VARIABILIDADES "CAL".....	75
TABELA 12 - VALORES MÉDIOS DE ESTABILIDADE COM SUAS VARIABILIDADES "CIMENTO".....	75
TABELA 13 - VALORES MÉDIOS DE ESTABILIDADE COM SUAS VARIABILIDADES "RESÍDUO".....	75
TABELA 14 - VALORES MÉDIOS DE FLUÊNCIA COM SUAS VARIABILIDADES "CAL".....	79
TABELA 15 - VALORES MÉDIOS DE FLUÊNCIA COM SUAS VARIABILIDADES "CIMENTO".....	79
TABELA 16 - VALORES MÉDIOS DE FLUÊNCIA COM SUAS VARIABILIDADES "RESÍDUO".....	79
TABELA 17 - VALORES MÉDIOS DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES "CAL".....	83
TABELA 18 - VALORES MÉDIOS DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES "CIMENTO".....	83
TABELA 19 - VALORES MÉDIOS DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES "RESÍDUO".....	83
TABELA 20 - VALORES MÉDIOS VOLUME DE VAZIOS DO COM SUAS VARIABILIDADES "CAL".....	86
TABELA 21 - VALORES MÉDIOS VOLUME VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES "CIMENTO".....	87
TABELA 22 - VALORES MÉDIOS VOLUME DE VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES "RESÍDUO".....	87
TABELA 23 - VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA COM SUAS VARIABILIDADES PARA TEOR DE 4% "RESÍDUO".....	94
TABELA 24 - VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA COM SUAS VARIABILIDADES PARA TEOR DE 6% "RESÍDUO".....	94
TABELA 25 - VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA COM SUAS VARIABILIDADES PARA TEOR DE 7% "RESÍDUO".....	94
TABELA 26 - VALORES MÉDIOS DE FLUÊNCIA COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 4% "RESÍDUO".....	94
TABELA 27 - VALORES MÉDIOS DE FLUÊNCIA COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 6% "RESÍDUO".....	94
TABELA 28 - VALORES MÉDIOS DE FLUÊNCIA COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 7% "RESÍDUO".....	95
TABELA 29 - VALORES MÉDIOS DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 4% "RESÍDUO".....	95
TABELA 30 - VALORES MÉDIOS DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 6% "RESÍDUO".....	95
TABELA 31 - VALORES MÉDIOS DA RELAÇÃO BETUME-VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 7% "RESÍDUO".....	95
TABELA 32 - VALORES MÉDIOS VOLUME VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 4% "RESÍDUO".....	95
TABELA 33 - VALORES MÉDIOS VOLUME DE VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 6% "RESÍDUO".....	96
TABELA 34 - VALORES MÉDIOS VOLUME DE VAZIOS COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 7% "RESÍDUO".....	96
TABELA 35 - VALORES MÉDIOS DA ESTABILIDADE MARSHALL COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 4% "RESÍDUO".....	96
TABELA 36 - VALORES MÉDIOS DA ESTABILIDADE MARSHALL COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 6% "RESÍDUO".....	96
TABELA 37 - VALORES MÉDIOS DA ESTABILIDADE MARSHALL COM SUAS VARIABILIDADES PARA O TEOR DE 7% "RESÍDUO".....	96

## RESUMO

---

SOUZA, JOSELITO NOVAES (2001). Utilização do Resíduo Proveniente da Serragem de Rochas Graníticas como Material de Enchimento em Concretos Asfálticos Usinados à Quente. Campina Grande, Paraíba, 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba.

O sistema produtivo explora os recursos naturais da terra, extraíndo-os e utilizando-os, visando a geração de produtos para o consumo. No contexto de tal realidade enquadram-se as indústrias de beneficiamento de mármore e granito que geram, a partir da serragem de blocos, uma pasta contendo granalha, cal, pó de granito e água, que, após o processo, é lançada ao meio ambiente em forma de resíduo, gerando problemas técnicos, ambientais e econômicos para as indústrias do setor. Estima-se, atualmente no Brasil, terceiro produtor de rochas ornamentais, uma produção de 45 milhões de toneladas com taxa de crescimento de 6% ao ano (Poligram S.A.). O volume total de resíduo, portanto, torna-se bastante significativo, quando se constata que, produzindo-se chapas de 2 cm de espessura, 20 a 25% do bloco é transformado em resíduo. Isto tem motivado representantes de várias indústrias do setor a procurarem um processo que o tome um produto utilizável e que não gere danos ao meio ambiente. Com base nos dados de caracterização do resíduo, características químicas, físicas e granulares, optou-se em verificar seu uso como material de enchimento, "filer", nos concretos asfálticos usinados à quente. Através de comparações de parâmetros obtidos a partir da realização de ensaios "Marshall" com materiais de uso corrente, cal e cimento Portland, pôde-se inferir que: a sua utilização, como filer, proporciona um comportamento mecânico satisfatório a mistura asfáltica, podendo ser usada como revestimento em pavimentos flexíveis sem que seja necessário um aumento no teor de cimento asfáltico.



## ABSTRACT

---

SOUZA, JOSELITO NOVAES (2001). Utilization of Residue From of Saw of Roaches Graníticas like Material of Filling in Concrete Asfálticos Usinados to the Hot. Campina Grande, Paraíba, 2001. Dissertation (Mestrado) – University Federal of Paraíba.

The productive system extracts and uses Earth's natural resources in order to yield consumption products. In this context, marble and granite processing industries generate a residue composed of granalha (small iron particles added to lubricant water, white wash, granite powder and water. This muddy residue has no use and is thrown away, generating technical, environmental and economic concerns. It is estimated that Brazil, third in the world ranking of the sector, produces annually 45,000,000 ton of the ornamental rocks, which increases in an annual rate of 6% (Poligram S.A.). The total residue volume becomes quite significant due to the fact that 20 at 25% of the block extracted from a quarry are reduced to power in the process of cutting it to 2 cm-thick sheets and surface sheet polishing. This than encouraged representatives of several quarry industries to seek a use to this residue, while at the same time reducing its negative environmental impacts. Based on granulometric, chemical and physical of this residue, its use as filler in hot mix asphalt concrete was studied. Marshall trial showed that the use of marble and granite power as filler, compared to two conventional filler material, white wash and portlan cement, provide satisfactory mechanical properties to the asphalt mixture, that can be used as top cover of flexible pavements without the necessity of increasing the agglutinating material level.

## CAPÍTULO 1

---

### 1.1 INTRODUÇÃO

Os países que dispõem de importantes recursos geológicos e onde a produção encontra-se em pleno desenvolvimento, entre eles o Brasil, enfrentam sérios problemas com os resíduos provenientes das indústrias de rochas ornamentais que contaminam diretamente os rios e o próprio solo, além da desfiguração da paisagem, o que vem preocupando as autoridades e a população.

O sistema de desdobramento de blocos de granito para a produção de chapas, gera uma quantidade significativa de rejeitos na forma de lama, sendo sua produção estimada na Paraíba de 3.000 toneladas com um crescimento de 6% ao ano (Polygram S. A.), com 20 a 25% dos blocos transformado em rejeito que é constituído de água, de granalha, de cal e de rocha moída, que após o processo são lançados no meio ambiente em forma de rejeito, ocupando espaços ao ar livre.

À medida que se processa a perda de umidade, o pó resultante se espalha, contaminando o ar, sendo alguns casos canalizada diretamente para os rios. Tal procedimento tem gerado sérios problemas às indústrias de rochas ornamentais com prejuízos ao meio ambiente.

Em um concreto asfáltico, ou melhor, em qualquer mistura asfáltica densa, o agregado graúdo tem os vazios preenchidos pelo agregado miúdo sendo necessária uma certa quantidade de pó mineral para preencher parte dos vazios. Ao qual dar-se na *língua inglesa* o nome genérico de "filler".

Se este pó é proveniente integralmente dos agregados graúdos e miúdos, tem-se o filer natural, que se não existir ou for insuficiente, obriga-se o uso de um filer artificial que admite certas tolerâncias na distribuição do tamanho de grãos, que varia de acordo com as diversas organizações de vários países.

A partir da década de 60, posterior aos estudos de *Ruiz e Puzinauskas*, descobriu-se que o filer além de preencher os vazios, apresentava a propriedade de aumentar a viscosidade do asfalto, dizia-se então que o filer ativava o asfalto, espaçando-o e incorporando-o. Esta atividade faz com que o "mástique" ou sistema filer-asfalto tenha maior viscosidade que o asfalto correspondente, este aumento cresce com a chamada concentração volumétrica do filer.

O uso de filer, neste vasto aspecto da evolução tecnológica, tem sido há muito relatado como parâmetro ligado à melhoria do comportamento das misturas asfálticas, largamente utilizadas como revestimento (camada de rolamento) nos pavimentos rodoviários, de vias urbanas, de aeroportos, de pátios e estacionamentos.

As principais influências no comportamento, quando incorporado o filer nas misturas asfálticas, se refletem, com base em inúmeros estudos e pesquisas sobre o assunto, nas seguintes características: na melhoria da adesividade entre ligante asfáltico e agregados; na redução da absorção da água; na redução das perdas de resistência (estabilidade e resistência a tração) após períodos de imersão prolongados;

na redução do envelhecimento das misturas, em decorrência da melhoria das características elásticas do ligante asfáltico; na redução dos efeitos da oxidação no cimento asfáltico; e na redução dos vazios (BUZATTI, 1999).

Os organismos rodoviários nacionais preconizam a utilização de filer (cal hidratada, pó calcário ou cimento) como um dos componentes básicos para os concretos asfálticos. Há alguns anos vem-se notando a gradual retirada do filer calcário nas misturas asfálticas e sua substituição por outro tipo de filer (pó de pedra) em virtude do elevado custo de produção do concreto asfáltico.

## **1.2 OBJETIVOS**

Aliado aos problemas ambientais causados pela deposição do rejeito no meio ambiente, algumas características específicas deste rejeito vislumbram potencialidades a sua utilização como material de enchimento em concretos asfálticos. Citam-se como exemplo sua fina granulometria, composição pré-definida (granito moído, cal ou substituto e granelha de ferro ou aço) e a inexistência de grãos mistos entre os três componentes básicos.

O presente trabalho tem como objetivo, um estudo sobre a utilização do rejeito com origem da serragem do granito, nos concretos asfálticos, como filer, em substituição aos produtos convencionais do tipo cimento Portland, cal e pó calcário, como formas de aproveitamento deste tipo de rejeito industrial e a redução do custo final dos concretos.

## **CAPÍTULO 2**

---

### **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica de tópicos relacionados à pesquisa. Inicialmente, são abordadas as características mineralógicas e geológicas do rejeito da serragem do granito e dos problemas causados ao meio ambiente pela sua deposição. Em seguida, é dada ênfase aos concretos asfálticos e seus constituintes, com destaque para o cimento asfáltico e o filler (materiais atualmente utilizados), suas propriedades, critérios de escolha, possível método de dosagem e do reaproveitamento do rejeito como material de enchimento em concreto asfáltico.

#### **2.1 PRODUÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

Os principais países produtores de rochas ornamentais são classificados em três grupos: Grupo A, países cuja produção encontra-se em redução: Suécia, Noruega, França, Alemanha, Bélgica e Suíça; Grupo B, países que dispõem de boas reservas, mas que encontram-se em dificuldades comerciais e ecológica para o seu desenvolvimento: Portugal, Japão, Grécia, Cuba, México e Estados Unidos; Grupo C, países que dispõem de importantes recursos geológicos e onde a produção se

encontra em pleno desenvolvimento: Espanha, Índia, Brasil, Finlândia e China. (VIDAL e STELLING, 1995).

Quanto ao mercado interno, a demanda de produtos acabados apresenta um forte potencial de expansão. Atualmente, a produção de rochas ornamentais no Brasil é estimada em 45 milhões de  $\text{t/ano}$  e vem apresentando um crescimento de 6% ano, ao longo dos últimos 5 anos (Fonte: Polygram S.A.). Os mármore representam cerca de 50% e os outros 50% são atribuídos aos granitos. Em termos regionais, aproximadamente 70% do território paraibano é formado por rochas graníticas, gnássicas, migmatíticas e quartizíticas do embasamento cristalino pré-cambriano (FARIAS, 1995).

Embora o Brasil disponha de condições geológicas e infra-estrutura que indicam um potencial de desenvolvimento de sua produção, participa somente com 2% das trocas internacionais de mármore e granitos (FARIAS, 1995).

## **2.2 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E GEOLÓGICAS DO GRANITO**

Do ponto de vista geológico, o granito é uma rocha leucocrática de origem ígnea, consolidada a partir de um magma resultante de diferenciação magmática em profundidade e, portanto, de granulação média a grosseira. Sua composição é ácida com teores de sílica maiores que 66% (geralmente em torno de 72%), e a sua mineralogia é definida pela predominância de feldspato potássico, oligoclássico subordinado, biotita acompanhado ou não por hornblenda ou moscovita.



Baseado nos teores relativos de alcali-feldspato e plagioclásio, dois tipos de granito podem ser reconhecidos: os alcali-granitos, com taxa de alcali-feldspatos: plagioclásio maior que 7:1; os granitos calco-alcalinos, com taxa que variam de 5:3 a 7:1.

Os granitos tem, geralmente, uma cor branca, rosa e cinza claro, sendo esta última a predominante. Se existir predominância de minerais ferromagnesianos, a cor se aproxima de cinza escuro ou esverdeado (FREIRE & MOTTA, 1995).

### **2.3 EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO DAS ROCHAS GRANÍTIAS**

O processo produtivo de rochas ornamentais, considerando os aspectos básicos e técnicos operacionais, da indústria de extração e beneficiamento, pode ser descrito a partir das seguintes etapas: extração e o desdobramento dos blocos de granito.

#### **2.3.1 Extração dos Blocos do Granito**

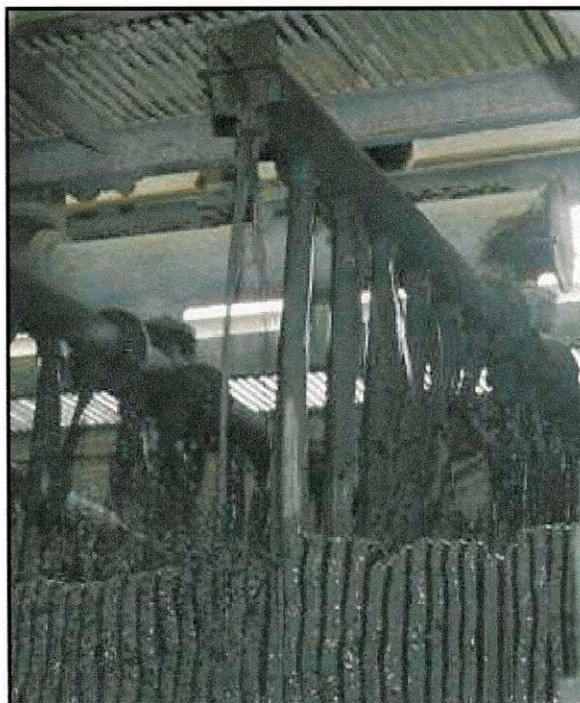
A extração do bloco do granito é feita preferencialmente a partir de matacões que possuem faces expostas, o que facilita os trabalhos de cortes.

#### **2.3.2 Desdobramento dos Blocos do Granito**

Após a extração, os blocos são transportados para as serrarias onde ocorre o desdobramento ou serragem, processo de transformação dos blocos em chapas ou placas semi-acabadas de espessuras que variam de 1 a 3 cm. São utilizadas máquinas denominadas de teares. Destacam-se as principais alternativas de obtenção de chapas: teares com misturas abrasivas; teares com lâminas diamantadas; discos

diamantados (talha-bloco). Os mais comuns são os teares que utilizam misturas abrasivas.

Nos teares com misturas abrasivas, o material abrasivo é o elemento essencial para o corte da rocha e ao mesmo tempo o mais complexo de todo o sistema. Ela é constituída, geralmente, de granalha de ferro, cálcio e detritos de serragem. Sua composição, em síntese, é descrita na Tabela 1. Utilizam-se ainda outros materiais como calcário moído, escória de alto forno, em substituição a cal. Sua distribuição é feita por chuveiros, sobre o bloco, através de bombeamento (Figura 1).



**Figura 1 - Transformação do Bloco em Placa Utilizando Mistura Abrasiva**

Os principais elementos constituintes da mistura abrasiva são: a água, que confere à mistura abrasiva a fluidez necessária para o seu escoamento; o pó de pedra (detritos), que é proveniente do processo de desagregação que o material sofre quando é cortado; a cal ou similar, que atua como elementos auxiliares na obtenção da viscosidade desejada e evita a oxidação da granalha de ferro fundido na mistura; e a granalha que é o principal elemento do processo de corte do bloco em teares convencionais, pois atua como desagregador de partículas. A quantidade de ferro presente é constituída por cerca de 75% de granalha e 25% de fragmentos da lâmina (PENA, 1998).

Além disso, a mistura abrasiva utilizada no tear tem, em paralelo, a função de cortar, lubrificar e resfriar as lâminas; evitar a oxidação das chapas; servir de veículo ao abrasivo (granalha) e limpar os canais entre as chapas. (STELLING, 1998).

**Tabela 1 - Composição dos Elementos Constituintes da Polpa**

		Concentração	
Densidade		1,5	2
Granalha e fragmentos da lâmina (ferro)	g/l	150	600
Cálcio ou Borra de Carbureto	g/l	10	50
Detritos	g/l	400	700
Água	g/l	500	700

## 2.4 O REJEITO GERADO NO DESDOBRAMENTO DOS BLOCOS DE GRANITO

O sistema de desdobramento dos blocos de granito para a produção de chapas, através dos teares, gera uma grande quantidade de rejeito em forma de lama. Durante a operação de corte dos blocos, a composição da mistura abrasiva nos teares passa por grandes variações em um curto espaço de tempo. Isto ocorre devido ao incremento de fragmento de rochas (pó), resíduos metálicos da granalha e das lâminas de corte (ROCHAS DE QUALIDADE, 1993).

Se tais fragmentos não forem removidos periodicamente, a mistura reunirá cada vez mais sólidos, aumentando consideravelmente sua viscosidade.

O controle da viscosidade é realizado acrescentando-se periodicamente água e descartando-se a parcela da mistura de menor granulometria, que é bombeada para um tanque onde é efetuada a separação da mistura de maior granulometria. Nos casos mais gerais, esta separação é feita por densidade, deixa-se o tanque ser preenchido completamente e separa-se a fração de menor granulometria que se posiciona na região superficial, de onde será descartada por transbordamento (ROCHAS DE QUALIDADE, 1993).

A partir deste descarte, o resíduo é transportado e, posteriormente, depositado em poços e lançados em tanques de deposição final (Figura 2). Estes tanques absorvem toda a geração de rejeito do desdobramento. Uma vez cessada esta capacidade, o volume depositado é removido para que o tanque fique novamente pronto para estocagem de nova quantidade de rejeito.



**Figura 2 - Tanque de Deposição Final da Empresa Polygram S. A.**

## **2.5 MEIO AMBIENTE E O REJEITO DOS BLOCOS DE GRANITO**

Entende-se por meio ambiente o espaço onde se desenvolve as atividades humanas e a vida dos animais e vegetais, envolvendo-se assim, todo o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas (SILVA, 1998). A poluição ou degradação ambiental define-se como qualquer alteração das qualidades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente que possam: a)prejudicar a saúde ou bem estar da população: b) criar situações adversas às atividades sociais e econômicas: c) ocasionar danos relativos à flora, fauna ou qualquer recurso natural: d) ocasionar danos relevantes aos acervos históricos, culturais e paisagísticos.

O termo meio ambiente inclui os aspectos sociais ligados ao ambiente natural e a interação com os ambientes construídos. Esta descrição abrange todos os componentes da Terra (solo, água e ar), a flora, a fauna, e as construções, rodovias, casas e outros empreendimentos.

A degradação do meio ambiente causada pela implantação e produção industrial, com corrente uso dos recursos naturais ou processos de industrialização, pode gerar impactos nocivos sobre a saúde e sobre as condições sócio-econômicas da população.

O setor de industrialização de granito precisa de um melhor gerenciamento e maior conscientização da responsabilidade com o respeito ao meio ambiente e à comunidade. É de fundamental importância a mudança de conceitos ultrapassados e a implantação de uma política que concilie o aproveitamento racional dos recursos naturais, com o desenvolvimento de novas tecnologias.

O intercâmbio Universidade – Indústria, representa assim, o desenvolvimento de novas tecnologias alternativas, para que uma atividade industrial desempenhe um menor comprometimento ao meio ambiente (IBRAM, 1992).

Os responsáveis pelas beneficiadoras ou indústrias de granito devem estar conscientes do papel relevante que deverão exercer nas áreas onde atuam, procurando reduzir os impactos causados na cadeia produtiva da geração de bens de consumo. Ressalta-se a importância da criação de entidades civis, com ou sem fins lucrativos, que atuem junto às empresas e instituições de ensino e pesquisa, tendo como finalidade viabilizar a geração de tecnologias para o desenvolvimento do reaproveitamento do resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais.

A necessidade de atender às exigências de manejo ambiental e do gerenciamento adequado dos resíduos sólidos gerados pelas mais diversas atividades industriais vem sendo imposta principalmente nas últimas duas décadas pelas leis ambientais, pelos movimentos ecológicos em todo mundo.



Como consequência dos processos de industrialização são gerados resíduos (sólidos, líquidos ou gasosos). Esses subprodutos, quando descarregados sem quaisquer cuidados, representam um risco em potencial à saúde pública e ao meio ambiente.

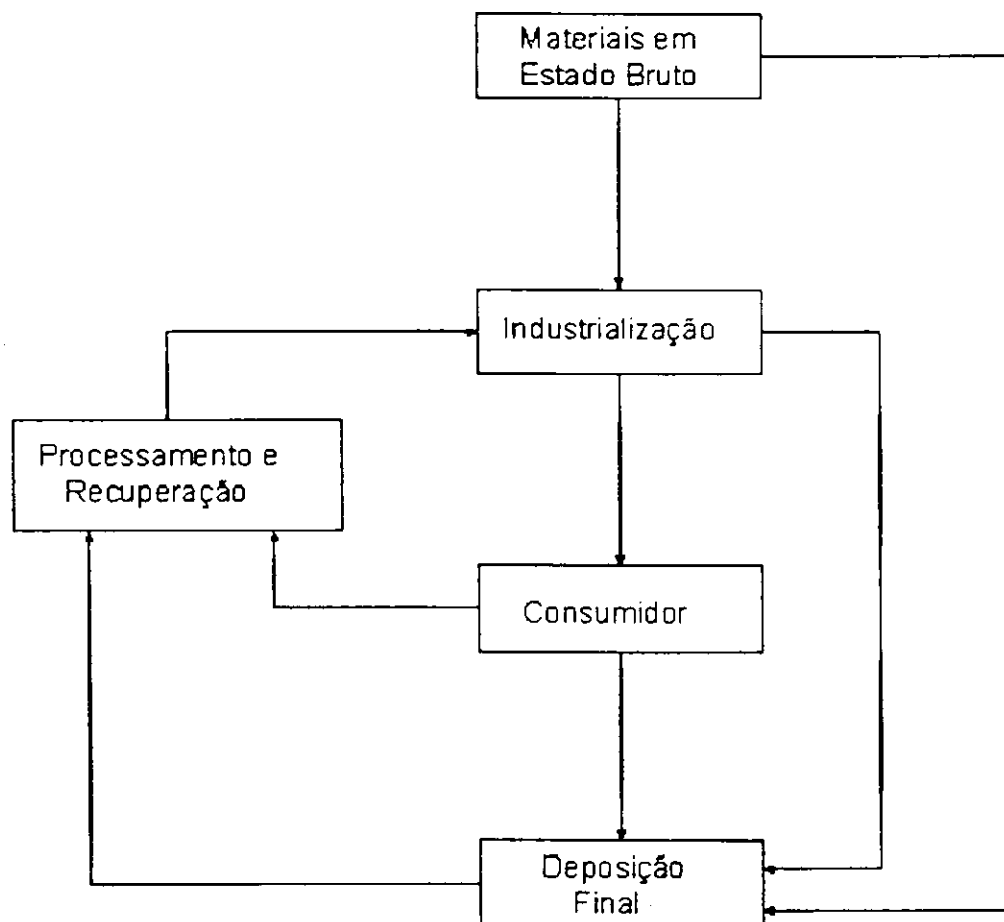
Do ponto de vista econômico, a geração desordenada e a deposição final sem critérios para proteger o meio ambiente podem ser identificados como fontes de desperdício de insumos e de matérias primas. Sob condições adequadas, estes materiais podem ser reaproveitados, diminuindo assim o consumo dos recursos naturais e a necessidade de tratamento, armazenamento ou eliminação dos rejeitos, tendo-se como consequência, a redução dos riscos gerados.

Nas regiões onde se processam estas rochas graníticas, os rejeitos provenientes das indústrias podem ser responsáveis pela contaminação direta dos rios ou do próprio solo, além de serem responsáveis pela desfiguração da paisagem, o que vem preocupando as autoridades e a população (Tabela 2).

**Tabela 2 - Impactos Durante o Beneficiamento das Rochas de Granito**  
[Fonte: IBRAM (1992)].

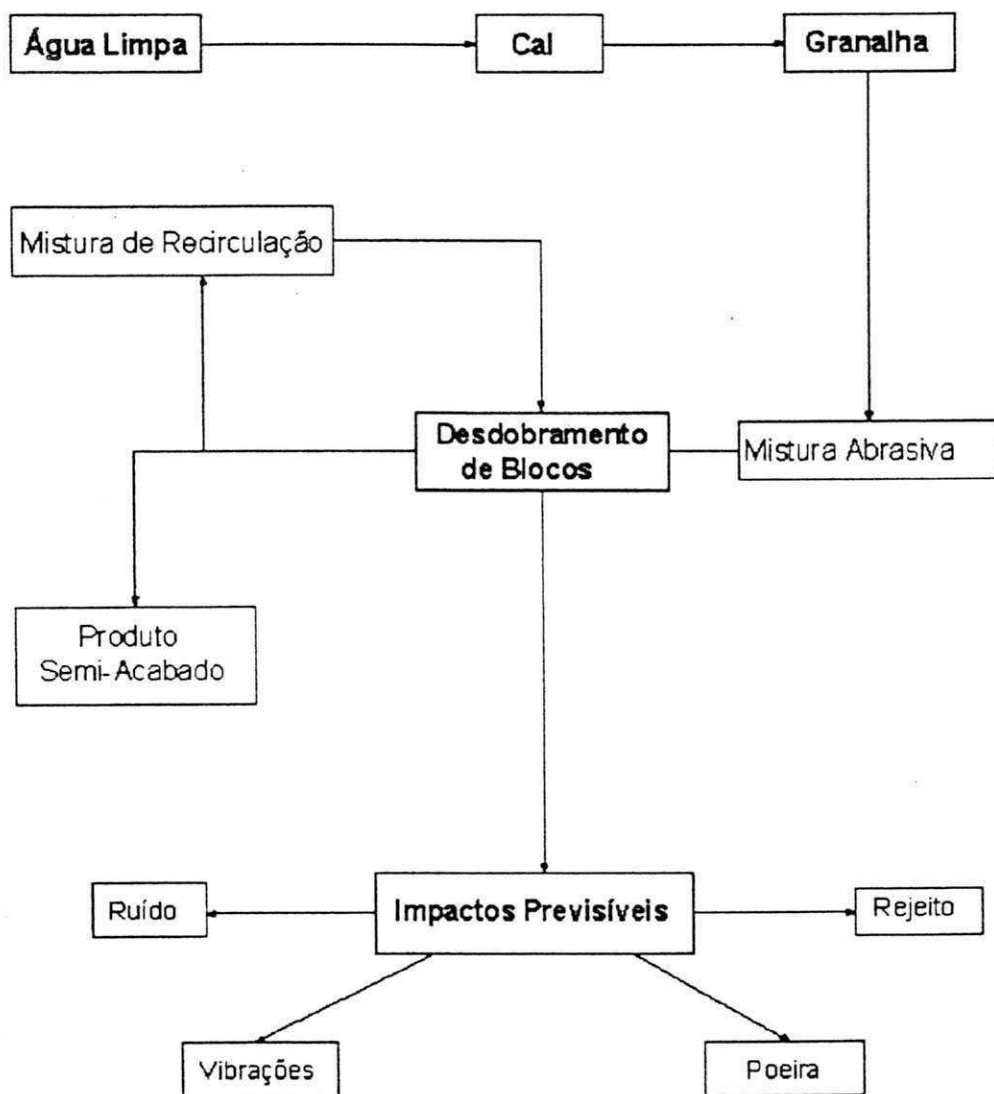
Tipo	Causas do Impacto	Parâmetro Gerador
Serragem do Bloco	Lançamento do rejeito sob a forma de polpa em tanques de deposição ou nos cursos d'água	Incremento de turbidez e sólidos sedimentáveis. Pode ocorrer solubilização de metais pelo tempo de contato com a água
Polimento e Corte	Lançamento do rejeito sob a forma de polpa em tanques de deposição ou nos cursos d'água podendo conter insumos químicos incorporados	Incremento de turbidez e sólidos sedimentáveis. Pode ocorrer presença de substâncias orgânicas

O Fluxograma 01 indica o uso de materiais em um sistema econômico e as possibilidades de seu reaproveitamento, desde que sejam observados critérios sanitários e ambientais. A confecção de materiais alternativos, tendo-se como constituintes os rejeitos gerados nas indústrias de transformação de rochas, poderá promover o aparecimento de novas oportunidades de trabalho e renda, imprescindíveis ao processo de desenvolvimento. O aproveitamento de rejeitos deve ser encarado como atividade complementar, que poderá, inclusive, contribuir para a redução de custos finais, a partir da adição de algum valor ao resíduo.



**Fluxograma 1- Uso de Materiais em um Sistema Econômico e as Possibilidades de seu Reaproveitamento [Fonte: MOLLER e BARROS (1995)].**

O Fluxograma 2, descreve o esquema da origem na serragem de blocos de rochas ornamentais.



Fluxograma 2 – Origem da Serragem de Blocos de Granito.  
[Fonte: GIUNTON (1993)]

## **2.6 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DA SERRAGEM DO GRANITO**

Baseado nos estudos de SILVA (1998) destaca-se a caracterização do resíduo, quantos aos aspectos químico e físico (morfológico e granulométrico). Para tanto, o autor fez análises das amostras coletadas de diferentes teares, localizados na região sul do estado do Espírito Santo, sendo proveniente da serragem de diferentes rochas graníticas.

### **2.6.1 Caracterização Química**

Segundo SILVA (1998), a composição das diferentes amostras dos resíduos gerados na transformação dos blocos de rochas individuais apresentam pequenas variações que podem ser consideradas não representativas. E o tipo de rocha granítica que será cortada não proporcionará alterações significativas na composição do resíduo final a ser utilizado.

A partir da caracterização química realizada em diferentes amostras, foi feita uma análise da variabilidade dos resultados e notou-se que, embora as amostras sejam de composições químicas diferentes, os valores médios obtidos correspondem a uma possível aproximação da composição química resultante do resíduo gerado. A partir da estatística (média, desvio padrão e variância) concluiu-se que a variabilidade da composição química do resíduo em relação a rocha não é significativa.

### 2.6.2 Caracterização Morfológica e Microestrutural

Os ensaios realizados por SILVA (1998) visaram caracterizar a morfologia, dimensão e os constituintes químicos das amostras, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) e micro-análise quantitativa (EDX), e identificar os componentes mineralógicos, através da difração de raio-X. Segundo demonstram as análises, as amostras possuem basicamente três fases distintas: branca, cinza claro e cinza escuro.

A fase branca é caracterizada pela presença do elemento ferro (93%) e por outros elementos Si (5%), Ca e Al em menor quantidade. Esta fase constitui a fração metálica do resíduo. A fase cinza claro é caracterizada como sendo constituída de outros componentes da mistura abrasiva [cal e resíduo da própria rocha, Si (40%)]. A fase cinza escuro é caracterizada pela presença de elementos da própria rocha granítica.

A fase branca é constituída de partículas de morfologia irregular e superfícies arredondadas e as demais fases possuem morfologia regular e cantos arredondados. O resíduo apresenta 71,65% de materiais pulverulentos (partículas menores que 0,075mm) e 0,3mm como dimensão máxima característica. A partir da análise dos espectogramas, os componentes mineralógicos encontrados com predominância são: quartzo, feldspatos e minerais do grupo das micas (SILVA, 1998).

### 2.6.3 Caracterização Granulométrica

Os ensaios foram realizada por via úmida em amostra do resíduo e, posteriormente, secas em estufas, as partículas metálicas foram separadas, observou-se que as distribuições das frações que se referem as partes metálicas e não-metálicas apresenta: 71,65% de materiais com dimensões inferiores a 0,075mm e a fração não-metálica com 76,99% e a fração metálica com 39,65%.

O resíduo apresenta 0,16 de módulo de finura, enquanto a fração não-metálica apresenta 0,12 e a fração metálica 0,4. A dimensão máxima característica do resíduo e da fração não-metálica é de 0,3mm, enquanto que, a fração metálica apresenta 0,60mm.

## 2.7 UTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAL ALTERNATIVO

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

SILVA (1994) realizou estudos visando uma possível utilização de escória de aciaria misturadas com solo argiloso (A-7-6) para emprego em obras de pavimentação e constatou que a mistura pode ser utilizada em camadas do pavimento.



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

BODI et al. (1995) estudaram a utilização de entulho de construção civil na pavimentação com a finalidade de estabilização de solos. SILVA (1998) fez uma abordagem sobre o potencial de aproveitamento do resíduo de serragem de blocos de granito das indústrias do Espírito Santo para aplicação em argamassas de assentamento e tijolos solo-cimento, cujos resultados mostraram que são potencialmente utilizáveis na produção dos elementos de construção.

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

O trabalho desenvolvido por SOBRINHO (1998) apud SILVA (1998) evidencia a possibilidade de utilização dos rejeitos provenientes do processamento de granitos e mármores na produção de argamassas alternativas para o uso na construção civil.

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

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

Os Departamentos de Engenharia Civil, Materiais e Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba vem desenvolvendo pesquisas desde 1997 com o rejeito da serragem de blocos de granito nas áreas: agrícola como corretivo de solo; na área de construção civil como argamassa, tijolos maciços sem queima, elementos de alvenaria e revestimentos cerâmicos com queima; na área rodoviária, recentemente, na melhoria de solos para aplicação em revestimentos primários e material de enchimento em concretos asfálticos. Os resultados são promissores, com possibilidade de aplicação em escala industrial.

## 2.8 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é um material aglutinante, de cor escura constituída por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis, de elevada massa molecular, obtido a partir do petróleo por destilação em unidades industriais. Sua principal função nos concretos asfálticos é a de promover a aglutinação do conjunto estrutural, permitindo que a transmissão dos esforços produzidos nos pavimentos sejam distribuídos pelos elementos granulares que formam o esqueleto do revestimento, conferindo ao pavimento características de flexibilidade e impermeabilidade (SANTANA, 1993).

Os CAPs são, em geral, classificados pela sua consistência que permite "traduzir" o conceito cotidiano de mais mole ou mais duro. Como são materiais termosensíveis e viscoelásticos esta consistência deve ser definida para uma dada temperatura e uma certa velocidade de aplicação de carga.

A escolha da consistência do CAP deve basear-se no tipo de serviço e clima da região, pois, o uso indiscriminado pode acarretar em pavimentos quebradiços BUFF apud MACEDO (1989). MOTTA et al. (1992) destacam algumas conclusões resultantes da comparação entre ensaios de envelhecimento em laboratório e o desempenho em campo. A velocidade do envelhecimento sob condições climáticas equivalentes é influenciada pela origem do asfalto, pelo índice de vazios inicial da mistura e pela variação do índice de vazios ao longo do tempo. Altas temperaturas em campo causam oxidação térmica e afetam a velocidade e o envelhecimento total dos cimentos asfálticos em regiões de climas quentes.

### 2.8.1 Classificação dos Cimentos Asfálticos

As primeiras especificações para cimentos asfálticos de petróleo nos Estados Unidos surgiu a partir de ensaios analíticos em asfaltos crus de Trinidad, as quais tinham por objetivo estimar a quantidade de betume (solúvel em dissulfeto de carbono).

Com o crescimento da indústria do petróleo e o uso de misturas asfálticas (Hot Mix Asphalt - HMA) em pavimentos nos Estados Unidos, por volta de 1900, ficou evidente a necessidade de eliminar as incertezas relativas, principalmente, no que se referia a consistência dos cimentos asfálticos.

Para os cimentos asfálticos em seu estado natural, materiais sólidos ou semi-sólidos, e a sua utilização em misturas com agregados, ficou claro na época, a necessidade de redução da sua consistência por uso de agentes químicos. Com isso, foram necessários normalizações de métodos, com caráter unificado, para estimativa da consistência de cimentos asfálticos oriundos de diferentes fontes.

Em 1888, *H.C. Bowen*, com esse objetivo, desenvolveu um equipamento denominado "*Bowen Penetration Machine*", que foi a precursor do ensaio de penetração.

Por volta de 1910, a máquina de *Bowen*, após várias modificações (ensaio de penetração), tornou-se o principal meio de "medir" e "controlar" a consistência de cimentos de asfalto semi-sólidos a uma temperatura de 25° C.

Federal Highway Administration (FHWA) desde 1901, e a Society American Testing and Materials (ASTM), desde 1903, usaram o ensaio de penetração padrão para verificar a consistência de cimentos de asfalto utilizados na pavimentação.

Em 1918, a Agência de Estradas Públicas introduziu o Sistema de Classificação baseado em vários graus de penetração sob condições diferentes de temperatura. Em 1931, a AASHO publicou as especificações para o cimento asfáltico baseado no ensaio de penetração.

Segundo ROBERTS et al. (1996), o sistema de classificação baseado no ensaio de penetração tem as seguintes vantagens e limitações:

Vantagens:

- a) classificar baseando-se na "consistência" do cimento de asfalto a uma temperatura de 25° C, que é próxima da temperatura média de serviço de pavimentos em países como os Estados Unidos;
- b) ao ensaiar a uma temperatura de 25° C, pode-se obter uma melhor correlação de consistência para ensaios realizados em baixas temperaturas que com propriedades de viscosidade medidas a temperaturas maiores, por exemplo, 60° C;
- c) tempo de ensaio relativamente curto;
- d) ensaio é adaptável às condições em campo;
- e) custos de equipamentos relativamente baixos;
- f) limite de precisão bem estabelecido;
- g) suscetibilidade à temperatura (consistência do cimento asfáltico com mudança correspondente em temperatura) do cimento de asfalto pode ser determinada medindo-se penetração em temperaturas diferentes de 25° C.

Limitações:

- a) ensaio empírico e não mede a consistência de cimento asfáltico em unidade fundamental como no ensaio de viscosidade;
- b) taxa de cisalhamento alta durante o ensaio;
- c) taxa de cisalhamento variável dependente da consistência do cimento asfáltico;
- d) parâmetro de classificação obtido a 25<sup>o</sup> C, o que não representa a temperatura de serviço que é variável.

Segundo LEITE & TONIAL (1994), a principal mudança no sistema de classificação de cimentos asfálticos teve início nos primeiros anos da década de sessenta pela FHWA, ASTM, AASHTO e vários departamentos de estradas de rodagem que, em consenso na época, consideraram a viscosidade a 60<sup>o</sup> C o melhor parâmetro para classificar os cimentos asfálticos. Os objetivos eram: (a) substituir os ensaios de penetração, considerados empíricos, por ensaios de viscosidade, que do ponto de vista desses órgãos, tinham um caráter mais científico e racional e (b) medir a consistência a 60<sup>o</sup> C em lugar de 25<sup>o</sup> C.

Considerando-se ainda, que esta temperatura se aproximava da temperatura máxima da superfície dos pavimentos, em dias de verão quente, na maior parte dos Estados Unidos. Foram desenvolvidos vários níveis de viscosidade para englobar as diferentes condições climáticas.

O "poise" foi a unidade padronizada de viscosidade, sendo mais baixo o número de poises correspondente ao cimento asfáltico menos viscoso (AC 2.5). O cimento asfáltico com uma viscosidade de 250 poises a 60° C, segundo esta classificação, é "mais leve" que AC-40 (cimento asfáltico com uma viscosidade de 4000 poises para mesma temperatura). O AC-20 é atualmente o cimento asfáltico mais usado para pavimentar nos Estados Unidos. O grau AC-30 foi inserido recentemente às especificações e é usado por alguns estados do sudeste dos Estados Unidos.

Segundo ROBERTS et al. (1996), o sistema de classificação dos cimentos asfálticos a partir de ensaios de viscosidade possuem vantagens e limitações, a saber:

Vantagens:

- a) viscosidade é uma propriedade fundamental dos cimentos asfálticos;
- b) o sistema baseia-se em viscosidade a uma temperatura de 60° C. Este valor se aproxima da temperatura máxima da superfície dos pavimentos (temperatura esta, crítica durante o desempenho ou vida útil);
- c) ensaio é bem padronizado e tem limites de precisão bem estabelecidos;
- d) a suscetibilidade do cimento asfáltico à temperatura pode ser estimada desde que a consistência possa ser medida em três níveis de temperaturas;

Limitações:

- a) classificando a ( $60^{\circ}$  C), em determinadas épocas do ano, pode não corresponder a temperatura de serviço do pavimento;
- b) o ensaio tem um custo mais elevado quando comparado com o ensaio de penetração;

Os cimentos asfálticos de petróleo no Brasil são classificados simultaneamente pelo ensaio de penetração ( $25^{\circ}$  C) em 4 tipos: 30/45; 50/60; 85/100; e 150/200; e pelo ensaio de viscosidade absoluta (poise,  $60^{\circ}$  C), em quatro tipos: CAP-7; CAP-20; CAP-40 e CAP-55. Essas temperaturas, não são compatíveis com as temperaturas, as quais estão submetidas os cimentos asfálticos sob as condições climáticas de regiões, como o Nordeste do Brasil, bem como no processo de fabricação, armazenamento, transporte e utilização. Atualmente, baseado nestes ensaios, é possível estabelecer uma mesma classificação para um determinado tipo de cimento de asfalto e observar em campo desempenhos diferentes.

No período entre outubro de 1987 e março de 1993, nos Estados Unidos, foi desenvolvido o Programa *SHRP* (*Strategic Highway Research Program*) que teve como objetivos gerais a elaboração de especificações e a concepção de novos equipamentos para ensaios em cimentos asfálticos e em concretos asfálticos (HMA – Hot Mix Asphalt). Foi então desenvolvido, entre outros, o conjunto de normas e equipamentos denominado "*SUPERPAVE*" (*Superior Performing Asphalt Pavements*), com os seguintes objetivos:



- a) desenvolver ensaios e especificações para cimentos asfálticos, entre eles inclui-se, modificados e não modificados;
- b) relacionar as propriedades físicas medidas pelo sistema "SUPERPAVE" e o desempenho em campo dos CAPs;
- c) considerar níveis de temperatura, no projeto de misturas, compatíveis com as que realmente ocorrem na superfície do pavimento durante sua vida útil;
- d) desenvolver ensaios e especificações para eliminar e/ou controlar três tipos específicos de patologias ou defeitos dos "concretos asfálticos": *deformações plásticas* (ocorrem tipicamente sob altas temperaturas), *trincas por fadiga* (ocorrem sob temperatura intermediárias), e *trincas de origem térmicas* (que ocorre sob baixas temperaturas);
- e) exigir da tecnologia do sistema SUPERPAVE freqüentes atualizações. Alguns ensaios e critérios teriam que ser flexíveis a ponto de serem revisados provavelmente com a implementação de pistas experimentais;
- f) exigir do sistema "SUPERPAVE" de ensaios e especificações em cimentos asfálticos as seguinte situações:
  - f.1) primeira fase, avaliação do CAP desde a origem, transporte, armazenamento e mistura com o agregado;
  - f.2) segunda fase, simular e avaliar o comportamento dos CAPs quanto ao envelhecimento após a produção e durante a construção do pavimento (envelhecimento a curto prazo);

f.3) terceira fase, simular e avaliar o comportamento dos CAPs quanto ao envelhecimento durante longos períodos em serviço ( 5-10 anos);

## **2.8.2 Equipamentos Utilizados para a Caracterização e Classificação dos Cimentos Asfálticos**

A partir dos objetivos citados no item anterior foram desenvolvidos os seguintes equipamentos para caracterização e classificação de cimentos asfálticos:

*Dynamic Shear Rheometer (Reômetro de Cisalhamento Dinâmico).*

*Rotational Viscometer/Rheometer & "Thermosel" (Reômetro e Viscosímetro Rotacional).*

*Rolling Thin Film Oven (Estufa de Filme Fino Rotativo).*

*Pressure Aging Vessel (Vaso de Envelhecimento sob Pressão)*

### **2.8.2.1. Dynamic Shear Rheometer (DSR)**

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

O DSR mede o módulo de elasticidade transversal ou módulo de cisalhamento "G". Pode ser considerado como a resistência total do cimento asfáltico a deformação por cisalhamento, quando submetido a um esforço cortante aplicado de forma repetida. Em síntese, a amostra de cimento asfáltico é intercalada entre um prato fixo e um prato

de movimento rotatório. O princípio de operação do ensaio é simples e o procedimento de ensaio é normalizado em AASHTO TP5.

#### **2.8.2.2. Rotational Viscometer/Rheometer & "Thermosel"**

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

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

#### **2.8.2.3. Rolling Thin Film Oven (RTFO)**

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

#### **2.8.2.4. Pressure Aging Vessel (PAV)**

Usado em pesquisas para envelhecimento de produtos. Segundo ROBERTS et al. (1996), a metodologia foi desenvolvida pelo Dr. D. Y. O. LEE da Universidade do Estado de Iowa para o envelhecimento de CAPs, por longos períodos de tempo (5-10 anos). É atualmente um método padronizado para envelhecimento de produtos de borracha (ASTM D454 e ASTM D572).

Segundo ROBERTS et al. (1996), a pressão agindo sobre o "CAP" tem as seguintes vantagens: a) perda limitada de voláteis; b) o processo oxidativo é acelerado sem recorrer a altas temperaturas; c) uma quantidade significativa de "CAP" pode ser envelhecida de uma só vez; d) o ensaio é prático e rotineiro.

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

## **2.9 FILER**

O filer é um material constituído de partículas minerais provenientes de agregados graúdos e/ou miúdos empregados em concretos asfálticos. Sua finalidade principal nas misturas asfálticas é melhorar o desempenho reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade a água.

No comportamento dos concretos asfálticos o índice de vazios assume particular importância. A influência da porcentagem de vazios no comportamento dos concretos, quanto à fadiga, pode ser explicado pelos seus efeitos na rigidez e nas tensões de tração que se desenvolvem no asfalto ou na combinação filer-asfalto, provocando um aumento na resistência à fadiga do material.

O filer, além de preencher os vazios, apresenta a propriedade de aumentar a viscosidade do asfalto, incorporando-o. Esta atividade faz com que o mástique tenha maior viscosidade do que o asfalto correspondente. Simultaneamente tem-se o aumento do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento

- a) desenvolver ensaios e especificações para cimentos asfálticos, entre eles inclui-se, modificados e não modificados;
- b) relacionar as propriedades físicas medidas pelo sistema "SUPERPAVE" e o desempenho em campo dos CAPs;
- c) considerar níveis de temperatura, no projeto de misturas, compatíveis com as que realmente ocorrem na superfície do pavimento durante sua vida útil;
- d) desenvolver ensaios e especificações para eliminar e/ou controlar três tipos específicos de patologias ou defeitos dos "concretos asfálticos": *deformações plásticas* (ocorrem tipicamente sob altas temperaturas), *trincas por fadiga* (ocorrem sob temperatura intermediárias), e *trincas de origem térmicas* (que ocorre sob baixas temperaturas);
- e) exigir da tecnologia do sistema SUPERPAVE freqüentes atualizações. Alguns ensaios e critérios teriam que ser flexíveis a ponto de serem revisados provavelmente com a implementação de pistas experimentais;
- f) exigir do sistema "SUPERPAVE" de ensaios e especificações em cimentos asfálticos as seguinte situações;
  - f.1) primeira fase, avaliação do CAP desde a origem, transporte, armazenamento e mistura com o agregado;
  - f.2) segunda fase, simular e avaliar o comportamento dos CAPs quanto ao envelhecimento após a produção e durante a construção do pavimento (envelhecimento a curto prazo);

f.3) terceira fase, simular e avaliar o comportamento dos CAPs quanto ao envelhecimento durante longos períodos em serviço ( 5-10 anos);

## **2.8.2 Equipamentos Utilizados para a Caracterização e Classificação dos Cimentos Asfálticos**

A partir dos objetivos citados no item anterior foram desenvolvidos os seguintes equipamentos para caracterização e classificação de cimentos asfálticos:

*Dynamic Shear Rheometer (Reômetro de Cisalhamento Dinâmico).*

*Rotational Viscometer/Rheometer & "Thermosel" (Reômetro e Viscosímetro Rotacional).*

*Rolling Thin Film Oven (Estufa de Filme Fino Rotativo).*

*Pressure Aging Vessel (Vaso de Envelhecimento sob Pressão)*

### **2.8.2.1. Dynamic Shear Rheometer (DSR)**

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

O DSR mede o módulo de elasticidade transversal ou módulo de cisalhamento "G". Pode ser considerado como a resistência total do cimento asfáltico a deformação por cisalhamento, quando submetido a um esforço cortante aplicado de forma repetida. Em síntese, a amostra de cimento asfáltico é intercalada entre um prato fixo e um prato

de movimento rotatório. O princípio de operação do ensaio é simples e o procedimento de ensaio é normalizado em AASHTO TP5.

#### **2.8.2.2. Rotational Viscometer/Rheometer & "Thermosel"**

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

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

#### **2.8.2.3. Rolling Thin Film Oven (RTFO)**

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

#### **2.8.2.4. Pressure Aging Vessel (PAV)**

Usado em pesquisas para envelhecimento de produtos. Segundo ROBERTS et al. (1996), a metodologia foi desenvolvida pelo Dr. D. Y. O. LEE da Universidade do Estado de Iowa para o envelhecimento de CAPs, por longos períodos de tempo (5-10 anos). É atualmente um método padronizado para envelhecimento de produtos de borracha (ASTM D454 e ASTM D572).

Segundo ROBERTS et al. (1996), a pressão agindo sobre o "CAP" tem as seguintes vantagens: a) perda limitada de voláteis; b) o processo oxidativo é acelerado sem recorrer a altas temperaturas; c) uma quantidade significativa de "CAP" pode ser envelhecida de uma só vez; d) o ensaio é prático e rotineiro.

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

## **2.9 FILER**

O filer é um material constituído de partículas minerais provenientes de agregados graúdos e/ou miúdos empregados em concretos asfálticos. Sua finalidade principal nas misturas asfálticas é melhorar o desempenho reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade a água.

No comportamento dos concretos asfálticos o índice de vazios assume particular importância. A influência da porcentagem de vazios no comportamento dos concretos, quanto à fadiga, pode ser explicado pelos seus efeitos na rigidez e nas tensões de tração que se desenvolvem no asfalto ou na combinação filer-asfalto, provocando um aumento na resistência à fadiga do material.

O filer, além de preencher os vazios, apresenta a propriedade de aumentar a viscosidade do asfalto, incorporando-o. Esta atividade faz com que o mástique tenha maior viscosidade do que o asfalto correspondente. Simultaneamente tem-se o aumento do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento



na resistência aos esforços cisalhantes (estabilidade), no módulo de rigidez e na resistência a tração.

Os fileres, em geral, apresentam a propriedade sobre a suscetibilidade térmica variável, conforme sua natureza e o teor, proporcionando a diminuição dos vazios da mistura betuminosa, minimizando assim, os efeitos da oxidação do asfalto pela ação do calor e do ar, impedindo a deterioração prematura da capa asfáltica, proporcionando desta forma, aumento da durabilidade do revestimento quando sujeito a ação do tráfego (MACÊDO, 1989).

Destaca-se sua grande importância na composição dos concretos asfálticos, principalmente os densos que são estruturas formadas por esqueletos pétreos integrados por agregado graúdo e miúdo devidamente adensados em que os vazios deixados estão em partes preenchidos pelo conjunto coesivo formado pelo asfalto, no qual encontra-se disperso o filer. A função básica do filer neste tipo de mistura é encher os vazios deixados pelo agregado graúdo e miúdo, o que contribui para fechar as misturas, dando maior equilíbrio à estrutura e conseqüentemente, aumentando a estabilidade, sem que haja a necessidade de grandes aumentos no teor de asfalto (PINILLA apud MACEDO, 1989).

A adição de filer aumenta a durabilidade das misturas ao fechá-las, tornando-as impermeáveis. Ao incorporar, filer e asfalto, tem-se um conjunto consistente com um significativo aumento de resistência da deformação do meio coesivo formado pelo concreto asfáltico. Isto é de particular importância quando o concreto comporta-se de maneira instável por apresentar resistência friccional deficiente, fato este que ocorre ao

empregar-se agregados naturais de grãos arredondados (PINILLA apud MACEDO, 1989).

Ao misturar-se o agregado graúdo, miúdo e filer, o ligante cobre as partículas dos agregados e é de suma importância que tanto o filer como o asfalto estejam em quantidades adequadas para que a mistura posteriormente compactada tenha seus agregados acomodados de tal forma, que o sistema filer-asfalto flua nos vazios da estrutura.

Para que a mistura asfáltica tenha flexibilidade adequada e apresente deformações sem fissuras, o esqueleto pétreo deverá deformar-se sem perder seu arranjo interno adquirido na compactação. A mistura coesiva que ocupa os vazios deverá ter certas propriedades que se assemelham aos líquidos de alta viscosidade. Esta consistência varia com a temperatura, logo, ao variá-la, deve-se conferir ao meio contínuo (filer-asfalto), propriedades que caracterizam o conjunto, uma certa capacidade de deformação sem ruptura, visto que, esta capacidade está vinculada à flexibilidade e a uma boa adaptabilidade à base.

Como consequência, para se conseguir uma mistura granular densa que se deforme sem ruptura nas condições de trânsito, Ruiz e, posteriormente Puzinauskas propuseram uma metodologia para dosagem do concreto asfáltico que leva em consideração a relação filer-asfalto condicionada a concentração crítica (SANTANA, 1995).

Segundo RUIZ apud SANTANA (1995), em um sistema filer-asfalto as partículas de filer encontram-se em suspensão, não sedimentando devido a grande viscosidade do meio dispersante. Com um possível aumento da concentração as partículas tendem a aproximar-se, diminuindo os vazios, formando uma estrutura que torna o mástique indesejavelmente rígido, frágil e quebradiço. Esta situação corresponde uma concentração crítica. Para SANTANA (1995), Ruiz não considerou a absorção do asfalto pelo filer ampliada pela grande superfície específica das partículas.

Em seus estudos, *Puzinauskas* deu ênfase a espessura do filme do asfalto que envolve as partículas do agregado, constatando assim, que esta espessura varia de 10 a 100 $\mu$ . Considerando uma dupla estrutura para o filer, admitiu a existência de um filer agregado (que forma um esqueleto mineral, onde as partículas se tocam) e um filer ativo (que fica em suspensão no asfalto formando o mástique). O filer agregado seria envolvido por uma película de mástique (SANTANA, 1995).

Baseado nas considerações de *Puzinauskas*, *Santana* supõe que as películas envolventes do mástique são todas homogêneas, independente do diâmetro da partícula envolvida, que todo asfalto destinado ao filer seja para envolvê-lo, que o filer agregado esteja compreendido entre 80 e 3,5 $\mu$  e que as partículas abaixo de 3,5 $\mu$  constituam o filer ativo, que ficarão em suspensão nas partículas do asfalto.

Em estudos de PUZINAUSKAS apud SANTANA (1995) constatou que o pó calcário tem aproximadamente 10% de grãos menores que 3,5 $\mu$  (10% de filer ativo), enquanto que a argila caulinitica tem cerca de 65% de grãos menores que 5 $\mu$  e 38% de grãos menores que 1 $\mu$ .

Destacam-se algumas das observações feitas por *Puzinauskas* sobre os mástiques, onde foram, em experimentos, utilizados quatro diferentes tipos de fileres e um só tipo de asfalto:

- a) Os fileres que aumentam a viscosidade são os que mais diminuem a ductibilidade;
- b) Um aumento na quantidade de filer reduz a sensibilidade do mástique à temperatura;
- c) A viscosidade do mástique é mais influenciada pela temperatura do que por mudanças na quantidade ou tipo de filer.

De acordo com as especificações do DNER EM 367/97, o filer deve atender às especificações contidas na Tabela 3.

**Tabela 3 – Especificações sobre Porcentagens de Grãos que Passam do Filer**

Peneiras	% em peso passando
n <sup>o</sup> 40	100
n <sup>o</sup> 80	95 - 100
n <sup>o</sup> 200	65 - 100

### 2.9.1 Uso da Cal Como Filer nos Concretos Asfálticos Usinados a Quente

O primeiro concreto asfáltico utilizando a cal com filer foi em Boston nos Estados Unidos, em 1910. No Brasil, no final da década de 1940, o DNER utilizou a cal no trecho Porto Alegre - São Leopoldo.

A cal pode ser utilizada nas misturas a quente em pequenas quantidades, visando a melhoria das condições de adesividade do agregado, minimizando os efeitos

de oxidação do asfalto (envelhecimento), aumentando a impermeabilidade e a viscosidade do ligante asfáltico e também a durabilidade potencial da camada asfáltica sujeita à ação do tempo e do tráfego.

A cal utilizada como filer, mesmo em pequenas quantidades, concede às misturas asfálticas as seguintes características: a) melhora a adesividade dos agregados devido a sua natureza alcalina; b) neutralizando a acidez do mesmo; c) melhora a resistência aos efeitos deletérios da ação prolongada à água e a temperatura, através do aumento de sua impermeabilidade; c) melhoria das condições de adesividade; d) aumenta a viscosidade do cimento asfáltico, diminuindo a susceptibilidade térmica da estrutura.

#### **2.9.2 Uso do Amianto como Filer no Concretos Asfálticos Usinados a Quente**

Os vazios do agregado mineral compactado constituem o espaço geométrico da mistura compactada que deve receber o asfalto e, em conseqüência, não é possível aumentar o teor de asfalto com baixa porcentagem de vazios, sem pôr em risco a resistência a deformação.

Diante de tais obstáculos, SCHLOSSER et al. (1978) realizaram ensaios e determinaram o comportamento em uma pista experimental de um concreto asfáltico tendo como filer o amianto de fibra curta. Para avaliar tal desempenho foi escolhido um trecho de 1km situado na BR 116/MG, entre as localidades de Leopoldina e Mariaé, onde foi utilizado como filer o calcário e o amianto crisotila. O método Marshall de dosagem pode ser aplicado para ambos os materiais, uma vez que foi verificado valores ótimos de estabilidade, volume de vazios, relação betume-vazios e fluência.

A diferença entre os dois fileres analisados reside, essencialmente, no fato de que com igual trabalho de compactação, as misturas com amianto pouco se densificam, dando origem a altos percentuais de volume de vazios.

Nesse estudo, após dois anos de tráfego pesado sobre um trecho experimental, não foi verificado afloramento do asfalto, perda de estabilidade ou desgaste do material, fato verificado no trecho executado com filer calcário.

SCHLOSSER et al. (1978) concluíram que: "... existe a possibilidade de aumento da porcentagem de asfalto de 5 para 6% substituindo o filer calcário pelo amianto crisotila do tipo 8S, o que proporcionará uma maior flexibilidade da mistura ..."

## **2.10 O CONCRETO ASFÁLTICO**

Concreto Asfáltico é a denominação dada às misturas à quente compostas de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (filer) e o cimento asfáltico, que deve recobrir uniformemente as partículas dos agregados. Entre as principais propriedades dos concretos asfálticos, destacam-se a estabilidade, a durabilidade, a flexibilidade, a resistência à derrapagem, a permeabilidade e a trabalhabilidade.

O concreto asfáltico, sendo uma mistura de materiais granulares e cimento asfáltico, herda as suas principais características viscoelásticas. Seu comportamento é fortemente influenciado por parâmetros de misturas, como a porcentagem de vazios (compacidade), a frequência de aplicação da carga e a temperatura.

Tradicionalmente, o teor de cimento asfáltico é determinado segundo o ensaio MARSHALL, pela otimização de cinco parâmetros: a estabilidade, a densidade, a porcentagem de vazios, a relação betume/vazios e a fluência.

A escolha do teor ótimo de cimento asfáltico dá-se pela média dos teores de asfalto para a densidade e estabilidade máxima, valor médio dos limites de fluência, da porcentagem de vazios e relação betume/vazios (GUAZELLI, 1985).

Os concretos asfálticos sofrem deformações permanentes excessivas ao longo da vida útil do pavimento de modo a torná-los inadequados ao uso. Três mecanismos que se traduzem em irregularidade, caracterizam as deformações permanentes na superfície do concreto asfáltico.

- a) Deformação Permanente Estrutural.
- b) Deformação Permanente de Fluência.
- c) Deformação Permanente de Uso.

O Projeto de uma mistura asfáltica deve atender :

- a) resistência a deformação permanente;
- b) resistência a fadiga;
- c) resistência ao trincamento devido a baixas temperaturas;
- d) durabilidade;
- e) resistência a ação da água;
- f) resistência ao polimento;
- g) trabalhabilidade;

A composição volumétrica dos concretos asfálticos é de importância fundamental para a estabilidade e durabilidade dos pavimentos. Em geral, os concretos asfálticos, após a compactação não devem ter menos do que 4% de vazios para que o teor de vazios não reduza a menos de 2 a 3% pela pós-compactação, o que causaria a perda da estabilidade da mistura. Por outro lado o teor de asfalto não deve ser superior a 8% para garantir a durabilidade.

Sendo o teor de vazios um dos fatores de maior influência na deformação permanente dos concretos asfálticos, existe um intervalo de teor de vazios de 3 a 7%, para o qual o material é mais estável.

#### **2.10.1 Método de Dosagem do Concreto Asfáltico com Resultados Obtidos no Ensaio Marshall**

A primeira versão do método de dosagem de misturas Marshall foi desenvolvida em 1939 por Bruce Marshall do *Mississippi Highway Department* (EUA). Segundo WHITE (1985), o desenvolvimento e a evolução do método Marshall foram baseados em duas variáveis, as quais foram consideradas mais significativas para o bom desempenho do concreto asfáltico, são elas: o teor de asfalto e a densidade.

Segundo o autor, em campo, o desempenho da mistura estaria relacionado ao teor ótimo de cimento de asfáltico e à densidade da mistura. Porém, em laboratório, a característica mais importante a selecionar seria a forma de compactação que reproduzisse a densidade induzida pelo tráfego, e, a escolha adequada das propriedades a serem "mensuradas" para estimativa do teor de cimento de asfáltico que viesse a produzir um desempenho satisfatório em campo.



Desde que foi concebido por *Bruce G. Marshall* e aprimorado pelo *Corps of Engineers*, o método Marshall tem sido cada vez mais adotado por instituições rodoviárias do mundo todo para fins de projeto e controle da qualidade de misturas betuminosas para pavimentação. Por ser um método de ensaio empírico, ou seja, por não medir as propriedades fundamentais do concreto asfáltico sob as condições em que eles realmente trabalham nas camadas de pavimentação, tem sido alvo de severas críticas.

Embora venha sendo intensamente usado por uma grande quantidade de organismos rodoviários do mundo todo com relativo sucesso na obtenção dos parâmetros necessários para dosagem de misturas asfálticas, o método apresenta falhas e deficiências e sua adoção precisa ser acompanhada de um exame crítico tanto de suas qualidades quanto de suas limitações e imperfeições.

GOETZ (1960) afirma que o ensaio Marshall fornece uma avaliação qualitativa geral de uma mistura entre asfalto-agregado e finaliza dizendo que para o controle de misturas asfálticas para pavimentação, e para os tipos de misturas por ele estudadas, o método Marshall parece ser o mais adequado.

ROAD RESEARCH LABORATORY (1962) considera o ensaio Marshall como sendo do tipo não-confinado e limitado na avaliação da resistência mecânica dos concretos asfálticos às deformações.

Sob um enfoque um pouco mais diverso, METCALF (1959) afirma que a capacidade de um concreto asfáltico de suportar a carga de tráfego, sem deformar-se, pode ser melhor avaliado por intermédio de sua capacidade de suporte, ao invés de simplesmente pela sua estabilidade. O conceito de capacidade de suporte deve ser

entendido como sendo o maior valor da tensão (total) que um pavimento (camada asfáltica) pode suportar sem fluência viscosa. Para o cálculo desta grandeza com os resultados do ensaio Marshall o autor propõe:

$$CS = \frac{E}{F} * \frac{(120 - F)}{100} (psi)$$

Onde:

E = Valor da estabilidade Marshall, em libras.

F = Valor da fluência Marshall, em centésimos de polegadas.

Segundo BONNOT (1984), os métodos de ensaios empíricos devem ser usados para uma previsão da composição das misturas asfálticas e, em seguida, deve-se determinar as propriedades mecânicas dessas misturas, não através de um único ensaio, mas por intermédio de diversos ensaios específicos para cada uma das propriedades de interesse e de maior relevância para o comportamento global do concreto asfáltico resultante dessa mistura. Dentro dessa linha de trabalho, deve-se examinar a resistência às deformações (sob carregamento dinâmicos, lentos e estáticos), a resistência à fadiga e a durabilidade.

### 2.10.2 Fatores que Influem nos Resultados do Método Marshall

Tanto a prática como as pesquisas mostram que, apesar de padronizado os equipamentos e os procedimentos para a moldagem e o ensaio de corpo de prova pelo método Marshall, os resultados são influenciados por diversos fatores. COELHO (1992) apresenta uma extensa revisão bibliográfica sobre tais fatores, afirmando que: as características dos materiais empregados, a temperatura da mistura e de compactação, a forma e dimensões como os corpos de prova são realizados, as características dos equipamentos e as condições operacionais do ensaio são os principais fatores a influir nos resultados. Mesmo sob idênticas condições relativas a materiais, equipamentos e operacionalidade, os resultados dos parâmetros empregados apresentam variabilidade.

Verifica-se que no método Marshall procura-se controlar as características físicas da mistura compactada, através de três parâmetros: densidade aparente; volume de vazios não preenchido com asfalto; volume de vazios ocupado pelo asfalto através da relação betume-vazios.

Para a avaliação das características mecânicas da mistura compactada são empregados no método, a estabilidade e a fluência.

Com a dependência entre a densidade aparente, volume de vazios e a relação betume-vazios tem-se basicamente três variáveis independentes: densidade aparente, estabilidade e fluência.

COELHO (1992) cita estudos realizados pelo *Corps of Engineers* sobre a repetibilidade do ensaio Marshall e estabeleceu as tolerâncias consideradas razoáveis para tais parâmetros:  $\pm 5\%$  para a fluência;  $\pm 10\%$  para a estabilidade;  $\pm 0,4\%$  para a densidade aparente. Comenta ainda que para obtenção de resultados dentro dos limites de tolerância citados recomenda-se preparar e ensaiar *dez corpos de prova*.

De um modo consensual, a estabilidade dos concretos asfálticos tem sido definida como a medida de capacidade de suporte dos carregamentos oriundos do tráfego sem sofrer deformações plásticas. O termo estabilidade é muitas vezes usado como sinônimo de resistência mecânica e, neste contexto, pode ser mal interpretado, pois as cargas oriundas do tráfego de veículos são extremamente variáveis, não só na magnitude como no tempo de aplicação. Dois aspectos são essenciais na avaliação da resistência mecânica ao deslocamento.

- a) A natureza do carregamento: estático e dinâmico.
- b) A natureza viscosa do cimento asfáltico.

NIJBOER (1948) afirma que a resistência mecânica dos concretos asfálticos tem basicamente duas componentes: a resistência devido ao travamento angular dos agregados e a resistência ao cisalhamento viscoso devido à coesão e viscosidade do CAP. Esta força de coesão decorre da mistura íntima entre a fração filerizada da mistura e o CAP, aumentando expressivamente a viscosidade do mástique. A coesão é alterada em função da temperatura do ensaio; da porcentagem de filer; da mineralogia; da superfície específica; da densidade; da consistência inicial do CAP; da temperatura de mistura; e do tempo de mistura.

Em suma, o comportamento reológico dos concretos asfálticos é de interpretação complexa e os objetivos precisam estar muito bem definidos para que se possa usar corretamente os conceitos e as propriedades das camadas de pavimentos, produzidas com misturas asfálticas.

NIJBOER (1948), trata do problema da deformação plástica das misturas asfálticas, mostrando a influência de cada um dos componentes (cimento asfáltico, filer, agregado) na propriedade mecânica do concreto asfáltico. Algumas conclusões deste estudo são detalhadas em termos de coesão e ângulo de atrito:

A penetração do ligante não tem influência no ângulo de atrito interno da mistura, para uma dada temperatura, ao passo que a coesão é altamente influenciada pela penetração. Quanto mais duro o asfalto, maior a coesão, para uma dada temperatura.

A temperatura tem grande influência na coesão e praticamente nenhuma no ângulo de atrito. Na viscosidade a influência da temperatura é grande, tendo sido definida uma temperatura de solidificação viscosa, que representa o ponto a partir do qual a velocidade de deformação é tão baixa, que é possível não se considerar mais a deformação permanente abaixo desta temperatura.

Existe uma grande influência da relação filer/asfalto, da relação volume de vazios/volume total e do tamanho das partículas finas nas propriedades plásticas de coesão e deformação das misturas.

O efeito do agregado pode ser considerado sob os aspectos da forma, tamanho e concentração de grãos mais grossos influenciando o ângulo de atrito, a coesão e a deformação plástica das misturas.

A deformação permanente é sobretudo um fenômeno de fluência (Creep), e portanto, a duração do carregamento é o parâmetro mais importante, sendo a frequência e o número de repetições secundários. A temperatura exerce um papel mais importante que o estado de tensões na deformação permanente (NIJBOER, 1948).

Não é fácil prever, com exatidão, as deformações permanentes de um revestimento asfáltico, embora estudos de laboratório mostraram que uma dosagem bem feita, com ligantes adequados ao clima da região, possibilita um desempenho adequado quanto a este aspecto durante a vida útil do revestimento.

As deformações elásticas repetidas pela passagem dos veículos são responsáveis pelo fenômeno da fadiga do revestimento asfáltico e o correspondente trincamento.

É comum admitir-se, por simplificação, um modelo elástico linear para a relação tensão – deformação nas misturas asfálticas, embora sabendo que estes materiais têm um comportamento reológico visco-elástico e termo-sensíveis. Para poder utilizar o modelo mais simples da elasticidade linear (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson constante) estipula-se uma temperatura e uma frequência de carregamento do ensaio para a obtenção dos parâmetros elásticos.

## 2.11 DEFEITOS NO CONCRETO ASFÁLTICO

### 2.11.1 Deformação Permanente

A degradação da qualidade do pavimento de concreto asfáltico ocasiona deformação permanente, que se traduz no aparecimento de irregularidade no perfil longitudinal e sobretudo no perfil transversal do pavimento.

A deformação permanente, em inglês, designada por "rutting" e, em francês, "orniérage", também denominada afundamento de trilha de roda, pode ser descrita como uma depressão nas trilhas das rodas com possível ocorrência de uma elevação ao longo das bordas dessa depressão.

A deformação permanente pode ser originada principalmente pela instabilidade do concreto asfáltico ocasionada pela fluência excessiva da mistura, agravada por temperaturas elevadas. É importante que a estrutura das camadas dos pavimentos das rodovias tenham características que conservem índices de irregularidades abaixo de certos limites para o ciclo de vida do pavimento.

Três mecanismos, que se traduzem em irregularidades da superfície, caracterizam formação de deformação permanente na superfície dos concretos asfáltico (deformação permanente estrutural, deformação permanente de fluência e deformação permanente de uso). Estes três tipos podem agir independentemente uns dos outros ou simultaneamente.

a) Deformação Permanente Estrutural

Geralmente a deformação permanente estrutural resulta de subdimensionamento das camadas do pavimento para o tráfego o qual é submetido, ou do emprego de materiais com defeito de execução (falta de compactação), de insuficiência de drenagem e suporte do solo. As providências para proteger o pavimento de tais defeitos estruturais são bem conhecidas: métodos de dimensionamentos correspondentes às cargas e recomendações de empregos de materiais de boa qualidade e drenagem.

b) Deformação Permanente de Fluência

Este tipo de deformação permanente distingue-se por ser um problema da produção e projeto do concreto asfáltico, portanto, das características dos diversos constituintes e da execução da mistura. A correção faz-se, em geral, pela retirada do concreto asfáltico e pela reposição de um novo ou pela reciclagem e correção dos materiais.

A formulação do concreto asfáltico com vistas a evitar a deformação permanente, assegura um esqueleto mineral estável e eficaz na transmissão dos esforços, procurando numerosos pontos de contatos entre as partículas granulares, resultando em atrito interno elevado e duradouro entre as partículas, quando empregam-se materiais de qualidade.



### c) Deformação Permanente por Uso

A deformação permanente por uso resulta do desgaste provocado pelos pneus, especialmente, por pneus providos de correntes para situações de pista com gelo. É um defeito que ocorre primordialmente em regiões frias.

#### 2.11.2 Parâmetros Influentes na Deformação Permanente

Tem sido difícil estabelecer correlações entre os parâmetros de formulação e a deformação permanente, contudo muitos parâmetros podem ter sua sensibilidade avaliada por teste de laboratório. Diversos fatores influenciam a deformação permanente:

##### a) Temperatura

Os concretos asfálticos herdam as características viscosas dos cimentos asfálticos, que alteram sua consistência com o aumento da temperatura. No mesmo sentido, o aumento da temperatura ambiente acentua o risco de ocorrência de deformação permanente.

É possível identificar uma forte tendência de mudança de comportamento para os concretos asfálticos, um aumento da temperatura de ensaio em 10 °C pode ocasionar uma translação da curva de deformação permanente em 10 (na escala log-log). A mesma porcentagem de deformação permanente pode ser obtida para 50° C e 100 000 ciclos e 60° C e 10 000 ciclos, no intervalo de temperaturas de 42° C a 60° C (BROSSEAUD et al., 1993).

b) Volume de Vazios:

O volume de vazios é um dos fatores que tem maior influência na deformação permanente dos concretos asfálticos. Existe um intervalo de volume de vazios, de 3% a 7%, para qual o material é mais estável (BROSSEAUD et al., 1993).

Existe um volume de vazios intergranulares cheios com betume para o qual a resistência é obtida pela imobilização do grão sem o efeito da lubrificação pelo betume

A composição volumétrica dos concretos asfálticos é de importância fundamental para a estabilidade e a durabilidade do pavimento. Em geral, o concreto asfáltico após a compactação não deve ter menos do que 4% de vazios para que o teor de vazios não se reduza a menos de 2% ou 3% pela pós-compactação, o que causaria a perda da estabilidade da mistura.

c) Granulometria:

O tamanho dos grãos dos agregados é o responsável pela sua distribuição interna, de modo que haja contato íntimo entre os grãos maiores, enquanto os grãos menores preenchem os vazios deixados pelos os grãos maiores.

Embora pesquisadores relatem que não têm uma conclusão geral sobre a influência da granulometria na deformação permanente, BROSSEAUD et al. (1993) afirmam que: o aumento de materiais granulares melhora sistematicamente a resistência à deformação permanente e que a introdução de uma descontinuidade na granulometria contribui, em geral, para a instabilidade.

d) Influência do Tipo e Teor de Cimento Asfáltico:

Os cimentos asfálticos menos viscosos tendem a apresentar maior risco de deformação permanente, a sua consistência, de maneira empírica, pode ser caracterizada pela penetração, temperatura de amolecimento (anel e bola) e pelo índice de susceptibilidade térmica.

Sistematicamente, os cimentos asfálticos com penetração inferior apresentam menor percentagem de deformação permanente, contudo a temperatura de amolecimento e o índice de susceptibilidade permitem, conjuntamente, aferir a sensibilidade ao risco de deformação permanente.

Em situações particulares, os riscos de deformação permanente podem ser controlados pela aplicação de cimentos asfálticos modificados de modo a reduzir sua sensibilidade térmica.

BROSSEAUD et al. (1993) afirmam que embora existam riscos maiores de deformação com o aumento do teor de cimento asfáltico, parece não haver uma proporcionalidade. Existe, na verdade, um nível crítico de preenchimento dos vazios do agregado mineral por cimento asfáltico a partir do qual o material se torna instável.

A adoção de teores mais elevados de cimento asfáltico com o intuito de melhorar a trabalhabilidade da mistura pode conduzir a alto risco de deformação permanente.

## 2.12 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

No Brasil, a moldagem de corpos de prova para testes de dosagem é feito por compactação do tipo Marshall. No entanto, isto não é garantia de uniformidade de procedimentos e resultados; não existe uma obediência às regras estabelecidas e estas, por sua vez, também são omissas em alguns pontos, à utilização de soquetes mecânicos ou manuais influenciam nos resultados.

Em pesquisa realizada por BROWN et al. (1993) apud MOTTA (1992) para verificar a influência do tipo de compactação nos parâmetros de dosagem utilizando soquetes mecânicos do tipo Marshall, com base rotativa ou não, com soquetes manual Marshall, com Hveem e também com o compactador giratório do Corpo de Engenheiros, concluíram que:

- a) o soquete mecânico Marshall conduz a um teor ótimo de asfalto maior em relação aos outros, e o menor teor é obtido pelo compactador giratório;
- b) há uma variabilidade muito grande no teor de asfalto determinado em cada método, indicando a necessidade de maior controle nos procedimentos para aumentar a repetibilidade do ensaio;
- c) a estabilidade é afetada pelo tipo de compactador empregado na confecção dos corpos de prova;
- d) a variabilidade do peso específico é grande.

O ideal, ao compactar o concreto asfáltico em laboratório, seria "simular" o mais próximo possível da realidade as solicitações impostas por diferentes tipos de carregamentos nas etapas de construção e de vida útil do pavimento. O teor de cimento de asfáltico na mistura seria estimado a partir de três variáveis: porcentagem de vazios, número de operações do eixo padrão, e a vida útil da mistura. Com isso, os corpos de prova, obtidos em laboratório, representariam melhor as condições "in situ", possibilitando a análise do comportamento mecânico da mistura e a estimativa do teor ótimo de "asfalto" em laboratório, relacionado ao desempenho do pavimento em campo.

Uma dosagem adequada deve assegurar a durabilidade, a resistência à fadiga e a estabilidade à deformação plástica da mistura, face às condições de clima, tráfego e da própria estrutura do pavimento. A filosofia do projeto de mistura é de que a deformação permanente está intimamente ligada a sua composição, enquanto a deformação elástica deve considerar, também, a estrutura do pavimento de que faz parte.

Trabalhando-se com várias possibilidades de dosagem, pode-se obter diferentes misturas de propriedades adequadas a cada tipo de tráfego, clima e estrutura, de modo a evitar problemas de deformação permanente ou de afundamento de trilha de roda.

### 2.12.1 Sistema de Dosagem de Concreto Asfáltico do Programa SHRP

O ensaio Marshall, adotado na dosagem de misturas betuminosas, é empírico e seus parâmetros não são relacionados diretamente ao desempenho do pavimento sob ação de diferentes níveis de temperatura e de tráfego. O ideal, ao compactar concretos asfálticos, seria "simular" o mais próximo possível da realidade, as solicitações impostas por diferentes tipos de carregamentos nas etapas de construção e de vida útil do pavimento. Com isso, os corpos de prova obtidos em laboratório representariam melhor essas duas etapas, possibilitando com isso, a análise do comportamento mecânico da mistura e a estimativa do teor ótimo de "asfalto", relacionado ao desempenho do pavimento em campo.

É evidente a importância do controle eficaz, através de ensaios mais racionais, nas etapas de produção (usinagem) do concreto asfáltico e da construção da camada de revestimento, levando em consideração a susceptibilidade ao envelhecimento precoce ou fadiga do cimento de asfáltico induzida por altas temperaturas. Ao deixar de considerar tal evidência, o desempenho do pavimento flexível poderá ser afetado de forma a gerar uma incompatibilidade do desempenho esperado em campo com o estimado em projeto.

O programa SHRP, atualmente bastante difundido nos Estados Unidos e no Canadá, constitui um dos avanços tecnológicos na área de projeto e de controle do desempenho de revestimentos constituídos de cimentos de asfálticos, no qual estão relacionados os experimentos com os fundamentos racionais aplicados a situações inerentes de cada região. Considerar que, o estudo e o desenvolvimento, a partir de técnicas e equipamentos do programa já citado, baseado no controle de qualidade e de

desempenho dos cimentos asfálticos em misturas com agregados utilizados na pavimentação de estradas de rodagem é de importância consensual entre os que atuam na área, sejam construtores como estudiosos do assunto.

Um das metas principais do Programa SHRP, com respeito a projeto de dosagem de concretos asfálticos, foi o de desenvolver um novo método de compactação em laboratório. Este método teria que representar, de maneira mais "fiel", as condições impostas pelo tráfego em campo durante as fases de construção e de vida útil do pavimento.

Projetado para compactar amostras de "concretos asfálticos ou misturas betuminosas" (Hot Mix Asphalt), com uma densidade semelhante a obtida em campo, foi desenvolvido o Superpave Gyrotory Compactor (SGC). Em princípio, considera-se que no processo de compactação, utilizado pelo SGC, ocorre uma redistribuição das partículas de agregados semelhante ao que ocorre em campo. Para este equipamento são três os parâmetros de controle de esforço de compactação: esforço vertical (600 kPa), ângulo de giro (1,25 graus), e o número de giro (30 RPM - usado para simular o tráfego).

As amostras de HMA ou "mistura betuminosa" são compactadas em moldes de forma cilíndrica (150 mm de diâmetro e 115 mm de altura). A partir da amostra compactada e de dados obtidos com o equipamento - propriedades volumétricas, a porcentagem de vazios, e os respectivos números de giros do compactador – é feita a análise dos dados e estimado o teor ótimo de cimento de asfáltico para mistura, a qual é relacionada diretamente com o índice de vazios e o número de aplicações de cargas (tráfego = número de giros).

Ao compactar o concreto asfáltico simulando as solicitações impostas nas etapas de construção do pavimento e durante sua vida útil, com o Superpave Gyratory Compactor (SGC), é possível obter corpos de provas em laboratório com uma melhor representatividade nessas duas etapas, possibilitando com isso, a análise do comportamento mecânico da mistura ou do concreto e a estimativa do teor ótimo de "asfalto" relacionado ao desempenho do pavimento em campo.



## CAPÍTULO 3

---

### 3. MÉTODO PARA O TESTE DE UMA HIPÓTESE

A seqüência lógica de raciocínio necessária à verificação e, conseqüentemente, aceitação de uma hipótese é o caminho ou o método para seu teste. Tentou-se verificar condições para aceitar a hipótese: *"é possível utilizarmos o resíduo proveniente da serragem dos blocos de rochas graníticas, como filer em concretos asfálticos"*.

Adotou-se no trabalho o método de inferência indutiva, denominado teste de hipótese, formulação de uma hipótese como tentativa de resposta a uma questão em estudo, e submissão de uma hipótese antagônica, hipótese nula, à verificação empírica. Desta forma, contrariamente ao que acontece na dedução, não afirmamos que a conclusão é verdadeira, mesmo tomando como verdadeira as premissas ou hipóteses auxiliares (HEMPEL, 1981).

Uma hipótese é confirmada se é adequadamente sustentada pela evidência empírica. Entretanto, mesmo uma verificação com numerosos casos e resultados inteiramente favoráveis ou contrários, não estabelecem ou refutam, uma hipótese de forma conclusiva. Fornece apenas um suporte mais ou menos sólido, para tomada de decisão.

Do ponto de vista metodológico, a certeza sobre o método adotado, encontra-se em concluir que a hipótese levantada poderá ser rejeitada diante de fatos observados segundo critérios pré-estabelecidos. Porém, nenhuma hipótese poderá ser confirmada definitivamente sem que a inferência seja feita em função da população e não sobre uma amostra que se diz representativa (RODRIGUES, 1998).

O caráter da pesquisa teve o espírito da imparcialidade na análise teórica e experimental dos resultados. Ao tentar confirmar a hipótese formulada, poderia cair no risco da parcialidade e entusiasmo pela tal, o que tornaria o resultado da pesquisa duvidoso. Porém ao tentar refutar a hipótese antagônica tive como objetivo verificar se tal hipótese poderá ser rejeitada. Desta forma, em caso de rejeição da hipótese antagônica, trouxe para a hipótese formulada um caráter de aceitação ou rejeição, que será válido até que estudos futuros demonstrem o contrário.

## **CAPÍTULO 4**

---

### **4. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS**

Neste capítulo são descritas as características e propriedades dos materiais utilizados na pesquisa e relatados, de maneira sintetizada, os métodos de ensaios. No Fluxograma 03 está representado a seqüência de ensaios realizados na pesquisa.

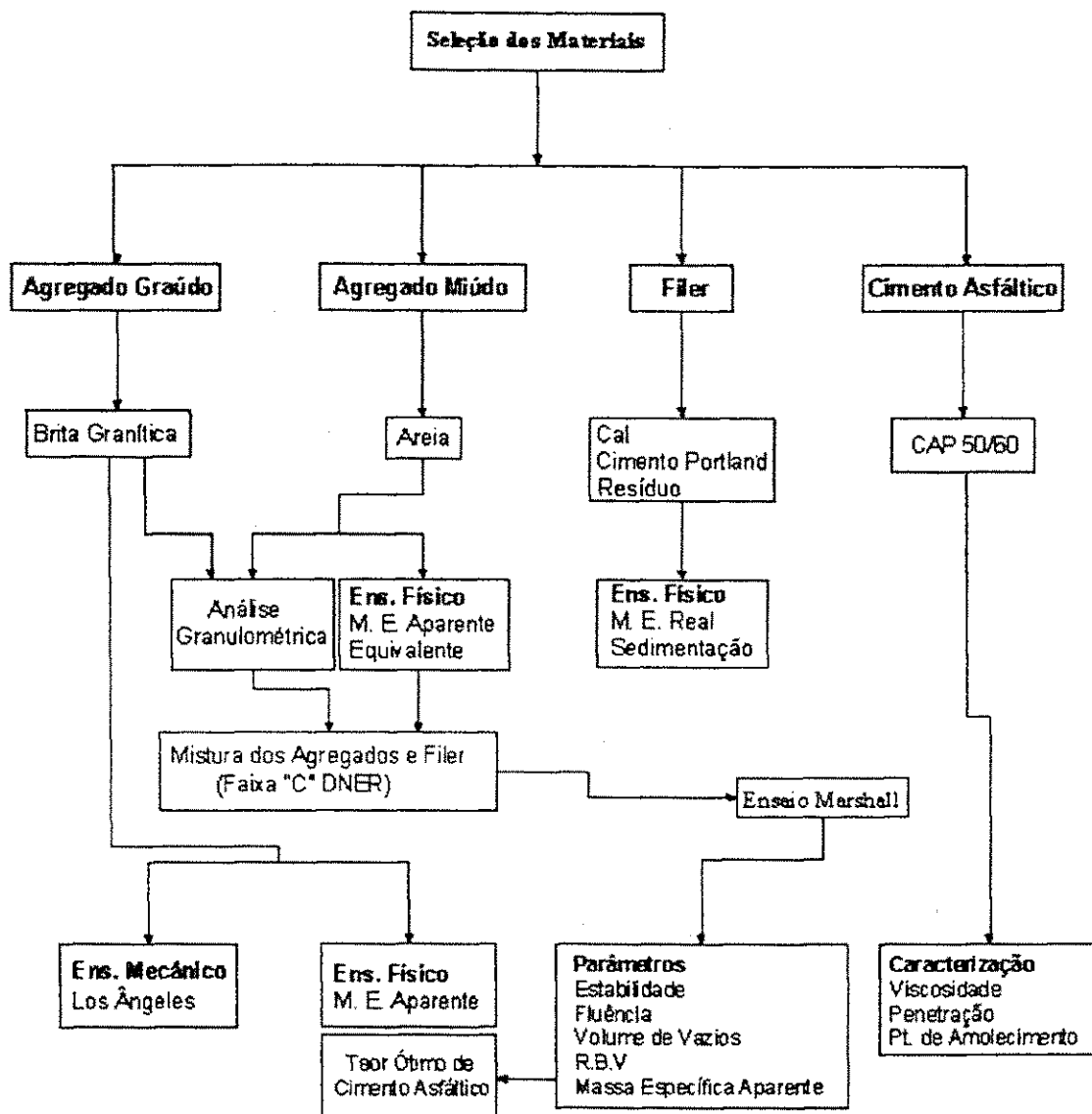
#### **4.1 MATERIAIS**

##### **4.1.1 Agregado Graúdo**

O agregado graúdo utilizado foi do tipo granítico (DNER – ME 081/94), comumente utilizado na região, apresentando um diâmetro máximo de 19,1 mm, massa específica aparente de 2,705 g/cm<sup>3</sup>, desgaste do agregado por abrasão Los Angeles de 20,96.

##### **4.1.2 Agregados Miúdos**

O agregado miúdo utilizado foi a areia do tipo quartzosa (DNER – ME 084/94), apresentando um diâmetro máximo de 4,75 mm, massa específica aparente de 2,610 g/cm<sup>3</sup>, e equivalente de areia igual a 95%.



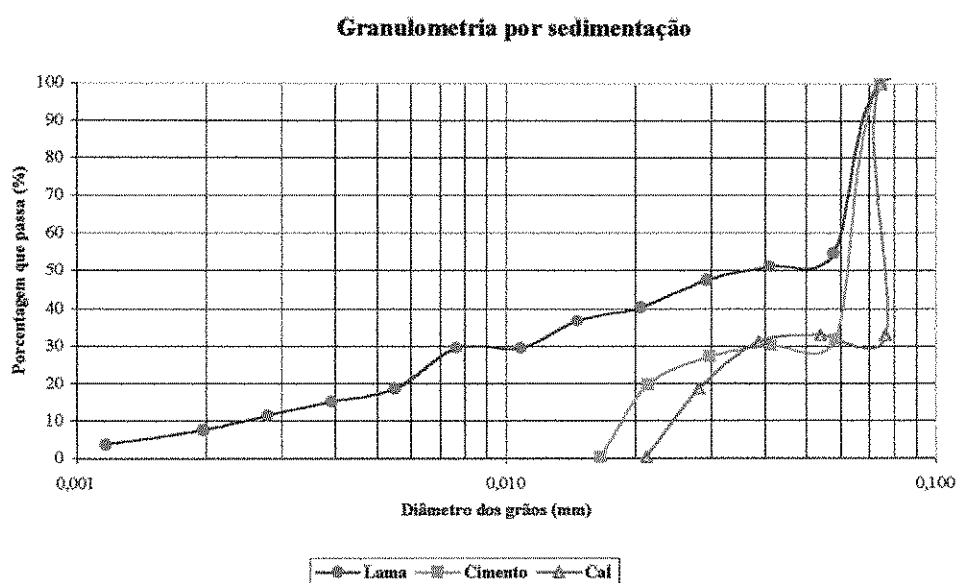
Fluxograma 3 - Atividades e Ensaios Desenvolvidos na Pesquisa

#### 4.1.3 Materiais de Enchimento "Fileres"

Como materiais de enchimento convencionais foram utilizados a cal hidratada e o cimento Portland com massa específica aparente de  $2,270 \text{ g/cm}^3$  e de  $3,080 \text{ g/cm}^3$  respectivamente, (DNER – ME 085/94). A escolha induzida desses materiais teve por objetivo analisar, por comparação, o comportamento mecânico das misturas asfálticas, com esses fileres e com o resíduo, representado através dos resultados obtidos no ensaio Marshall.

O resíduo da serragem do granito com massa específica aparente  $3,335 \text{ g/cm}^3$ , material alvo das pesquisas, foi fornecido pela Indústria Polygram S.A. O critério de utilização deste material, em substituição aos usuais, partiu do pressuposto que a sua produção é abundante em diversas regiões do país. Aliado a isto, à sua deposição inadequada em pátios das indústrias de serragem de granito constitui uma fonte poluidora do meio ambiente. A produção estimada do resíduo proveniente da serragem do granito na Paraíba é de 3.000 toneladas com um crescimento de 6% ao ano (Polygram S. A.).

As distribuições dos tamanhos dos grãos dos fileres, cal, cimento Portland e do resíduo de serragem, estão lançadas em gráfico semi-logaritmo apresentado na Figura 3.



**Figura 3 – Distribuições dos Tamanhos dos Grãos dos Fileres Estudados**

#### 4.1.4 Cimento Asfáltico de Petróleo

De acordo com as especificações da ANP (Agência Nacional de Petróleo) e DNC (Departamento Nacional de Petróleo), que definem parâmetros de aceitação e classificação, o cimento asfáltico utilizado nesta pesquisa, apresentou, segundo os ensaios realizados (Tabela 4), características necessárias para ser classificado como do tipo 50/60.

O cimento asfáltico, colocado em recipientes metálicos, foi mantido fechado para que não houvesse contaminação proveniente de outros materiais. A Tabela 4 apresenta dados característicos do CAP.

Tabela 4 – Características do Cimento Asfáltico

FNSAIOS	MÉTODO	VALOR
Penetração (100g, 5s à 25° C)	DNER-ME 003/94	58
Ponto de Fulgor (° C, min)	DNER-ME 148/94	295
Densidade	DNER ME 154/94	1,020 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade Saybolt Furol (135° C, s)	DNER-ME 004/94	320

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Mistura dos Materiais

Os agregados graúdo e miúdo foram separados nas frações recomendadas de acordo com o método do DNER, adotada para cada ensaio. As frações assim separadas foram acondicionadas em sacos plásticos para posterior realização dos ensaios.

Quanto ao material de enchimento, foi colocado em sacos plásticos e depositados em ambientes livres de variações de teores de umidade natural. A Tabela 5 apresenta os métodos de ensaios utilizados para caracterização dos agregados e fileres utilizados na pesquisa.

Os agregados utilizados nos ensaios, com exceção do ensaio de absorção, foram previamente secos em estufa calibrada à 110° C, por 24 horas. Posteriormente foi feita uma homogeneização através do quarteamento.

A Tabela 6 apresenta os métodos de ensaios utilizados nas misturas dos materiais para moldagem dos corpos de prova de concreto asfáltico.

Tabela 5 - Ensaio Empregada para a Mistura Asfáltica Utilizados na Pesquisa

ENSAIOS	METODOLOGIA
Ensaio Marshall	DNER ME 43-64

Tabela 6 - Ensaios Utilizados para Caracterização dos Agregados e Fileres Utilizados na Pesquisa

ENSAIOS	METODOLOGIA
Análise Granulométrica:	
Agregados	
Graúdos	DNER ME 083-94
Miúdos	
Filer	
Densidade Real dos Agregados	
Graúdos	DNER ME 084-94
Miúdos	DNER ME 084-94
Filer	DNER ME 085-95
Sedimentação	DNER ME 083-94
Filer	
Massa Específica Real	DNER-ME 085-94
Filer	
Equivalente de Areia	DNER-ME 054/94

A mistura dos agregados apresentou uma distribuição dos tamanhos dos grãos que se enquadra entre os limites de domínio da faixa "C" do DNER. (Tabela 7).

Tabela 7 - Distribuição dos Tamanhos dos Grãos dos Agregados, Fileres e Limites Percentuais da Faixa "C" do DNER.

Peneiras (mm)	PORCENTAGEM PASSANDO								
	Brita		Areia		Filer		Combin. Result.	Especificação	
	Total	45%	Total	50%	Total	5%		Pt. Med.	Limites
38,100	100,0	45,0	100,0	50,0	100,0	5,0	100,0	100,0	100,0
25,400	100,0	45,0	100,0	50,0	100,0	5,0	100,0	100,0	100,0
19,100	98,7	44,5	100,0	50,0	100,0	5,0	99,4	100,0	100,0
12,700	74,0	33,3	100,0	50,0	100,0	5,0	88,3	92,5	85-100
9,520	54,3	24,4	99,7	49,8	100,0	5,0	79,2	87,5	75-100
4,750	8,8	3,9	97,3	48,6	100,0	5,0	57,5	67,5	50-85
2,000	2,6	1,2	89,0	44,5	100,0	5,0	50,7	52,5	30-75
0,420	0,6	0,3	27,8	13,9	100,0	5,0	19,2	27,5	15-40
0,180	0,5	0,2	6,0	3,0	100,0	5,0	8,2	19	8-30
0,075	0,3	0,1	2,3	1,2	100,0	5,0	6,3	7,5	5-10



## **4.2.2 Experimento**

O experimento foi dividido em três fases, a saber:

- a) Fase 01 - Denominada "Projeto Piloto" ;
- b) Fase 02 – Denominada "Verificação do Comportamento Mecânico das Misturas Asfálticas";
- c) Fase 03 – Denominada "Variabilidade do teor de Filer e seus Efeitos"

### **4.2.2.1. Fase 01 - "Projeto Piloto"**

Nesta fase inicial de ensaios buscou-se a familiarização com os diversos equipamentos a serem utilizados, visando minimizar as diversas fontes de erros que a metodologia Marshall está exposta, tentou-se também verificar a real possibilidade de utilização do material alvo da pesquisa como alternativo no concreto asfáltico e um possível entendimento do comportamento dos materiais envolvidos no trabalho. Para tanto foram confeccionados 45 corpos de provas, sendo 15 para cada filer analisado e 3 para cada teor de cimento asfáltico.

### **4.2.2.2. Fase 02 - "Verificação do Comportamento Mecânico das Misturas Asfálticas"**

Nesta etapa inicia-se uma bateria de ensaios que forneceram subsídios para análise do comportamento do material alvo da pesquisa. Para tanto foram confeccionados 150 corpos de provas rompidos no aparelho Marshall, sendo 50 para cada filer analisado e 10 para cada teor de cimento asfáltico.

#### 4.2.2.3. Fase 03 – “Variabilidade do Teor de Filer e seus Efeitos”

Na tentativa de entender o comportamento da mistura asfáltica com a variabilidade do teor de filer, foram confeccionados 45 corpos de provas, sendo 15 para teor de filer analisado (4, 6 e 7%) e três para cada teor de cimento asfáltico, variando o teor de filer, sem alterar quantitativamente os demais materiais envolvidos.

O experimento foi realizado nas seguintes etapas:

##### a) Seleção dos Materiais

Nesta primeira etapa os materiais foram selecionados tendo como critério básico seu desempenho mecânico, optou-se por uma brita do tipo granítica, areia de rio, CAP (cimento asfáltico de petróleo) de penetração 50/60, de uso comum na região e três tipos de fileres (cal, cimento Portland e o resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas).

##### b) Misturas dos agregados

Os agregados foram, enquadrados na faixa “C” do DNER.

##### c) Moldagem dos corpos de provas

Para moldagem dos corpos de provas obedeceu-se a especificação do método de ensaios do DNER ME 43-64. Foi realizada exclusivamente por compactação do tipo Marshall com soquete mecânico, sendo aplicados 50 golpes.

#### d) Realização do Ensaio Marshall

Após obtenção dos corpos de provas, procedeu-se seu rompimento, sendo para tanto utilizado o aparelho Marshall, obtendo diretamente os parâmetros (fluência e estabilidade) e indiretamente (vazios, relação betume-vazios e densidade). A escolha do equipamento idealizado por *Bruce Marshall* foi baseada em: custo baixo do equipamento, acessibilidade de sua realização por pessoal técnico de nível médio (laboratorista), participação e rapidez de sua execução em laboratórios e no campo.

## **CAPÍTULO 5**

---

### **5. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados, descritos e analisados os resultados do experimento obtidos nas fases 01, 02 e 03.

#### **5.1 FASE 01 - "PROJETO PILOTO"**

A Figura 4 apresenta gráficos da variação dos parâmetros obtidos a partir do ensaio Marshall, com o teor de cimento asfáltico das misturas asfálticas para os fileres cal, cimento e resíduo.

Observa-se, a partir da Figura 4, uma tendência semelhante dos parâmetros do ensaio Marshall (Estabilidade, RBV, Fluência, Massa Específica e Volume de Vazios) obtidos em misturas asfálticas nas quais foram utilizados os fileres cal e resíduo. O experimento piloto indicou comportamento (tendências) satisfatório do resíduo de granito como filer para as misturas. Os limites considerados para os parâmetros avaliados pela metodologia Marshall são: a) Estabilidade (> 250 Kfg); b) RBV (75 a 82%); c) Fluência (8 a 18); d) Massa Específica (máximo); Volume de Vazios (3 a 5%).

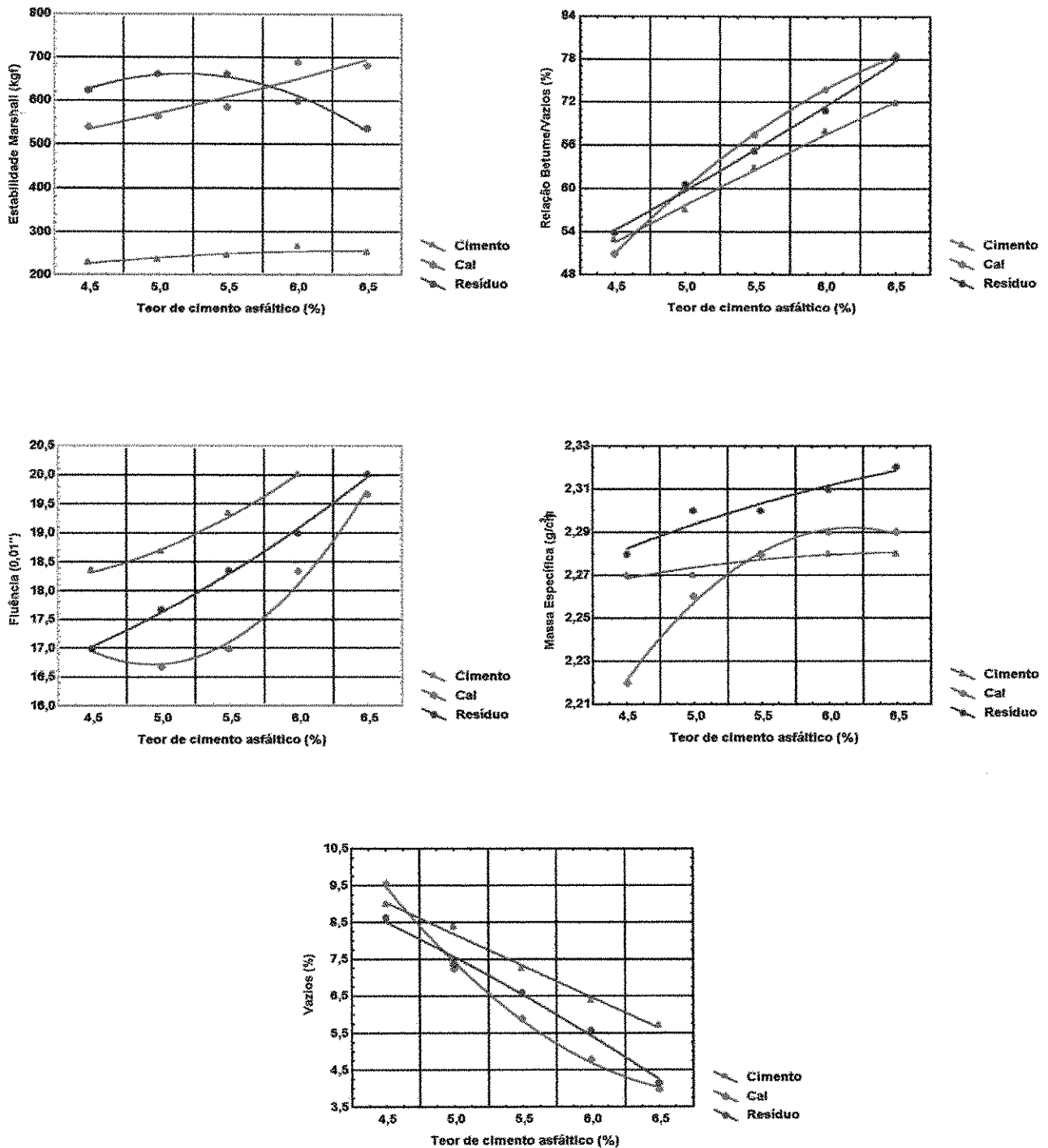


Figura 4 - Variação dos Parâmetros Obtidos a partir do Ensaio Marshall, com o Teor de Cimento das Misturas Asfálticas para os Fileres Cal, Cimento e Resíduo

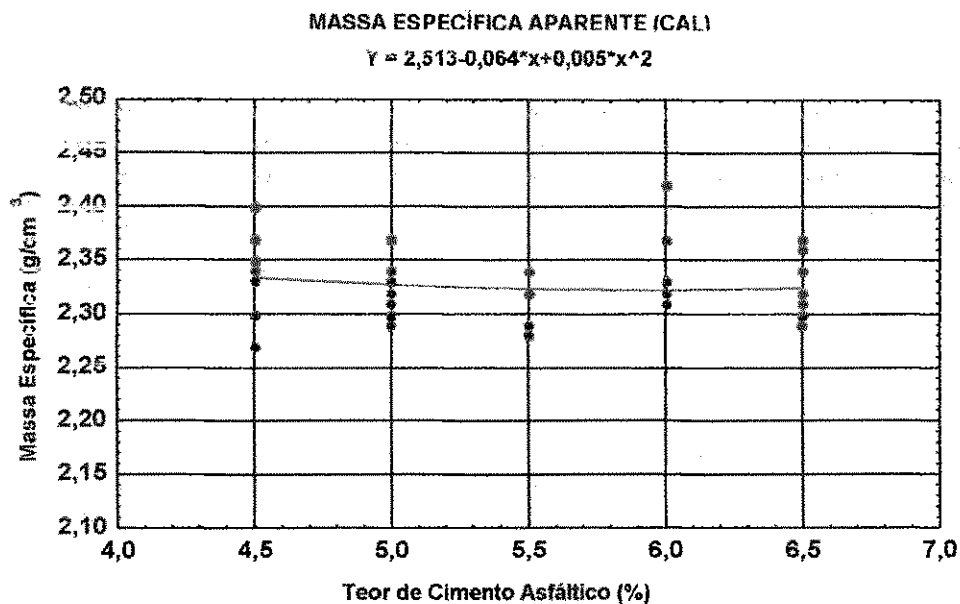
## **5.2 FASE 02 – “VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS”**

Estudos realizados por COELHO (1992) mostram que a variabilidade dos valores dos parâmetros físicos dos corpos de provas (massa específica, volume de vazios e relação betume–vazios), é relativamente baixa nas misturas para concreto asfáltico. Já para os parâmetros mecânicos da mistura, medidos pelo ensaio Marshall (estabilidade e fluência) a dispersão é mais significativa. Os fatores que influenciam nos resultados do método Marshall, segundo o autor, são: a) tempo de mistura, dos diversos materiais envolvidos, insuficiente para obtenção de misturas realmente homogênea; b) compactação ineficiente e em desigualdade de condições; c) controle ineficiente de temperatura dos materiais envolvidos.

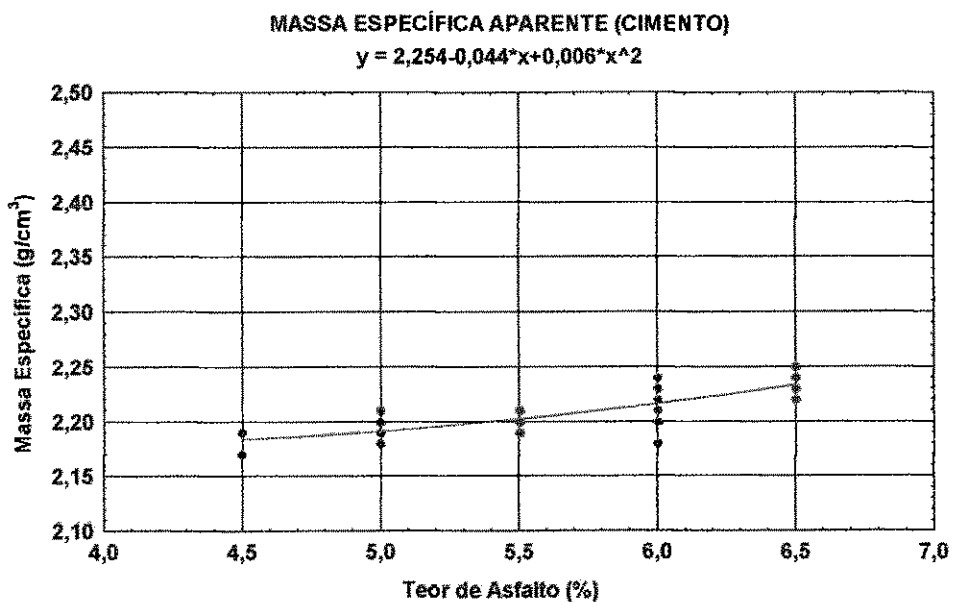
Em seguida, a partir dos resultados obtidos durante a fase 02 do experimento, far-se-á uma análise sobre os parâmetros obtidos, através do ensaio Marshall, das misturas com os respectivos fileres utilizados.

### **5.2.1 Massa Específica Aparente**

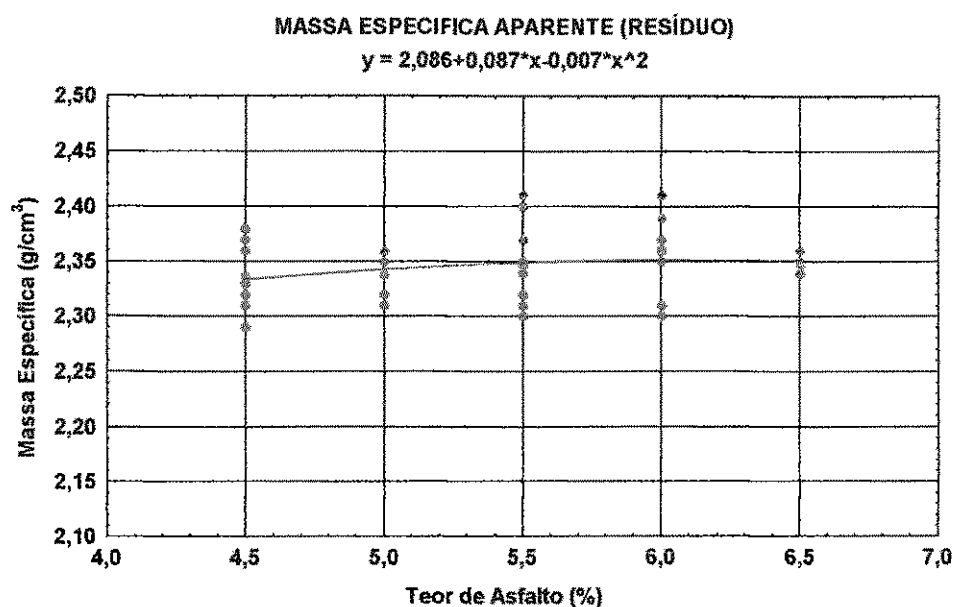
Figura 5, a Figura 6 e a Figura 7 apresentam gráficos das variações da massa específica aparente das misturas asfálticas para os fileres cal, cimento e resíduo, respectivamente.



**Figura 5 - Variação da Massa Específica Aparente da Mistura Asfáltica para o Filer Cal em Função do Teor de Asfalto**



**Figura 6 - Variação da Massa Específica Aparente da Mistura Asfáltica para o Filer Cimento em Função do Teor de Asfalto**



**Figura 7 - Variação da Massa Específica Aparente da Mistura Asfáltica para o Filer Resíduo em Função do Teor de Asfalto**

As (Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10) apresentam os valores médios obtidos para a massa específica com suas respectivas medidas de variabilidade representada pelos desvios-padrão.

**Tabela 8 - Valores Médios de Massa Específica com suas Variabilidades "Cal"**

	Teor	Média	Desvio-	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	2,336000	0,011944	2,308980	2,363020	10
2	5,0	2,325000	0,007188	2,308740	2,341260	10
3	5,5	2,319000	0,006403	2,304515	2,333485	10
4	6,0	2,332000	0,011333	2,306362	2,357638	10
5	6,5	2,321000	0,008750	2,301207	2,340793	10



**Tabela 9 - Valores Médios de Massa Específica com suas Variabilidades  
"Cimento"**

	Teor	Média	Desvios	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	2,182000	0,003266	2,174612	2,189388	10
2	5,0	2,196000	0,003399	2,188310	2,203690	10
3	5,5	2,200000	0,002582	2,194159	2,205841	10
4	6,0	2,216000	0,006000	2,202427	2,229573	10
5	6,5	2,235000	0,003073	2,228048	2,241952	10

**Tabela 10 - Valores Médios de Massa Específica com suas Variabilidades  
"Resíduo"**

	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	2,337000	0,009667	2,315132	2,358867	10
2	5,0	2,338000	0,007118	2,321898	2,354102	10
3	5,5	2,347000	0,012654	2,318376	2,375624	10
4	6,0	2,361000	0,010899	2,336346	2,385654	10
5	6,5	2,347000	0,002134	2,342172	2,351828	10

Para a mistura com o filer Cal, ao variar o teor de cimento asfáltico, entre 4,5 e 5,5%, houve um decréscimo da massa específica. Com o incremento do teor de cimento asfáltico, os valores encontrados para a massa específica da mistura, em geral, variou, para um intervalo de confiança de 95%, de 2,31 a 2,34 g/cm<sup>3</sup> (Figura 8 e Tabela 8).

Ao analisar os resultados obtidos com o filer cimento Portland, observa-se uma menor variabilidade dos valores de massa específica, com uma pequena tendência de variação em torno de um valor central, a média. Em seguida pode-se observar um aumento diretamente proporcional ao do teor de cimento asfáltico. A massa específica variou entre 2,17 a 2,24 g/cm<sup>3</sup> (Figura 8 e Tabela 9).

Para a mistura, com o Resíduo, observa-se uma pequena dispersão de valores estimados de massa específica com um crescimento do parâmetro analisado, acompanhando do aumento no teor de cimento asfáltico. A massa específica variou entre 2,31 a 2,380 g/cm<sup>3</sup> (Figura 8 e Tabela 10).

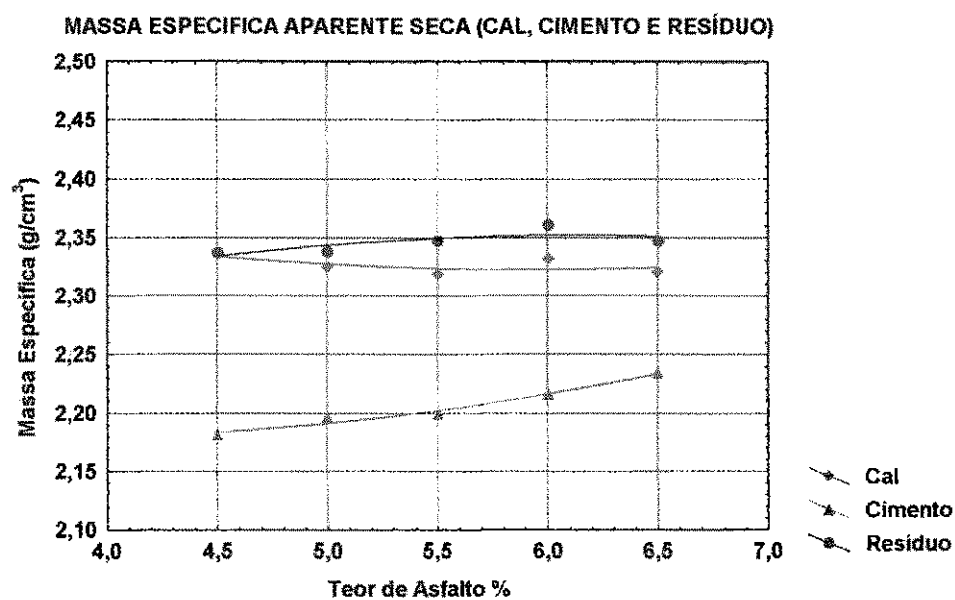


Figura 8 – Tendências das Curvas de Ajustes para Variação da Massa Específica Aparente “Fileres Cal, Cimento e Resíduo”

### 5.2.2 Estabilidade Marshall

As (Figura 9, Figura 10, Figura 11) apresentam gráficos das variações da "estabilidade Marshall " das misturas asfálticas para os fileres cal, cimento e resíduo, respectivamente.

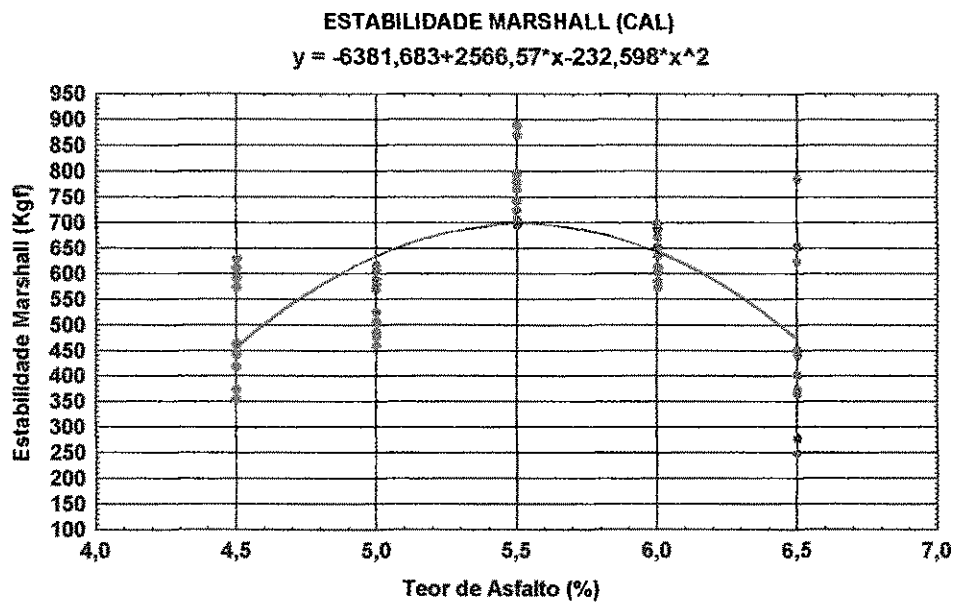


Figura 9 - Variação da Estabilidade da Mistura Asfáltica para o Filer Cal

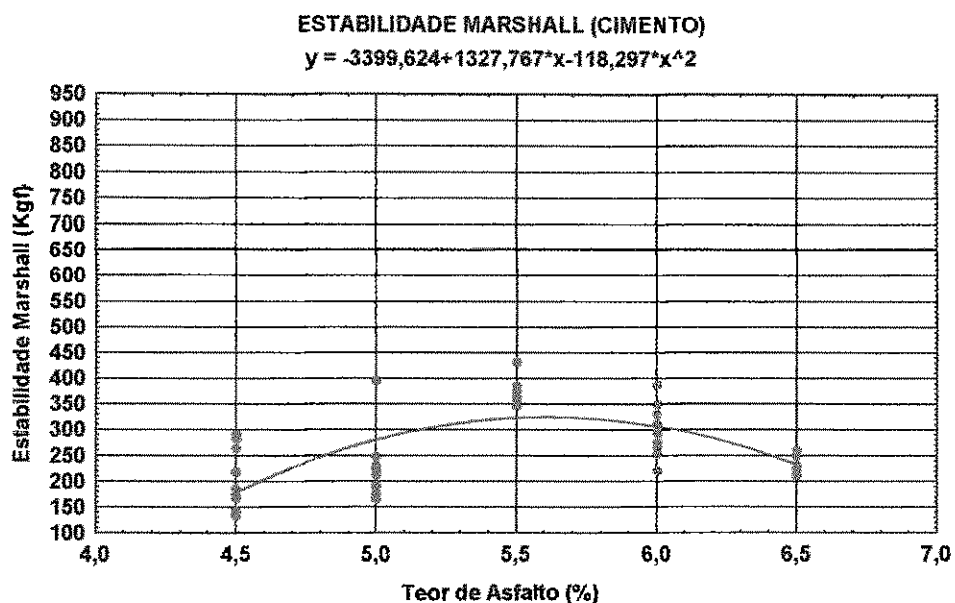


Figura 10 – Variação da Estabilidade da Mistura Asfáltica para o Filer Cimento

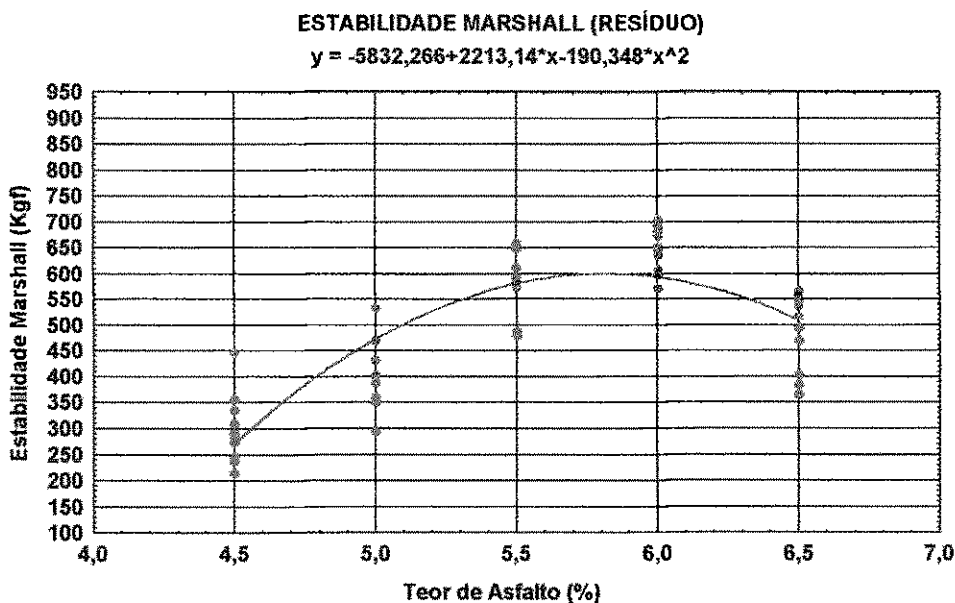


Figura 11 - Variação da Estabilidade da Mistura Asfáltica para o Filer Resíduo

As (Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13) apresentam os valores médios obtidos para a estabilidade Marshall com respectivas medidas de variabilidade, dispersões em torno das médias, representada pelos desvios- padrão.

Tabela 11 - Valores Médios de Estabilidade com suas Variabilidades "Cal"

	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	492,5540	31,93058	420,3220	564,7860	10
2	5,0	542,7660	18,14366	501,7222	583,8098	10
3	5,5	770,0320	21,05705	722,3976	817,6664	10
4	6,0	642,1030	14,46585	609,3790	674,8270	10
5	6,5	462,8660	54,62002	339,3069	586,4251	10

Tabela 12 - Valores Médios de Estabilidade com suas Variabilidades "Cimento"

	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	199,8660	19,23868	156,3451	243,3869	10
2	5,0	225,8530	20,65150	179,1361	272,5699	10
3	5,5	372,0310	7,50635	355,0505	389,0115	10
4	6,0	300,9620	15,41978	266,0800	335,8440	10
5	6,5	228,5520	4,94203	217,3724	239,7317	10

Tabela 13 - Valores Médios de Estabilidade com suas Variabilidades "Resíduo"

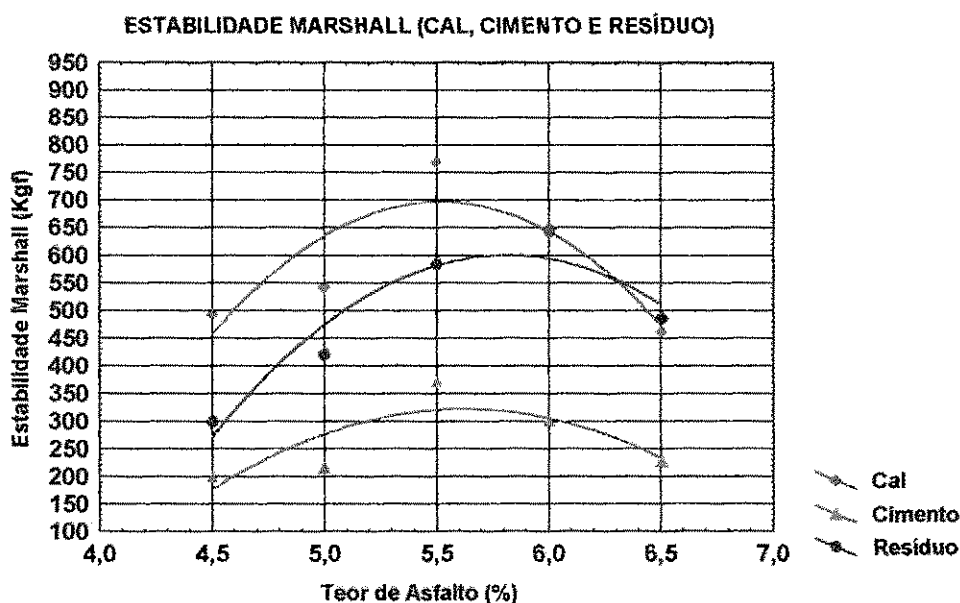
	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	299,4350	21,37349	251,0848	347,7852	10
2	5,0	419,8370	24,64670	364,0823	475,5917	10
3	5,5	584,1130	18,79109	541,6046	626,6214	10
4	6,0	646,1580	13,64950	615,2807	677,0353	10
5	6,5	484,5670	23,85645	430,6000	538,5340	10

Os valores de estabilidade das misturas asfálticas apresentaram, para todos os fileres, tendências de resultados típicos do ensaio Marshall, ou seja, incremento da estabilidade com o aumento na quantidade de ligante atingindo um valor máximo, onde a partir do qual ocorre um decréscimo. A estabilidade mínima exigida pelo método de ensaio, DNER (ME 43/64) é de 250 kgf (ensaios com 50 golpes) foi alcançada para todos os materiais analisados (Figura 12).

Para a mistura onde foi utilizada a cal como filer, o comportamento mecânico sugere valores satisfatórios de estabilidade, entretanto, dos materiais estudados, foi a que apresentou a maior dispersão em torno do valor central, média do teor ótimo (linha

3 da Tabela 11). O valor mínimo de estabilidade foi alcançado com 4,5% de ligante e a estabilidade máxima com 5,5% de ligante (Figura 12).

Para a mistura com o filer cimento Portland, o comportamento mecânico representado pela estabilidade Marshall, apresentou dispersões menores em torno dos valores médios, em geral, uma baixa estabilidade (Tabela 12). A estabilidade mínima exigida foi alcançada com 5,5% de cimento asfáltico. Este valor representa a máxima estabilidade alcançada, porém, esses valores foram menores que os obtidos a partir de misturas onde foram utilizados a cal e o resíduo, material este, que apresentou um melhor conjunto (baixa dispersão e alta estabilidade). A estabilidade mínima exigida, para a mistura asfáltica com o filer "resíduo" foi alcançada com um teor de cimento asfáltico de 4,5% e a máxima com 6%, um pouco acima do verificado nos demais materiais analisados (Figura 12 e Tabela 13).



**Figura 12 - Tendências das Curvas de Ajustes para Variação da Estabilidade "Fileres Cal, Cimento e Resíduo"**

### 5.2.3 Fluência Marshall

As (Figura 13, Figura 14, Figura 15) apresentam gráficos as variações da fluência das misturas asfálticas para os fileres cal, cimento e resíduo, respectivamente.

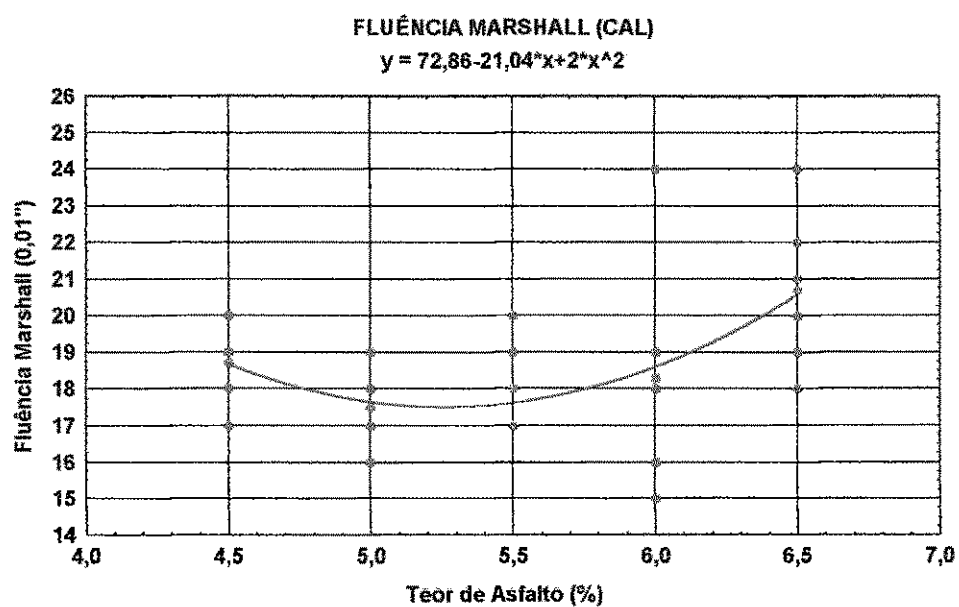
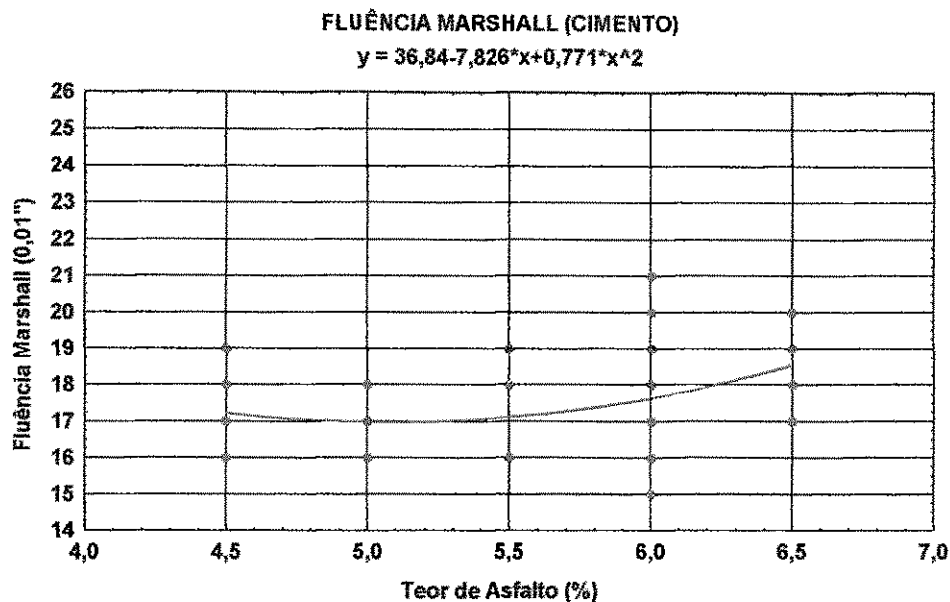
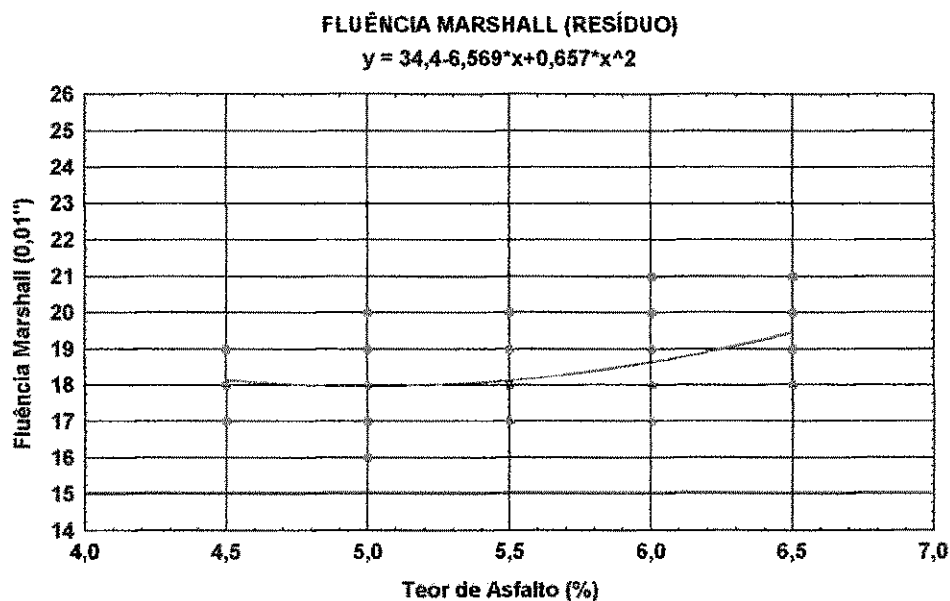


Figura 13 - Variação da Fluência da Mistura Asfáltica para o Filer Cal



**Figura 14 - Variação da Fluência da Mistura Asfáltica para o Filer Cimento**



**Figura 15 - Variação da Fluência da Mistura Asfáltica para o Filer Resíduo**

As (Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16) apresentam os valores médios obtidos para a fluência, com respectivas medidas de variabilidade, dispersões em torno das médias, representada pelos desvios-padrão.



Tabela 14 - Valores Médios de Fluência com suas Variabilidades "Cal"

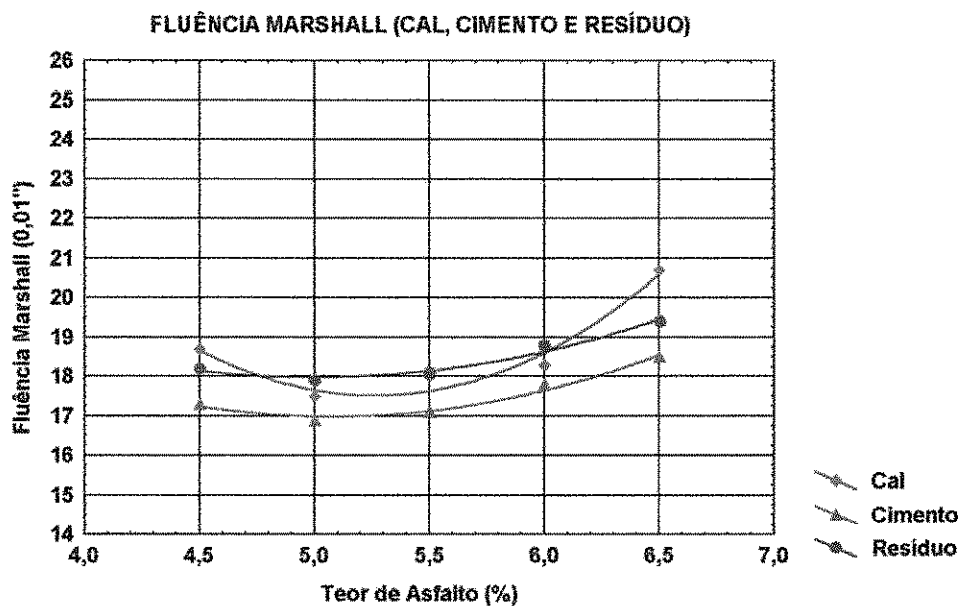
	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	18,70000	0,366667	17,87054	19,52946	10
2	5,0	17,50000	0,341565	16,72733	18,27267	10
3	5,5	18,00000	0,298142	17,32556	18,67444	10
4	6,0	18,30000	0,746101	16,61220	19,98780	10
5	6,5	20,70000	0,538516	19,48179	21,91821	10

Tabela 15 - Valores Médios de Fluência com suas Variabilidades "Cimento"

	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	17,30000	0,366667	16,47054	18,12946	10
2	5,0	16,90000	0,276887	16,27364	17,52636	10
3	5,5	17,10000	0,378594	16,24356	17,95644	10
4	6,0	17,80000	0,573488	16,50268	19,09732	10
5	6,5	18,50000	,307318	17,80480	19,19520	10

Tabela 16 - Valores Médios de Fluência com suas Variabilidades "Resíduo"

	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	18,20000	0,249444	17,63572	18,76428	10
2	5,0	17,90000	0,433333	16,91973	18,88027	10
3	5,5	18,10000	0,314466	17,38863	18,81137	10
4	6,0	18,80000	0,359011	17,98786	19,61214	10
5	6,5	19,40000	0,339935	18,63101	20,16899	10



**Figura 16 - Tendências das Curvas de Ajustes para Variação da Fluência "Fileres Cal, Cimento e Resíduo"**

Conforme exigências do método de ensaio DNER ME 43-64 a fluência desejada para misturas asfálticas deve estar dentro do intervalo estabelecido (8 a 18). A cal apresentou dispersões para os seus valores médios de fluência, porém o intervalo de 17,32 a 18,67, com um nível de significância de 5%, ficou no intervalo preconizado pelo DNER (Figura 16 e Tabela 14). Para o cimento Portland, os valores obtidos de fluência situaram-se dentre os limites acima citados. Em geral, o comportamento da mistura asfáltica com o filer cimento, representados pela fluência, qualitativamente, foi inferior ao verificado com a cal e semelhante ao observado pela mistura asfáltica com o filer resíduo em termos de tendências (Figura 16).

#### 5.2.4 Relação Betume - Vazios

As (Figura 17, Figura 18, Figura 19) apresentam gráficos as variações da relação betume-vazios das misturas asfálticas contendo os fileres cal, cimento e resíduo respectivamente.

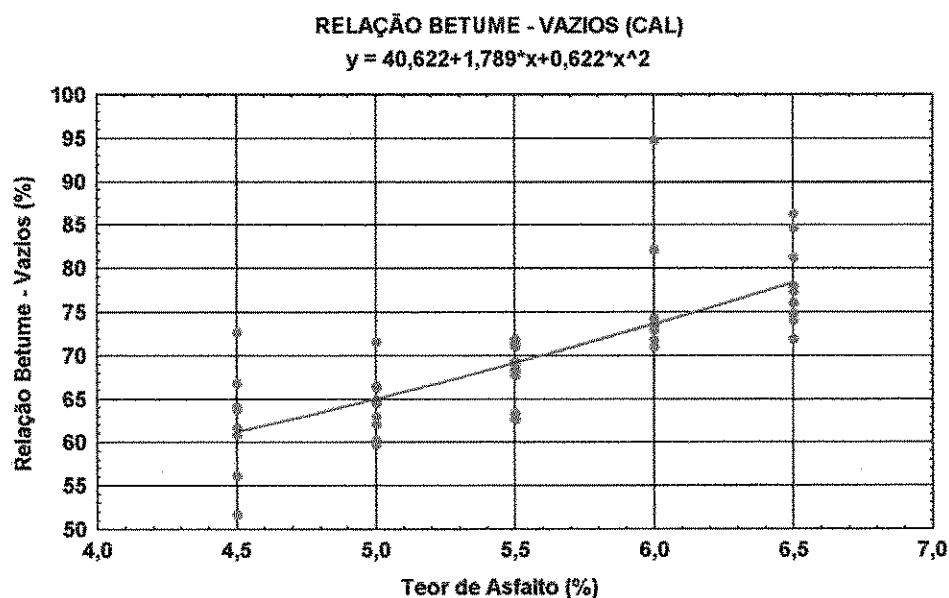
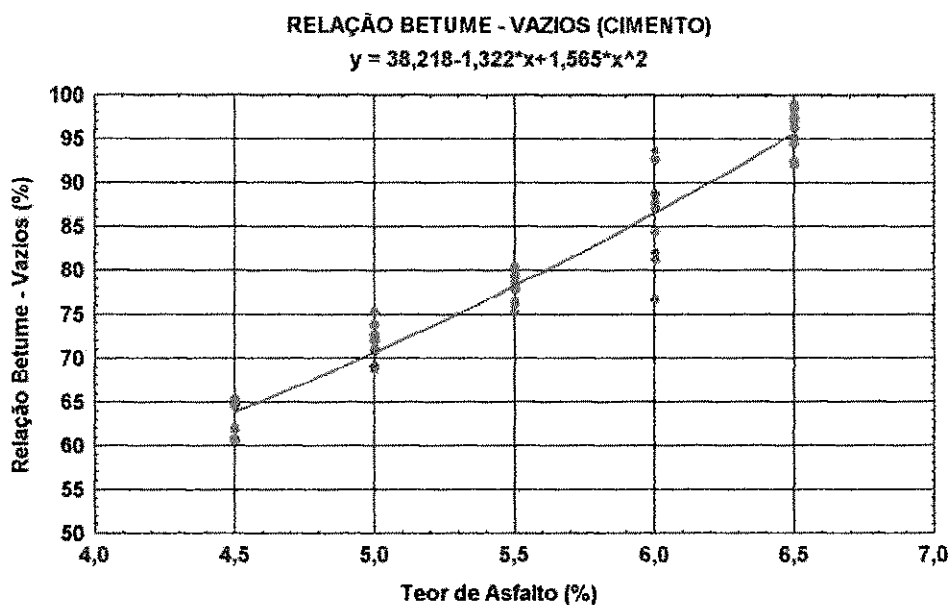
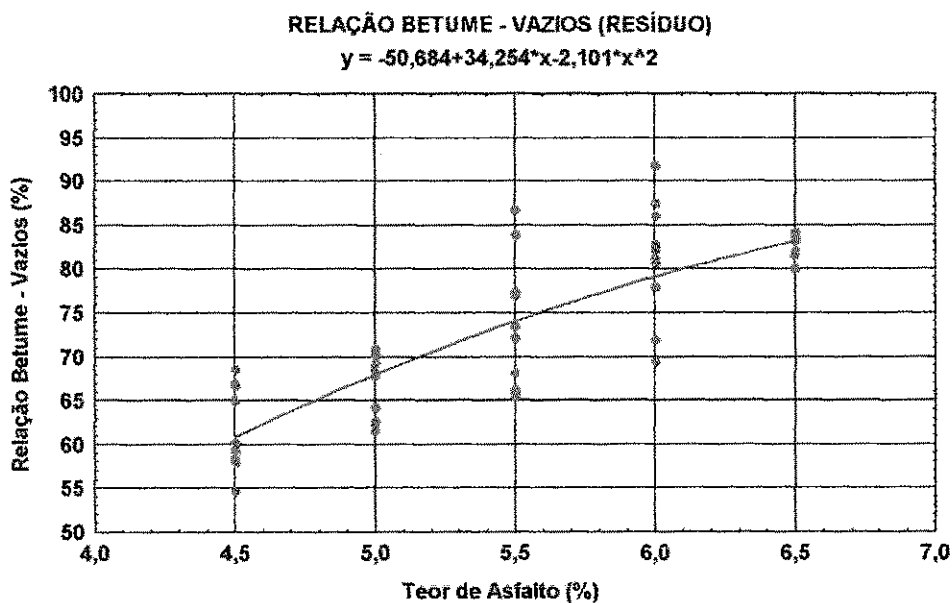


Figura 17 - Variação da Relação Betume-Vazios da Mistura Asfáltica para o Filler Cal



**Figura 18 - Variação da Relação Betume-Vazios da Mistura Asfáltica para o Filer Cimento**



**Figura 19 - Variação da Relação Betume-Vazios da Mistura Asfáltica para o Filer Resíduo**

As (Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19) apresentam os valores médios obtidos para a relação betume-vazios com respectivas dispersões, desvios-padrão das médias.

**Tabela 17 - Valores Médios da Relação Betume-Vazios com suas Variabilidades "Cal"**

	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	61,79400	1,903895	57,48709	66,10091	10
2	5,0	64,38500	1,087859	61,92409	66,84591	10
3	5,5	68,31900	0,992753	66,07324	70,56476	10
4	6,0	75,75800	2,343730	70,45611	81,05989	10
5	6,5	77,68500	1,586993	74,09497	81,27503	10

**Tabela 18 - Valores Médios da Relação Betume-Vazios com suas Variabilidades "Cimento"**

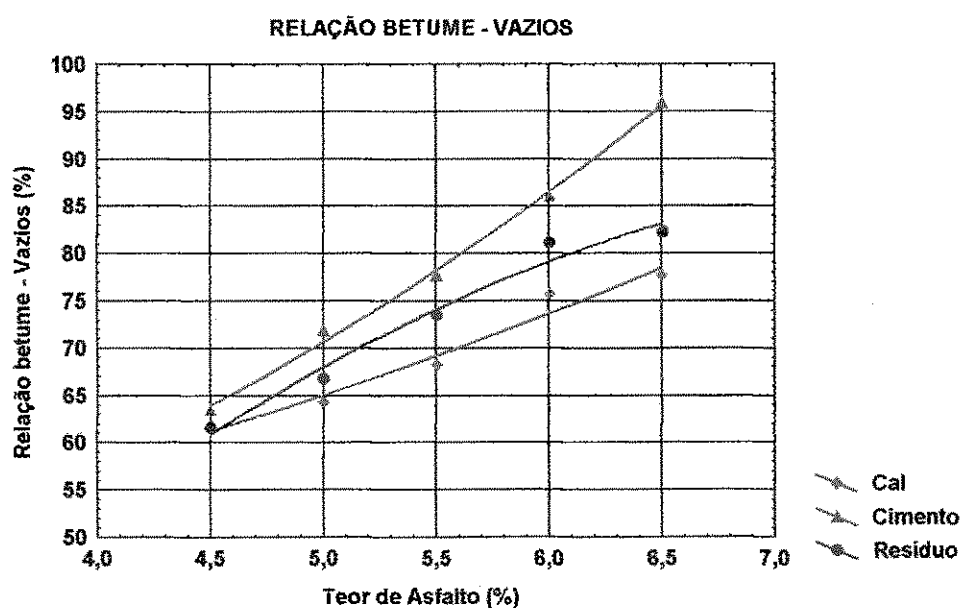
	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	63,47200	0,580013	62,15992	64,78408	10
2	5,0	71,86000	0,626152	70,44354	73,27645	10
3	5,5	77,74900	0,534737	76,53934	78,95866	10
4	6,0	86,17800	1,647898	82,45019	89,90581	10
5	6,5	96,03400	0,751158	94,33476	97,73324	10

**Tabela 19 - Valores Médios da Relação Betume-Vazios com suas Variabilidades "Resíduo"**

	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	63,47200	0,580013	62,15992	64,78408	10
2	5,0	71,86000	0,626152	70,44354	73,27645	10
3	5,5	77,74900	0,534737	76,53934	78,95866	10
4	6,0	86,17800	1,647898	82,45019	89,90581	10
5	6,5	96,03400	0,751158	94,33476	97,73324	10

O método de ensaio DNER ME 43-64 sugere que sejam observados os limites mínimos e máximos, de  $75 \leq RBV \leq 82$ , para aceitação da relação betume-vazios. Ao observar a Figura 20 e as (Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19), pode-se inferir que os resultados obtidos para as misturas com os fileres cal, cimento e resíduo, apresentaram pequenas dispersões nos valores estimados sobre média. Para a cal o

teor de cimento asfáltico, considerando a RBV, foi de 6,5%. Para o cimento Portland o conjunto de valores estimados sugerem teor de cimento asfáltico de 5,5%. O resíduo apresentou baixa dispersão com o teor ótimo de cimento asfáltico de 6% (Tabela 19 e Figura 20).



**Figura 20 - Tendências das Curvas de Ajustes para Variação da Relação Betume-Vazios "Fileres Cal, Cimento e Resíduo"**

### 5.2.5 Volume de Vazios

As (Figura 21, Figura 22, Figura 23) apresentam gráficos das variações do teor de vazios das misturas asfálticas para os fileres cal, cimento e resíduo, respectivamente.

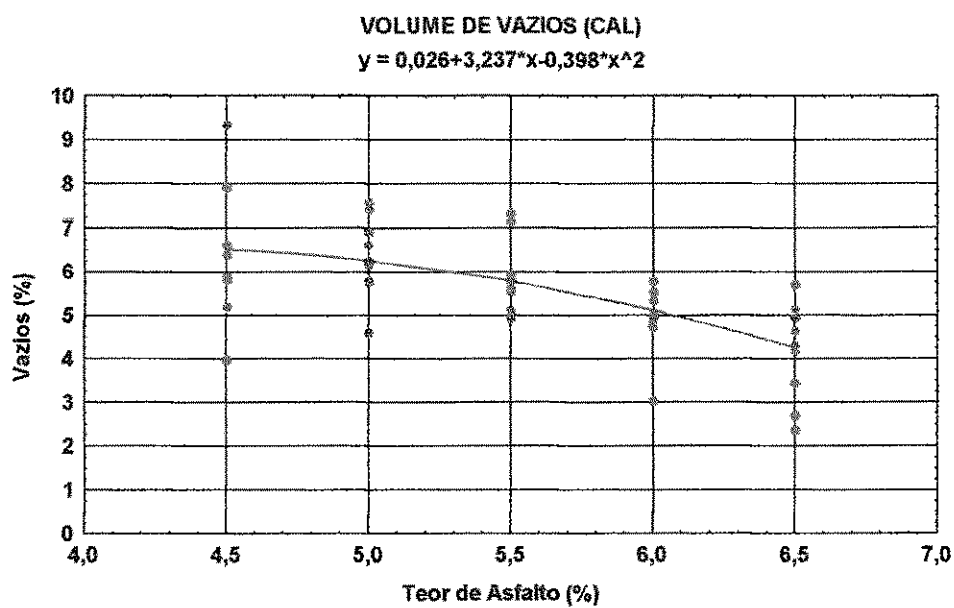


Figura 21 - Variação do Volume de Vazios da Mistura Asfáltica para o Filer Cal

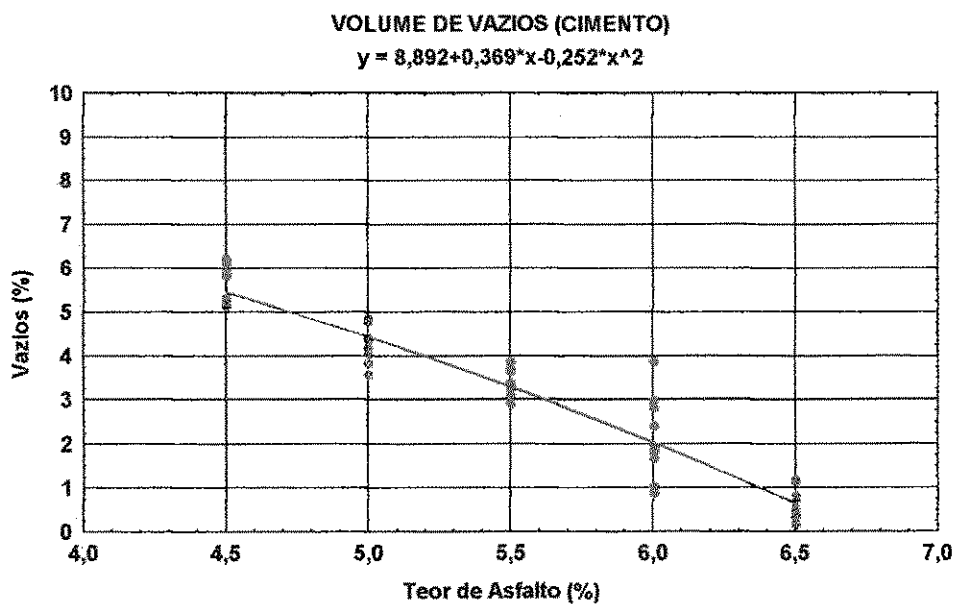
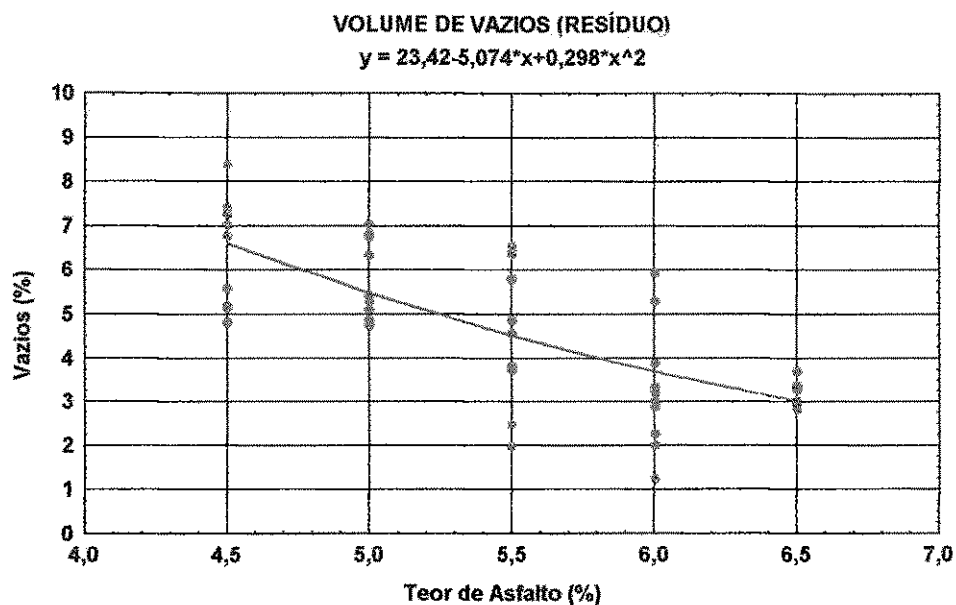


Figura 22 – Variação do Volume de Vazios da Mistura Asfáltica para o Filer Cimento



**Figura 23 - Variação do Volume de Vazios da Mistura Asfáltica para o Filer Resíduo**

As (Tabela 20, Tabela 21, Tabela 22) apresentam os valores médios estimados para os vazios do agregado mineral com respectivas dispersões, desvios padrão das médias.

**Tabela 20 - Valores Médios Volume de Vazios do com suas Variabilidades "CaI"**

	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	6,493000	0,489201	5,386350	7,599650	10
2	5,0	6,334000	0,275077	5,711734	6,956266	10
3	5,5	5,826000	0,258406	5,241445	6,410556	10
4	6,0	5,005000	0,240066	4,461933	5,548067	10
5	6,5	4,306000	0,364927	3,480478	5,131522	10



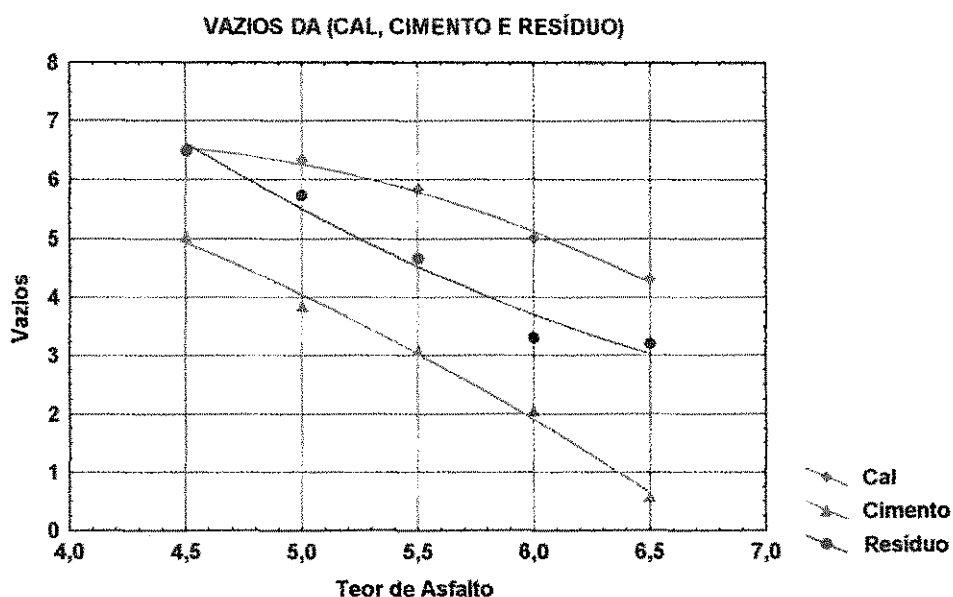
Tabela 21 - Valores Médios Volume Vazios com suas Variabilidades "Cimento"

	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	6,493000	0,489201	5,386350	7,599650	10
2	5,0	6,334000	0,275077	5,711734	6,956266	10
3	5,5	5,826000	0,258406	5,241445	6,410556	10
4	6,0	5,005000	0,240066	4,461933	5,548067	10
5	6,5	4,306000	0,364927	3,480478	5,131522	10

Tabela 22 - Valores Médios Volume de Vazios com suas Variabilidades "Resíduo"

	Teor	Média	Desvio	-95,00%	+95,00%	n
1	4,5	6,494000	0,381340	5,631348	7,356652	10
2	5,0	5,724000	0,290292	5,067314	6,380686	10
3	5,5	4,667000	0,521660	3,486923	5,847077	10
4	6,0	3,316000	0,452276	2,292880	4,339120	10
5	6,5	3,215000	0,081694	3,030196	3,399804	10

Os limites mínimo e máximo do percentual de vazios sugeridos pelo DNER (ME 43/64) são de 3% e 5% respectivamente. Observa-se que para a mistura asfáltica, na qual foram utilizados os fileres cal e cimento Portland, o teor de cimento asfáltico estimado, que correspondeu ao que preconiza o DNER, foram de 6,5 e 5,5%, respectivamente (Figura 24, Tabela 20 e Tabela 21). A mistura asfáltica, que tem como filer o resíduo, enquadrou-se dentro dos limites sugeridos pelo DNER com um teor de 6% de cimento asfáltico (Figura 24 e Tabela 22).



**Figura 24 - Tendências das Curvas de Ajustes para Variação do Volume de Vazios "Fileres Cal, Cimento e Resíduo"**

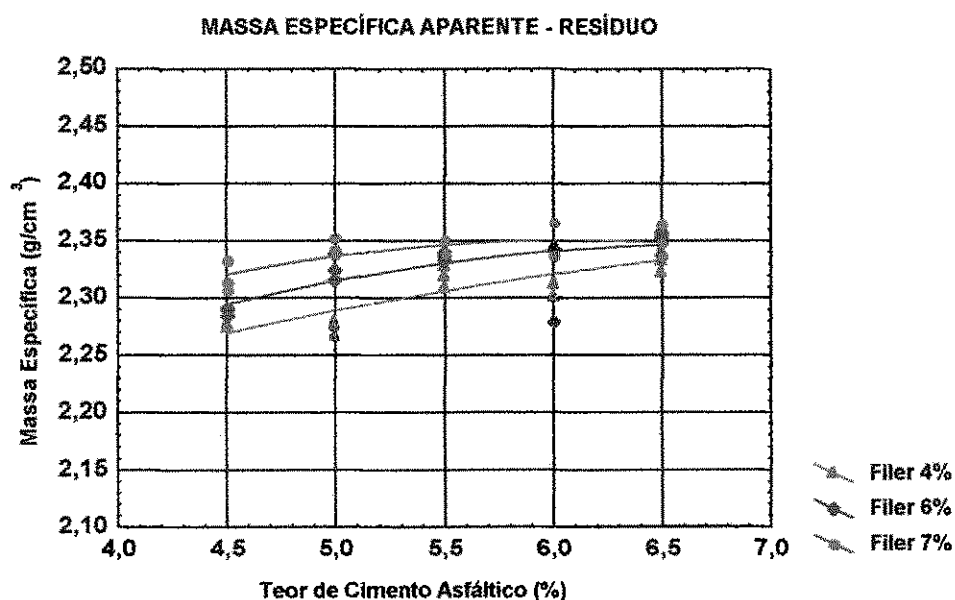
### 5.3 FASE 03 – "VARIABILIDADE DO TEOR DE FILER E SEUS EFEITOS"

Na etapa anterior de ensaios trabalhou-se com uma mistura asfáltica composta com 45% de agregado graúdo, 50% de agregado miúdo e 5% de filer. Nesta fase, procurou-se observar o comportamento da mistura asfáltica com diferentes percentuais de filer (resíduo). Trabalhou-se com os percentuais de 4%, 6% e 7%, valores em torno do percentual de 5% da fase 02. O critério adotado para definição desses valores foi baseado nos resultados obtidos em estudos realizados por RUIZ (1959), em que, o autor descreve: "...num sistema filer-asfalto, se aumentarmos a quantidade de filer, as partículas tendem a aproximar-se, diminuindo os poros, tendendo a formar uma estrutura que vai tornar o mástique rígido, tornando frágil e quebradiço (concentração crítica) ".

A seguir, serão descritos e apresentados os parâmetros obtidos, através dos resultados do ensaio Marshall, da fase 03:

### 5.3.1 Massa Específica Aparente

A Figura 25 apresenta gráfico da massa específica aparente das misturas asfálticas para o filer resíduo, com os teores de 4, 6 e 7%.



**Figura 25 - Variação da Massa Específica Aparente das Misturas Asfálticas para os Teores 4%, 6% e 7% do Filer Resíduo**

Ao diminuir o percentual de filer de resíduo para 4%, observou-se uma diminuição nos valores da massa específica. Ao aumentar este percentual para 6% e 7% houve um incremento nos valores do parâmetro analisado.

### 5.3.2 Estabilidade Marshall

A estabilidade foi influenciada com a diminuição no percentual de fíler para 4%. Na fase 02, a estabilidade máxima da mistura, com 5% de fíler, foi estimada para um teor de cimento asfáltico de 6%. Porém, ao acrescentar a taxa de fíler na mistura para 6%, observou-se que o valor ótimo para estabilidade corresponde a um teor de cimento asfáltico de 5,5%. Com aumento no percentual de fíler para 7%, o valor da estabilidade estimada, para o teor ótimo de cimento asfáltico, decresceu (Figura 26).

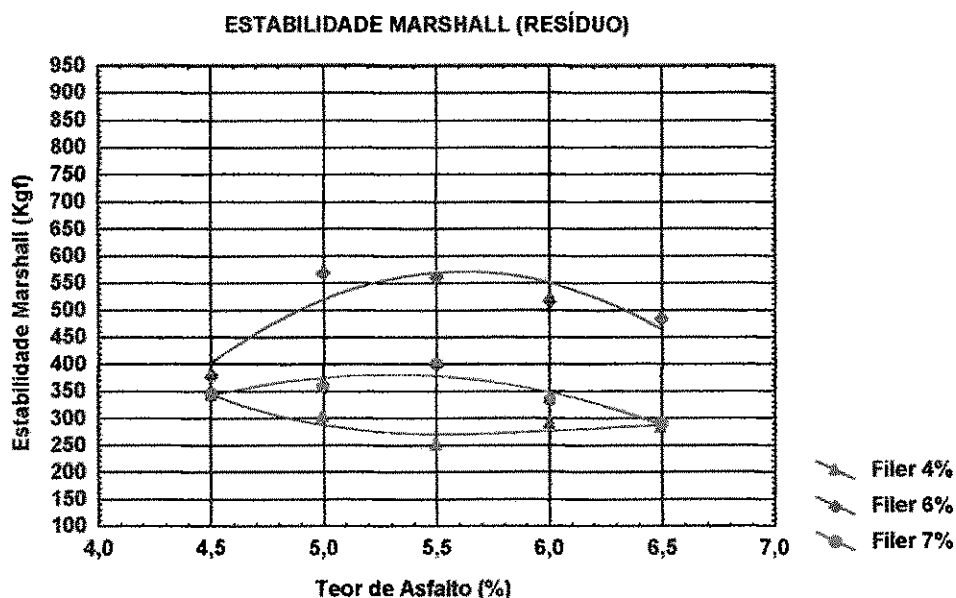
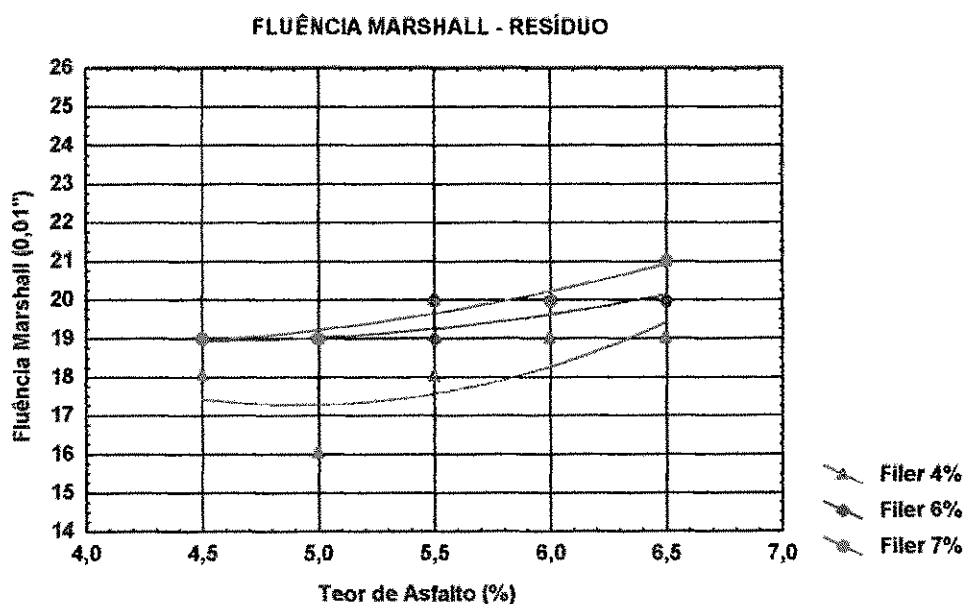


Figura 26 - Variação da Estabilidade das Misturas Asfálticas para os Teores 4%, 6% e 7% do Fíler Resíduo

### 5.3.3 Fluência Marshall

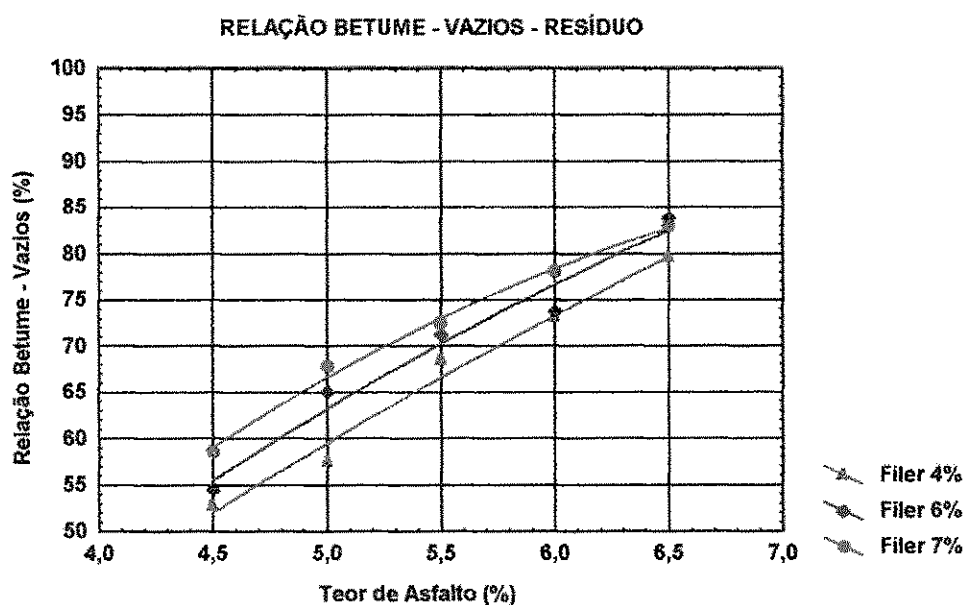
Este parâmetro só foi influenciado quando alterado o percentual de filer para 4%. Observou-se um decréscimo nos valores obtidos, porém, ao aumentar para 6% e 7%, não houve influência significativa. Vale ressaltar, que para todos os teores de ligantes e percentuais de filer analisados os valores encontram-se dentro dos limites estabelecidos pelo DNER (ME 43/64) (Figura 27).



**Figura 27 - Variação da Fluência das Misturas Asfálticas para os Teores 4%, 6% e 7% do Filer Resíduo**

### 5.3.4 Relação Betume – Vazios

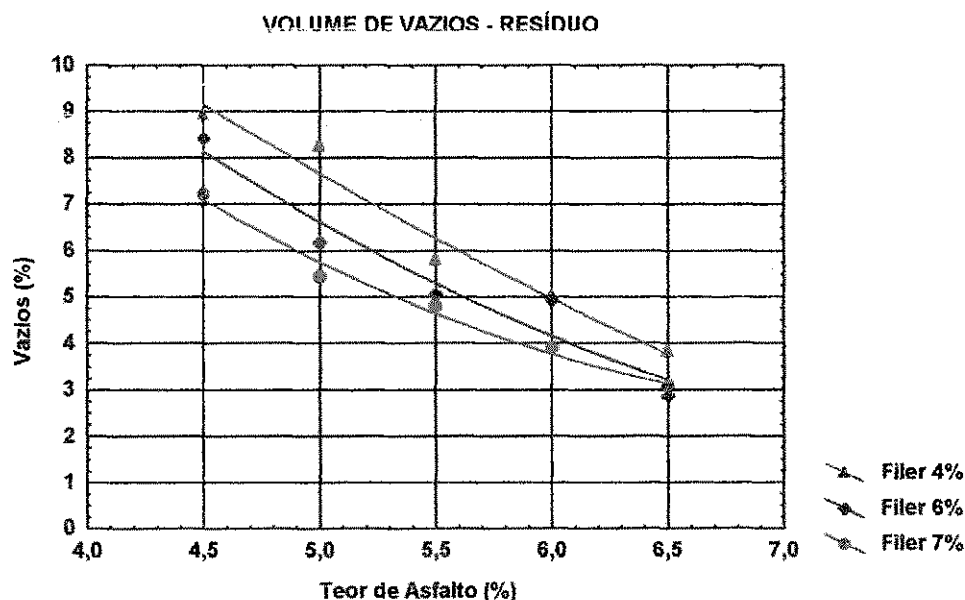
O parâmetro RBV foi influenciado pela variação no percentual do filer resíduo. Com a diminuição deste, houve uma redução nos valores estimados para o respectivo parâmetro. Ao aumentar tal percentual, observou-se um incremento gradativo do RBV. Para o percentual de filer de 7%, o comportamento da mistura, expresso pela tendência da curva de ajuste, foi semelhante com a tendência verificada na curva de ajuste para o percentual de filer de 5% (Figura 20 e Figura 28).



**Figura 28 - Variação da Relação Betume-Vazios das Misturas Asfálticas para os Teores 4%, 6% e 7% do Filer Resíduo**

### 5.3.5 Volume de Vazios

Em análise ao gráfico lançados na Figura 29, observa-se uma influência da modificação do percentual de filler na mistura asfáltica. Ao diminuir tal percentual, os vazios da mistura aumentaram, sem no entanto, extrapolar os limites estabelecidos pelo método de ensaios do DNER ME (43-64), que é de  $(3 \leq V_v \leq 5)$ , para o teor de cimento asfáltico de 6%.



**Figura 29 - Variação do Volume de Vazios das Misturas Asfálticas para os Teores 4%, 6% e 7% do Filler Resíduo**

As (Tabela 23 a Tabela 37) apresentam os valores médios estimados com respectivas dispersões, desvios-padrão das médias, dos parâmetros obtidos a partir do ensaio Marshall das misturas asfáltica com percentuais de filler "resíduo" de 4%, 6% e 7%. Observa-se que a variabilidade estimada das médias para todos os parâmetros, apesar da pouca quantidade de corpos de prova (03 corpos de prova por teor), esteve sempre abaixo dos valores estimados na fase 02.

**Tabela 23 - Valores Médios de Massa Específica com suas Variabilidades para Teor de 4% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	2,275115	0,000935	2,271091	2,279138	3
2	5,0	2,274651	0,003584	2,259230	2,290073	3
3	5,5	2,318731	0,005502	2,295056	2,342405	3
4	6,0	2,319704	0,012972	2,263889	2,375519	3
5	6,5	2,332054	0,004785	2,311465	2,352642	3

**Tabela 24 - Valores Médios de Massa Específica com suas Variabilidades para Teor de 6% "Resíduo"**

	<i>Toer</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	2,288149	0,002230	2,278556	2,297742	3
2	5,0	2,326576	0,006499	2,298614	2,354538	3
3	5,5	2,336201	0,001879	2,328116	2,344285	3
4	6,0	2,322305	0,021191	2,231126	2,413485	3
5	6,5	2,354845	0,001280	2,349337	2,360354	3

**Tabela 25 - Valores Médios de Massa Específica com suas Variabilidades para Teor de 7% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	2,317834	0,007836	2,284117	2,351551	3
2	5,0	2,344238	0,003858	2,327640	2,360836	3
3	5,5	2,342987	0,003789	2,326682	2,359292	3
4	6,0	2,347648	0,009592	2,306377	2,388919	3
5	6,5	2,350464	0,008108	2,315577	2,385351	3

**Tabela 26 - Valores Médios de Fluência com suas Variabilidades para o Teor de 4% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	18,00000	0,577350	15,51586	20,48414	3
2	5,0	16,33333	0,333333	14,89912	17,76755	3
3	5,5	18,00000	1,000000	13,69735	22,30265	3
4	6,0	18,66667	0,333333	17,23245	20,10088	3
5	6,5	19,33333	0,333333	17,89912	20,76755	3

**Tabela 27 - Valores Médios de Fluência com suas Variabilidades para o Teor de 6% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	18,66667	0,333333	17,23245	20,10088	3
2	5,0	19,33333	0,333333	17,89912	20,76755	3
3	5,5	19,33333	0,333333	17,89912	20,76755	3
4	6,0	19,66667	0,333333	18,23245	21,10088	3
5	6,5	20,00000	0,333333	18,34521	21,21354	3



**Tabela 28 - Valores Médios de Fluência com suas Variabilidades para o Teor de 7% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	18,66667	0,333333	17,23245	20,10088	3
2	5,0	19,00000	0,577350	16,51586	21,48414	3
3	5,5	19,66667	0,881917	15,87208	23,46125	3
4	6,0	20,00000	0,577350	17,51586	22,48414	3
5	6,5	20,66667	0,333333	19,23245	22,10088	3

**Tabela 29 - Valores Médios da Relação Betume-Vazios com suas Variabilidades para o Teor de 4% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	52,90068	0,114749	52,40696	53,39441	3
2	5,0	57,43841	0,464076	55,44165	59,43517	3
3	5,5	68,39585	0,887274	64,57822	72,21349	3
4	6,0	73,14253	2,232573	63,53654	82,74851	3
5	6,5	79,54858	0,869806	75,80611	83,29105	3

**Tabela 30 - Valores Médios da Relação Betume-Vazios com suas Variabilidades para o Teor de 6% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	54,54013	0,286281	53,30836	55,77189	3
2	5,0	64,91916	1,038115	60,45251	69,38581	3
3	5,5	71,29508	0,324262	69,89990	72,69027	3
4	6,0	73,75231	3,478270	58,78653	88,71810	3
5	6,5	83,87895	0,255036	82,78162	84,97629	3

**Tabela 31 - Valores Médios da Relação Betume-Vazios com suas Variabilidades para o Teor de 7% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	58,62833	1,147501	53,69103	63,56562	3
2	5,0	67,80909	0,662445	64,95882	70,65936	3
3	5,5	72,49113	0,677193	69,57740	75,40486	3
4	6,0	78,07306	1,836149	70,17275	85,97337	3
5	6,5	83,06281	1,595122	76,19955	89,92607	3

**Tabela 32 - Valores Médios Volume Vazios com suas Variabilidades para o Teor de 4% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	8,936676	0,037429	8,775634	9,097718	3
2	5,0	8,264335	0,144550	7,642386	8,886284	3
3	5,5	5,782360	0,223577	4,820384	6,744336	3
4	6,0	5,038232	0,531046	2,753326	7,323139	3
5	6,5	3,824348	0,197338	2,975270	4,673426	3

**Tabela 33 - Valores Médios Volume de Vazios com suas Variabilidades para o Teor de 6% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	8,414955	0,089242	8,030978	8,798932	3
2	5,0	6,170249	0,262091	5,042561	7,297937	3
3	5,5	5,072488	0,076348	4,743990	5,400986	3
4	6,0	4,931742	0,867513	1,199137	8,664347	3
5	6,5	2,884408	0,052797	2,657241	3,111574	3

**Tabela 34 - Valores Médios Volume de Vazios com suas Variabilidades para o Teor de 7% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	7,226818	0,313656	5,877268	8,576369	3
2	5,0	5,457947	0,155575	4,788561	6,127334	3
3	5,5	4,796741	0,153980	4,134219	5,459264	3
4	6,0	3,894290	0,392671	2,204762	5,583819	3
5	6,5	3,065086	0,334386	1,626337	4,503835	3

**Tabela 35 - Valores Médios da Estabilidade Marshall com suas Variabilidades para o Teor de 4% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	342,5250	4,97372	321,1248	363,9252	3
2	5,0	300,7013	15,91256	232,2351	369,1675	3
3	5,5	352,0447	7,65759	319,0967	384,9926	3
4	6,0	279,5540	8,79300	241,7208	317,3872	3
5	6,5	284,7610	15,40335	218,4857	351,0363	3

**Tabela 36 - Valores Médios da Estabilidade Marshall com suas Variabilidades para o Teor de 6% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	553,2867	15,90980	484,8323	621,7410	3
2	5,0	568,3200	5,20771	545,9130	590,7270	3
3	5,5	560,0767	13,17816	503,3756	616,7777	3
4	6,0	516,2967	26,19674	403,5812	629,0121	3
5	6,5	483,5267	9,26373	443,6680	523,3853	3

**Tabela 37 - Valores Médios da Estabilidade Marshall com suas Variabilidades para o Teor de 7% "Resíduo"**

	<i>Teor</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>-95,00%</i>	<i>+95,00%</i>	<i>n</i>
1	4,5	345,8050	7,95577	311,5741	380,0359	3
2	5,0	360,8400	10,41540	316,0261	405,6539	3
3	5,5	400,7400	16,18757	331,0905	470,3895	3
4	6,0	334,6833	9,17609	295,2018	374,1649	3
5	6,5	290,9677	20,38819	203,2444	378,6910	3

#### 5.4 COMBINAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE UM PROJETO ESTRUTURAL SEGUNDO METODOLOGIA SUPERPAVE

Para selecionar o projeto estrutural do agregado, sugere-se que o projetista estabeleça misturas experimentais combinando matematicamente a granulometria individual dos materiais em uma única granulometria, tais tentativas consiste na variação das porcentagens dos materiais envolvidos (agregados e/ou filer) para obter misturas granulométricas que atendam a determinados requisitos exigidos para uma mistura particular na metodologia SUPERPAVE. (SHRP, 1994)

Na Figura 30 estão inseridos a distribuição granulométrica de quatro misturas asfálticas com variação no teor de filer (4, 5, 6, 7%) onde testou-se seu enquadramento nos moldes estabelecidos pela metodologia SUPERPAVE que aconselha utilizar uma mistura definida entre os *pontos de controle*, fora da área contomada (preferencialmente acima) pelos limites estabelecidos para a *zona de restrição* e acima da linha de *densidade máxima*.

**Distribuição Granulométrica (Fase 3)**  
**Adaptada a Metodologia SUPERPAVE - Diâmetro Nominal 12,5 mm**

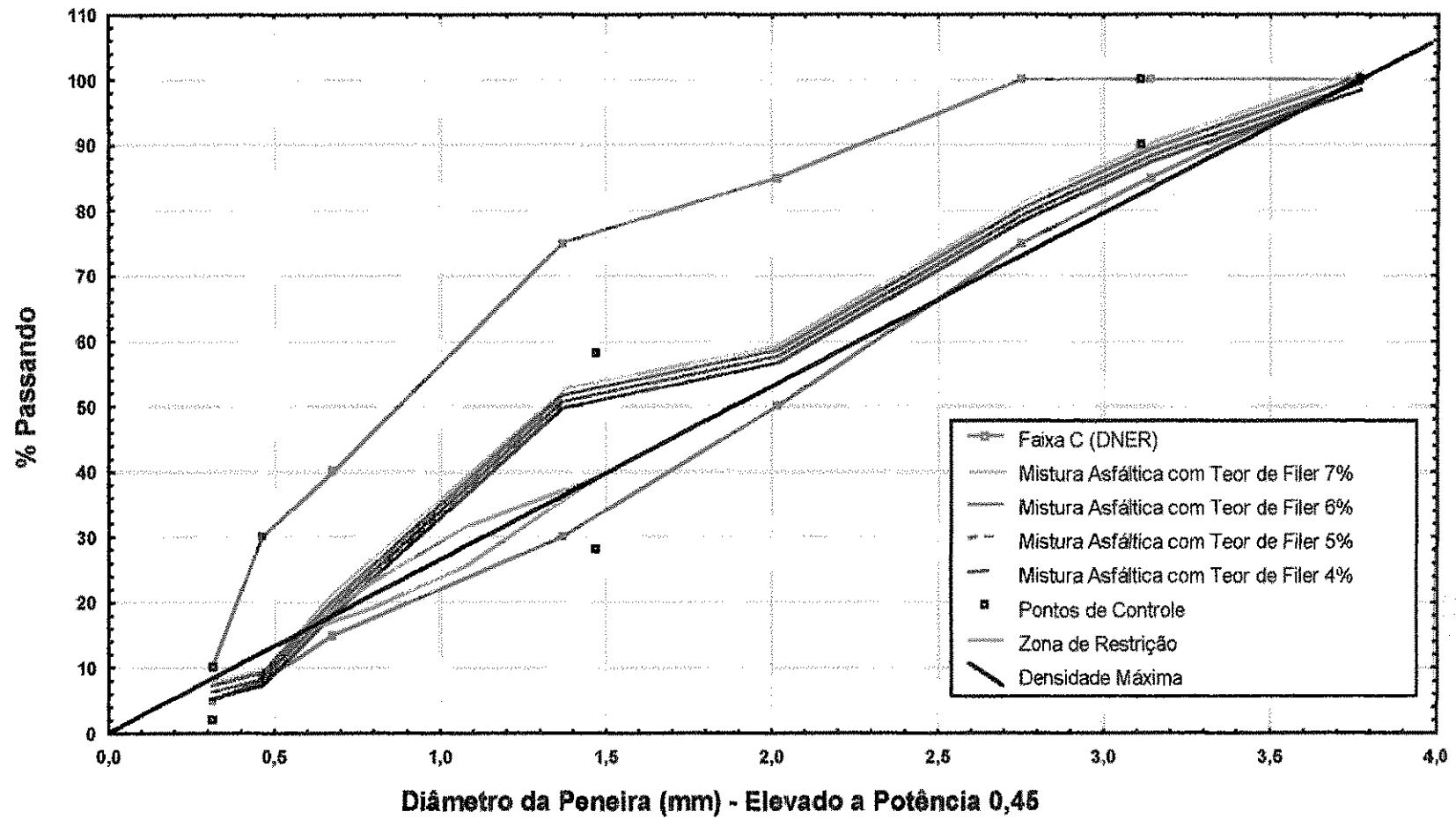


Figura 30 – Distribuição Granulométrica (Fase 3) – Metodologia SUPERPAVE

## **CAPÍTULO 6**

---

### **6. CONCLUSÕES**

A massa específica aparente da mistura asfáltica, que tem como filer o resíduo, apresentou valores próximos aos observados ou obtidos com a mistura asfáltica composta com o filer cal.

A estabilidade Marshall mínima, preconizada pelo DNER, foi alcançada para as três misturas analisadas, sendo que, a mistura que tem como filer a cal apresentou um valor maior de estabilidade quando comparado com as outras misturas.

A mistura asfáltica composta com o filer do resíduo apresentou valores de estabilidade compatíveis com os valores estimados para mistura asfáltica com o filer cal. Esse fato não se repetiu ou ocorreu com a mistura que tem como filer o cimento Portland. Para estes, os valores de estabilidade são inferiores.

Na análise da fluência, para as três misturas asfálticas, os resultados indicam comportamento satisfatório.

Na relação betume – vazios a mistura que tem como filer o cimento Portland apresentou limite mínimo estabelecido com um teor de asfalto de 5%, enquanto que a

mistura que tem como filer o resíduo, este limite foi atingido com 5,5% de cimento asfáltico e a que tem como filer a cal com 6% de cimento asfáltico.

O conhecimento do padrão de variabilidade dos resultados de um ensaio, é de fundamental importância para o estabelecimento de níveis de confiança para estes resultados.

As dispersões verificadas nos ensaios da fase 02 podem ser explicadas ao analisarmos algumas fontes de erros: a) tempo de mistura dos diversos materiais envolvidos insuficiente para obtenção de misturas realmente homogênea; b) compactação ineficiente e em desigualdade de condições; c) controle ineficiente de temperatura dos materiais envolvidos.

Os resultados obtidos indicam para condição de aceitar a hipótese: *"é possível utilizarmos o resíduo proveniente da serragem dos blocos de rochas graníticas, como filer em concretos asfálticos"*.

## **CAPÍTULO 7**

---

### **7. SUGESTÕES**

Ainda são necessárias observações e pesquisas objetivando um melhor conhecimento do resíduo da serragem do granito quando utilizado como material de enchimento em misturas asfálticas. Para isso, sugere-se:

- a) realizar novos ensaios aumentando o grau de compactação (75 golpes);
- b) verificar o comportamento da mistura asfáltica tendo como filer o resíduo, submetendo-a a ensaios dinâmicos;
- c) verificar o comportamento da mistura asfáltica tendo como filer o resíduo, como corpos de provas confeccionados com o compactador giratório;
- d) realizar ensaios com corpos de prova após imersão em água;
- e) executar e monitoramento de um trecho experimental;
- f) dosagem racional de um concreto asfáltico projetada para um determinado nível de resistência à tração e módulo de resiliência

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

BODI, J., BRITO F. & ALMEIDA, S. (1995), Utilização de Entulho de Construção Civil Reciclado na Pavimentação Urbana, 29ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Cuiabá MT, vol 3

BONNOT, J (1984), Essais Mecaniques Pratiques de Formulation et de Contrôle des Enrobés Bitumineux: Rapport Général . Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, França

BONNOT, J (1981), Étude Comparée des Essais de Module Complexe et de Resistance à la Fatigue des Enrobés Bitumineux – Bulletin LCPC France

BUZATTI, Dauro José (1999), A Cal Usada como Filer no CBUQ Enfoque Mecânico e de Custo, Belo Horizonte – MG

COELHO, Vladimir (1992), Considerações sobre o Método Marshall, 26ª Reunião Anual de Pavimentação, Aracaju – SE

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1994), DNER-ME 003/94 - Materiais Betuminosos - determinação da penetração

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1994), DNER-ME 004/94 - Materiais betuminosos - determinação da viscosidade



DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1994), DNER-ME  
035/94 - Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles"

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1964), DNER-ME  
043/64 - Ensaio Marshall para misturas betuminosas

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1994), DNER-ME  
054/94 - Equivalente de areia

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1994), DNER-ME  
083/94 - Agregados - Análise Granulométrica

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1994), DNER-ME  
148/94 - Material betuminoso - determinação dos pontos de fulgor e combustão

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1995) DNER-ME  
084/95 - Agregado miúdo - determinação de densidade real

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1994), DNER-ME  
085/94 - Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real.

FARIAS, Carlos Eugênio Gomes, (1995). Mercado Nacional. *Séries Estudos Econômicos Sobre Rochas*, vol. 2, Fortaleza.

FREIRE, A. S.; MOTTA, J. F. M. (1995), Rochas de Qualidade, julho/agosto, Edição  
123

GIUNTON, M. (1993), Problemática de Variação do Impacto Ambiental na Indústria de Transformadora de Pedras Naturais. Rochas e Equipamentos, Revista de

Informação Técnica de Mármore e Granitos, Pedras Naturais, Máquinas e Equipamentos, vol. 31

GOETZ, W. H. & WOOD, L. E. (1960), Bituminous Materials and Mixtures. In: WOODS, Kenneth B. , Highway Engineering Handbook. N. York, EUA, McGraw-Hill Book Company

GONÇALVES, J. V., MAZONI, S. A. & SCHMIDT, L. A. (1986), Solo Estabilizado com Cinza Volante e Cal, uma Experiência no Rio Grande do Sul, 21ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis, SC, vol 1

GUAZELLI, José Camargo (1985), Produção de Concreto Asfáltico Usinado a Quente, In: 20ª Reunião Anual de Pavimentação, Fortaleza-Ce, 1985, V. II

HEMPEL, C. G. (1981), Filosofia da Ciência Natural. Trad. por P. S. ROCHA. 3ª Edição. Rio de Janeiro, ZAHAR Editores.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineralogia. (1992) "Mineração e Meio Ambiente. Brasília, DF. Comissão Técnica de Meio Ambiente/Grupo de Trabalho e Redação

LEITE, L. F. M. & TONIAL, I. (1994), Qualidade dos Cimentos Asfálticos Brasileiros Segundo Especificações SHAP, In: 12º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro

MACÊDO, José Afonso Gonçalves (1989), Estudo Comparativo das Características físicas e Mecânicas de Agregados Graúdos Convencionais e não Convencionais Visando sua Aplicação em Concreto Betuminoso Usinado a Quente. Campina Grande, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba.

- METCALF, C. T (1959), Use of Marshall Stability Test in Asphalt Paving Mix Design. Washington, D. C., EUA, HRB, Bulletin 234.
- MOLLER, L. M. e BARROS, R. T. V. (1995), Limpeza Pública In: Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios
- MOTTA, J. F. e FREIRE (1995), Potencialidades para o Aproveitamento Econômico do Rejeito de Granito, Rochas de Qualidade, Granitos Mármore e Pedras Ornamentais. EMC Editores Associados Ltda, São Paulo, Edição 123, Julho/Agosto pg. 98-108
- MOTTA L. et all (1992), Aspectos do Comportamento das Misturas Asfálticas, In: 11<sup>o</sup> Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro – RJ
- NIJBOER, L. W. (1948), Plasticity as a Factor in the design of dense bituminous road carpets. Amesterdã, Holanda, Elsevier Publishing Company, Inc.
- PENA José Neto (1998), Tecnologia de Beneficiamento de Rochas Ornamentais, / *Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste*, Pernambuco
- REZENDE, Liliam Ribeiro (1999), Técnicas Alternativas para a Construção de Bases de Pavimentos Rodoviários, Brasília – DF, Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil.
- ROBERT, F. L., KANDHAL, P. S. & BROWN, E. R. (1996), Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, Seond Edition, NAPA Education Foundation lanham, Maryland

- ROCHAS DE QUALIDADE. (1993), Granito, Mármore e Pedras Ornamentais. "Cetemag Desenvolve Equipamentos para Lama Abrasiva". São Paulo. Edição 115, pg 92. Outubro/Novembro/Dezembro
- ROAD RESEARCH LABORATORY RRL (1962), Bituminous Materials in Road Construction, Londres, Inglaterra, Her Majesty's Stationery Office.
- RODRIGUES, John Kennedy Guedes (1998), Pressiômetros Tensões e Deformações em Sub-Bases de Pavimentos Flexíveis. São Carlos-SP, Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo .
- SANTANA, Humberto (1993). Manual de Pré-Misturado a Frio. *IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo)*, Comissão de Asfalto, 1ª Edição, Rio de Janeiro.
- SANTANA, Humberto (1995). Considerações Sobre os Nebulosos Conceitos e Definição de Filler em Misturas Asfálticas. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá – Mato, 1995, Grosso v. 1.
- SCHLOSSER, R. C. J et al (1978). O Uso de Amianto como Filler nas Misturas Betuminosas do Tipo Concreto Asfáltico, *MT-DNER-Instituto de Pesquisa Rodoviária*, Rio de Janeiro.
- SHRP (1994), The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods, and Practices – SHRP Strategic Highway Research Program – National Research Council, Washington, DC
- SILVA, Sérgio Augusto Chagas (1998), Caracterização do Resíduo da Serragem de Blocos de Granito Estudo do Potencial de Aplicação na Fabricação de Argamassa

de Assentamento e de Tijolos de Solo-Cimento. Vitória. Dissertação (Mestrado).  
Universidade Estadual do Espírito Santo

SILVA, E. A., (1994), Uso de escória de Aciária em Pavimentação Viária 28ª Reunião  
Anual de Pavimentação, ABPv, Belo Horizonte MG, vol. 1

STELLING A. J., (1998). Serragem do Granito para fins Ornamentais, *Boletim Técnico  
da Escola Politécnica da USP*, Departamento de Engenharia de Minas. São  
Paulo

VIDAL, Francisco Wilson Hollanda.; STELLING, Antônio Júnior. (1995). A Indústria de  
Rochas Extrativas de Rochas Ornamentais no Ceará - Boletim Técnico da Escola  
Politécnica da USP, São Paulo

WHITE, T. D. (1985), Marshall Procedures for Design and Quality Control of asphalt  
Mixtures. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists

## **ANEXOS**

---

Constam planilhas de cálculos dos ensaios com os parâmetros obtidos pela metodologia Marshall

Fase 01 – "Projeto Piloto"

Fase 02 – "Verificação do Comportamento Mecânico das Misturas Asfálticas"

Fase 03 – "Variabilidade do Teor de Filer e seus Efeitos"

O presente trabalho é constituído de planilhas de cálculos dos ensaios Marshall realizados na pesquisa, com todos os parâmetros (estabilidade, fluência, vazios, massa específica e relação betume-vazio) que serviram de suporte para a confecção dos gráficos do capítulo 5.

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CAL - (APENDICE - FASE 01)**

ATECEL

CCT - DEC - GEOTECNIA

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME - % TOTAL				VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUENCIA
	a	b		NO AR	NA AGUA		APAR.	TEOR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET.	VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	FOR PESO DE AGRE	FOR PESO DE MIST.	d	e	f	h	i	j	k	l	m	n	o	p	r	s			
1	4,5	6,76	1213	675,7	537,5	2,26	2,46	9,96	81,90	8,14	18,10	55,02	8,14	295	572,30	532,24	19		
2	4,5	6,80	1242	669,1	572,5	2,17	2,46	9,57	78,69	11,74	21,31	44,91	11,74	305	591,70	550,28	16		
3	4,5	6,85	1218	673,8	543,7	2,24	2,46	9,88	81,25	8,87	18,75	52,70	8,87	300	582,00	541,26	16		
M	4,5					2,22	2,46					50,88	9,58		541,26	17,00			
4	5,0	6,76	1213	674,6	538,6	2,25	2,44	11,04	81,31	7,65	18,69	59,07	7,65	305	591,70	550,28	17		
5	5,0	6,69	1206	675,4	530,1	2,27	2,44	11,15	82,09	6,77	17,91	62,23	6,77	315	611,10	568,32	18		
6	5,0	6,66	1204	671,4	532,2	2,26	2,44	11,09	81,63	7,28	18,37	60,36	7,28	320	620,80	577,34	15		
M	5,0					2,26	2,44					60,55	7,23		565,32	16,67			
7	5,5	6,58	1202	673,9	528,2	2,28	2,42	12,27	81,72	6,01	18,28	67,12	6,01	320	620,80	583,55	19		
8	5,5	6,60	1196	670,2	525,5	2,28	2,42	12,27	81,70	6,03	18,30	67,04	6,03	320	620,80	583,55	15		
9	5,5	6,52	1197	672,4	524,1	2,28	2,42	12,31	81,97	5,72	18,03	68,28	5,72	315	611,10	586,66	17		
M	5,5					2,28	2,42					67,48	5,92		584,59	17,00			
10	6,0	6,56	1204	677,5	526,1	2,29	2,40	13,46	81,71	4,83	18,29	73,58	4,83	340	659,60	626,62	19		
11	6,0	6,53	1197	673,3	523,5	2,29	2,40	13,45	81,65	4,90	18,35	73,29	4,90	390	756,60	726,34	18		
12	6,0	6,60	1208	680,5	527,0	2,29	2,40	13,48	81,83	4,69	18,17	74,20	4,69	390	756,60	711,20	18		
M	6,0					2,29	2,40					73,69	4,81		688,05	18,33			
13	6,5	6,52	1198	675	522,5	2,29	2,39	14,61	81,42	3,97	18,58	78,61	3,97	350	679,00	638,26	20		
14	6,5	6,50	1199	677,1	521,4	2,30	2,39	14,65	81,66	3,69	18,34	79,87	3,69	380	737,20	707,71	20		
15	6,5	6,48	1187	667,1	519,4	2,28	2,39	14,56	81,15	4,29	18,85	77,24	4,29	370	717,80	696,27	19		
M	6,5					2,29	2,39					78,57	3,98		680,75	19,67			

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CIMENTO - (APÊNDICE - FASE 01)**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/f	-	-	-	100-IJ	100-J	I/L*100	-	-	Kg	Kg	s
1	4,5	6,54	1225,4	684,4	541	2,27	2,49	9,99	80,94	9,07	19,06	52,42	9,07	125	242,50	230,38	19	
2	4,5	6,54	1220,5	675,7	544,8	2,24	2,49	9,88	80,05	10,07	19,95	49,54	10,07	128	248,32	235,90	18	
3	4,5	6,66	1235,9	697,8	538,1	2,30	2,49	10,13	82,07	7,80	17,93	56,51	7,80	123	238,62	221,92	18	
M	4,5					2,27	2,49					52,83	8,98			229,40	18,33	
4	5,0	6,48	1198,1	673,7	524,4	2,28	2,47	11,20	81,21	7,59	18,79	59,61	7,59	145	281,30	272,86	19	
5	5,0	6,55	1202,4	672,2	530,2	2,27	2,47	11,12	80,61	8,27	19,39	57,34	8,27	110	213,40	202,73	19	
6	5,0	6,42	1164,9	645,7	519,2	2,24	2,47	11,00	79,75	9,25	20,25	54,32	9,25	120	232,80	228,14	18	
M	5,0					2,27	2,47					57,09	8,37			234,58	18,67	
7	5,5	6,62	1222,8	681,7	541,1	2,26	2,45	12,19	79,90	7,91	20,10	60,64	7,91	65	126,10	118,53	20	
8	5,5	6,63	1229,5	692,4	537,1	2,29	2,45	12,34	80,94	6,72	19,06	64,76	6,72	185	358,90	337,37	20	
9	5,5	6,50	1195,3	670,7	524,6	2,28	2,45	12,29	80,56	7,15	19,44	63,21	7,15	150	291,00	279,36	18	
M	5,5					2,28	2,45					62,87	7,26			245,09	19,33	
10	6,0	6,70	1220,7	683,8	536,9	2,27	2,44	13,37	79,97	6,66	20,03	66,76	6,66	140	271,60	252,59	20	
11	6,0	6,69	1205,2	683,3	521,9	2,31	2,44	13,58	81,22	5,20	18,78	72,33	5,20	140	271,60	252,59	19	
12	6,0	6,49	1154,6	643,0	511,6	2,26	2,44	13,28	79,38	7,35	20,62	64,37	7,35	155	300,70	291,68	21	
M	6,0					2,28	2,44					67,82	6,40			265,62	20,00	
13	6,5	6,56	1193,5	664,6	528,9	2,26	2,42	14,38	78,94	6,68	21,06	68,30	6,68	130	252,20	239,59	20	
14	6,5	6,50	1201,1	675,8	525,3	2,29	2,42	14,57	79,99	5,44	20,01	72,82	5,44	135	261,90	251,42	21	
15	6,5	6,42	1196,3	675,5	520,8	2,30	2,42	14,64	80,36	5,00	19,64	74,53	5,00	138	267,72	262,37	21	
M	6,5					2,28	2,42					71,88	5,70			251,13	20,67	



**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER RESIDUO - (APÊNDICE - FASE 01)**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	gf				100-I-J	100-J	I/L*100		Kg	Kg	1" / 100	
1		4,5	6,62	1191,2	665,9	525,3	2,27	2,50	10,00	80,76	9,24	19,24	52,00	9,24	320	620,80	583,55	17
2		4,5	6,59	1207,2	676,8	530,4	2,28	2,50	10,04	81,06	8,90	18,94	53,01	8,90	330	640,20	601,79	17
3		4,5	6,52	1203,0	681,1	521,9	2,31	2,50	10,17	82,09	7,74	17,91	56,79	7,74	370	717,80	689,09	17
M		4,5					2,28	2,50					53,93	8,62			624,81	17,00
4		5,0	6,54	1200,6	677,1	523,5	2,29	2,48	11,24	81,25	7,51	18,75	59,96	7,51	325	630,50	598,98	18
5		5,0	6,47	1194,6	674,4	520,2	2,30	2,48	11,26	81,36	7,39	18,64	60,38	7,39	356	690,64	669,92	18
6		5,0	6,53	1203,6	680,8	522,8	2,30	2,48	11,29	81,56	7,15	18,44	61,21	7,15	390	756,60	718,77	17
M		5,0					2,30	2,48					60,52	7,35			662,56	17,67
7		5,5	6,54	1160,0	654,6	505,4	2,30	2,46	12,38	80,89	6,74	19,11	64,75	6,74	370	717,80	681,91	18
8		5,5	6,42	1190,0	672,8	517,2	2,30	2,46	12,41	81,08	6,51	18,92	65,59	6,51	330	640,20	627,40	19
9		5,5	6,46	1190,1	672,6	517,5	2,30	2,46	12,40	81,04	6,56	18,96	65,42	6,56	360	698,40	677,45	18
M		5,5					2,30	2,46					65,25	6,60			662,25	18,33
10		6,0	6,48	1194,5	676,1	518,4	2,30	2,44	13,55	80,77	5,67	19,23	70,50	5,67	330	640,20	620,99	19
11		6,0	6,51	1206,1	683,0	523,1	2,31	2,44	13,56	80,82	5,61	19,18	70,73	5,61	340	659,60	633,22	19
12		6,0	6,54	1203,4	682,3	521,1	2,31	2,44	13,58	80,95	5,46	19,05	71,32	5,46	295	572,30	543,69	19
M		6,0					2,31	2,44					70,85	5,58			599,30	19,00
13		6,5	6,70	1192,0	681,1	510,9	2,33	2,42	14,87	81,35	3,78	18,65	79,73	3,78	280	543,20	505,18	19
14		6,5	6,45	1204,5	686,4	518,1	2,32	2,42	14,82	81,06	4,12	18,94	78,23	4,12	300	582,00	564,54	21
15		6,5	6,40	1183,1	671,6	511,5	2,31	2,42	14,74	80,65	4,61	19,35	76,17	4,61	280	543,20	537,77	20
M		6,5					2,32	2,42					78,05	4,17			535,83	20,00

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CAL (TEOR DE ASFALTO 4,5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	NO AR	NA MISTURA		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET.	VAZIOS		TOTAL	LIDA	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	r	s
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/t	-	-	-	100-I-J	100-J	I/L*100	-	-	Kg	Kg	1" 100
1	4,5	6,87	1180,0	678,4	501,6	2,35	2,50	10,38	83,76	5,86	16,24	63,91	5,86	253	490,82	461,37	19	
2	4,5	6,97	1185,0	678,4	506,6	2,34	2,50	10,32	83,29	6,40	16,71	61,74	6,40	345	669,30	629,14	20	
3	4,5	6,88	1193,0	689,5	503,5	2,37	2,50	10,45	84,36	5,18	15,64	66,85	5,18	325	630,50	592,67	20	
4	4,5	6,92	1180,0	678,6	501,4	2,35	2,50	10,38	83,79	5,82	16,21	64,07	5,82	335	649,90	610,91	18	
5	4,5	6,89	1183,0	660,8	522,2	2,27	2,50	9,99	80,66	9,34	19,34	51,68	9,34	315	611,10	574,43	19	
6	4,5	6,88	1186,8	678,2	508,6	2,33	2,50	10,29	83,08	6,62	16,92	60,86	6,62	243	471,42	443,13	17	
7	4,5	7,03	1184,3	669,5	514,8	2,30	2,50	10,15	81,91	7,94	18,09	56,10	7,94	255	494,70	465,02	18	
8	4,5	6,86	1182,1	668,4	513,7	2,30	2,50	10,15	81,93	7,91	18,07	56,19	7,91	205	397,70	373,84	17	
9	4,5	7,00	1192,1	685,2	506,9	2,35	2,50	10,38	83,73	5,89	16,27	63,79	5,89	230	446,20	419,43	20	
10	4,5	6,97	1187,2	692,5	494,7	2,40	2,50	10,59	85,45	3,97	14,55	72,75	3,97	195	378,30	355,60	19	
M	4,5					2,34	2,50					61,79	6,49			492,55	18,70	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CAL (TEOR DE ASFALTO 5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR	TEOR.	LIG	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	cm	g	g	cm <sup>3</sup>	d/f	-	-	-	100-I-J	100-J	IL*100	-	Kg	Kg	1"			
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm <sup>3</sup>	d/f	-	-	100-I-J	100-J	IL*100	-	Kg	Kg	100		
1	5,0	6,94	1186,5	678,9	507,6	2,34	2,48	11,46	82,79	5,75	17,21	66,58	5,75	330	640,20	608,19	18	
2	5,0	6,83	1184,4	675,4	509,0	2,33	2,48	11,41	82,42	6,18	17,58	64,87	6,18	285	552,90	525,26	19	
3	5,0	6,79	1171,4	676,3	495,1	2,37	2,48	11,60	83,80	4,60	16,20	71,59	4,60	310	601,40	571,33	17	
4	5,0	6,90	1178,9	672,1	506,8	2,33	2,48	11,40	82,39	6,21	17,61	64,75	6,21	265	514,10	488,40	18	
5	5,0	6,78	1189,1	680,1	509,0	2,34	2,48	11,45	82,74	5,80	17,26	66,36	5,80	275	533,50	506,83	17	
6	5,0	6,80	1186,4	672,5	513,9	2,31	2,48	11,32	81,77	6,91	18,23	62,07	6,91	315	611,10	580,55	16	
7	5,0	6,88	1192,4	673,1	519,3	2,30	2,48	11,26	81,33	7,42	18,67	60,28	7,42	260	504,40	479,18	16	
8	5,0	6,86	1195,4	681,2	514,2	2,32	2,48	11,40	82,34	6,26	17,66	64,53	6,26	250	485,00	460,75	18	
9	5,0	6,86	1194,5	678,6	515,9	2,32	2,48	11,35	82,01	6,64	17,99	63,08	6,64	320	620,80	589,76	17	
10	5,0	6,84	1188,1	669,8	518,3	2,29	2,48	11,24	81,19	7,57	18,81	59,74	7,57	335	649,90	617,41	19	
M	5,0					2,33	2,48					64,39	6,33			542,77	17,50	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CAL (TEOR DE ASFALTO 5,5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	NO AR	NA ÁGUA		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEOR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	r	s
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/f	-	-	-	100-I-J	100-J	I/L*100	-	-	Kg	Kg	1" 100
1	5,5	6,74	1193,4	680,1	513,3	2,32	2,46	12,54	81,91	5,55	18,09	69,32	5,55	375	727,50	705,68	18	
2	5,5	6,91	1194,9	679,5	515,4	2,32	2,46	12,50	81,68	5,82	18,32	68,25	5,82	370	717,80	696,27	17	
3	5,5	6,82	1198,5	674,2	524,3	2,29	2,46	12,33	80,54	7,14	19,46	63,33	7,14	423	820,62	796,00	19	
4	5,5	6,90	1196,3	671,9	524,4	2,28	2,46	12,30	80,37	7,32	19,63	62,68	7,32	395	766,30	743,31	20	
5	5,5	6,81	1194,5	678,6	515,9	2,32	2,46	12,48	81,58	5,94	18,42	67,76	5,94	408	791,52	767,77	18	
6	5,5	6,88	1191,2	681,5	509,7	2,34	2,46	12,60	82,34	5,06	17,66	71,36	5,06	385	746,90	724,49	18	
7	5,5	6,87	1189,9	676,9	513,0	2,32	2,46	12,51	81,72	5,77	18,28	68,42	5,77	385	746,90	724,49	17	
8	5,5	6,81	1188,4	679,6	508,8	2,34	2,46	12,59	82,29	5,11	17,71	71,12	5,11	415	805,10	780,95	17	
9	5,5	6,81	1189,4	681,2	508,2	2,34	2,46	12,62	82,46	4,92	17,54	71,94	4,92	463	898,22	871,27	18	
10	5,5	6,46	1191,5	678,6	512,9	2,32	2,46	12,53	81,85	5,63	18,15	69,01	5,63	473	917,62	890,09	18	
M	5,5					2,32	2,46					68,32	5,83			770,03	18,00	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CAL (TEOR DE ASFALTO 6%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL BET.	VAZIOS		TOTAL	LIDA	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/t	-	-	-	100-I-J	100-J	IL*100	-	-	Kg	Kg	1°
																		100
1		6,0	6,69	1173,6	689,5	484,1	2,42	2,44	14,26	84,96	0,78	15,04	94,83	0,78	333	646,02	613,72	18
2		6,0	6,79	1189,4	675,2	514,2	2,31	2,44	13,61	81,07	5,33	18,93	71,86	5,33	328	636,32	604,50	19
3		6,0	6,89	1190,3	674,6	515,7	2,31	2,44	13,58	80,89	5,53	19,11	71,05	5,53	365	708,10	672,70	18
4		6,0	6,71	1191,2	676,2	515,0	2,31	2,44	13,61	81,06	5,33	18,94	71,84	5,33	318	616,92	586,07	15
5		6,0	6,84	1194,1	677,8	516,3	2,31	2,44	13,60	81,05	5,34	18,95	71,81	5,34	312	605,28	575,02	18
6		6,0	6,82	1192,5	689,2	503,3	2,37	2,44	13,94	83,04	3,03	16,96	82,16	3,03	373	723,62	687,44	16
7		6,0	6,81	1196,1	681,3	514,8	2,32	2,44	13,67	81,43	4,91	18,57	73,59	4,91	355	688,70	654,27	18
8		6,0	6,79	1192,6	678,6	514	2,32	2,44	13,65	81,31	5,04	18,69	73,04	5,04	380	737,20	700,34	18
9		6,0	6,85	1198,7	682,1	516,6	2,32	2,44	13,65	81,32	5,03	18,68	73,07	5,03	345	669,30	635,84	19
10		6,0	6,82	1191,1	679,4	511,7	2,33	2,44	13,69	81,58	4,73	18,42	74,33	4,73	375	727,50	691,13	24
M		6,0					2,33	2,44					75,76	4,51			642,10	18,30

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CAL (TEOR DE ASFALTO 6,5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEOR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	cm	g	g	cm <sup>3</sup>	d/f	.	.	.	100-I-J	100-J	I/L*100	.	Kg	Kg	s			
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm <sup>3</sup>	d/f	.	.	100-I-J	100-J	I/L*100	.	Kg	Kg	100		
1	6,5	6,78	1197,6	678,2	519,4	2,31	2,43	14,69	80,38	4,93	19,62	74,88	4,93	340	659,60	653,00	18	
2	6,5	6,82	1202,8	689,2	513,6	2,34	2,43	14,92	81,64	3,44	18,36	81,27	3,44	410	795,40	787,45	20	
3	6,5	6,69	1198,0	674,3	523,7	2,29	2,43	14,58	79,74	5,68	20,26	71,97	5,68	210	407,40	403,33	20	
4	6,5	6,76	1193,1	671,5	521,6	2,29	2,43	14,58	79,74	5,69	20,26	71,94	5,69	195	378,30	374,52	24	
5	6,5	6,75	1195,2	680,2	515,0	2,32	2,43	14,79	80,90	4,31	19,10	77,44	4,31	325	630,50	624,20	22	
6	6,5	6,82	1184,5	684,2	500,3	2,37	2,43	15,09	82,53	2,38	17,47	86,38	2,38	235	455,90	451,34	22	
7	6,5	6,83	1189,4	685,3	504,1	2,36	2,43	15,04	82,25	2,71	17,75	84,71	2,71	145	281,30	278,49	21	
8	6,5	6,73	1195,1	680,9	514,2	2,32	2,43	14,81	81,02	4,17	18,98	78,04	4,17	190	368,60	364,91	19	
9	6,5	6,79	1195,3	678,5	516,8	2,31	2,43	14,74	80,63	4,63	19,37	76,08	4,63	230	446,20	441,74	21	
10	6,5	6,79	1194,8	675,6	519,2	2,30	2,43	14,66	80,22	5,12	19,78	74,14	5,12	130	252,20	249,68	20	
M	6,5					2,32	2,43					77,69	4,31			462,87	20,70	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CIMENTO (TEOR DE ASFALTO 4,5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/t	-	-	-	100-I-J	100-J	I/L*100	-	-	Kg	Kg	s
1	4,5	6,85	1205,8	650,9	554,9	2,17	2,31	9,59	84,52	5,90	15,48	61,92	5,90	160	310,40	291,78	17	
2	4,5	6,69	1190,4	646,2	544,2	2,19	2,31	9,65	85,08	5,27	14,92	64,68	5,27	120	232,80	218,83	18	
3	4,5	6,82	1204,0	654,0	550,0	2,19	2,31	9,66	85,14	5,20	14,86	65,01	5,20	102	197,88	186,01	17	
4	4,5	6,82	1200,2	646,5	553,7	2,17	2,31	9,56	84,31	6,13	15,69	60,94	6,13	155	300,70	282,66	16	
5	4,5	6,80	1205,8	654,6	551,2	2,19	2,31	9,65	85,09	5,26	14,91	64,71	5,26	145	281,30	264,42	17	
6	4,5	6,73	1187,7	644,5	543,2	2,19	2,31	9,65	85,04	5,31	14,96	64,49	5,31	92	178,48	167,77	18	
7	4,5	6,85	1206,6	655,2	551,4	2,19	2,31	9,65	85,11	5,24	14,89	64,84	5,24	75	145,50	136,77	16	
8	4,5	6,85	1197,7	644,7	553,0	2,17	2,31	9,56	84,24	6,21	15,76	60,62	6,21	95	184,30	173,24	16	
9	4,5	6,87	1195,3	645,6	549,7	2,17	2,31	9,59	84,57	5,83	15,43	62,19	5,83	73	141,62	133,12	19	
10	4,5	6,79	1187,1	645,2	541,9	2,19	2,31	9,66	85,20	5,13	14,80	65,32	5,13	79	153,26	144,06	19	
M	4,5					2,18	2,31					63,47	5,55			199,87	17,30	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CIMENTO (TEOR DE ASFALTO 5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/t	-	-	-	100-I-J	100-J	I/L*100	-	Kg	Kg	s	
																		1° 100
1	5,0	6,76	1207,4	658,8	548,6	2,20	2,29	10,79	85,15	4,06	14,85	72,67	4,06	215	417,10	396,25	18	
2	5,0	6,8	1204,7	655,5	549,2	2,19	2,29	10,75	84,87	4,38	15,13	71,07	4,38	103	199,82	189,83	17	
3	5,0	6,72	1200,8	654,7	546,1	2,20	2,29	10,78	85,08	4,15	14,92	72,22	4,15	125	242,50	230,38	18	
4	5,0	6,69	1186,5	646,7	539,8	2,20	2,29	10,77	85,04	4,18	14,96	72,04	4,18	115	223,10	211,95	16	
5	5,0	6,80	1206,7	661,2	545,5	2,21	2,29	10,84	85,59	3,57	14,41	75,24	3,57	50	97,00	92,15	17	
6	5,0	6,78	1194,8	647,8	547,0	2,18	2,29	10,71	84,51	4,78	15,49	69,13	4,78	90	174,60	165,87	18	
7	5,0	6,72	1182,7	643,4	539,3	2,19	2,29	10,75	84,85	4,40	15,15	70,96	4,40	95	184,30	175,09	17	
8	5,0	6,76	1195,0	652,0	543,0	2,20	2,29	10,79	85,15	4,06	14,85	72,64	4,06	120	232,80	221,16	16	
9	5,0	6,89	1211,3	656,3	555,0	2,18	2,29	10,70	84,44	4,86	15,56	68,77	4,86	123	238,62	226,69	16	
10	5,0	6,74	1201,7	657,0	544,7	2,21	2,29	10,81	85,36	3,83	14,64	73,86	3,83	135	261,90	248,81	16	
M	5,0					2,20	2,29					71,86	4,23			215,82	16,90	



**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CIMENTO (TEOR DE ASFALTO 5,5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/l	-	-	-	100-I-J	100-J	I/L*100	-	-	Kg	Kg	1"
																		100
1	5,5	6,71	1190,3	648,2	542,1	2,20	2,28	11,84	84,51	3,65	15,49	76,42	3,65	230	446,20	432,81	18	
2	5,5	6,61	1193,1	652,9	540,2	2,21	2,28	11,91	85,00	3,09	15,00	79,42	3,09	190	368,60	357,54	16	
3	5,5	6,76	1198,2	651,3	546,9	2,19	2,28	11,81	84,32	3,86	15,68	75,35	3,86	195	378,30	366,95	16	
4	5,5	6,74	1201,8	654,1	547,7	2,19	2,28	11,83	84,45	3,72	15,55	76,10	3,72	193	374,42	363,19	19	
5	5,5	6,69	1208,6	662,4	546,2	2,21	2,28	11,93	85,16	2,91	14,84	80,41	2,91	185	358,90	348,13	16	
6	5,5	6,72	1196,2	653,7	542,5	2,20	2,28	11,89	84,86	3,25	15,14	78,55	3,25	195	378,30	366,95	18	
7	5,5	6,72	1194,3	652,1	542,2	2,20	2,28	11,88	84,78	3,35	15,22	78,02	3,35	205	397,70	385,77	16	
8	5,5	6,74	1201,9	654,2	547,7	2,19	2,28	11,83	84,46	3,71	15,54	76,14	3,71	200	388,00	376,36	16	
9	5,5	6,78	1203,3	656,8	546,5	2,20	2,28	11,87	84,74	3,38	15,26	77,81	3,38	194	376,36	365,07	18	
10	5,5	6,77	1216,4	665,5	550,9	2,21	2,28	11,91	84,98	3,11	15,02	79,27	3,11	190	368,60	357,54	18	
M	5,5					2,20	2,28					77,75	3,40			372,03	17,10	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CIMENTO (TEOR DE ASFALTO 6%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIOADE		FLUÊNCIA
	NO AR	NA ÁGUA		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	r	s
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/t	-	-	-	100-I-J	100-J	I/L*100	-	-	Kg	Kg	1" 100
1	6,0	6,64	1210,0	659,2	550,8	2,20	2,26	12,92	84,10	2,98	15,90	81,28	2,98	120	232,80	221,16	20	
2	6,0	6,66	1200,6	654,9	545,7	2,20	2,26	12,94	84,23	2,83	15,77	82,06	2,83	170	329,80	313,31	17	
3	6,0	6,75	1213,9	656,1	557,8	2,18	2,26	12,80	83,31	3,88	16,69	76,72	3,88	170	329,80	313,31	17	
4	6,0	6,63	1203,9	664,1	541,9	2,22	2,26	13,07	85,05	1,88	14,95	87,43	1,88	150	291,00	276,45	15	
5	6,0	6,65	1206,0	663,3	538,2	2,24	2,26	13,18	85,79	1,03	14,21	92,73	1,03	145	281,30	267,24	18	
6	6,0	6,66	1201,5	658,3	539,7	2,23	2,26	13,10	85,23	1,68	14,77	88,65	1,68	138	267,72	254,33	17	
7	6,0	6,72	1198,0	657,0	539,6	2,22	2,26	13,06	85,00	1,94	15,00	87,04	1,94	180	349,20	331,74	18	
8	6,0	6,69	1196,6	656,7	538,3	2,22	2,26	13,08	85,10	1,82	14,90	87,77	1,82	190	368,60	350,17	19	
9	6,0	6,68	1195,0	656,0	540,8	2,21	2,26	13,00	84,59	2,41	15,41	84,38	2,41	160	310,40	294,88	16	
10	6,0	6,60	1196,8	663,5	533,3	2,24	2,26	13,20	85,91	0,89	14,09	93,72	0,89	210	407,40	387,03	21	
M	6,0					2,22	2,26					86,18	2,13			300,96	17,80	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER CIMENTO (TEOR DE ASFALTO 6,5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECÍFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/t	-	-	-	100-I-J	100-J	I/L*100	-	-	Kg	Kg	e
1		6,5	6,52	1195,5	661,2	534,3	2,24	2,25	14,26	85,20	0,54	14,80	96,37	0,54	135	261,90	259,28	19
2		6,5	6,71	1204,2	662,4	541,8	2,22	2,25	14,16	84,64	1,20	15,36	92,19	1,20	130	252,20	249,68	20
3		6,5	6,69	1210,6	666,2	544,4	2,22	2,25	14,17	84,68	1,15	15,32	92,50	1,15	120	232,80	230,47	17
4		6,5	6,63	1212,4	672,3	540,1	2,24	2,25	14,30	85,48	0,21	14,52	98,52	0,21	110	213,40	211,27	19
5		6,5	6,59	1198,6	663,7	534,9	2,24	2,25	14,28	85,33	0,39	14,67	97,33	0,39	117	226,98	224,71	17
6		6,5	6,68	1198,9	661,5	537,4	2,23	2,25	14,22	84,95	0,83	15,05	94,49	0,83	112	217,28	215,11	19
7		6,5	6,54	1184,6	655,8	528,8	2,24	2,25	14,28	85,31	0,42	14,69	97,15	0,42	110	213,40	211,27	19
8		6,5	6,63	1197,8	661,5	536,3	2,23	2,25	14,23	85,05	0,72	14,95	95,20	0,72	120	232,80	230,47	18
9		6,5	6,66	1203,1	666,4	536,7	2,24	2,25	14,29	85,36	0,35	14,64	97,59	0,35	118	228,92	226,63	19
10		6,5	6,70	1211,0	671,9	539,1	2,25	2,25	14,31	85,54	0,14	14,46	99,00	0,14	118	228,92	226,63	18
M		6,5					2,24	2,25					96,03	0,60			228,55	18,50

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER RESIDUO (TEOR DE ASFALTO 4,5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEOR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORRIGIDA	
	g	g	cm	g	g	cm³	dn	-	-	100-J	100-J	I/L*100	-	-	Kg	Kg	s	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	dn	-	-	100-J	100-J	I/L*100	-	-	Kg	Kg	1" 100	
1	4,5	6,93	1194,5	678,9	515,6	2,32	2,50	10,22	82,49	7,29	17,51	58,36	7,29	160	310,40	291,78	19	
2	4,5	7,00	1198,5	680,5	518,0	2,31	2,50	10,21	82,38	7,41	17,62	57,93	7,41	195	378,30	355,60	18	
3	4,5	6,87	1195,5	691,1	504,4	2,37	2,50	10,46	84,39	5,15	15,61	66,98	5,15	245	475,30	446,78	19	
4	4,5	6,81	1189,4	689,4	500,0	2,38	2,50	10,49	84,70	4,81	15,30	68,58	4,81	150	291,00	273,54	18	
5	4,5	6,86	1197,9	682,3	515,6	2,32	2,50	10,25	82,72	7,03	17,28	59,32	7,03	118	228,92	215,18	19	
6	4,5	6,88	1187,5	684,1	503,4	2,36	2,50	10,41	83,99	5,60	16,01	65,01	5,60	184	356,96	335,54	17	
7	4,5	6,86	1189,4	687,2	502,2	2,37	2,50	10,45	84,33	5,22	15,67	66,67	5,22	170	329,80	310,01	18	
8	4,5	6,86	1198,1	681,1	517,0	2,32	2,50	10,22	82,51	7,26	17,49	58,46	7,26	135	261,90	246,19	17	
9	4,5	6,84	1199,8	675,7	524,1	2,29	2,50	10,10	81,51	8,39	18,49	54,62	8,39	130	252,20	237,07	18	
10	4,5	6,84	1191,1	679,8	511,3	2,33	2,50	10,28	82,94	6,78	17,06	60,26	6,78	155	300,70	282,66	19	
M	4,5					2,34	2,50					61,62	6,49			299,44	18,20	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER RESIDUO (TEOR DE ASFALTO 5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL BET.	VAZIOS		TOTAL	LIDA	
	g	g	cm	g	g	cm³	gr	-	-	-	100-J	100-J	100	-	Kg	Kg	1"	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.																100
1	5,0	6,82	1189,8	685,4	504,4	2,36	2,48	11,56	83,55	4,89	16,45	70,28	4,89	235	455,90	433,11	18	
2	5,0	6,82	1195,4	689,2	506,2	2,36	2,48	11,58	83,64	4,78	16,36	70,77	4,78	290	562,60	534,47	19	
3	5,0	6,73	1196,3	678,9	517,4	2,31	2,48	11,33	81,89	6,77	18,11	62,60	6,77	290	562,60	534,47	19	
4	5,0	6,65	1187,9	676,5	511,4	2,32	2,48	11,39	82,27	6,34	17,73	64,23	6,34	210	407,40	387,03	20	
5	5,0	6,85	1198,1	687,9	510,2	2,35	2,48	11,51	83,17	5,31	16,83	68,41	5,31	235	455,90	433,11	17	
6	5,0	6,80	1189,4	682,3	507,1	2,35	2,48	11,50	83,07	5,43	16,93	67,93	5,43	218	422,92	401,77	16	
7	5,0	6,81	1195,4	689,4	506	2,36	2,48	11,58	83,68	4,74	16,32	70,94	4,74	195	378,30	359,39	19	
8	5,0	6,73	1197,3	679,2	518,1	2,31	2,48	11,33	81,85	6,82	18,15	62,42	6,82	160	310,40	294,88	18	
9	5,0	6,76	1194,9	676,6	518,3	2,31	2,48	11,30	81,66	7,04	18,34	61,60	7,04	190	368,60	350,17	17	
10	5,0	6,86	1198,4	689,1	509,3	2,35	2,48	11,53	83,34	5,12	16,66	69,24	5,12	255	494,70	469,97	16	
M	5,0					2,34	2,48					66,84	5,72			419,84	17,90	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER RESIDUO (TEOR DE ASFALTO 5,5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEOR	LIG	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET.	VAZIOS		TOTAL	LIDA	
	g	g	cm	g	g	cm³	d/f				100-IJ	100-J	I/L*100		Kg	Kg	s	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.																1" / 100
1	5,5	6,69	1196,5	687,1	509,4	2,35	2,46	12,67	82,76	4,58	17,24	73,45	4,58	259	502,46	487,39	18	
2	5,5	6,66	1199,1	678,9	520,2	2,31	2,46	12,43	81,21	6,36	18,79	66,16	6,36	255	494,70	479,86	17	
3	5,5	6,79	1195,8	675,9	519,9	2,30	2,46	12,40	81,04	6,56	18,96	65,40	6,56	315	611,10	592,77	19	
4	5,5	6,78	1195,4	679,8	515,6	2,32	2,46	12,50	81,69	5,81	18,31	68,26	5,81	305	591,70	573,95	20	
5	5,5	6,66	1198,2	692,1	506,1	2,37	2,46	12,77	83,41	3,82	16,59	76,97	3,82	325	630,50	611,59	18	
6	5,5	6,66	1189,4	696,4	493,0	2,41	2,46	13,01	85,00	1,99	15,00	86,73	1,99	315	611,10	592,77	17	
7	5,5	6,57	1188,0	693,1	494,9	2,40	2,46	12,94	84,57	2,48	15,43	83,91	2,48	310	601,40	583,36	17	
8	5,5	6,74	1189,6	687,5	502,1	2,37	2,46	12,78	83,47	3,75	16,53	77,31	3,75	325	630,50	611,59	18	
9	5,5	6,71	1199,5	678,6	520,9	2,30	2,46	12,42	81,13	6,45	18,87	65,81	6,45	345	669,30	649,22	19	
10	5,5	6,73	1198,9	686,9	512,0	2,34	2,46	12,63	82,50	4,87	17,50	72,15	4,87	350	679,00	658,63	18	
M	5,5					2,35	2,46					73,62	4,67			584,11	18,10	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER RESÍDUO (TEOR DE ASFALTO 6%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECÍFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA	
	a	b		c	NO AR		NA ÁGUA	f	APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.		REL. BET.	VAZIOS		TOTAL
			d		e	g	h		i	j	k	l	m		n	p	r		
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm <sup>3</sup>	d/l	-	-	-	100-I-J	100-J	l/l*100	-	-	-	Kg	Kg	1" 100
1	6,0	6,72	1198,5	688,1	510,4	2,35	2,44	13,81	82,29	3,89	17,71	78,01	3,89	330	640,20	608,19	18		
2	6,0	6,70	1191,3	697,5	493,8	2,41	2,44	14,19	84,55	1,26	15,45	91,85	1,26	345	669,30	635,84	19		
3	6,0	6,80	1195,8	675,5	520,3	2,30	2,44	13,52	80,55	5,93	19,45	69,49	5,93	350	679,00	645,05	19		
4	6,0	6,61	1197,2	698,6	500,1	2,39	2,44	14,08	83,90	2,02	16,10	87,45	2,02	310	601,40	571,33	18		
5	6,0	6,76	1198,7	682,1	505,9	2,37	2,44	13,94	83,04	3,02	16,96	82,18	3,02	370	717,80	681,91	19		
6	6,0	6,62	1188,0	673,9	513,5	2,31	2,44	13,61	81,08	5,31	18,92	71,93	5,31	375	727,50	691,13	17		
7	6,0	6,62	1187,4	683,5	502,8	2,36	2,44	13,89	82,76	3,34	17,24	80,60	3,34	365	708,10	672,70	18		
8	6,0	6,56	1186,3	688,2	501,7	2,36	2,44	13,91	82,87	3,22	17,13	81,19	3,22	354	686,76	652,42	21		
9	6,0	6,65	1189,9	689,6	498,3	2,39	2,44	14,05	83,69	2,27	16,31	86,11	2,27	382	741,08	704,03	20		
10	6,0	6,67	1187,9	687,2	500,7	2,37	2,44	13,96	83,15	2,90	16,85	82,80	2,90	325	630,50	598,98	19		
M	6,0					2,36	2,44					81,16	3,32			646,16	18,80		

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER RESÍDUO (TEOR DE ASFALTO 6,5%) - APÊNDICE FASE 02**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME (% TOTAL)			VAZIOS (%)		LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA	
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS		TOTAL	LIDA		CORRIGIDA
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/f				100-I-J	100-J	I/L*100			Kg	Kg	1°
																		100
1		6,5	6,69	1195,0	687,9	507,1	2,36	2,43	15,02	82,15	2,83	17,85	84,12	2,83	190	368,60	364,91	19
2		6,5	6,56	1192,6	684,2	508,4	2,35	2,43	14,95	81,77	3,28	18,23	82,02	3,28	200	388,00	384,12	20
3		6,5	6,76	1194,5	686,6	507,9	2,35	2,43	14,99	81,98	3,03	18,02	83,19	3,03	210	407,40	403,33	18
4		6,5	6,57	1183,7	678,9	504,8	2,34	2,43	14,94	81,74	3,32	18,26	81,84	3,32	270	523,80	518,56	19
5		6,5	6,57	1198,6	687,1	511,5	2,34	2,43	14,93	81,69	3,38	18,31	81,54	3,38	280	543,20	537,77	18
6		6,5	6,57	1198,1	689,1	509	2,35	2,43	15,00	82,05	2,95	17,95	83,58	2,95	290	562,60	556,97	21
7		6,5	6,54	1195,4	685,3	510,1	2,34	2,43	14,93	81,69	3,37	18,31	81,57	3,37	295	572,30	566,58	19
8		6,5	6,71	1189,8	682,6	507,2	2,35	2,43	14,95	81,77	3,28	18,23	82,02	3,28	285	552,90	547,37	20
9		6,5	6,59	1199,5	685,9	513,6	2,34	2,43	14,88	81,41	3,70	18,59	80,07	3,70	245	475,30	470,55	19
10		6,5	6,7	1198,2	688,8	509,4	2,35	2,43	14,99	82,00	3,01	18,00	83,26	3,01	258	500,52	495,51	21
M		6,5					2,35	2,43					82,32	3,22			484,57	19,40



**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER RESIDUO 4% - APÊNDICE FASE 03**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR	TEOR	LIG	AGREG	VAZIOS	AGREG	REL BET VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORREGIDA	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	%	%	100-J	100-J	UL*100		Kg	Kg	1" / 100		
				d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	r	s
1	4,5	6,60	1197	670,8	526,6	2,27	2,50	10,03	80,98	8,99	19,02	52,74	8,99	195	378,30	351,82	19	
2	4,5	6,50	1186	664,9	520,7	2,28	2,50	10,05	81,09	8,86	18,91	53,12	8,86	190	368,60	342,80	18	
3	4,5	6,47	1185	663,8	520,8	2,27	2,50	10,03	81,01	8,96	18,99	52,83	8,96	185	358,90	333,78	17	
M	4,5					2,28	2,50					52,90	8,94			342,80	18,00	
4	5,0	6,49	1186	662,9	522,9	2,27	2,48	11,12	80,34	8,54	19,66	56,54	8,54	180	349,20	324,76	17	
5	5,0	6,48	1178	660,7	517,6	2,28	2,48	11,16	80,65	8,19	19,35	57,67	8,19	170	329,80	306,71	16	
6	5,0	6,49	1196	671,1	524,4	2,28	2,48	11,18	80,77	8,06	19,23	58,10	8,06	150	291,00	270,63	16	
M	5,0					2,27	2,48					57,44	8,26			300,70	16,33	
7	5,5	6,62	1188	677,9	510,4	2,33	2,46	12,55	82,05	5,40	17,95	69,93	5,40	195	378,30	355,60	20	
8	5,5	6,31	1186	672,1	513,4	2,31	2,46	12,45	81,38	6,17	18,62	66,85	6,17	185	358,90	337,37	17	
9	5,5	6,43	1200	682,4	517,4	2,32	2,46	12,50	81,72	5,78	18,28	68,40	5,78	195	378,30	363,17	17	
M	5,50					2,32	2,46					68,40	5,78			352,05	18,00	
10	6,0	6,38	1193	674,8	518,2	2,30	2,44	13,54	80,70	5,75	19,30	70,18	5,75	160	310,40	294,88	19	
11	6,0	6,43	1196	678,5	517,2	2,31	2,44	13,60	81,04	5,36	18,96	71,73	5,36	150	291,00	279,36	18	
12	6,0	6,41	1215	697	518,2	2,35	2,44	13,79	82,20	4,00	17,80	77,52	4,00	145	281,30	264,42	19	
M	6,0					2,32	2,44					73,14	5,04			279,55	18,67	
13	6,5	6,63	1188	679,1	509,2	2,33	2,42	14,87	81,37	3,76	18,63	79,83	3,76	140	271,60	255,30	20	
14	6,5	6,30	1186	675,3	510,4	2,32	2,42	14,80	81,00	4,19	19,00	77,92	4,19	165	320,10	307,30	19	
15	6,5	6,25	1179	674,8	503,8	2,34	2,42	14,91	81,57	3,52	18,43	80,90	3,52	155	300,70	291,68	19	
M	6,5					2,33	2,42					79,55	3,82			284,76	19,33	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER RESIDUO 6% - APÊNDICE FASE 03**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR	TEOR	LIG	AGREG	VAZIOS	AGREG	REL BET VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORREGIDA	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST	cm	g	g	cm³	d/f	-	-	-	100-I-J	100-J	VL*100	-	Kg	Kg	1"	
																		100
1	4,5	6,54	1211	680,7	530,2	2,28	2,50	10,08	81,34	8,59	18,66	53,99	8,59	290	562,60	523,22	19	
2	4,5	6,61	1219	686,4	532,4	2,29	2,50	10,10	81,53	8,37	18,47	54,68	8,37	320	620,80	577,34	19	
3	4,5	6,57	1217	685,7	531,0	2,29	2,50	10,11	81,60	8,29	18,40	54,95	8,29	310	601,40	559,30	18	
M	4,5					2,29	2,50					54,54	8,41			553,29	18,67	
4	5,0	6,44	1224	697,5	526,6	2,32	2,48	11,39	82,35	6,25	17,65	64,57	6,25	320	620,80	577,34	19	
5	5,0	6,49	1219	692,6	526,1	2,32	2,48	11,36	82,07	6,58	17,93	63,32	6,58	310	601,40	559,30	20	
6	5,0	6,48	1217	696,8	520,5	2,34	2,48	11,46	82,85	5,68	17,15	66,87	5,68	315	611,10	568,32	19	
M	5,0					2,33	2,48					64,92	6,17			568,32	19,33	
7	5,5	6,52	1217	696,3	521,0	2,34	2,46	12,60	82,34	5,06	17,66	71,34	5,06	320	620,80	583,55	20	
8	5,5	6,38	1213	694,3	518,4	2,34	2,46	12,61	82,44	4,95	17,56	71,83	4,95	295	572,30	537,96	19	
9	5,5	6,42	1214	693,6	520,4	2,33	2,46	12,58	82,21	5,21	17,79	70,71	5,21	300	582,00	558,72	19	
M	5,5					2,34	2,46					71,30	5,07			560,08	19,33	
10	6,0	6,41	1181	663	518,0	2,28	2,44	13,41	79,92	6,67	20,08	66,80	6,67	270	523,80	497,61	20	
11	6,0	6,39	1213	695,6	517,8	2,34	2,44	13,78	82,15	4,07	17,85	77,21	4,07	305	591,70	568,03	20	
12	6,0	6,51	1215	696,8	518,6	2,34	2,44	13,79	82,15	4,06	17,85	77,25	4,06	265	514,10	483,25	19	
M	6,0					2,32	2,44					73,75	4,93			516,30	19,67	
13	6,5	6,42	1204	692,9	511,5	2,35	2,42	15,01	82,10	2,89	17,90	83,84	2,89	255	494,70	465,02	20	
14	6,5	6,32	1213	697,2	515,4	2,35	2,42	14,99	82,04	2,97	17,96	83,46	2,97	265	514,10	493,54	20	
15	6,5	6,44	1217	700,7	516,3	2,36	2,42	15,02	82,19	2,79	17,81	84,34	2,79	275	533,50	517,50	20	
M	6,5					2,35	2,42					83,88	2,88			492,02	20,00	

**DOSAGEM "MARSHALL" - FILER RESIDUO 7% - APÊNDICE FASE 03**

**ATECEL  
CCT - DEC - GEOTECNIA**

CORPO DE PROVA - N°	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECÍFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE		FLUÊNCIA
	a	b		d	e		f	g	h	i	j	k	l	m		n	o	
	POR PESO DE AGRE	POR PESO DE MIST	cm	g	g	cm³	df	-	-	-	100-i-j	100-j	VL*100	-	-	Kg	Kg	1" / 100
1	4,5	6,64	1227	695	532,0	2,31	2,50	10,18	82,14	7,68	17,86	56,97	7,68	200	388,00	360,84	19	
2	4,5	6,50	1236	706	529,7	2,33	2,50	10,29	83,08	6,63	16,92	60,83	6,63	190	368,60	342,80	19	
3	4,5	6,56	1227	696,7	530,1	2,31	2,50	10,21	82,42	7,37	17,58	58,08	7,37	185	358,90	333,78	18	
M	4,5					2,32	2,50					58,63	7,23			345,81	18,67	
4	5,0	6,45	1223	700	522,8	2,34	2,48	11,47	82,86	5,67	17,14	66,91	5,67	190	368,60	342,80	20	
5	5,0	6,47	1226	704,8	521,4	2,35	2,48	11,53	83,32	5,16	16,68	69,10	5,16	200	388,00	360,84	19	
6	5,0	6,45	1213	694,9	517,8	2,34	2,48	11,48	82,97	5,55	17,03	67,42	5,55	210	407,40	378,88	18	
M	5,0					2,34	2,48					67,81	5,46			360,84	19,00	
7	5,5	6,52	1224	701	523,0	2,34	2,46	12,62	82,48	4,90	17,52	72,01	4,90	235	455,90	428,55	18	
8	5,5	6,48	1228	702,8	525,2	2,34	2,46	12,61	82,40	4,99	17,60	71,63	4,99	220	426,80	401,19	20	
9	5,5	6,48	1226	704,4	521,6	2,35	2,46	12,67	82,83	4,49	17,17	73,83	4,49	200	388,00	372,48	21	
M	5,5					2,34	2,46					72,49	4,80			400,74	19,67	
10	6,0	6,36	1208	691,6	516,6	2,34	2,44	13,76	81,98	4,26	18,02	76,36	4,26	185	358,90	340,96	19	
11	6,0	6,40	1215	694,9	519,6	2,34	2,44	13,75	81,94	4,31	18,06	76,11	4,31	170	329,80	316,61	20	
12	6,0	6,35	1218	703,5	514,7	2,37	2,44	13,92	82,97	3,11	17,03	81,74	3,11	190	368,60	346,48	21	
M	6,0					2,35	2,44					78,07	3,89			334,68	20,00	
13	6,5	6,51	1224	700,3	523,7	2,34	2,42	14,89	81,49	3,61	18,51	80,48	3,61	140	271,60	255,30	20	
14	6,5	6,33	1220	704,3	515,9	2,37	2,42	15,07	82,47	2,46	17,53	85,98	2,46	175	339,50	325,92	21	
15	6,5	6,48	1220	700,8	519,5	2,35	2,42	14,97	81,91	3,13	18,09	82,72	3,13	155	300,70	291,68	21	
M	6,5					2,35	2,42					83,06	3,07			290,97	20,67	