UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

EMMANUELLE STEFÂNIA HOLDEFER GARCIA

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO (AREIAS) DE FUNDIÇÃO NO CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

Ijuí/RS

2014

EMMANUELLE STEFÂNIA HOLDEFER GARCIA

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO (AREIAS) DE FUNDIÇÃO NO CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

Projeto de Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção de parecer para desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientador: Prof. José Antônio Santana Echeverria

Ijuí

2014

EMMANUELLE STEFÂNIA HOLDEFER GARCIA

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO (AREIAS) DE FUNDIÇÃO NO CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelos membros da banca examinadora.

Ijuí, 10 de dezembro de 2014

Prof. José Antônio Santana Echeverria

Mestre pela Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul - Orientador

Prof. Cristina Eliza Pozzobon

Coordenadora do Curso de Engenharia Civil/UNIJUÍ

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Alberto Simões Pires Wayhs (UNIJUÍ)

Mestre pela Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul

Pai e mãe, muito obrigada por tudo, esta conquista é nossa e a vocês, todo o meu amor!.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por tudo de maravilhoso que aconteceu em minha vida durante esta faculdade, o Senhor é a luz que me guia.

Agradeço imensamente a toda a minha família que sempre esteve ao meu lado me apoiando, aos meus pais amados Goamar e Marta e ao meu irmão Irwyng que nunca mediram esforços para que eu pudesse aproveitar a faculdade da melhor maneira possível e por inúmeras vezes abdicaram de seus sonhos para viver os meus. Vocês três juntamente com o Eduardo foram a força que me motivou a nunca desistir, a vocês todo meu amor e reconhecimento.

Ao meu orientador e professor, José Antonio Santana Echeverria, pela orientação prestada ao longo deste trabalho, por sempre responder os meus e-mails (mesmo que com outras perguntas) e por sempre exigir o meu máximo, sempre, obrigada por todas as conversas e divergências de ideias que tivemos, pois elas foram essenciais para a conclusão com entendimento deste TCC.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil: Felipe, Túlio e Roberto, por sempre se mostrarem dispostos a ajudar quando algum equipamento apresentava problemas tanto neste projeto quanto em todas as pesquisas e em especial ao Luiz Donato por todas as manhãs encontrar um motivo para “reclamar” de algo no laboratório e assim tornar a manhã mais agradável.

Às empresas Carpenedo Cia Ltda e Fundimisa que disponibilizaram os materiais para que este TCC pudesse ser realizado, muito obrigada.

A TODOS os professores do Curso de Engenharia Civil por todo conhecimento transferido ao longo destes 5 anos e também por muitas vezes serem mais do que professores, em especial a professora Cristina Eliza Pozzobon que sempre se mostrou prestativa para resolver “meus problemas” e que levarei comigo como um exemplo de mulher e profissional.

Às secretárias do Curso, Cassiana e Rosane, por todas as inúmeras horas de conversa durante os dias e por sempre realizarem mágicas com as documentações que eu perdia.

A TODO GRUPO PET desde a minha entrada em 2010 até o dia de hoje, por serem muito mais do que colegas de trabalho. Obrigada por todas as manhãs, por todas as brincadeiras, por todo sarcasmo, pelas “sonecas” nas cadeiras ao meio dia e muito obrigada pela amizade e companheirismo ao longo destes anos, vou sentir saudades Carine, Mariana, Tatiane, Cristiane, Bruna, Gabiela, Pedro, Lucas e André. Gostaria de agradecer em especial aos meus “pupilos” deste ano, Ricardo, Janaína, Anna e Felipe, sem vocês eu jamais teria concluído este trabalho, muito obrigada por estarem comigo desde o peneiramento do material até a limpeza do laboratório, por não fugirem com cheiro da gasolina, muito menos com meu mau humor. Muito obrigada mesmo, por tudo!

As minhas amigas inseparáveis e colegas de trabalho, Geannina e Geisiele, por ao longo desta faculdade terem se tornado essenciais em minha vida, vocês duas, juntamente com o Mauricio e a Jéssica partilharam dos meus momentos bons e ruins, das noites em festas até as inúmeras madrugadas em claro estudando, sem vocês nada teria tido tanta graça e nem se tornado tão especial. Desejo-lhes tudo de melhor que houver no mundo e sei que serão brilhantes profissionais, obrigada por tudo, eu amo vocês!

Por fim gostaria de agradecer a todos os meus amigos criados durante esta faculdade, a cada um festejou, sorriu e estudou comigo, muito obrigada por todo companheirismo durante estes anos, vocês foram e são essenciais em minha vida, vou guardar cada um de vocês em meu coração e espero que possamos nos encontrar muito por ai ainda e que todos estejam felizes e realizados nesta profissão. Do fundo do meu coração, muito obrigada!

`

`

Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar.

Chico Xavier

RESUMO

GARCIA, EMMANUELLE STEFÂNIA. HOLDEFER. **Análise laboratorial da utilização do resíduo (areias) de fundição no concreto asfáltico convencional**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2014.

Areias constituem o principal resíduo de empresas de fundição, visto são com elas que são feitos todos os moldes das peças fundidas produzidas, dependendo do porte da empresa por dia ela chega a produzir toneladas de resíduos, que precisam ser depositados em algum lugar seguro onde não ocorram problemas com contaminações de qualquer espécie. Apresenta-se como proposta de reutilização deste resíduo sua incorporação ao concreto asfáltico convencional moldado a quente (CBUQ) na proporção de 5% da massa total de moldagem. A caracterização granulométrica deste trabalho seguiu normativas brasileiras para pavimentos flexíveis e apresentou bons resultados quanto a incorporação de apenas 5% de resíduo, as curvas granulométricas foram estabilizadas para a faixa C e as misturas ficam com as mesmas porcentagens para todos os materiais, ou seja, 15% de brita ¾”; 29% de brita 3/8”; 50% de pó de pedra; 1% de cal calcítica e 5% de cada areia em análise (macharia, areia verde, IMF e pó do exaustor). Estas misturas foram separadas por tipo de areia introduzida e receberam nomes diferentes para serem facilmente identificadas (AMA, AIMF, AV e APÓ). Após caracterização estas misturas foram moldadas através da metodologia Marshall e seus parâmetros mecânicos analisados, todas apresentaram estabilidade e fluência dentro dos exigíveis e adotou-se então como padrão teor de ligante de projeto em 4,5%, tomando-se como referencia o volume de vazios fixo em 4%. As misturas foram submetidas a ensaios de resistência onde cada uma comportou-se de maneira diferente, tendo um tipo de areia ótimo resultado em um ensaio, porém, decréscimo em outro, percebendo isto, decidiu-se que para que a conclusão sobre a areia com os melhores resultados fosse mais precisa deveria realizar-se uma análise estatística de seus dados através de variância e do método da ANOVA, desta forma os dados poderiam se completar e a definição sobre as areias mais completa. Todos estes ensaios foram realizados seguindo recomendações de normativas brasileiras e por isso, possuem veracidade em sua decisão e repetitividade caso haja interesse.

Palavras-chave: Reutilização. Resíduos. Areia de fundição. Concreto Asfáltico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição dos esforços no pavimento. 20
Figura 2 - Tipos de pavimentos 21
Figura 3 - Camadas constituintes do pavimento 22
Figura 4 - Comportamento de diferentes curvas granulométricas 25
Figura 5 - Estocagem dos materiais no laboratório 42
Figura 6 - Aparência física dos agregados britados 43
Figura 7 - Aspectos visuais das areia de fundição 44
Figura 8: Experimento Inteiramente Casualizado - DIC, através da ANOVA 55
Figura 9: Fórmulas necessárias para realização da análise ANOVA 55
Figura 10: Comportamento da areia de macharia quando exposta à água 64
Figura 11: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura de Referência 71
Figura 12: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura AMA 72
Figura 13: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura AV 73
Figura 14: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura AIMF 74
Figura 15: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura APÓ 75
Figura 16: Agregados envoltos por ligante 78
Figura 17: Material antes e depois de 72 horas na estufa 78
Figura 18: Aspectos finais dos agregados envoltos pelo ligante 78
Figura 19: CPs sem condicionamento 84
Figura 20: Sequência de condicionamentos dos CPs 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Série de peneiras utilizadas para granulometria 49
Tabela 2: Densidade do material graúdo 62
Tabela 3: Densidades dos agregados miúdos isoladamente 63
Tabela 4: Densidades através do Frasco de Le Chatelier 63
Tabela 5: Densidade final de cada mistura 64
Tabela 6: Porcentagens de cada material na mistura 65
Tabela 7: Porcentagens de cada material na mistura. 66
Tabela 8: Porcentagens de cada material na mistura 67
Tabela 9: Porcentagens constituintes de cada material da mistura 68
Tabela 10: Porcentagem dos materiais que constituem a mistura 69
Tabela 11: Parâmetros da mistura de Referência 71
Tabela 12: Parâmetros da mistura AMA 72
Tabela 13: Parâmetros da mistura AV 73
Tabela 14: Parâmetros da mistura AIMF 74
Tabela 15: Parâmetros da mistura APÓ 75
Tabela 16: Quantidade de cada material usado no ensaio 77
Tabela 17: Resistências à tração das misturas 79
Tabela 18: Resultados de Mr encontrados em ambas as direções 80
Tabela 19: Relação Mr/Rt 81
Tabela 20: Golpes de compactação para Lottman 83
Tabela 21: Resultados da Metodologia Lottman Modificado 85
Tabela 22: Levantamento de dados 86
Tabela 23: Parâmetros iniciais necessários para a análise 86
Tabela 24: Análise dos quadrados 86
Tabela 25: Teste de Tukey 87

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica dos materiais analisados 50
Gráfico 2: Distribuição granulométrica dos agregados pétreos 59
Gráfico 3: Distribuição granulométrica dos agregados residuais 61
Gráfico 4: Material enquadrado na faixa C 66
Gráfico 5: Mistura de macharia dentro dos limites da faixa 67
Gráfico 6: Material enquadrado na faixa C 68
Gráfico 7: Enquadramento da mistura na faixa C 69
Gráfico 8: Distribuição granulométrica dentro da faixa de trabalho 70
Gráfico 9: Variação de volume de vazios das misturas 76
Gráfico 10: Resultados médios de Mr 81
Gráfico 11: Perda de massa das misturas 82

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

a – Absorção de água

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos Sólidos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIMF – Mistura com 5% de Areia de IMF

AMA –Mistura com 5% de Areia de Macharia

APÓ – Mistura com 5% de Areia Pó do Exaustor

AV – Mistura com 5% de Areia Verde

CA – Concreto Asfáltico

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente

CPA – Camada Porosa de Atrito

CPA – Camada Porosa de Atrito

CPs – Corpos de Prova

CS2 – Bissulfetos de Carbono

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte

G_m – massa específica média

G_n – massa específica da fração n

G_{sa} – massa específica do agregado na condição seca

G_{sb} – massa específica do agregado na condição SSS

ISC – Índice de Suporte Califórnia

kPa – QuiloPascal

MCAQ – MRAQ - Microrrevestimento asfáltico a quente

Mr – Módulo de resiliência

M_r – módulo de resiliência do material

NBR – Norma Brasileira

PMF – Pré-misturado à Frio

PMQ – Pré-misturado à Quente

REF –Mistura de Referência

RPM – Rotações por minuto

RRt – Resistência retida à tração

Rt – Resistência à tração por compressão diametral

S – grau de saturação

SMA – Stone Matrix Asphalt

SSS – Superfície Saturada Seca

TS – Tratamento Superficial

TSD – Tratamento Superficial Duplo

UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 19
2.1. Caracterização do pavimento asfáltico 19
2.1.1. Camadas do pavimento 21
2.1.2. Agregados constituintes do pavimento 23
2.1.3. Ligante Asfáltico 26
2.2. Revestimentos asfálticos 27
2.2.1. Misturas usinadas a quente 27
2.2.2. Revestimentos por tratamentos superficiais e penetração de asfaltos 31
2.2.3. Misturas asfálticas a frio 32
2.3. Métodos de dosagem do concreto asfáltico 32
2.3.1. Método de Dosagem Marshall 33
2.3.2. Método de Hveem 34
2.3.3. Método SUPERPAVE 34
2.3.4. Método de Triaxial Smith 35
2.4. Resíduos sólidos 35
2.4.1. Classificação dos resíduos 36
2.5. Areias de fundição 37
2.5.1. Processos de Fundição 38
2.5.2. Utilização da areia de fundição no concreto asfáltico 40
3. MATERIAIS E MÉTODOS 41
3.1. Classificação da pesquisa 41
3.2. Planejamento da pesquisa 41

3.3. Materiais utilizados 41
3.3.2. Massa específica densidade e absorção dos agregados 44
3.3.3. Misturas realizadas 47
3.4. Métodos laboratoriais aplicados e ensaios realizados 48
3.4.1. Análise granulométrica 48
3.4.1. Perda de massa dos CP's – Método Cantabro 50
3.4.2. Adesividade ao ligante asfáltico 51
3.4.3. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral 51
3.4.4. Ensaio de módulo de resiliência 52
4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS AMOSTRAS 53
4.1. Análise de variância, método da ANOVA 53
4.1.1. Hipóteses para o Teste F 54
4.1.2. Teste de Comparação entre as Médias de Tratamentos 56
4.1.3. Teste de Tukey 56
5. ÁNALISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 58
5.1. Análise granulométrica dos materiais 58
5.1.1. Granulometria dos materiais pétreos 58
5.1.2. Granulometria dos materiais residuais 59
5.2 Densidades dos materiais 61
5.3 Misturas realizadas 65
5.3.1 Mistura de referência (REF) 65
5.3.2 Mistura com 5% de areia de macharia (AMA) 66
5.3.3 Mistura com 5% de areia verde (AV) 67
5.3.4 Mistura com 5% de areia IMF (AIMF) 68
5.3.5 Mistura com 5% de pó do exaustor (APÓ) 69
5.4 Dosagem Marshall 70

5.4.1 Teor de ligante das misturas 76

5.4.2 Adesividade de agregado ao ligante asfáltico 76

5.5 Resistência à tração (Rt) 79

5.6 Módulo de resiliência x Resistência à tração 81

5.7 Perda de massa – Metodologia Cantabro 82

5.8 Dano por umidade – Metodologia Lottman Modificado 82

5.9. Análise estatística 85

5.10. Análise da lixiviação 87

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 89

6.1. Conclusões 89

6.1.1. Dosagem Marshall 89

6.1.2. Resistência à tração 89

6.1.3. Módulo de Resiliência 90

6.1.4. Módulo de Resiliência x Resistência à tração 90

6.1.5. Perda de massa 90

6.1.6. Metodologia Lottman Modificado 90

6.1.7. Análise estatística 91

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 92

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DA AREIA MACHARIA 97

ANEXO B – CLASSIFICAÇÃO DA AREIA IMF 103

ANEXO C – LIXIVIAÇÃO DA MISTURA 109

ANEXO D – TABELA MÉTODO DA ANOVA (Ftab) 11313

1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados da Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos Sólidos (ABETRE) (2013) de toda quantidade de resíduos da indústria de fundição produzidos no Brasil, apenas 22% destes recebem destinação correta para descarte, 16% desta porcentagem acaba sendo depositada em aterros, 1% é incinerado e apenas 5% são co-processados, transformando-se assim em combustíveis para a indústria de cimento. O restante da totalidade de resíduos produzidos, os 78%, acabam sendo despejados diretamente na natureza de maneira irregular, causando danos tanto ao meio ambiente quanto as empresas produtoras. O despejo destes resíduos em aterros sanitários controlados e legalizados acaba por gerar as empresas gastos exorbitantes que poderiam ser minimizados caso este resíduo fosse reaproveitado.

Empresas de fundição logo perceberam que a reutilização de seus resíduos poderiam ser uma maneira de diminuir a abertura de novos aterros sanitários e ainda contribuir com novas pesquisas nesta área hoje amplamente explorada devido ao seu ganho ambiental, já que fora comprovado que as areias destes processos são classificadas como não perigosas ao lençol freático. Escolheu-se então reutilizar areias provenientes de diferentes etapas do processo de moldagem das peças metálicas, as chamadas, areias de fundição.

Com objetivo de encontrar uma alternativa economicamente viável e totalmente funcional para a reutilização deste tipo de resíduo, decidiu-se por incorporá-lo no concreto asfáltico convencional (CBUQ), uma estrutura que constantemente necessita de reparos devido ao tráfego e que depende constantemente de novas tecnologias que aumentem sua vida de fadiga.

Foram escolhidas para serem incorporadas ao concreto asfáltico 4 tipos de areia de fundição; areia de macharia, areia verde, areia de IMF e areia pó do exaustor. A incorporação escolhida foi da ordem de 5% de cada areia em substituição total à massa de moldagem.

A partir desta inserção, tem-se como objetivo principal avaliar se o material asfáltico mantém suas características e requisitos estipulados pelas normativas brasileiras de uma mistura pura, para isso as misturas com estes materiais serão submetidas a vários ensaios

característicos de resistência e comportamento e seus resultados interpretados de forma a descobrir se este material pode ou não ser reutilizado desta forma.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Caracterização do pavimento asfáltico

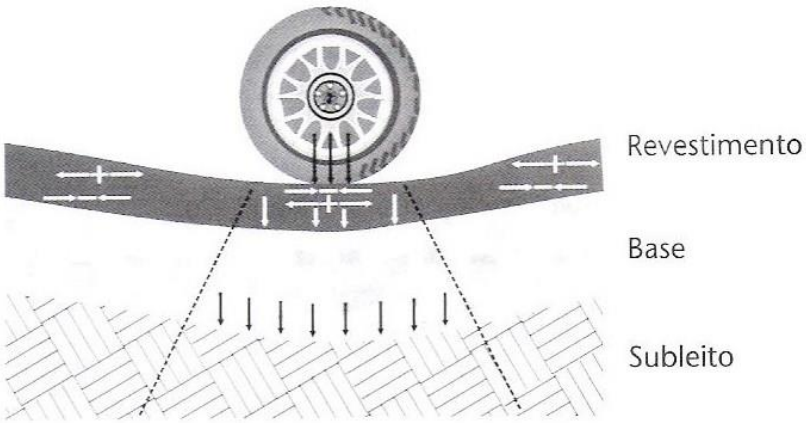
De acordo com Balbo (2007), o pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerando, no entanto, diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.

Segundo Bernucci et al. (2008), pavimentos são um sistema de sobreposição de camada sobre uma fundação chamada de subleito, em que seu comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas.

Segundo Balbo (2007), a estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido puramente estrutural, para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas interiores, que por muitas vezes acabam tendo menores resistências, devido ao produto com que são executadas. Para que funcione adequadamente, todas as peças que compõem o pavimento devem trabalhar deformações compatíveis com sua natureza e capacidade portanto, isto é, de modo que não ocorram processos de ruptura ou danificação de forma prematura e inadvertida nos materiais que constituem suas camadas, a Figura 1 exemplifica a distribuição dos esforços no pavimento.

Ainda de acordo com Baldo (2007), as cargas são transmitidas à fundação de forma aliviada, impedindo a ocorrência de deformações incompatíveis com a utilização da estrutura ou mesmo de rupturas na fundação, que geram estados de tensão não previstos inicialmente nos cálculos e induzem toda a estrutura a um comportamento mecânico inapropriado e à degradação demasiada ou prematura.

Figura 1 - Distribuição dos esforços no pavimento.



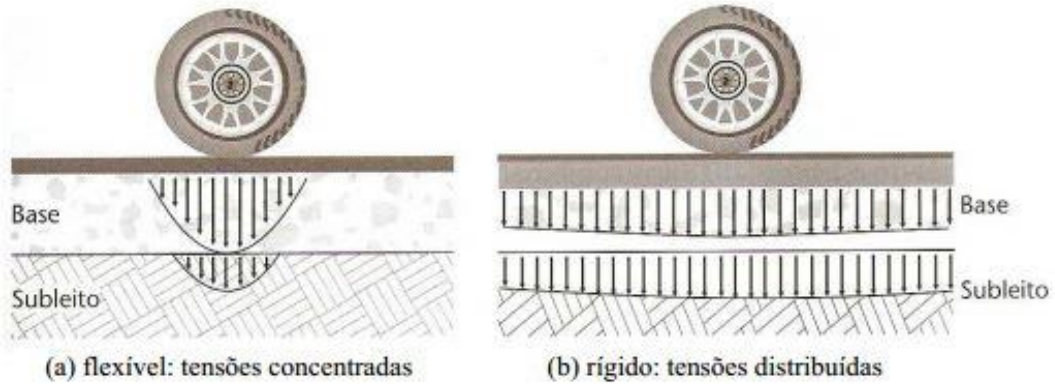
Fonte: Balbo, 2007

Cada camada do pavimento de acordo com Bernucci et al. (2008), possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento em qualquer condição climática. As cargas aplicadas sobre a superfície do pavimento acabam por gerar determinados estados de tensões na estrutura, que muito dependerá do comportamento mecânico de cada uma das camadas e do conjunto dessas. Recorda-se que as cargas são aplicadas por veículos e também pelo ambiente, geralmente de modo transitório; são, portanto, cíclicas ou repetitivas, o que não implica repetição constante de suas respectivas magnitudes.

Em linhas gerais, pode-se dizer que as cargas externas geram esforços solicitantes verticais e horizontais, os esforços verticais podem ser reduzidos a solicitações de compressão e de cisalhamento; os esforços horizontais podem inclusive solicitar certos materiais à tração ou simplesmente atuar confinando outros materiais.

Na prática da engenharia existem dois tipos de pavimentos: os rígidos e os flexíveis, conforme exemplifica a Figura 2, de acordo com Bernucci et al. (2008), os rígidos são normalmente constituídos por uma camada de revestimento de concreto de cimento Portland, sobre uma sub-base, esta apoiada sobre um subleito ou reforço de subleito, se necessário. Já os pavimentos flexíveis são constituídos por camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre uma camada de base, de sub-base e uma de reforço de subleito.

Figura 2 - Tipos de pavimentos



Fonte: Adaptado de Balbo (2007, p.47)

Dependendo do caso, o pavimento poderá não possuir camada de sub-base ou reforço; mas a existência de revestimento, nem que seja primário (cascalhamento, agulhamento), e fundação (subleito) são condições mínimas para que a estrutura seja chamada de pavimento.

2.1.1. Camadas do pavimento

As camadas do pavimento possuem dimensões e materiais distintos, geralmente, quanto mais perto da superfície, mais delgada é a camada e com maior custo de execução, em contraponto, quanto mais próximo do subleito (fundação) existente no local, mais espessas suas camadas e seu custo de obtenção e execução, menor. Tendo em vista estas distinções, o pavimento flexível é constituído das seguintes camadas: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, estas camadas estão representadas pela Figura 03, e descritas abaixo (BALBO, 2007).

✓ O revestimento asfáltico ou camada de rolamento: Chama-se revestimento, a camada destinada a resistir diretamente às ações dos veículos e a transmitir as tensões resultantes desse processo de forma minimizada para as camadas abaixo, além de garantir segurança e conforto aos usuários que nela trafegam. Constituindo-se, basicamente, de agregados e ligante asfáltico.

✓ Base: A base é uma camada destinada a resistir às ações dos veículos e então transmiti-las ao subleito. Por muitas vezes antes desta camada é executada outra camada que

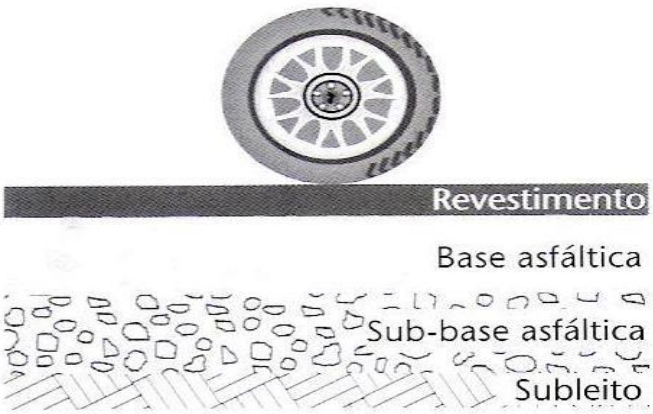
recebe o nome de sub-base, esta torna-se uma camada complementar, com as mesmas funções, mas não com os mesmos requisitos.

Para as camadas de base e sub-base constituídas com materiais granulares e solos, tradicionalmente são utilizados os seguintes materiais:

- Brita Graduada Simples (BGS);
- Bica Corrida;
- Macadame Hidráulico;
- Macadame Seco (MS);
- Macadame Betuminoso;
- Misturas Estabilizadas Granulometricamente;
- Solo-Agregado;
- Solo Natural;
- Solo melhorado com cimento ou cal.

✓ Reforço do subleito: É uma camada que se aplica com objetivo de reduzir a espessura da sub-base, ou quando o subleito (fundação ou terreno natural onde o pavimento será construído) tem uma qualidade inferior, por exemplo, um baixo Índice de Suporte Califórnia (ISC).

Figura 3 - Camadas constituintes do pavimento



Fonte: Adaptada de Balbo (2007, p. 47)

2.1.2. Agregados constituintes do pavimento

O agregado escolhido para uma determinada utilização deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior. O desempenho das partículas de agregado é dependente da maneira como são produzidas, mantidas unidas e das condições sob as quais vão atuar. A escolha é feita em laboratório onde uma série de ensaios é utilizada para a predição do seu comportamento posterior quando em serviço (BERNUCCI et al, 2008).

2.1.2.1. Classificação dos Agregados

De acordo com Ceratti e Reis (2014), agregado é um termo coletivo para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou britadas em seu estado processado. Ainda dentro do conceito de agregado, há de se considerar os agregados artificiais. Os agregados utilizados em pavimentação podem ser classificados em três grandes grupos, segundo sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos.

Quanto à Natureza

Segundo Ceratti e Reis (2010) os agregados podem ser classificados quanto sua natureza em três categorias e são elas:

- ✓ Natural- Inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. São exemplos os pedregulhos, as britas, os seixos, as areias, etc.
- ✓ Artificial- São resíduos de processos industriais, tais como, a escória de alto forno e de aciaria, ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada e a argila expandida. O tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado em pavimentação são os vários tipos de escórias, subprodutos da indústria do aço.
- ✓ Reciclado- Nesta categoria estão os provenientes de reuso de materiais diversos. A possibilidade de utilização de agregados reciclados provenientes da fresagem de pavimentos asfálticos vem crescendo devido a interesses ambientais e diminuição na exploração de agregados naturais.

Quanto ao tamanho

Os agregados são classificados quanto ao tamanho, para uso em misturas asfálticas, em graúdo, miúdo e material de enchimento ou fíler (DNIT 031/2006 - ES):

- ✓ Graúdo - É o material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira nº 10. São as britas, cascalhos, seixos, etc.;
- ✓ Miúdo - É o material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. É o material que fica retido na peneira de nº 200, mas que passa na de abertura nº 10. São as areias, o pó de pedra, etc.;
- ✓ Material de enchimento (fíler) - É o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente a peneira de nº 200, como é o exemplo da cal hidratada, cimento Portland, etc.

O tamanho máximo do agregado em misturas asfálticas para revestimentos pode afetar as mesmas de diversas maneiras. Podem tornar-se instáveis misturas asfálticas com agregados de tamanho máximo excessivamente pequeno e prejudicar a trabalhabilidade e/ou provocar segregação em misturas asfálticas com agregados de tamanho máximo excessivamente grande.

Quanto à distribuição dos grãos

Segundo o Ceratti e Reis (2010), a distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influência quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e a deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, etc.

Ainda de acordo com o manual citado, a distribuição granulométrica dos agregados é determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento. Nessa análise, uma amostra seca de agregado é fracionada através de uma série de peneiras com aberturas de malhas progressivamente menores. Uma vez que a massa da fração de partículas retida em cada peneira e determinada e comparada com a massa total da amostra, a distribuição é expressa como porcentagem em massa em cada tamanho de malha de peneira.

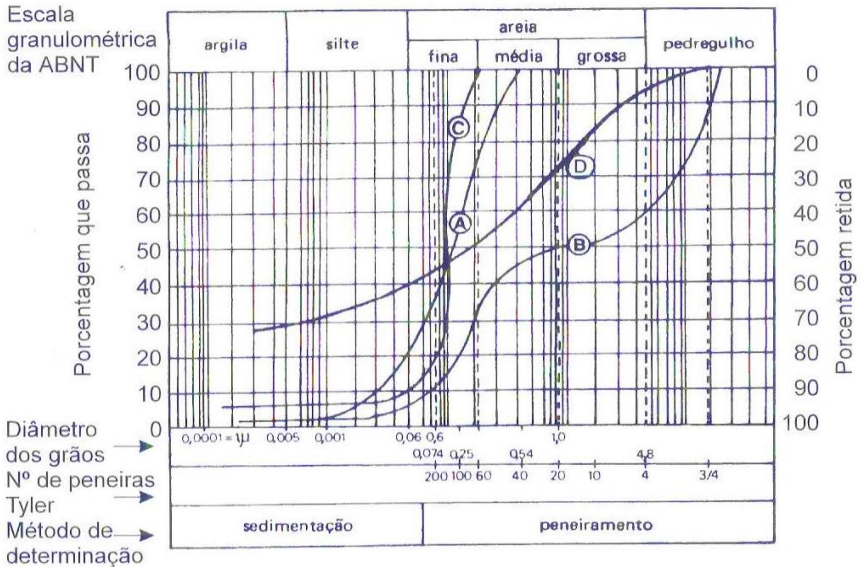
✓ Granulometria dos Agregados - A composição granulométrica de qualquer material permite o conhecimento das porcentagens das partículas constituintes em função de suas dimensões, o que representa um elemento de grande valia para os estudos do comportamento desse material, quer como elemento constituinte da fundação em que se apoia um pavimento, quer como constituintes das próprias camadas do pavimento, por exemplo. (SENÇO, 2007)

✓ Tipos de Curvas Granulométricas - As curvas granulométricas podem apresentar diversas formas, as quais identificam não só prováveis aplicações, mas também o comportamento das camadas com elas construídas, inclusive em misturas com aglutinantes. (SENÇO, 2007)

A Figura 4 representa o provável comportamento de cada tipo de curva:

- Curva A – Granulometria contínua aberta. O material apresenta certa uniformidade nas frações, desde as mais graúdas até as mais finas;
- Curva B – Granulometria descontínua. Não há uniformidade nas porções das diversas frações;
- Curva C – Granulometria uniforme. Existe evidente predominância de uma determinada fração, identificada pela verticalidade da curva;
- Curva D – Granulometria contínua densa. Além de contínua, temos uma porcentagem de finos que, preenchendo os vazios, aumenta a densidade do agregado.

Figura 4 - Comportamento de diferentes curvas granulométricas



Fonte: Senço (2007)

2.1.3. Ligante Asfáltico

De acordo com Budny (2009), o ligante asfáltico é um material constituído essencialmente de betume e materiais betuminosos que são, por definição, associações de hidrocarbonetos solúveis em bissulfetos de carbono (CS2) e que têm propriedades de aderência aos agregados pétreos. O principal uso dos materiais asfálticos em pavimentação é como elemento aglutinante das partículas de agregados pétreos. São também utilizados na impermeabilização de certas camadas do pavimento e como ligação entre essas camadas.

Características dos Materiais Betuminosos

Os materiais ou ligantes betuminosos apresentam as seguintes características:

- ✓ São materiais aglutinantes ou ligantes;
- ✓ São hidrófugos, isto é, repelentes da água;
- ✓ São "quimicamente inertes";
- ✓ Apresentam grande sensibilidade à variação de temperatura, permitindo o seu manuseio em diversas temperaturas;
- ✓ As propriedades do betume e a durabilidade das misturas betuminosas são mantidas por vários anos.

Cimentos Asfálticos de Petróleo - CAP

Segundo Cavalcante (2010), os cimentos asfálticos derivados do petróleo são designados no Brasil através da sigla CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo, sendo classificados de acordo com a sua consistência medida através do ensaio de penetração (DNER 03/73 – Penetração de material betuminoso). O valor desta penetração caracteriza o cimento asfáltico e lhe atribui um nome, no Brasil, os tipos mais produzidos são classificados como CAP 50 - 60, CAP 85 - 100, CAP 100 - 120 e CAP 150 -200. Os CAP´s são aplicados em diversos tipos de misturas asfálticas, podem ser aplicados na camada de rolamento ou base do pavimento, processos de imprimação e na mistura com agregados a fim de se garantir a impermeabilização desta camada.

Atualmente, o CAP mais produzido nas refinarias brasileiras é do tipo CAP 50 – 60 (mais consistentes). Este material apresenta grande coesão em temperatura ambiente e

necessita ser aquecido para que possa ser manuseado de maneira a envolver todos os agregados constituintes da mistura.

Ensaios para a Caracterização de Materiais Asfálticos

Para caracterização dos materiais betuminosos são executados vários tipos de testes laboratoriais a fim de garantir suas propriedades estipuladas em norma e seu perfeito aproveitamento posterior. Os ensaios corriqueiros são: ensaio de penetração, ensaio de ductilidade, ensaio de viscosidade e ensaio de ponto de fulgor.

2.2. Revestimentos asfálticos

> Segundo Bernucci et al. (2008), na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequada garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o tráfego previsto para o local. Os requisitos técnicos e de qualidade de um pavimento asfáltico serão atendidos com um projeto adequado da estrutura do pavimento e com o projeto de dosagem da mistura asfáltica compatível com as outras camadas escolhidas.

Um dos tipos mais empregados no Brasil é o concreto asfáltico (CA) também denominado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Trata-se do produto da mistura convenientemente proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante. (BERNUCCI et al. 2008).

2.2.1. Misturas usinadas a quente

Segundo Bernucci et al. (2008), misturas asfálticas são caracterizadas como sendo a mistura de agregados e ligante. Este procedimento pode ser realizado em usina estacionária, e posteriormente ser transportado por caminhão para a pista, onde é lançado por equipamento apropriado, denominado vibro acabadora. Em seguida a mistura é compactada, de modo a atingir um grau de compressão tal que resulte num arranjo estrutural estável e resistente, tanto

às deformações permanentes quanto às deformações elásticas repetidas devido à passagem do tráfego.

Ainda conforme Bernucci et al. (2008), as misturas asfálticas a quente podem ser subdivididas pela graduação dos agregados e fíler. São destacados três tipos mais usuais nas misturas a quente:

- ✓ Graduação densa: curva granulométrica contínua e bem graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios, visto que, os agregados de dimensões menores, preenchem os vazios dos maiores. Exemplo: concreto asfáltico (CA);
- ✓ Graduação aberta: curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm). Para preencher os vazios entre as partículas maiores, com o objetivo de tornar a mistura com elevado volume de vazios com ar e, portanto, drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Exemplo: mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA);
- ✓ Graduação descontínua: curva granulométrica com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras, com o objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos. Exemplo: matriz pétrea asfáltica (*stone matrix asphalt* – SMA); mistura sem agregados de certa graduação (*gap-graded*).

2.2.1.1. Concreto asfáltico (CA)

O concreto asfáltico é a mistura asfáltica muito resistente em todos os aspectos, desde que adequadamente selecionados os materiais e dosados convenientemente. Pode ser:

- ✓ Convencional: CAP e agregados aquecidos, segundo a especificação DNIT-ES 031/2006;
- ✓ Especial quanto ao ligante asfáltico: com ligante modificado por polímeros ou borrachas;, misturas que apresentem elevado módulo de elasticidade (*enrobé à module élevé* – EME).

De acordo com Bernucci et al. (2008), devido ao arranjo de partículas com graduação bem graduada, a quantidade de ligante asfáltico requerida para cobrir as partículas e ajudar a preencher os vazios da mistura não pode ser muito elevada, pois a mistura necessita contar, ainda, com vazios com ar, após a compactação em torno de 3 a 5% no caso de camada de rolamento (camada em contato direto com os pneus dos veículos) e de 4 a 6% para camadas intermediárias ou de ligação (camada subjacente à de rolamento). Caso não seja deixado certo volume de vazios com ar, as misturas asfálticas deixam de ser estáveis ao tráfego e, por fluência, deformam-se significativamente.

A faixa de teor de ligante em peso está normalmente entre 4,5 a 6,0% dependendo da forma que apresentam os agregados, suas massas específicas, da viscosidade e do tipo do ligante, podendo sofrer variações em torno desses valores. Para o teor de projeto, a relação betume-vazios está na faixa de 75 a 82% para camada de rolamento e 65 a 72% para camada de ligação.

Segundo Baldo (2007), o papel do fíler no CA, além de material de enchimento, as adições minerais finamente moídas aos concretos asfálticos, que ficam dispersas no CAP, acabam por formar uma massa CAP + fíler denominada mastique asfáltico. Mais do que apenas o preenchimento de vazios da mistura, os fílers se prestam a causar um aumento de viscosidade do CAP, o que gera incremento do ponto de amolecimento, na estabilidade, no módulo de resiliência e na resistência da mistura asfáltica, evidentemente até um dado limite de consumo desta adição fina.

2.2.1.2. CPA – Camada Porosa de Atrito

De acordo com Bernucci et al. (2008) as misturas asfálticas abertas do tipo CPA mantêm uma grande porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças às pequenas quantidades de filer, de agregado miúdo e de ligante asfáltico. O CPA é aplicado como camada de rolamento com a finalidade funcional de aumento de aderência pneu-pavimento em dias de chuva.

> Esse revestimento é responsável pela coleta da água da chuva para o seu interior e é capaz de promover uma rápida percolação da mesma devido a sua elevada permeabilidade, até a água alcançar as sarjetas. A característica importante dessa mistura é que ela causa: redução da espessura da lâmina de água na superfície

> de rolamento e consequentemente das distancias de frenagem; redução do spray proveniente do borrifo de água pelos pneus dos veículos, aumento da distância de visibilidade; e redução da reflexão da luz dos faróis noturnos (BERNUCCI et al 2008).

Todos esses requisitos são responsáveis pela redução no numero de acidentes em dias de chuva. Outro fator importante é a redução de ruído ao rolamento, amenizando esse desconforto ambiental em áreas nas proximidades de vias com revestimentos drenantes. Esta camada drenante é executada sobre uma camada de mistura densa e estrutural.

2.2.1.3. SMA – *Stone Matrix Asphalt*

> Atualmente, a questão do escoamento de águas é tratada de outra forma: buscam-se formulações de CA que, após compactadas, apresentam uma macro textura tal na superfície de modo a conformar uma rede de canais que permitam o escoamento das água sem sobreposição dos agregados (BALBO 2007).

Segundo vocabulário de Bernucci et al. (2008) o SMA tem como significado de sua sigla a expressão *Stone Matrix Asphalt*, adotada nos Estados Unidos e no Brasil e que quando traduzida apresenta a denominação matrix pétrea asfáltica, contudo amplamente a expressão utilizada se dá na língua inglesa.

Conforme especificação de Bernucci et al. (2008), o SMA é um revestimento asfáltico, usinado a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a integração grão/grão; a mistura se caracteriza por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos e devido a essa particular graduação, formar um grande volume de vazios. Estes vazios serão preenchidos posteriormente por mastigue asfáltico, constituído pela mistura da fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras. A porcentagem de ligante varia entre 6,0 e 7,5%. A espessura das camadas varia entre 1,5 a 7 cm, dependendo da sua faixa granulométrica.

Esta mistura devido a estas condições tende a ser impermeável e com volume de vazios que varia de 4 a 6%, ao contrário da CPA.

A textura superficial resultante, segundo Balbo (2007), devido à ausência de finos em quantidade no SMA é mais rugosa e estabelece uma espécie de rede de microdrenagem

superficial, o que evita a formação de lâminas finas d'água durante períodos chuvosos, favorecendo a aderência e o contato dos pneus com os agregados superficiais.

2.2.1.4. Pré – misturado a quente (PMQ)

Conforme Balbo (2007), os pré-misturados a quente são misturas asfálticas semelhantes aos CAUQs, porém elaboradas sem a introdução de material de enchimento, sendo em geral compostos quanto ao diâmetro de material por apenas dois agregados.

Através deste processo, distinguirão misturas mais abertas (com maior índice de vazios) que os CAUQs e, desta forma não exigindo especificações rígidas quanto a dosagem dos agregados. Misturas a quente acabam por formar camadas mais flexíveis e como são mais baratos que CAUQs dosados, acabam sendo utilizados largamente como camada de regularização ou de ligação.

2.2.1.5. Microrrevestimento asfáltico a quente (MRAQ ou MCAQ)

Preferencialmente executado com CAP modificado por polímeros, tem sua distribuição granulométrica continua que resulta em uma mistura fina e impermeável, sem função estrutural e empregada como manutenção preventiva dos pavimentos asfálticos.

É um material que pode ser utilizado como microrrevestimento de pavimentos de baixo custo e também como opção de manutenção de pavimentos asfálticos que apresentam alguns tipos de patologias, possui ainda função impermeabilizante e aderente podendo ser utilizado como camada final de pavimentos revestidos com macadames betuminosos, (BALBO 2007).

2.2.2. Revestimentos por tratamentos superficiais e penetração de asfaltos

2.2.2.1. Tratamentos superficiais (TS)

Os tratamentos superficiais são segundo Balbo (2007), revestimentos delgados descontínuos por asfalto e agregados, executados sobre base ou sobre o revestimento existente de um pavimento, não sendo utilizados em sua execução processos de usinagem. Os materiais asfálticos aplicáveis na execução dos tratamentos superficiais são os CAPs (Concreto Asfáltico de Petróleo), os asfaltos diluídos e as emulsões asfálticas.

O CAP deve ser aplicado a quente, a fim de se conseguir boa penetração do material asfáltico na camada de agregados. O uso de emulsões nestes processos também é bem corriqueiro, em geral são aquelas de ruptura rápida, que podem eventualmente ser aquecidas até determinadas temperaturas para a garantia de um bom espargimento do material (BALBO 2007).

2.2.3. Misturas asfálticas a frio

Os pré-misturados a frio (PMF) consistem em misturas usinadas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, misturados com emulsão asfáltica de petróleo (EAP) à temperatura ambiente, diferentemente dos misturados a quente que precisam de usina especializada estas podem ser misturadas em usinas móveis, mais facilmente obtida pelas prefeituras devido ao menor valor.

Conforme Bernucci et. al (2008), o PMF pode ser usado como revestimento de ruas e estradas de baixo volume de tráfego, ou ainda como camada intermediária (com CA superposto) e em operações de conservação e manutenção, podendo ser:

• Denso – graduação contínua e bem-graduada, com baixo volume de vazios;

• Aberto – graduação aberta, com elevado volume de vazios.

Os PMFs podem ser usados em camadas de 30 a 70mm de espessura compactada dependendo do tipo de serviço e da granulometria da mistura. Espessuras maiores devem ser compactadas em duas camadas. As camadas devem ser espalhadas e compactadas à temperatura ambiente. O espalhamento pode ser feito com vibroacabadora ou até mesmo com motoniveladora, o que é conveniente para pavimentação urbana de ruas de pequeno tráfego. Também é possível estocar a mistura ou mesmo utilizá-la durante um dia inteiro de programação de serviços de conservação de vias (ABEDA, 2001).

2.3. Métodos de dosagem do concreto asfáltico

Conforme Bernucci et al. (2008), a dosagem de uma mistura asfáltica tem consistido, através de procedimentos experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. A definição do que vem a ser um teor ótimo não é simples.

Portanto, o mais conveniente, é se nomear o teor de ligante dosado como teor de projeto, como forma de ressaltar que sua definição é convencional.

O teor de projeto de ligante asfáltico varia de acordo com o método de dosagem, e é função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros.

O método de dosagem mais usado mundialmente faz uso da compactação por impacto e é denominado método Marshall em referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940. O método de dosagem Marshall de misturas asfálticas (DNER-ME 043/95) ainda é o mais utilizado no país. Foi concebido no decorrer da 2ª Guerra Mundial como um procedimento para definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas de roda e pressão de pneus das aeronaves militares. (BERNUCCI et al. 2008)

2.3.1. Método de Dosagem Marshall

Para a realização da dosagem Marshall, são necessários que procedimentos antecessores já estejam determinados, como por exemplo: determinação das massas específicas reais do cimento asfáltico de petróleo (CAP) e dos agregados, seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com a mistura asfáltica e escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a sua mistura nos limites da faixa granulométrica

Segundo Bernucci et al. (2008), um segundo passo a ser tomado para a execução da dosagem é a escolha das temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade- temperatura do ligante escolhido. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt-Furol), de preferência entre 75 e 95SSF. A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107ºC nem superior a 177ºC e a temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15ºC acima da temperatura definida para o ligante, sem ultrapassar 177ºC.

De acordo com Pasche (2013), a moldagem dos corpos de prova (CP’s) através da metodologia Marshall deverá decorrer da seguinte forma: os agregados deverão ser aquecidos até que atinjam a temperatura de mistura, quando atingirem, misturam-se os agregados com o ligante asfáltico, previamente aquecido conforme especificado anteriormente. Decorrido este processo, a mistura é colocada em uma estufa calibrada na temperatura de compactação, onde

repousará por 2 horas e, em seguida, moldam-se os CP´s por compactação a quente, dentro de moldes cilíndricos metálicos, normatizados.

Posterior a este processo, os CP´s ficam sem condicionamento durante o período de 24 horas, e decorrido este período os mesmos são desmoldados, suas circunferências medidas e pesadas em balança de precisão. Na prensa Marshall, os CP´s são rompidos à compressão e os valores mecânicos de estabilidade e fluência obtidos. Valores estes necessários para que se possa verificar se as misturas estão dentro dos parâmetros exigidos pelo DNIT e demais normativas brasileiras.

2.3.2. Método de Hveem

Segundo Motta (2000) método Hveem realiza uma análise de densidade/vazios e estabilidade. Também é determinada a resistência da mistura ao inchamento em água. O método Hveem possui duas vantagens reais. Primeiramente, o método de compactação pulsante em laboratório é vista pelos técnicos como a melhor simulação do adensamento que ocorre com o CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente – em campo. Segundo, o parâmetro de resistência, a estabilidade Hveem é uma medida direta dos componentes de atrito interno da resistência de cisalhamento. Este mede a capacidade de um corpo-de-prova resistir a deformação lateral quando uma carga vertical é aplicada.

2.3.3. Método SUPERPAVE

Este método foi criado para substituir os métodos de Hveem e Marshall, a fim de se garantir mais precisão em suas análises, decidiu-se então unir estes dois métodos e aperfeiçoa-los, o mesmo então serviu de base para o método Superpave, que em 1993 foi concluído e nomeado de Superior Performing Asphalt Pavement System (SUPERPAVE).

O Superpave trata-se de um método que abrange o dimensionamento de misturas asfálticas adaptadas aos requisitos de desempenho ditadas pelo tráfego e ambiente (clima). Ele facilita a escolha e a combinação do ligante asfáltico, agregado, e algum modificante necessário para alcançar o nível requerido do desempenho do pavimento (MOTTA 2000).

Segundo Cavalcante (2010) o Superpave tem como a diferença mais importante em relação ao Marshall e o Hveem o tipo de compactação, pois utiliza um compactador designado de giratório que aplica energia por amassamento. É a metodologia usada

atualmente em universidades e departamentos de estradas dos EUA. No Brasil este tipo de dosagem tem sido analisado principalmente em centros de pesquisas.

O seu funcionamento se compara a de um rolo compressor que, em vez de aplicar golpes de impacto, faz a compactação exercendo uma tensão de amassamento na mistura. Os parâmetros utilizados na operação do CGS são: Ângulo de rotação de 1,25 +/- 0,02°; taxa de 30RPM; tensão de compressão aplicada ao CP durante a rotação de 600 kPa e capacidade de reproduzir corpos de provas com diâmetro de 100mm e 150mm (CAVALCANTE 2010).

Embora seja recente, a metodologia de dosagem Superpave, utilizada no Brasil, apresenta limitações assim como a metodologia Marshall, pois considera apenas parâmetros volumétricos e não as propriedades mecânicas, que na verdade são as que se relacionam diretamente com o desempenho da mistura.

2.3.4. Método de Triaxial Smith

Dos métodos utilizados atualmente, o método Triaxial Smith é o que melhor correlaciona o confinamento praticamente total que as laterais de uma porção de material de um maciço recebe na natureza, com as condições de confinamento, no laboratório, ao se aplicar uma pressão lateral, os corpos-de-prova e, depois, submetê-los a pressões verticais (Senço, 2001).

O mesmo autor ainda comenta que os métodos empíricos de determinação de misturas têm seu ponto fraco no fato de serem limitadas as considerações para as quais se fizeram as correlações inicias entre os resultados obtidos em laboratório e os obtidos no comportamento em campo.

2.4. Resíduos sólidos

Segundo PNRS (2014) é bastante atual e contém instrumentos importantes para permitir o avanço necessário ao País no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos.

A Lei nº 12.305/10 prevê também a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos

(aquilo que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reaproveitado) e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (aquilo que não pode ser reciclado ou reutilizado).

2.4.1. Classificação dos resíduos

De acordo com a norma NBR 10004:2004 (Resíduos sólidos – Classificação), a classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

Conforme a origem

Segundo a ABETRE (2014), os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à origem em:

- ✓ Resíduo Hospitalar ou de Serviços de Saúde - Qualquer resto proveniente de hospitais e serviços de saúde como pronto-socorro, enfermarias, laboratórios de análises clínicas, farmácias, etc.. Geralmente é constituído de seringas, agulhas, curativos e outros materiais que podem apresentar algum tipo de contaminação por agentes patogênicos;

- ✓ Resíduo Domiciliar - São aqueles gerados nas residências e sua composição é bastante variável sendo influenciada por fatores como localização geográfica e renda familiar. Porém, nesse tipo de resíduo podem ser encontrados restos de alimentos, resíduos sanitários papel, plástico, vidro, etc.

- ✓ Resíduo Agrícola - São aqueles gerados pelas atividades agropecuárias (cultivos, criações de animais, beneficiamento, processamento, etc.). Podem ser compostos por embalagens de defensivos agrícolas, restos orgânicos, produtos veterinários e etc..

- ✓ Resíduo Comercial - São aqueles produzidos pelo comércio em geral. A maior parte é constituída por materiais recicláveis como papel e papelão, principalmente de embalagens, e plásticos, mas também podem conter restos sanitários e orgânicos.

- ✓ Resíduo Industrial - São originados dos processos industriais. Possuem composição bastante diversificada e uma grande quantidade desses rejeitos é considerada perigosa. Podem ser constituídos por escórias (impurezas resultantes da fundição do ferro), cinzas, lodos, óleos, plásticos, papel, borrachas, etc.

✓ Resíduos Sólidos Urbanos - É o nome usado para denominar o conjunto de todos os tipos de resíduos gerados nas cidades e coletados pelo serviço municipal (domiciliar, de varrição, comercial e, em alguns casos, entulhos).

Conforme norma NBR 10004:2004

Para os efeitos desta Norma, os resíduos são classificados em:

✓ Resíduos classe I – Perigosos- Aqueles que apresentam periculosidade, risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

✓ Resíduos classe II – Não perigosos- São exemplos de resíduos não perigosos materiais como: resíduo de restaurante (restos de alimentos), resíduo de madeira, sucata de metais ferrosos, resíduo de materiais têxteis, sucata de metais não ferrosos (latão etc.), resíduos de minerais não metálicos, resíduo de papel e papelão, areia de fundição, resíduos de plástico polimerizado, bagaço de cana e resíduos de borracha.

✓ Resíduos classe II A - Não inertes- Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B- Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

✓ Resíduos classe II B – Inertes- Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

2.5. Areias de fundição

A moldagem em areia, apesar de sua origem remota, é ainda hoje o processo mais utilizado para a obtenção de peças metálicas fundidas. As areias têm sido usadas há muito tempo devido à sua abundância na natureza, baixo custo de exploração e suas boas propriedades refratárias, além de serem facilmente moldáveis com a adição de argilas ou outros aditivos aglomerantes orgânicos ou inorgânicos.

Estimativas indicam que a produção de uma tonelada de metal fundido gera entre 0,25 e 1,0 tonelada de resíduo sólido e que, aproximadamente, 30% a 60% desses resíduos são constituídos por areia de fundição residual (KLINSKY 2012).

Nos Estados Unidos, por exemplo, para cada tonelada de metal fundido é gerada uma tonelada de areia de fundição residual, um número extremamente alto, mas que segue os mesmos princípios no Brasil em que não há tanto investimento na melhoria desta prática. Em países desenvolvidos como o Japão, o processo de fundição foi aperfeiçoado até que fosse possível gerar somente 0,2 toneladas de areia de fundição por tonelada de metal fundido, (KLINSKY 2012, apud MCINTYRE, 2002).

2.5.1. Processos de Fundição

Segundo Kondic (1973), fundição é qualquer processo de fusão e vazamento de metais em moldes, tendo como objetivo a produção de peças com formas e dimensões previamente estabelecidas. As peças fundidas são obtidas pela solidificação do metal líquido em molde, que possa permanecer em contato com o fogo ou suportar calor elevado, sem alterações significativas em suas características.

Etapas de Fundição

Segundo Siegel et al. (1982), a fundição de uma peça metálica pode ser resumida, em síntese, em moldagem, macharia, fusão, vazamento, desmoldagem e rebarbação – limpeza. Estas estão descritas sucintamente no desenvolvimento deste item.

- ✓ Modelação: Esta operação engloba os requisitos necessários para a confecção do modelo, que é uma réplica da peça a ser reproduzida, porém, com as dimensões acrescidas da contração para ela prevista, devido à solidificação e resfriamento, pois os metais/ligas, de um modo geral, se contraem ao se solidificarem.

- ✓ Moldagem: São requisitos necessários para a confecção do molde, em material refratário moldado, sobre o modelo, que, ao ser extraído, deixa a impressão da peça que será fundida.

A importância da moldagem no processo de fundição é em virtude dos numerosos processos e materiais empregados para sua execução, bem como na qualidade dos resíduos

resultantes da atividade de fundição ser altamente dependente do processo empregado. Os processos básicos de fundição pela técnica da moldagem podem ser classificados como a seguir:

- Areia verde;
- Areia seca;
- Areia-cimento;
- Areia de macho;
- Pelo processo de CO_2;
- Por moldes permanentes;
- Por moldes semipermanentes.

✓ Macharia: Etapa da confecção dos machos que correspondem aos ocos e às reentrâncias das peças fundidas. Os machos são colocados no molde antes da caixa ser fechada para receber o metal fundido e são retirados, após o vazamento.

✓ Fusão: É a etapa na qual uma determinada quantidade de material metálico, constituída por pedaços sólidos de metais ou ligas, com formatos geométricos e purezas químicas diversas é derretida num forno revestido de material refratário em uma temperatura compatível com a matéria a ser fundida.

✓ Vazamento: Preenchimento do molde com material fundido. O vazamento deve ser realizado cuidadosamente. Essa fase exige um controle rigoroso de temperatura, estado essa numa faixa pré-fixada, como supracitada, entre 100 e 300ºC acima da temperatura de início da solidificação do metal/liga.

✓ Desmoldagem: Após o vazamento, o material solidifica-se e é deixado resfriar-se, até atingir uma temperatura em que seja possível manipulá-lo convenientemente. Após o resfriamento a peça é retirada do molde e está pronta para ser efetuada a etapa final do processo de fundição, que é limpeza e acabamento.

Limpeza e rebarbação; A limpeza e o corte de canais e rebarbas (saliências irregulares que apresentam uma peça fundida, pelo fato do metal ter entrado nas juntas).

2.5.2. Utilização da areia de fundição no concreto asfáltico

De acordo com Coutinho (2004), a areia após a utilização na indústria de fundição, torna-se um grave problema ambiental, pois fica contaminada por elementos e compostos químicos, tais como: arsênio, bário, cádmio, chumbo, sódio, mercúrio, cloretos, fluoretos, fenóis e surfactantes.

Ainda de acordo com o autor citado, o reaproveitamento da areia de fundição, seja no reuso, ou na reciclagem traz grandes benefícios para o meio ambiente e para as industrias. Com isto, contribui-se para diminuir a quantidade de recursos naturais utilizados, além de minimizar a problemática das indústrias com o destino final deste resíduo.

Devido a estes fatos, universidades e empresas tem se envolvido em pesquisas com a finalidade de buscar um destino mais adequado a este resíduo. Estas pesquisas estão relacionadas à reutilização da areia, tais como: na fabricação de blocos de concreto, aterro em rodovias, como parte do agregado fino na mistura asfáltica e em concreto para aplicação não estrutural.

Estudos como os referidos neste trabalho já foram realizados anteriormente como cita Coutinho (2004), onde a Universidade de Purdue (Indiana, EUA) em parceria com o Departamento de Transportes de Indiana construiu um aterro rodoviário utilizando areia de fundição de origem ferrosa, este aterro foi monitorado constantemente a fim de controlar o comprometimento do meio ambiente que teve como resultado impacto ambiental negativo. Posterior ao estudo com o aterro empregou-se a areia na construção civil, em aterros e subleitos de rodovias, como agregado fino em material de baixa resistência e como agregado fino em concreto asfáltico. Concluíram, dentre outras, que a areias de fundição estudadas demonstravam boas propriedades físicas e mecânicas e tem baixa possibilidade de contaminar o lençol freático.

Sendo assim, torna-se viável a utilização do resíduo areia de fundição como parte do agregado fino em misturas asfáltica densas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos laboratoriais efetuados para a caracterização e avaliação dos materiais estudados. Os ensaios de laboratório são descritos de forma resumida, apresentando as normas técnicas nas quais constam os detalhes destes.

3.1. Classificação da pesquisa

Devido ao fato de amostras terem sido coletadas em campo e analisadas em laboratório, esta pesquisa caracteriza-se como quantitativa e laboratorial. Ressalta-se que os resultados pertinentes serão analisados graficamente.

3.2. Planejamento da pesquisa

Os materiais pétreos são provenientes da empresa Carpenedo Cia Ltda, com sede em Santa Rosa – RS. Os resíduos, areias de fundição, foram coletadas na empresa Fundimisa, com sede em Santo Ângelo – RS. O Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP) também foi disponibilizado da empresa Carpenedo Cia Ltda.

Concluída a etapa de revisão bibliográfica e a obtenção dos materiais necessários, as misturas começaram a ser preparadas e posteriormente analisadas laboratorialmente para a avaliação de suas propriedades físico-mecânicas relevantes e sua viabilidade ou não, da aplicação do material como camada de revestimento de pavimentos flexíveis.

3.3. Materiais utilizados

Os revestimentos asfálticos constituem um material composto formado por agregados de vários tamanhos e proporções que são mantidos unidos devido ao ligante asfáltico. Existe uma elaborada série de fatores que atuam conjuntamente para produzir uma estrutura com desempenho adequado. A seleção de agregados para utilização em revestimentos asfálticos depende de sua disponibilidade, custo e qualidade, bem como do tipo de aplicação.

3.3.1. Classificação dos agregados

A coleta da amostra é de fundamental importância para a representatividade dos ensaios, devendo ser tomada toda a precaução para que a amostra represente a natureza e as condições dos agregados (DNER-PRO 120/97).

A amostra, com a qual os ensaios serão realizados, deve ser formada pela reunião de várias amostras parciais, tomadas em vários pontos do lote submetido à amostragem, em numero suficiente para representar, em média, as características do material (DNER-PRO 120/97).

Todos os agregados utilizados na pesquisa foram coletados, transportados e estocados conforme diretrizes da norma DNER-PRO 120/97, conforme representa a Figura 5.

Figura 5 - Estocagem dos materiais no laboratório

Fonte: Próprio Autor (2014)

3.3.1.1. Agregados Britados: Os agregados britados utilizados nesta pesquisa foram: brita ¾ “, brita 3/8” e o pó de pedra, todos, provenientes de rocha basáltica. Estes agregados foram doados pela empresa Carpenedo Cia Ltda, com jazida localizada no município de Santa Rosa-RS, a Figura 6 ilustra o tamanho dos grãos e o aspecto visual de cada um dos materiais que serão utilizados na mistura. Os agregados coletados serão submetidos a ensaios laboratoriais no Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ.

Figura 6 - Aparência física dos agregados britados

Fonte: Próprio Autor (2014)

3.3.1.2. Agregados Residuais: As areias de fundição utilizadas, como agregados residuais, na mistura foram doados pela empresa Fundimisa, com sede e produção na cidade de Santo Ângelo – RS, a estocagem deste material foi Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ, onde foram realizados os ensaios de caracterização e a própria mistura. A Figura 7 apresenta o aspecto visual de cada tipo de areia inserida na mistura.

Estas areias são provenientes de processos de fundição e possuem distinção quanto ao seu aspecto visual e granulométrico. Como citado na revisão bibliográfica o resíduo, areia de macharia é resultante do primeiro processo, quando as peças em metal quente são despejadas em moldes feitos por areia, para que não haja vazamento deste metal, esta areia é misturada com resina para que adquira resistência, a classificação geral do resíduo segue descrita no anexo A. A areia denominada de IMF também é gerada pelos processos de moldagem porém em processo secundário, recebe este nome devido a máquina em que é gerado, denominada de IMF.

Por ser um processo secundário, o material apresenta granulometria mais fina, sua classificação juntamente com seu laudo lixiviado segue descrito no anexo B. As demais areias incorporadas neste estudo, areia verde e pó do exaustor, assim como a areia verde são proveniente de processos secundários, concebidas em máquinas de queima que de certa forma "destilam" a areia pura até que esta vire totalmente pó, (o pó do exaustor é captado em processo antecedente à destilação final).

Figura 7 - Aspectos visuais das areia de fundição

Fonte: Próprio Autor (2014)

3.3.2. Massa específica densidade e absorção dos agregados

Os materiais estudados são constituídos por diferentes frações granulométricas, o que dificulta a determinação da massa específica dos grãos e a absorção. A recomendação de Bernucci et al. (2008) é que pode-se computar um valor para a massa específica média através de um valor ponderado das várias frações da mistura, pela Equação 1:

Equação 1: Frações de cada material na mistura

$$Gm = \frac{100}{\frac{\%a}{Ga} + \frac{\%Ag}{GAg} + \frac{\%Am}{GAm} + \frac{\%f}{Gf}}$$

Fonte: Bernucci et al. (2008)

Onde:

- %a = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica;
- %Ag, %Am, %f = porcentagem de agregado graúdo, miúdo e fíler, respectivamente, expressas em relação à massa total da mistura;

- Ga, Gag, Gam, Gf = massas especificas reais do asfalto, agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente.

Para determinação da massa especifica dos grãos maiores do que 4,8mm (peneira nº 4) foi determinada através da metodologia descrita na norma DNER-ME 195/97, que traz definições a serem seguidas, como:

- Absorção de água: aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento dos seus poros por água, expresso como percentagem de sua massa seca (Equação 4);
- Massa específica na condição seca: relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluídos os vazios permeáveis, conforme Equação 2;
- Massa específica na condição superfície saturada seca (SSS): relação entre a massa do agregado na condição saturada superfície seca e o seu volume, excluídos os vazios permeáveis, calculado de acordo com a Equação 3.

Equação 2: Massa específica seca

$$Gsa = \frac{A}{A-C}$$

Fonte: DNER-ME 195 (1997)

Equação 3: Massa específica saturada seca

$$Gsb = \frac{A}{B-C}$$

Fonte: DNER-ME 195 (1997)

Equação 4: Absorção de água

$$a = \frac{B-A}{A} x\ 100$$

Fonte: DNER-ME 195 (1997)

Onde:

- Gsa = densidade do agregado na condição seca, em g/cm³
- Gsb = densidade do agregado na condição SSS, em g/cm³

- a = absorção de água, em %
- A : massa do agregado seco, em g
- B : massa do agregado na condição saturada superfície seca, em g
- C : leitura correspondente ao agregado imerso em água, em g

Como procedimento para determinação da densidade do agregado graúdo e sua absorção, seguiu-se recomendações na norma DNIT 081/1998 exemplificadas pelas Equação 5 e Equação 6.

Equação 5: Densidade aparente do agregado graúdo

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L}$$

Fonte: DNIT 081/98

Onde:

- Dap = densidade aparente;
- Ms = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g;
- Mh = massa ao ar, do agregado na condição saturada de superfície seca, em g;
- L = leitura na balanca, correspondente ao agregado submerso, em g.

Equação 6: Densidade real e absorção do agregado graúdo

$$D_r = \frac{P_s}{P_s - P_i} \qquad a = \frac{P_h - P_s}{P_s} \text{ x } 100$$

Fonte: DNIT 081/98

Onde:

- Dr = densidade real;
- a = absorção do agregado, em porcentagem
- Ph = Peso úmido, em g;
- Ps = Peso seco, em g

Para a fração do material de areia de fundição e do pó de pedra com grãos menores do que 4,8 mm a densidade real foi determinada pelos procedimentos da DNER-ME 084/95, com

o auxílio de um picnômetro. Com a obtenção dos pesos descritos e explicados na norma pode-se calcular a densidade real, através da Equação 6, multiplicando esta pela massa específica real da água, obtêm-se a massa específica real do agregado miúdo (G_r).

Equação 7: Densidade real pelo método do picnômetro

$$Dr = \frac{B - A}{(D - A) - (C - B)}$$

Fonte: DNER-ME 084 (1995)

Onde:

- Dr = densidade real do agregado miúdo;
- A = massa do picnômetro vazio e seco, em g;
- B : massa do picnômetro mais amostra, em g;
- C : massa do picnômetro mais amostra mais água, em g;
- D : massa do picnômetro cheio d`água, em g.

3.3.3. Misturas realizadas

Com base na referência bibliográfica procedida anteriormente, constatou-se que as substituições em massa de agregado pelo resíduo areia de fundição, deveriam ser de pequena ordem e empregadas quase que totalmente como fíler devido ao seu módulo de finura. Foram realizadas 4 misturas que possuíram substituição da ordem de 5% (cinco por cento) para cada uma das areias em análise (Pó do Exaustor, Macharia, IMF e Areia Verde) com relação a massa total dosada para cada corpo de prova, as composições das misturas foram apresentadas da seguinte forma:

Mistura REF:

18,0%	21,0%	61,0%
BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA

Mistura AMA:

15,0%	29,0%	50,0%	1,0%	5,0%
BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	CAL	MACHARIA

Mistura AIMF:

15,0%	29,0%	50,0%	1,0%	5,0%
BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	CAL	IMF

Mistura AV:

15,0%	29,0%	50,0%	1,0%	5,0%
BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	CAL	AREIA VERDE

Mistura APÓ:

15,0%	29,0%	50,0%	1,0%	5,0%
BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	CAL	PÓ EXAUSTOR

A cal adicionada na mistura foi a cal calcita, provinda do estado de Minas Gerais e doada por antigos acadêmicos do curso, os mesmos, comprovaram através de seus trabalhos de conclusão de curso, que a adição de pequenas porcentagens deste material em misturas asfálticas usinadas a quente, acabam por melhorar características da mistura como, por exemplo, adesividade.

3.4. Métodos laboratoriais aplicados e ensaios realizados

3.4.1. Análise granulométrica

Tendo-se como objetivo principal do presente trabalho o emprego de areias de fundição em revestimentos asfálticos executados a quente, realizou-se a análise granulométrica dos materiais escolhidos para este estudo a fim de verificar seu enquadramento nas faixas de trabalho determinadas pela norma DNIT – ES 031/2006, (Pavimentos Flexíveis – Especificações de Serviço). As peneiras adotadas para execução da granulometria estão representadas na Tabela 01, adotou-se peneiramento manual de todos os componentes da mistura, garantindo assim a não discrepância de dados, o processo de peneiramento seguiu especificações da DNER – ME 080/1994, (Solos – Análise Granulométrica por Peneiramento).

Tabela 1: Série de peneiras utilizadas para granulometria

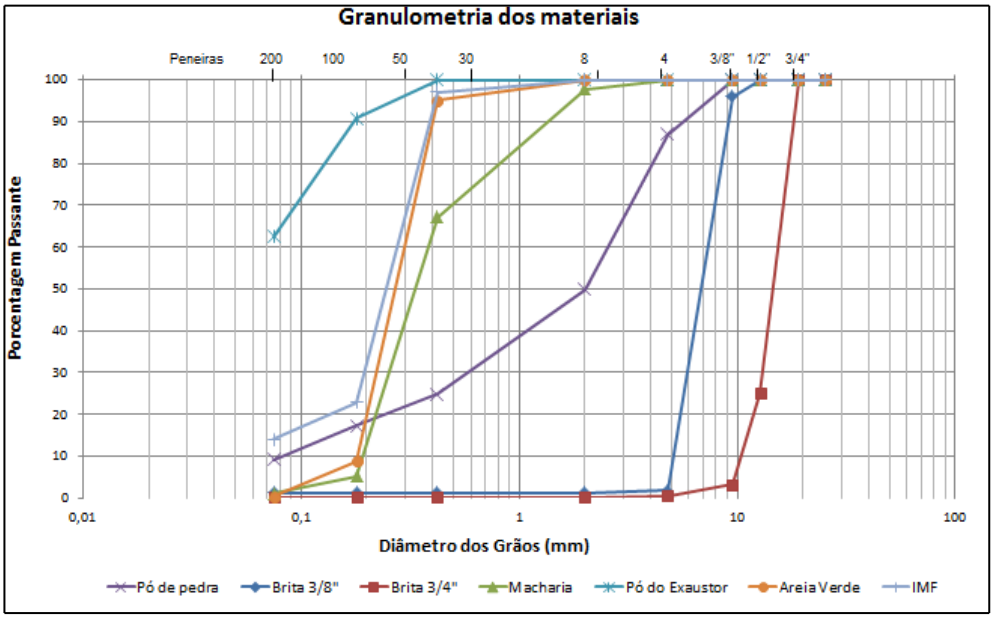
Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Toleráncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
N° 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
N° 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
N° 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
N° 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
N° 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT – ES 031/2006

Distribuição granulométrica dos materiais

De acordo com a curva granulométrica formada por cada material tem-se seu provável comportamento quando utilizado em campo e também a distribuição de seus grãos quanto a seus tamanhos específicos. Como citado anteriormente na revisão bibliográfica, de acordo com estes dados é possível classificar as misturas em abertas ou densas. O Gráfico 1 apresenta a distribuição granulométrica de todos os materiais envolvidos no estudo.

Gráfico 1: Curva granulométrica dos materiais analisados



Fonte: Autoria própria (2014)

3.4.1. Perda de massa dos CP's – Método Cantabro

Durante o processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos, os agregados estão sujeitos à abrasão, estes materiais devem apresentar habilidade para resistir a quebras, degradação e desintegração. Agregados localizados próximos ou na superfície do pavimento devem apresentar resistência à abrasão maior do que os localizados nas camadas inferiores. (BERNUCCI et al. 2008)

Esta resistência abrasiva é tratada por normas brasileiras que avaliam este desgaste sofrido pelos agregados e os classificam conforme suas condições e capacidades. O ensaio mais comum realizado para este tipo de especificação segue as diretrizes da norma DNER-ME 035/98 – Agregados: determinação da abrasão Los Angeles.

Nesse ensaio uma amostra de agregado de cerca de 5.000g é submetida a 500 ou 1.000 revoluções no interior do cilindro de um equipamento padronizado. Um número variado de esferas de aço, conforme a granulometria da amostra, é adicionado no cilindro, induzindo impactos nas partículas durante as suas revoluções. O resultado é avaliado pela redução de massa dos agregados retidos na peneira de nº 12 (1,7mm) em relação à massa inicial da amostra especificada. (BERNUCCI et al. 2008)

3.4.2. Adesividade ao ligante asfáltico

O efeito da água em separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. Por este motivo a propriedade de adesividade é verificada antes de qualquer utilização juntamente com a mistura, para que problemas posteriores sejam evitados.

Segundo Budny (2009), os ensaios para determinação das características de adesividade podem ser subdivididos em dois grupos: aqueles que avaliam o comportamento de partículas de agregados recobertas por ligante asfáltico e aqueles que avaliam o desempenho de determinadas propriedades mecânicas de misturas sob a ação da água.

O método de ensaio com grande utilização para determinação do dano causado pela umidade é o Lottman Modificado, descrito na norma AASHTO T 283, onde amostras compactadas cilíndricas regulares de misturas asfálticas com teores de vazios preestabelecidos são parcialmente saturadas com água e submetidas à baixas temperaturas para congelamento durante um período de horas estabelecido em norma, simulando com isso a presença de água na mistura e tensões internas induzidas por cargas do tráfego. As amostras descongeladas e à temperatura de equilíbrio de 25°C são submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT'); outro conjunto similar de amostras compactadas cilíndricas regulares, não submetidas ao processo de saturação e congelamento, são igualmente submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) à temperatura de 25°C. A relação entre RT'/RT indica a perda de resistência por umidade induzida. Essa relação deve ser maior ou igual a 0,70, ou seja, a perda deve ser inferior ou igual a 30% (BERNUCCI et al. 2008).

3.4.3. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio determina a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas, através do ensaio de compressão diametral, conforme preconiza a DNIT-ME 126/2010.

Conforme a norma do DNIT-ME 126/2010, o corpo de prova para o ensaio pode ser obtido diretamente na pista por extração, por meio de sonda ou moldado em laboratório. Deve

ter forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm e 6,50 cm e diâmetro de 10 cm. Antes do início do rompimento a altura e diâmetro do corpo de prova devem ser anotados.

Os corpos de prova devem ser estabilizados em temperatura de 25ºC por duas horas, após esse período, o corpo de prova é colocado na prensa entre dois frisos metálicos, curvos em uma das faces, com comprimento igual ao do corpo de prova. Aplica-se então cargas gradativas crescentes até que esta cause a ruptura do corpo de prova, após o rompimento tem-se o valor da resistência do corpo de prova.

3.4.4. Ensaio de módulo de resiliência

De acordo com DNIT-ME 135/2010, resiliência é a capacidade do material de absorver energia quando deformado elasticamente por uma carga e após o descarregamento ter parte da sua energia recuperada. Esse ensaio procede às normativas da norma e para isso recebe força triaxial, se caracteriza por possuir uma carga pontual de 0,1 segundos e um repouso de 0,9 segundos.

Seguindo recomendações da norma, DNIT-ME 135/2010 posiciona-se o corpo de prova na prensa, por meio de garras em suas faces extremas, ajusta-se o pistão de carga para o contato com o corpo de prova, o mesmo é fixado e seus transdutores ajustados para que o registro de carga seja percebido pelo computador.

4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS AMOSTRAS

Segundo Corrente (2014), estatística experimental, é a parte da estatística que se preocupa em obter conclusões a partir de dados experimentais. Um experimento permite a coleta das observações sob condições determinadas, ou seja, trata-se de tratamento previamente planejado, que segue determinados princípios básicos, no qual se faz comparação de seus efeitos. No estudo experimental manipula-se de forma planejada certas variáveis independentes ou fatores (A, B, C,...) para verificar o efeito que esta manipulação provoca numa certa variável dependente ou resposta Y.

Ainda segundo o mesmo autor, existem estratégicas para o planejamento de certos experimentos e são elas:

- Reconhecer, estabelecer e delimitar claramente o problema;
- Identificar os possíveis fatores que podem afetar o problema em estudo;
- Verificar quais fatores que poderão ser mantidos fixos e, portanto, não terão os seus efeitos avaliados no estudo experimental;
- Identificar, para cada fator, o intervalo de variação e os níveis que entrarão no estudo;
- Escolher um projeto experimental adequado, isto é, saber como combinar os níveis dos fatores de forma que se possa resolver o problema proposto com o menor custo possível;
- Escolher a resposta adequada, ou seja, a variável *Y* que mede adequadamente o resultado (a qualidade, o desempenho, etc.) do processo e o planejamento de como será a análise dos dados do experimento.

4.1. Análise de variância, método da ANOVA

De acordo com Corrente (2014), a análise de variância é um teste estatístico amplamente difundido entre os analistas, que visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Os fatores propostos podem ser de origem qualitativa ou quantitativa, mas a variável dependente necessariamente deverá ser contínua.

A principal aplicação da ANOVA (analise of variance) é a comparação de médias oriundas de grupos diferentes, também chamados tratamentos, como por exemplo, médias históricas de questões de satisfação, empresas que operam simultaneamente com diferentes rendimentos, entre muitas outras aplicações.

A análise de variância é uma técnica proposta por Fisher (1890-1962), utilizada para comparar as médias de várias amostras ao mesmo tempo. Consiste em comparar *a variação devido aos tratamentos* com a *variação devido ao acaso* ou resíduo. Seja um experimento com I tratamentos com J repetições, onde:

Yi é a variável resposta

ij y representa os dados observados

4.1.1. Hipóteses para o Teste F

Uma possível abordagem para o problema de comparação múltipla é fazer cada comparação independentemente usando um procedimento estatístico adequado. Por exemplo, um teste de hipótese estatístico pode ser usado para comparar cada par de médias, em que a hipótese nula e a hipótese alternativa são da forma.

- ✓ Ho= Fcal = 0: Não existe diferença significativa entre os efeitos dos tratamentos.
- ✓ Ha= Fcal >0: Existe, pelo menos, uma diferença significativa entre os efeitos dos tratamentos.

A Figura 8 apresenta os dados para análise de ANOVA através de um Experimento Inteiramente Causalizado – DIC. Pode-se mostrar que o quociente QMTrat/QMRes tem distribuição F com (I − 1) e I (J − 1) graus de liberdade, supondo que, todas são variáveis independentes e todos os tratamentos têm variâncias iguais. Por esses motivos, os pressupostos da ANOVA devem ser testados ou avaliados em qualquer análise.

Se Fcalculado> Ftabelado, rejeita-se a hipótese de nulidade H0 , ou seja, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível α de significância escolhido. Caso contrário, não rejeita-se a hipótese de nulidade H0, ou seja, não há evidências de diferença significativa entre tratamentos, ao nível α de significância escolhido. Outra maneira de avaliar a significância da estatística F é utilizando o p-valor. Se o

p-valor< α, rejeitamos a hipótese de nulidade H0. Caso contrário, não se rejeitamos a hipótese de nulidade H0, ou seja, não há evidências de diferenças significativas entre os tratamentos, ao nível α de significância escolhido.

Figura 8: Experimento Inteiramente Casualizado - DIC, através da ANOVA

FONTES DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F_C	*P*
Entre os tratamentos (Tratamentos)	*k – 1*	SQT	QMT	F_{calc}	
Dentro de tratamentos (Resíduos)	*n - k*	SQR	QMR		
TOTAL	*n - 1*	SQ GERAL	-----	-----	---

Fonte: Corrente (2014)

Os dados da tabela são identificados como: k= número de tratamentos

r= número de repetições de cada um dos tratamentos

n= r.k

SQ: Soma dos quadrados.

QM: Quadrados médios.

SQT: Soma dos Quadrados Total (Tratamentos).

SQR: Soma de Quadrados Residual.

SQG: Somatório Quadrático Geral.

Para realização de cada uma destas siglas deve-se tomar como referencia as formulas apresentadas pela Figura 9. Através destas fórmulas os cálculos seguintes podem ser realizados sem que haja complicações.

Figura 9: Fórmulas necessárias para realização da análise ANOVA

$$SQG = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \qquad SQT = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i^2}{r} - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \qquad SQR = SQG - SQT$$

$$QMT = \frac{SQT}{k-1} \qquad QMR = \frac{SQR}{n-k} \qquad F_{calculado} = \frac{QMT}{QMR}$$

Fonte: Corrente (2014)

Depois de feita execução dos referidos cálculos e encontrar o Fcalc deve-se prosseguir à tabela de probabilidade F que segue exemplificada no ANEXO D e ali encontrar seu limite, que é dado pela fórmula:

$$F_{tabela} = F_{n-k}^{k-1}$$

Com estes dois dados pode-se determinar a condição de Ho e descobrir se há ou não diferenças significativas entre os resultados.

4.1.2. Teste de Comparação entre as Médias de Tratamentos

De acordo com Corrente (2014), se H0 for rejeitada, ou seja, se pelo menos um tratamento difere dos demais, então o interesse é identificar qual é este(s) tratamento(s). Existem vários testes de comparação múltipla entre médias: Tukey, Scheffé, SNK, Duncan quando os tratamentos são fatores qualitativos e análise de regressão quando os tratamentos são fatores quantitativos.

4.1.3. Teste de Tukey

Conforme Corente (2014)), após concluirmos que se existe diferença significativa entre tratamentos, por meio do teste F, podemos avaliar a magnitude destas diferenças utilizando um teste de comparações múltiplas. O teste de Tukey permite testar qualquer contraste, sempre, entre duas médias de tratamentos, ou seja, não permite comparar grupos entre si. O teste baseia-se na Diferença Mínima Significativa (DMS), a estatística do teste é dada da seguinte forma:

$$dms = q\sqrt{\frac{QM\,\mathrm{Res}}{r}}$$

dms = diferença mínima significativa.

q = valor tabelado, com os parâmetros , número de tratamentos e grau de liberdade do resíduo.

QMRes = quadrado médio do resíduo da ANOVA.

Como o teste de Tukey é, de certa forma, independente do teste F, é possível que, mesmo sendo significativo o valor de Fcalculado, não se encontrem diferenças significativas entre contrastes de médias. Após a determinação do “dms” realiza-se a diferença de médias entre cada uma das amostras ensaiadas. A média da diferença entre as amostras que mais se aproximar do valor obtido pela “dms” representa a amostra escolhida como mais significativa e que deve ser utilizada como referência para as demais determinações.

5. ÁNALISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados com a inserção de areias de fundição no concreto asfáltico convencional, anteriormente citados no capitulo 3.

Procurou-se realizar ensaios que caracterizassem a mistura de forma mecânica, estrutural e também física e para todas estas considerações que foram levantadas ao longo deste capítulo seguiram-se normativas brasileiras.

Visando os melhores resultados para este estudo, preocupou-se também com a influência que estas misturas asfálticas com inserção de material de fundição causariam ao meio ambiente quando aplicadas em campo, por este motivo realizou-se um ensaio de lixiviação a fim de verificar se a água percolada por este material possuía ou não elementos contaminantes ao lençol freático. Desta forma pretende-se confirmar a viabilidade de tal substituição em grandes quantidades.

5.1. Análise granulométrica dos materiais

De acordo com a metodologia descrita anteriormente, as peneiras utilizadas na dosagem seguiram especificação da DNIT 031/2006. Já o método de realização da granulometria decorreu da DNER – ME 080/1994 norma que preconiza a realização da granulometria com lavagem para que o pó existente entre os grãos seja eliminado e posteriormente os mesmos garantam maior aderência com o cimento asfáltico.

Decorrida a o peneiramento de cada material, seguiu-se com a formulação da curva granulométrica de cada material constituinte da mistura, seja ele pétreo ou residual. A partir desta caracterização deu-se seguimento à dosagem da mistura que seria analisada mecânica e estruturalmente. Estas caracterizações serão descritas em sequencia.

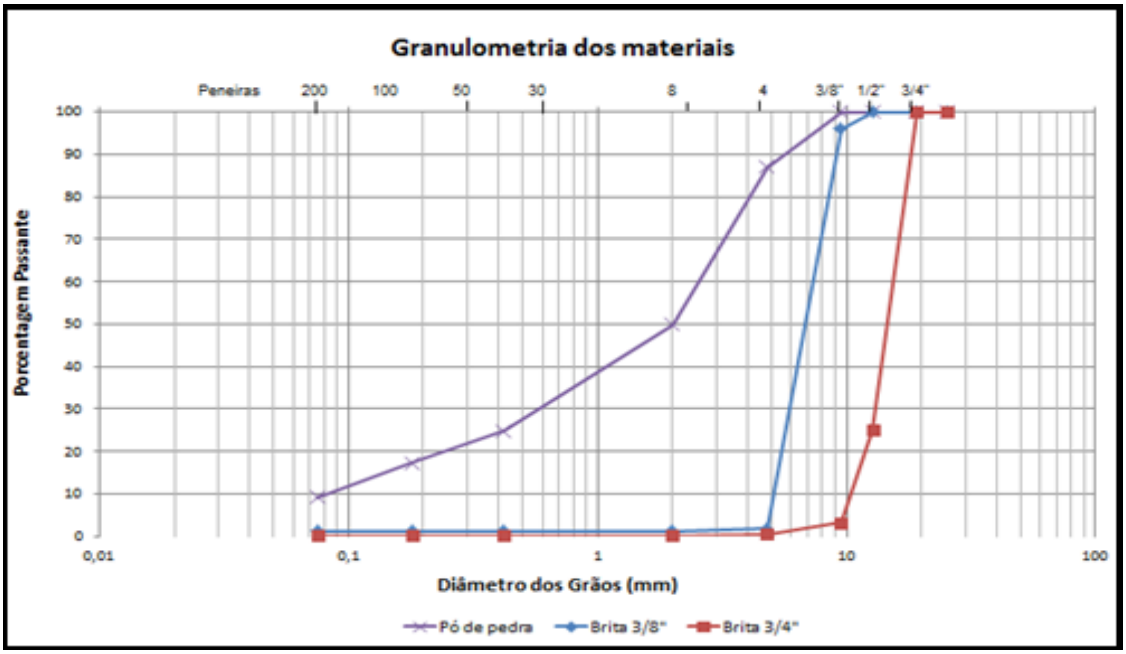
5.1.1. Granulometria dos materiais pétreos

Para caracterização granulométrica dos materiais procedeu-se de forma lavada, conforme normativa já citado, juntamente com seu conjunto correspondente de peneiras.

Depois deste peneiramento concluído, tratou-se de analisar a curva granulométrica apresentada por cada uma destes materiais e estimar qual seria sua melhor utilização quando aplicado em campo.

Conforme apresenta o Gráfico 2 os materiais pétreos apresentam características distintas entre si. A brita denominada ¾” caracteriza-se como material graúdo e de granulometria fechada, e fica retido em praticamente duas peneiras apenas (19,5 mm e 12,5mm), a brita 3/8” também apresenta a mesma granulometria graúda, entretanto seu material se mantém retido entre as peneiras (9.75mm e 4.8 mm). O pó de pedra difere dos outros materiais e apresenta granulometria miúda, visivelmente mais fino e com grande porcentagem de finos, é o material com maior distribuição entre as peneiras por ser 100% passante na peneira 4,8mm, apresentando desta forma uma curva granulométrica denominada aberta.

Gráfico 2: Distribuição granulométrica dos agregados pétreos



Fonte: Próprio autor (2014)

5.1.2. Granulometria dos materiais residuais

As areias de fundição utilizadas neste trabalho de conclusão de curso foram provindas de diferentes etapas do processo de desmoldagem das peças metálicas e devido a este fato apresentam distribuições granulométricas diferentes.

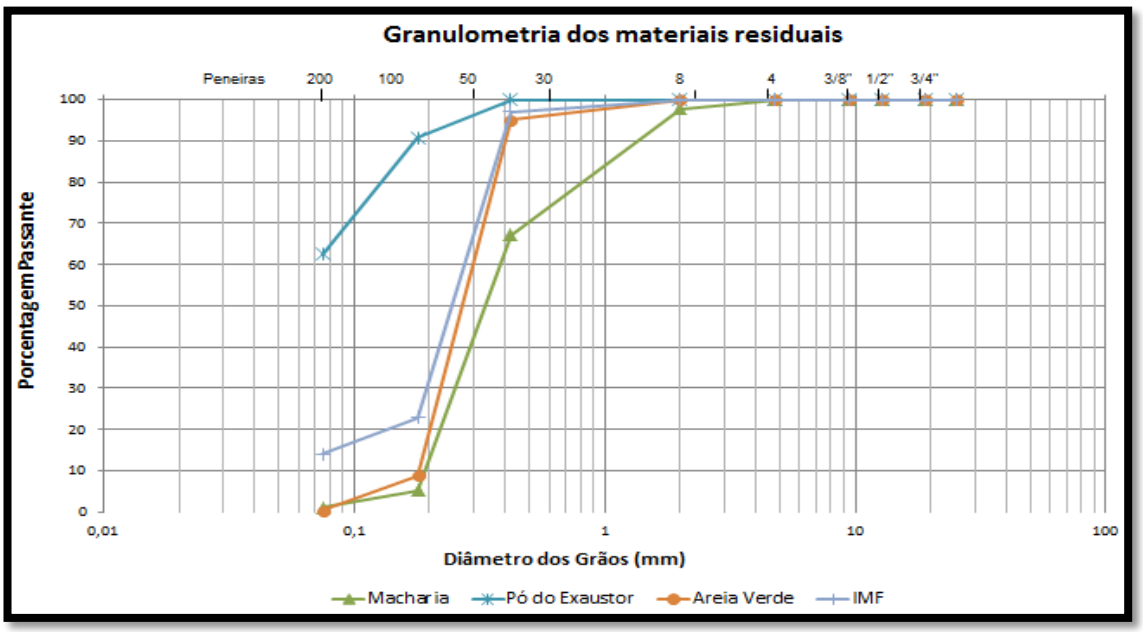
A areia de macharia por ser o primeiro resíduo gerado após a desforma dos machos metálicos moldados em areia acaba por apresentar certo tipo de resina que tem como função repelir parcialmente a água e garantir estabilidade a peça a ser moldada. Esta resina não foi identificada e devido a este fato gerou dificuldades na hora da lavagem de seus grãos sendo necessário que as amostras permanecessem 48 horas cobertas por água destilada a fim de "desprender" esta resina de suas partículas e a granulometria decorrer normalmente.

A areia verde visivelmente não apresentava nenhum tipo de resina entre seus grãos e uma granulometria mais fina do que a areia de macharia o que facilitou sua lavagem e caracterização, mas devido a este maior módulo de finura uma pequena porcentagem de material acabou sendo eliminado durante a lavagem, contudo esta porcentagem não comprometeu a análise do material.

O resíduo gerado pela máquina IMF apresenta granulometria e características parecidas com a areia verde, inclusive com sua pequena perda de material durante a lavagem. A divergência destes dois materiais acontece pelo aspecto visual, conforme mostrado em foto anterior, a areia de IMF apresenta coloração mais escura. Ressalta-se que todo o material da IMF acabou retido entre as peneiras de número 40, 80 e 200.

Por fim tratou-se de definir a característica do material mais fino e pulverulento que se tinha inserido na pesquisa, o pó do exaustor, sua granulometria, juntamente com os demais agregados residuais estão apresentadas pelo Gráfico 3. Este material foi peneirado da mesma forma como os demais e também apresentou perdas durante sua lavagem, mas nada que prejudicassem os ensaios decorridos, visivelmente este material o mais fino de todos e por esta razão deve apresentar boa resistência junto ao concreto asfáltico, pois seu modulo de finura pode contribuir no fechamento dos vazios da mistura.

Gráfico 3: Distribuição granulométrica dos agregados residuais



Fonte: Autoria própria (2014)

5.2 Densidades dos materiais

As densidades das misturas foram divididas de acordo com a granulometria de seus materiais constituintes, a parte de material graúdo foi preconizada pela DNIT 081/1998 e segue com seus valores descritos na Tabela 2, suas fórmulas foram apresentadas na metodologia do presente trabalho. Como a parte graúda das misturas era igual, esta densidade determinada foi aplicada para todas as misturas, variando apenas as densidades dos agregados miúdos constituintes.

Tabela 2: Densidade do material graúdo

Amostra A		Amostra B	
Mh	1006,32	Mh	1007,4
L	658,69	L	658,1
Ms	991,80	Ms	993,6
Dap	2,853033	**Dap**	2,844546
Dr	2,977395	**Dr**	2,96155
A	1,464005	**A**	1,388889
Média Daparente		2,849	
Média Dreal		2,969	
Média Absorção		1,426	
Diferença Daparente		0,008	
Diferença Dreal		0,016	
Diferença Absorção		0,075	

Fonte: Autoria própria (2014)

Os materiais miúdos apresentavam diferenças entre si, por isso suas densidades foram realizadas separadamente, as areias (macharia, areia verde e IMF) e pó de pedra que apresentavam maior módulo de finura foram determinadas através da norma DNER-ME 084/1995 pelo método do picnômetro e seus resultados estão apresentados isoladamente na Tabela 3.

O pó do exaustor e a cal tiveram suas densidades determinadas através do frasco de Le Chatelier, assim como preconiza a norma de cimento Portland NBR NM 23/2000, o pó do exaustor por ser muito fino acabava subindo o picnômetro quando colocado na bomba de vácuo e por isso, utilizou-se este outro método para sua análise, estes resultados são apresentados pela Tabela 4.

O material que apresentou mais resistência a este ensaio foi a areia de macharia, pois a resina que recobre seus grãos dificultou sua interação com a água dentro do picnômetro, como apresentado pela Figura 10, entretanto, mesmo tendo este comportamento o material foi ensaiado da mesma forma como prescreve a forma. A Tabela 5 apresenta as densidades dos materiais em referência a dosagem completa, o somatório da porcentagem de cada material na mistura juntamente com suas densidades, para qualificar os resultados e diminuir a chance de erro destas densidades.

Tabela 3: Densidades dos agregados miúdos isoladamente

Areia Verde					Areia IMF				
Amostra A			Amostra B		Amostra A			Amostra B	
a	148,33		a	147,52	a	141,98		a	133,43
b	450,74		b	484,54	b	453,26		b	461,5
c	827,72		c	842,12	c	834,33		c	812,5
d	636,8		d	632,09	d	649,5		d	617,78
D25	2,712441		**D25**	2,65391	**D25**	2,461684		**D25**	2,460217
Média			2,68318		**Média**			2,46095	
Diferença			0,05853		**Diferença**			0,00147	

Areia Macharia					Referência				
Amostra A			Amostra B		Amostra A			Amostra B	
a	142,02		a	132,95	a	148,32		a	148,02
b	480,26		b	445,57	b	452,74		b	482,75
c	862,2		c	828,44	c	838,18		c	853,55
d	632,89		d	617,76	d	637,38		d	632,42
D25	3,105113		**D25**	3,066706	**D25**	2,93785		**D25**	2,946567
Média			3,0859		**Média**			2,94221	
Diferença			0,0384		**Diferença**			0,00872	

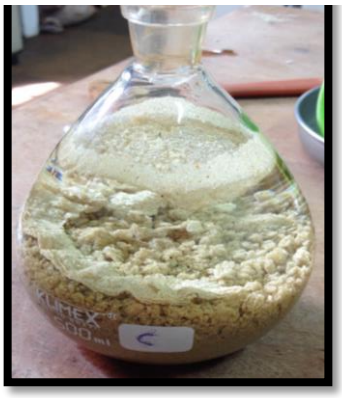
Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 4: Densidades através do Frasco de Le Chatelier

Areia Pó do Exaustor					CAL				
Amostra A			Amostra B		Amostra A			Amostra B	
$p = \frac{m}{v}$			$p = \frac{m}{v}$		$p = \frac{m}{v}$			$p = \frac{m}{v}$	
m	55		m	55	m	55		m	55
v2	18,6		v2	19	v2	22,5		v2	21,9
v1	0,1		v1	0,6	v1	0,8		v1	0,6
v	18,50		v	18,40	v	21,70		v	21,30
p	2,972973		p	2,98913	p	2,534562		p	2,58216
Média			2,98105		**Média**			2,55836	
Diferença			0,01616		**Diferença**			0,04760	

Fonte: Autoria própria (2014)

Figura 10: Comportamento da areia de macharia quando exposta à água



Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 5: Densidade final de cada mistura

MISTURA DE REFERÊNCIA		
$\frac{\text{pas n4 (31,21)}}{\frac{\text{pas n4 (31,21)}}{\text{D Agreg (2,9422)}}}$	DREF	2,94221
MISTURA AREIA DE MACHARIA		
$\frac{\text{pas n4 (31,21)}}{\frac{5\%\,Macharia}{DR\,Macharia}+\frac{31{,}21\ -6}{Dr.Agreg\,Miúdo}+\frac{1\%}{Dr.Cal}}$	DAMA	2,95003
MISTURA AREIA VERDE		
$\frac{\text{pas n4 (31,21)}}{\frac{5\%\,Macharia}{Dr\,Ar.Verde}+\frac{31{,}21\ -6}{Dr.Agreg\,Miúdo}+\frac{1\%}{Dr.Cal}}$	DV	2,88374
MISTURA AREIA IMF		
$\frac{\text{pas n4 (31,21)}}{\frac{5\%\,Macharia}{Dr\,Ar.IMF}+\frac{31{,}21\ -6}{Dr.Agreg\,Miúdo}+\frac{1\%}{Dr.Cal}}$	DIMF	2,8396
MISTURA AREIA PÓ DO EXAUSTOR		
$\frac{\text{pas n4 (31,21)}}{\frac{5\%\,Macharia}{Dr\,Ar.Pó}+\frac{31{,}21\ -6}{Dr.Agreg\,Miúdo}+\frac{1\%}{Dr.Cal}}$	DPÓ	2,93423

Fonte: Autoria própria (2014)

5.3 Misturas realizadas

Depois de realizada todas as granulometrias dos materiais envolvidos no trabalho, começou-se a trabalhar com as misturas que seriam formadas, de modo a atender a faixa C da DNIT – ES 031/2006, camada destinada a rolamento conforme especificação.

A inserção de areia de fundição se deu na ordem de 5% em relação à massa total da mistura, tendo como base o peso do material constituinte do corpo de prova que é de 1200 gramas. Ao decorrer deste subtítulo serão apresentadas essas misturas detalhadamente.

Vale a ressalta de que a substituição do agregado pétreo por areia de fundição seguiu como padrão para todas as misturas em 5%, mesmo sabendo que os materiais apresentam granulometrias e características diferentes, pois todos apresentaram as exigências mínimas para serem utilizados na mistura de CBUQ, como módulo de finura dos grãos.

5.3.1 Mistura de referência (REF)

O primeiro passo para este enquadramento foi traçar uma mistura que fosse dita como base, onde não houvesse inserção de nenhuma das areias de fundição e cal, esta mistura recebeu o nome de Referência, é constituída de brita ¾”, brita 3/8”, pó de pedra e CAP 50/70 apenas. A distinção desta mistura é apresentada na

Tabela 6.

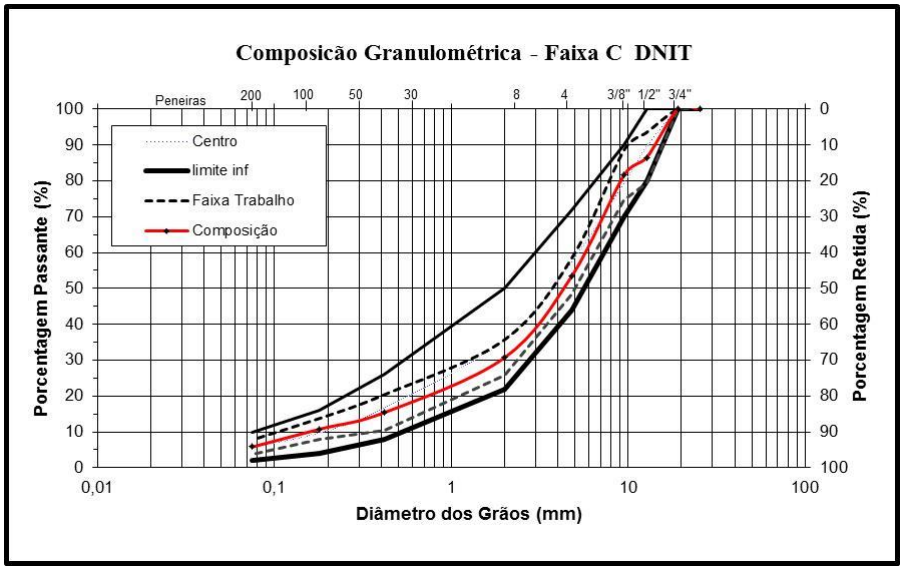
Após o enquadramento da mistura de Referência dentro da faixa C, como mostra o Gráfico 4, procedeu-se o enquadramento das demais misturas, agora usando cada um dos tipos de areia de fundição.

Tabela 6: Porcentagens de cada material na mistura

COMPOSIÇÃO DA MISTURA REFERÊNCIA					
% mistura		18,0%	21,0%	61,0%	100,0%
PENEIRA	mm	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	MISTURA
1	25,4	18,0	21,0	61,0	100
3/4"	19,1	18,0	21,0	61,0	100
1/2"	12,7	4,5	21,0	61,0	86,5
3/8"	9,5	0,6	20,1	61,0	81,7
n 4	4,8	0,1	0,4	53,1	53,5
n 10	2	0,0	0,3	30,4	30,7
n 40	0,42	0,0	0,3	15,2	15,5
n 80	0,18	0,0	0,3	10,5	10,8
n 200	0,075	0,0	0,2	5,6	5,8
frações	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	0	
%	18%	21%	61%	100,0%	

Fonte: Autoria própria (2014)

Gráfico 4: Material enquadrado na faixa C



Fonte: Autoria própria (2014)

5.3.2 Mistura com 5% de areia de macharia (AMA)

A mistura utilizando areia de macharia recebeu o nome em todas as moldagens de AMA (Areia Macharia), para que sua identificação fosse facilitada.

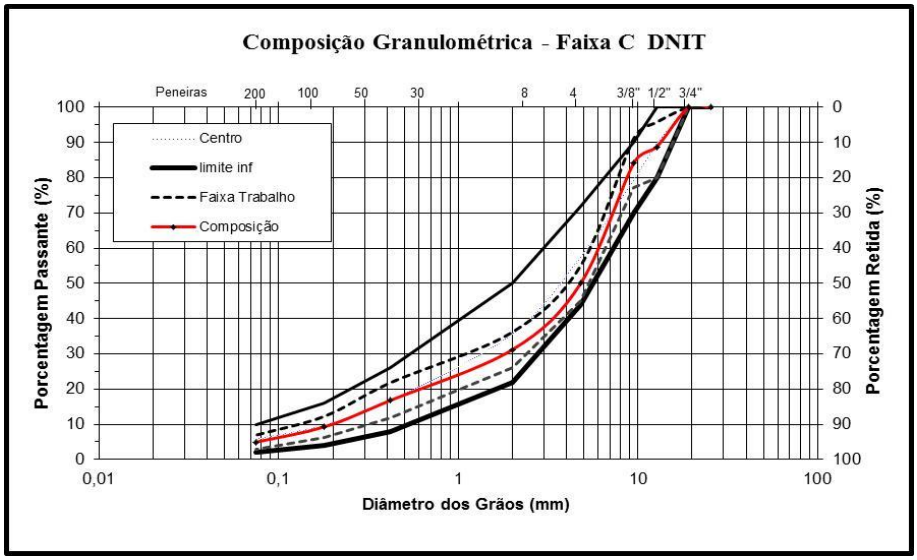
A composição desta está apresentada na Tabela 7 e descreve a quantidade de cada material que foi acrescido na mistura, adicionou-se também 1% de cal calcítica para que propriedades como adesividade fossem melhoradas, entretanto ressalta-se que a inserção de apenas 1% deste material não compromete o comportamento da mistura. O GR apresenta a distribuição do material dentro dos limites da faixa C da norma.

Tabela 7: Porcentagens de cada material na mistura.

COMPOSIÇÃO DA MISTURA MACHARIA							
% mistura		15,0%	29,0%	50,0%	1,0%	5,0%	
PENEIRA	mm	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	CAL	MACHARIA	MISTURA
1	25,4	15,0	29,0	50,0	1,0	5,0	100,0
3/4"	19,1	15,0	29,0	50,0	1,0	5,0	100,0
1/2"	12,7	3,8	29,0	50,0	1,0	5,0	88,8
3/8"	9,5	0,5	27,8	50,0	1,0	5,0	84,3
n 4	4,8	0,1	0,5	43,5	1,0	5,0	50,1
n 10	2	0,0	0,4	25,0	1,0	4,9	31,2
n 40	0,42	0,0	0,4	12,4	0,7	3,4	16,8
n 80	0,18	0,0	0,4	8,6	0,1	0,3	9,3
n 200	0,075	0,0	0,3	4,6	0,0	0,0	5,0
frações	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	MACHARIA	CAL	TOTAL	
%	15%	29%	50%	1,0%	5,0%	100%	

Fonte: Autoria própria (2014)

Gráfico 5: Mistura de macharia dentro dos limites da faixa



Fonte: Autoria própria (2014)

5.3.3 Mistura com 5% de areia verde (AV)

A mistura que recebeu os 5% de areia verde foi identificada como AV (Areia Verde) para facilitar sua identificação juntamente com outras misturas. A quantidade de cada material presente na mistura AV está apresentada na Tabela 8, percebe-se que a mistura apresenta além dos agregados pétreos, os 5% de areia de verde e 1% de cal calcítica, que deve melhorar certas características como já foi citado.

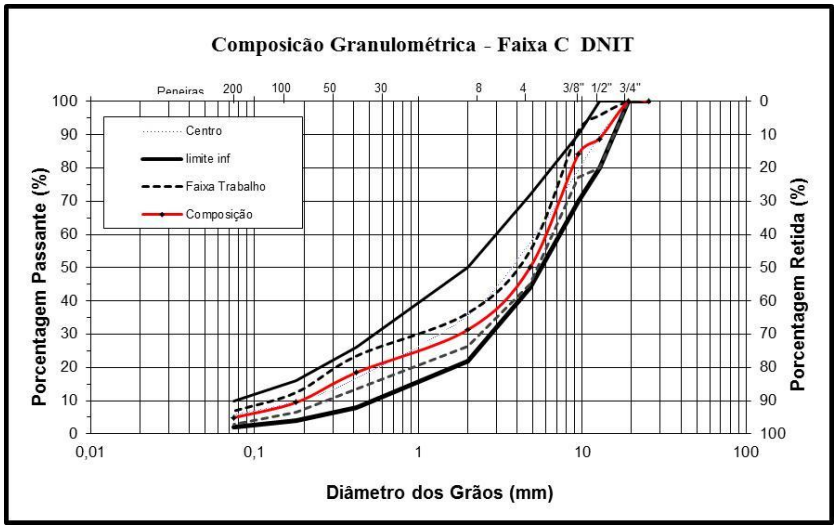
Tabela 8: Porcentagens de cada material na mistura

COMPOSIÇÃO DA MISTURA AREIA VERDE							
% mistura		15,0%	29,0%	50,0%	1,0%	5,0%	100%
PENEIRA	mm	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	CAL	AREIA VERDE	MISTURA
1	25,4	15,0	29,0	50,0	1,0	5,0	100,0
3/4"	19,1	15,0	29,0	50,0	1,0	5,0	100,0
1/2"	12,7	3,8	29,0	50,0	1,0	5,0	88,8
3/8"	9,5	0,5	27,8	50,0	1,0	5,0	84,3
n 4	4,8	0,1	0,5	43,5	1,0	5,0	50,1
n 10	2	0,0	0,4	25,0	1,0	5,0	31,3
n 40	0,42	0,0	0,4	12,4	0,9	4,7	18,5
n 80	0,18	0,0	0,4	8,6	0,1	0,4	9,5
n 200	0,075	0,0	0,3	4,6	0,0	0,0	4,9
Frações	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	AREIA VERDE	CAL	TOTAL	
%	15%	29%	50%	1,0%	5,0%	100%	

Fonte: Autoria própria (2014)

O material areia verde apresenta granulometria mais fina que a areia de macharia, mas enquadrou-se perfeitamente na faixa C do DNIT, conforme exemplifica o Gráfico 4.

Gráfico 6: Material enquadrado na faixa C



Fonte: Autoria própria (2014)

5.3.4 Mistura com 5% de areia IMF (AIMF)

A areia denominada IMF também recebeu nova nomenclatura e foi chamada de AIMF para ser identificada nos demais ensaios que serão apresentados.

A Tabela 9 apresenta a porcentagem de cada material que constituí a mistura, assim como as demais, nesta também foi inserido 1% de cal.

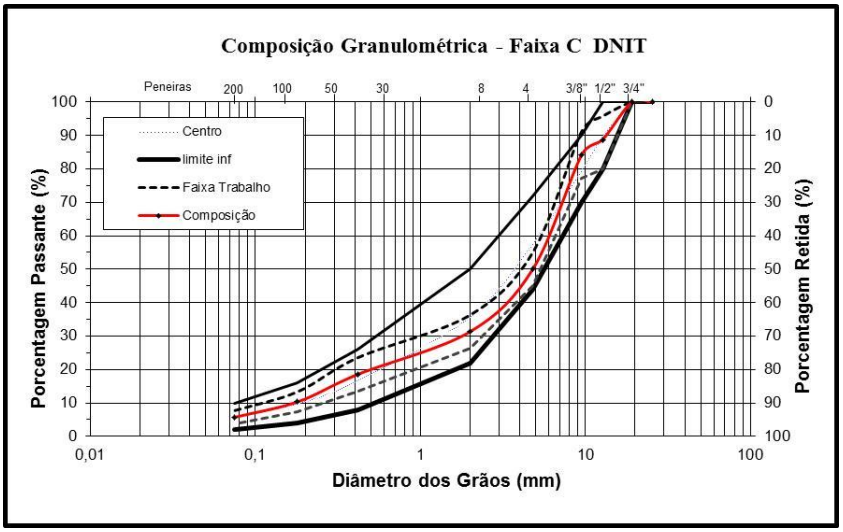
A fim de atender as especificações normativas seguidas pelos demais materiais, a AIMF também enquadrou-se na faixa C do DNIT e segue apresentada no Gráfico 7.

Tabela 9: Porcentagens constituintes de cada material da mistura

COMPOSIÇÃO DA MISTURA AIMF							
% mistura		15,0%	29,0%	50,0%	1,0%	5,0%	
PENEIRA	mm	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	CAL	IMF	MISTURA
1	25,4	15,0	29,0	50,0	1,0	5,0	100,0
3/4"	19,1	15,0	29,0	50,0	1,0	5,0	100,0
1/2"	12,7	3,8	29,0	50,0	1,0	5,0	88,8
3/8"	9,5	0,5	27,8	50,0	1,0	5,0	84,3
n 4	4,8	0,1	0,5	43,5	1,0	5,0	50,1
n 10	2	0,0	0,4	25,0	1,0	5,0	31,3
n 40	0,42	0,0	0,4	12,4	1,0	4,9	18,6
n 80	0,18	0,0	0,4	8,6	0,2	1,1	10,4
n 200	0,075	0,0	0,3	4,6	0,1	0,7	5,8
Frações	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	IMF	CAL	TOTAL	
%	15%	29%	50%	1,0%	5,0%	100%	

Fonte: Autoria própria (2014)

Gráfico 7: Enquadramento da mistura na faixa C



Fonte: Autoria própria (2014)

5.3.5 Mistura com 5% de pó do exaustor (APÓ)

O material que gerou maior dificuldade de manuseio certamente foi o pó do exaustor, por ser muito fino e apresentar aspecto parecido ao de algum tipo de farinha, sua granulometria foi trabalhosa, mas executável, assim sendo, o material foi separado por peneiras como os demais e através disso sua dosagem seguiu os métodos normais.

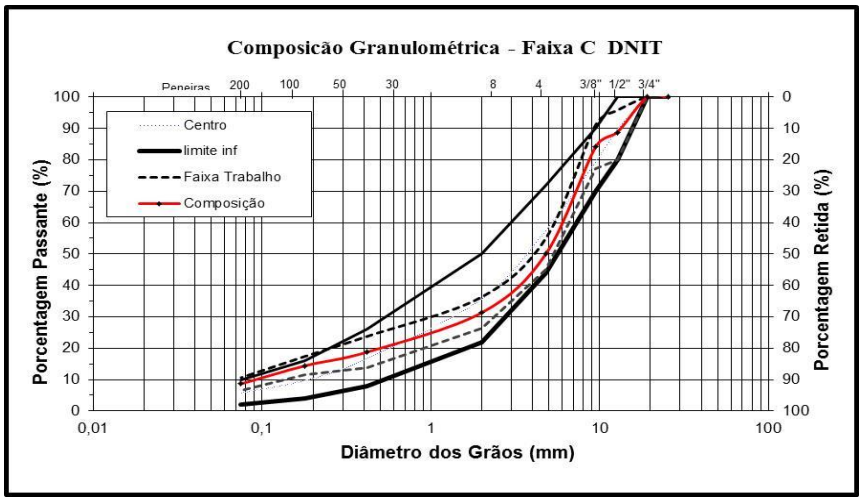
A porcentagem de material que compõem a mistura é apresentada pela Tabela 10 e sua distribuição dentro dos limites da faixa C em análise pelo Gráfico 8.

Tabela 10: Porcentagem dos materiais que constituem a mistura

COMPOSIÇÃO DA MISTURA PÓ DO EXAUSTOR							
% mistura		15,0%	29,0%	50,0%	1,0%	5,0%	100%
PENEIRA	mm	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	CAL	PÓ EXAUSTOR	MISTURA
1	25,4	15,0	29,0	50,0	1,0	5,0	100,0
3/4"	19,1	15,0	29,0	50,0	1,0	5,0	100,0
1/2"	12,7	3,8	29,0	50,0	1,0	5,0	88,8
3/8"	9,5	0,5	27,8	50,0	1,0	5,0	84,3
n 4	4,8	0,1	0,5	43,5	1,0	5,0	50,1
n 10	2	0,0	0,4	25,0	1,0	5,0	31,3
n 40	0,42	0,0	0,4	12,4	1,0	5,0	18,8
n 80	0,18	0,0	0,4	8,6	0,9	4,5	14,4
n 200	0,075	0,0	0,3	4,6	0,6	3,1	8,7
Frações	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ-DE-PEDRA	PÓ EXAUSTOR	CAL	TOTAL	
%	15%	29%	50%	1,0%	5,0%	100%	

Fonte: Autoria própria (2014)

Gráfico 8: Distribuição granulométrica dentro da faixa de trabalho



Fonte: Autoria própria (2014)

5.4 Dosagem Marshall

Segundo Budny (2009), a dosagem Marshall sempre busca:

- Máxima massa específica aparente possível que garanta máxima estabilidade;
- Fluência em certos limites a fim de garantir flexibilidade à mistura;
- Volume de vazios entre certos limites para garantir que não ocorra oxidação da massa asfáltica pela ação da água e/ou ar e para que também não ocorra exsudação;
- Relação betume/vazios entre certos limites a fim de garantir que exista betume suficiente para unir os agregados sem exsudação.

Para execução da dosagem Marshall foram moldados diferentes grupos de corpos de prova, cada grupo composto por 3 CPs com diferentes teores de ligante asfáltico.

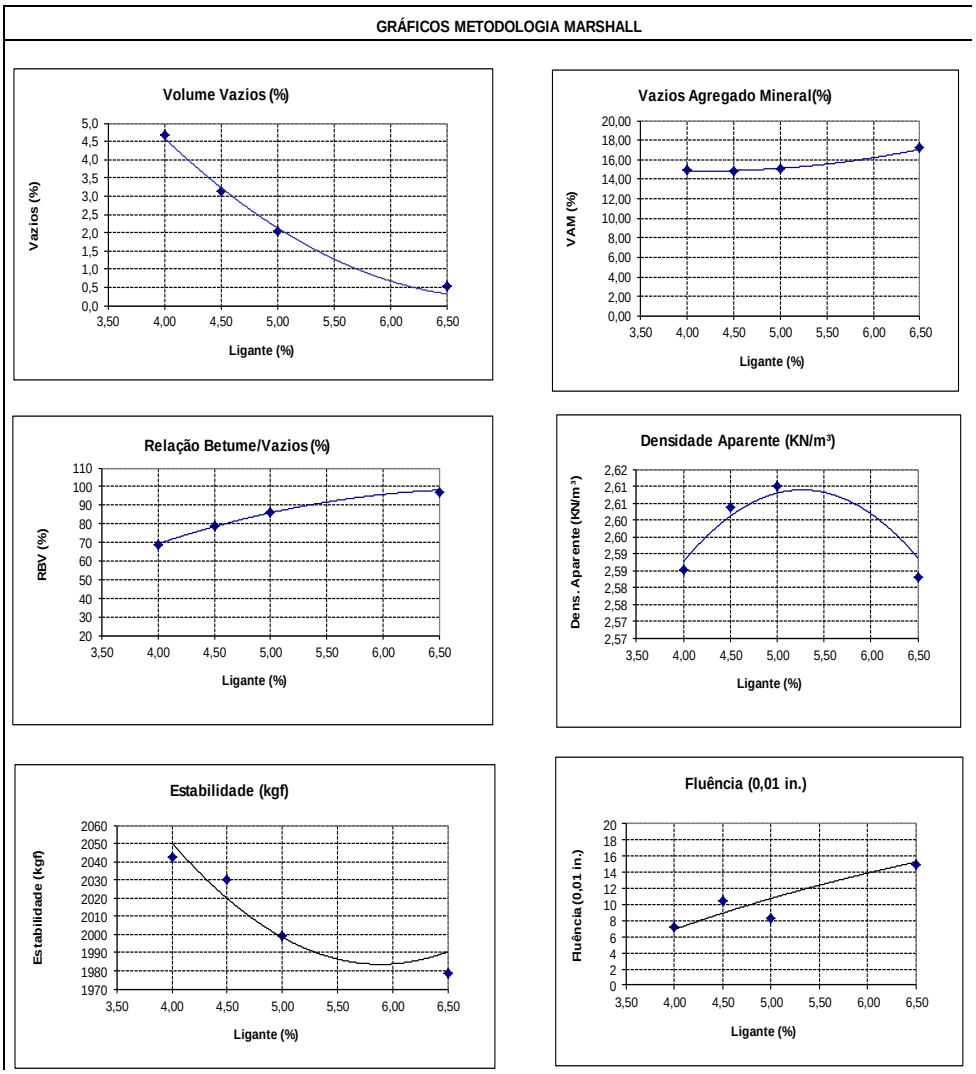
As tabelas 11, 12, 13, 14 e 15 apresentam os valores encontrados em cada parâmetro da metodologia Marshall e as figuras 11, 12, 13, 14 e 15 apresentam as curvas de cada um destes parâmetros em análise.

Tabela 11: Parâmetros da mistura de Referência

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS - REFERÊNCIA					
	Teor de Betume (%)				
Propriedade	*4,0*	*4,5*	*5,0*	*5,5*	*6,0*
Volume de Vazios (%)	5,0	3,7	2,6	2,8	2,3
Relação Betume Vazios (%)	67	76	83	84	87
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,36	15,37	15,61	16,92	17,69
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,73	2,70	2,68	2,66	2,63
Densidade Aparente (g/cm³)	2,59	2,60	2,61	2,58	2,57
Estabilidade (1/100 in)	2130	2034	1910	1908	1855
Fluência (kgf)	7	10	8	15	17

Fonte: Autoria própria (2014)

Figura 11: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura de Referência



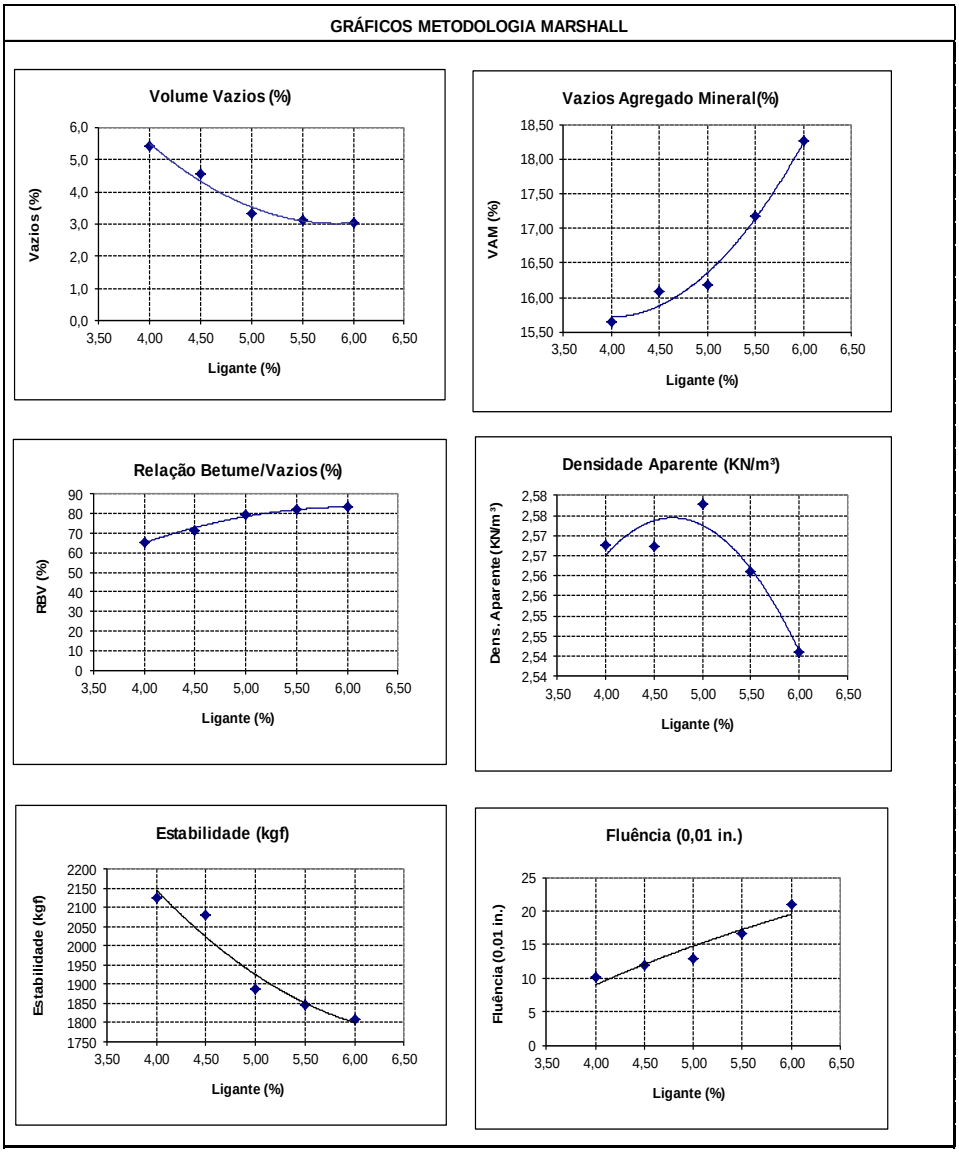
Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 12: Parâmetros da mistura AMA

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS AMA					
	Teor de Betume (%)				
Propriedade	*4,0*	*4,5*	*5,0*	*5,5*	*6,0*
Volume de Vazios (%)	5,4	4,6	3,3	3,1	3,1
Relação Betume Vazios (%)	65	72	80	82	83
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,64	16,08	16,18	17,17	18,26
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,71	2,69	2,67	2,64	2,62
Densidade Aparente (g/cm³)	2,57	2,57	2,58	2,56	2,54
Estabilidade (1/100 in)	2124	2079	1888	1845	1809
Fluência (kgf)	10	12	13	17	21

Fonte: Autoria própria (2014)

Figura 12: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura AMA



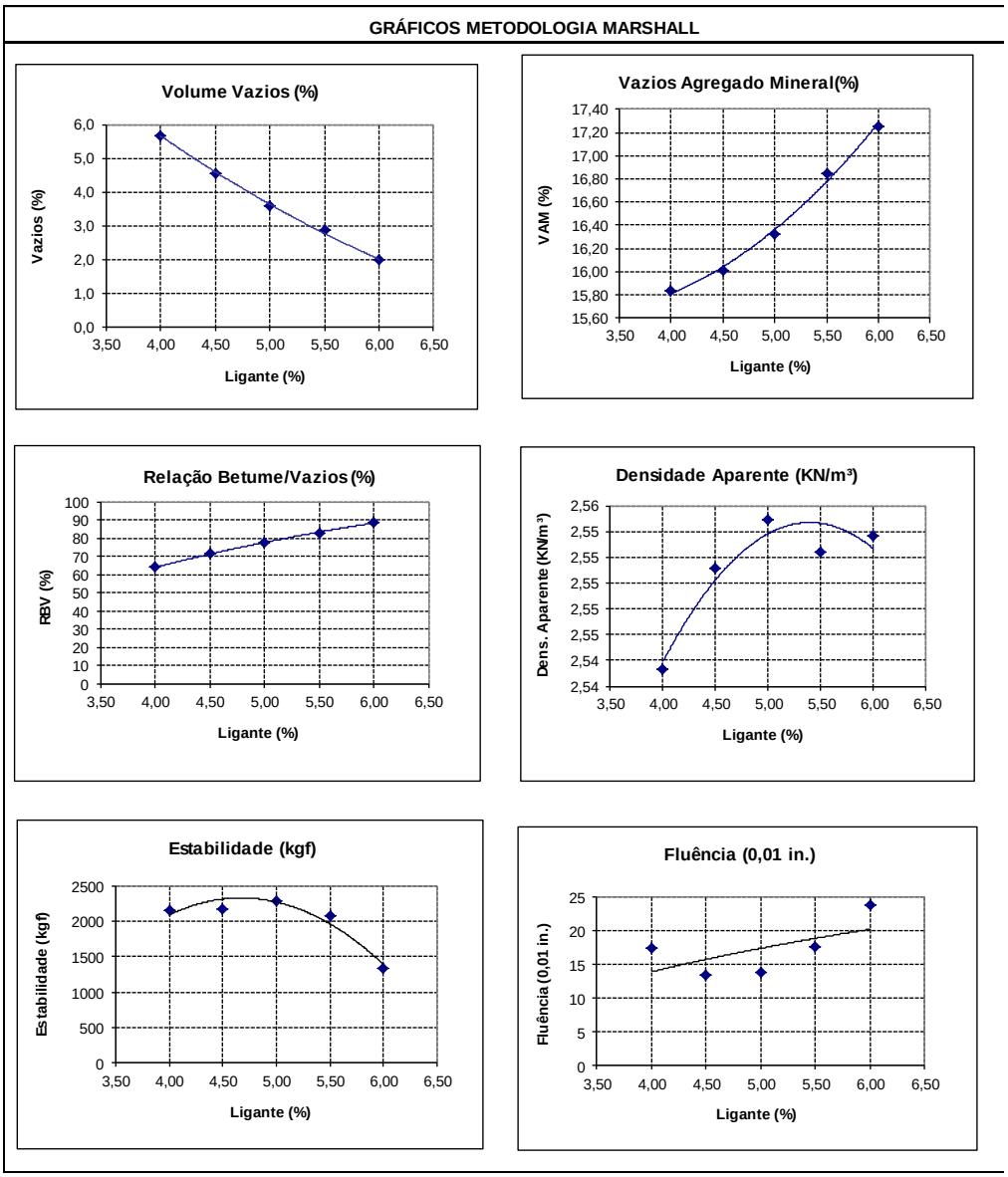
Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 13: Parâmetros da mistura AV

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS AV					
	Teor de Betume (%)				
Propriedade	*4,0*	*4,5*	*5,0*	*5,5*	*6,0*
Volume de Vazios (%)	5,7	4,6	3,6	2,9	2,0
Relação Betume Vazios (%)	64	71	78	83	89
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,83	16,01	16,33	16,85	17,25
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,70	2,67	2,65	2,63	2,61
Densidade Aparente (g/cm³)	2,54	2,55	2,55	2,55	2,55
Estabilidade (1/100 in)	2158	2166	2295	2078	1327
Fluência (kgf)	17	13	14	18	24

Fonte: Autoria própria (2014)

Figura 13: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura AV



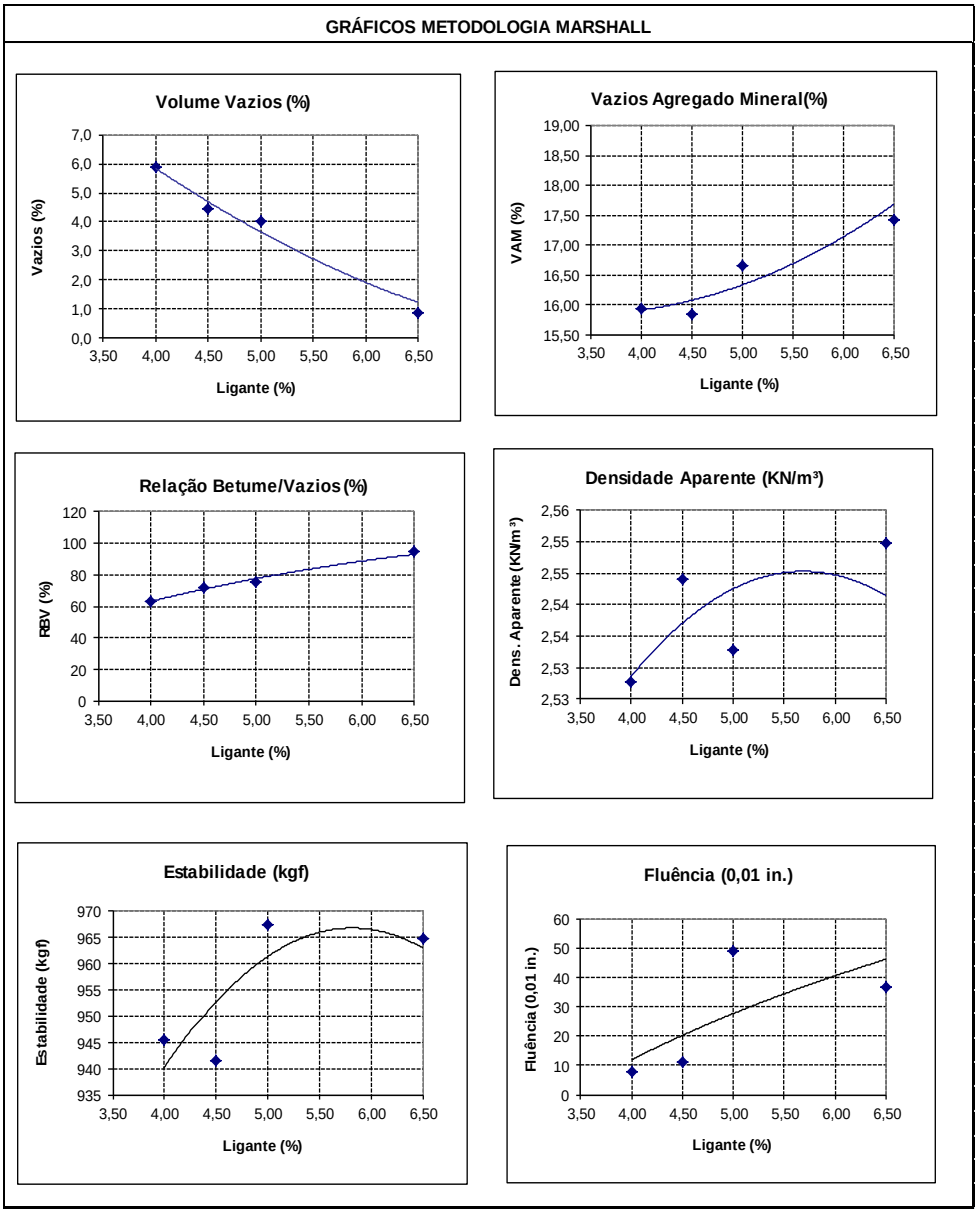
Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 14: Parâmetros da mistura AIMF

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS					
	Teor de Betume (%)				
Propriedade	*4,0*	*4,5*	*5,0*	*6,5*	*7,0*
Volume de Vazios (%)	5,9	4,4	4,0	0,9	0,8
Relação Betume Vazios (%)	63	72	76	95	96
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,95	15,85	16,65	17,42	18,49
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,69	2,66	2,64	2,57	2,55
Densidade Aparente (g/cm³)	2,53	2,54	2,53	2,55	2,53
Estabilidade (1/100 in)	945	942	967	965	954
Fluência (kgf)	8	11	49	37	53

Fonte: Autoria própria (2014)

Figura 14: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura AIMF



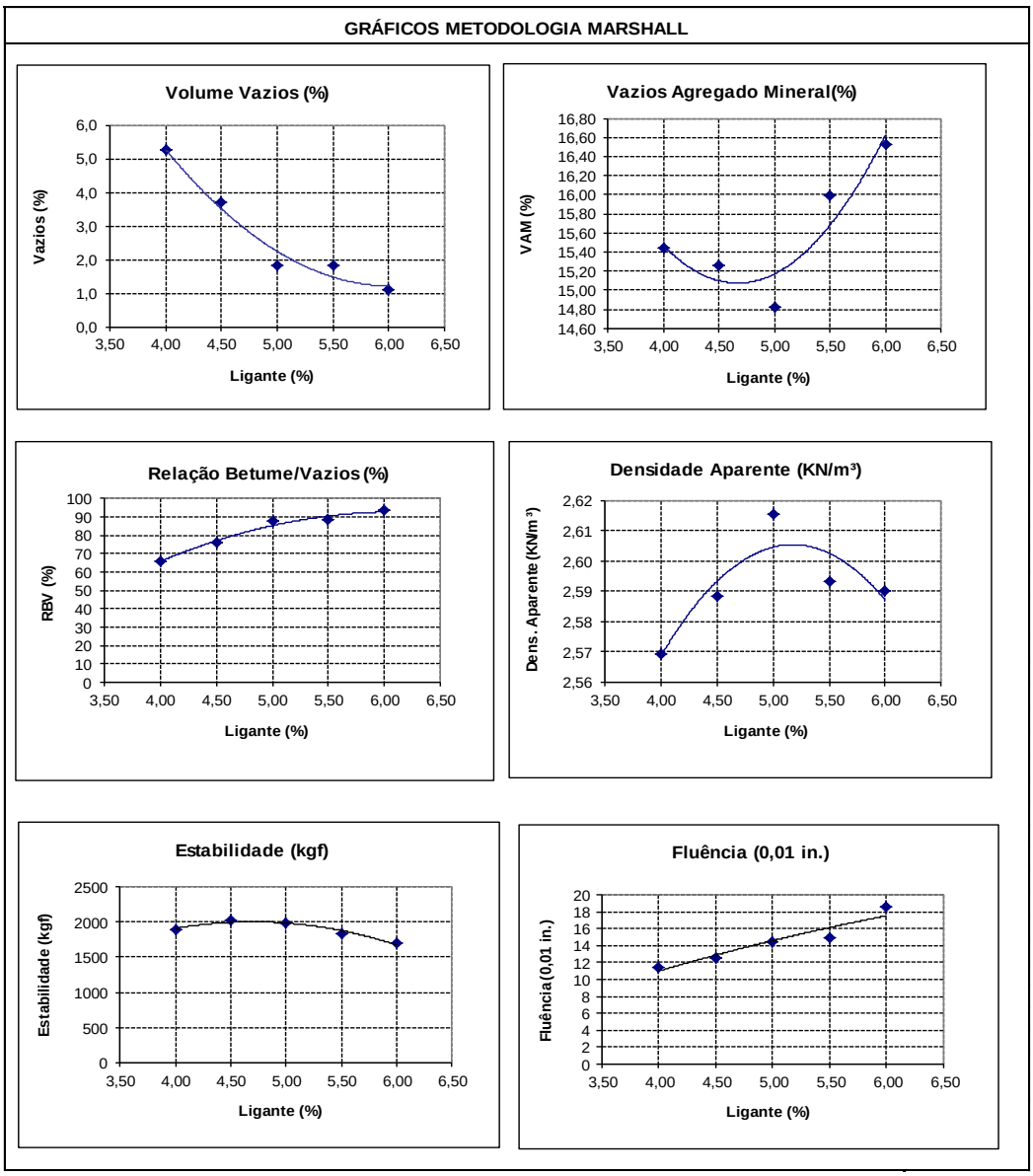
Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 15: Parâmetros da mistura APÓ

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS APÓ					
Propriedade	***Teor de Betume (%)***				
	4,0	*4,5*	*5,0*	*5,5*	*6,0*
Volume de Vazios (%)	5,3	3,7	1,9	1,8	1,1
Relação Betume Vazios (%)	66	76	88	89	93
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,45	15,25	14,83	15,99	16,53
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,71	2,69	2,66	2,64	2,62
Densidade Aparente (g/cm³)	2,57	2,59	2,62	2,59	2,59
Estabilidade (1/100 in)	1897	2024	1995	1843	1692
Fluência (kgf)	11	13	15	15	19

Fonte: Autoria própria (2014)

Figura 15: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura APÓ



Fonte: Autoria própria (2014)

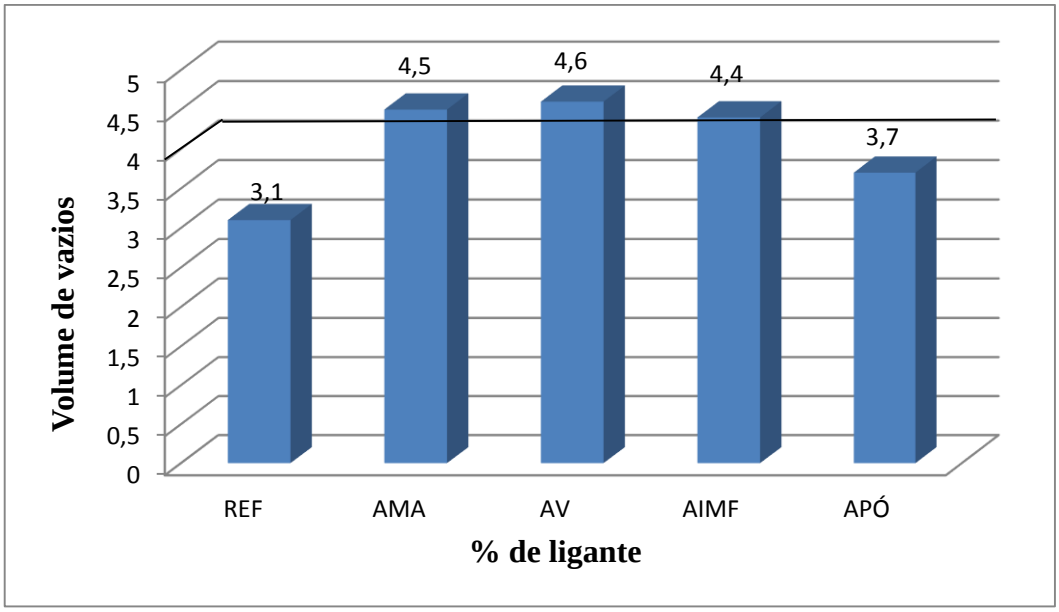
5.4.1 Teor de ligante das misturas

O teor dito ótimo de ligante estimado em projeto foi fixado em 4% de volume de vazios e a partir deste fator os teores de ligante de cada mistura acabaram por ser encontrados. O Gráfico 9 apresenta esta relação encontrada.

Nota-se que o teor de ligante adicionado além de não se manter constante nas misturas, acabou variando levemente para mais e assim nenhuma das misturas criadas apresentou redução no teor de ligante em relação à mistura de referência, sendo que esta apresentou menor volume de vazios.

A variação no teor de ligante foi pequena e por isso, o teor ótimo de ligante de todas as misturas foi mantido em 4,5% (valor encontrado com relação a volume de vazios de 4%). Este teor em gramas representa a inserção de 56,50 gramas de CAP em cada corpo de prova para os demais ensaios.

Gráfico 9: Variação de volume de vazios das misturas



Fonte: Autoria própria (2014)

5.4.2 Adesividade de agregado ao ligante asfáltico

Prescrita pela DNIT ME-24 este método tem como objetivo analisar a propriedade do agregado de envolver o ligante asfáltico de tal forma que eles não se descolem. Esta

propriedade deveria ser analisada, pois qualquer descolamento durante os ensaios poderia ser então explicado, a má adesividade pode tornar o agregado inviável para uso em misturas asfálticas.

Pela prescrição da norma o agregado submetido ao ensaio deveria ser o retido na peneira 12,5mm (1/2”) e cerca de 500 gramas, entretanto como na nossa mistura a maioria dos agregados apresenta menor diâmetro, foi feita uma ponderação de massa que segue apresentada na Tabela 16 tanto para a brita ¾”, quanto para a brita 3/8”.

Tabela 16: Quantidade de cada material usado no ensaio

Brita 3/4"		
Peneiras	Peso p/ 1200g	Peso p/2500g
1/2"	162	337
3/8"	47	98
nº 4	6	12,5
	SOMA =	447,5
Brita 3/8"		
Peneiras	Peso p/ 1200g	Peso p/2500g
3/8"	10	20
nº 4	237	493
	SOMA =	513

Fonte: Autoria própria (2014)

Após o material ter sido retirado da estufa e o ligante misturado, o mesmo deve repousar até seu total resfriamento, a Figura 16 mostra as duas amostras envoltas em ligante como prescreve a norma, a Figura 17 apresenta o material após total resfriamentos e coberto por água destilada em repouso na estufa e abaixo o mesmo quando retirado na estufa, onde permaneceu por 72 horas à 40ºC. A Figura 18 apresenta o aspecto final dos agregados, comprovando que o material possui boa adesividade ao ligante asfáltico e pode ser utilizado em misturas asfáltica, as fotos apresentam a brita ¾”e 3/8” respectivamente e nelas é possível perceber que o ligante permanece recobrindo perfeitamente os agregados.

Figura 16: Agregados envoltos por ligante

Fonte: Autoria própria (2014)

Figura 17: Material antes e depois de 72 horas na estufa

Fonte: Autoria própria (2014)

Figura 18: Aspectos finais dos agregados envoltos pelo ligante

Fonte: Autoria própria (2014)

5.5 Resistência à tração (Rt)

Preconizado pela DNER – ME 138/94, este ensaio tem como objetivo demonstrar a resistência à tração que o corpo de prova apresenta, é analisado através da média de 3 corpos de prova moldados com o teor ótimo de ligante para cada tipo de mistura, salienta-se que os ensaios de resistência a tração foram realizados no laboratório de engenharia civil da UNIJUÍ. A Tabela 17 apresenta os resultados médios destes conjuntos de CPs separados por mistura. Conclui-se que a mistura de macharia foi à única que não teve sua resistência à tração aumentada, este fato pode ter sido influenciado pela resina que recobre os grãos desta areia de fundição, pois pode ter dificultado a interação entre os grãos da mistura.

Tabela 17: Resistências à tração das misturas

	Média RT (MPa)	**σ (MPa)**
REF	1,04	0,010
AMA	0,70	0,053
AV	1,10	0,013
AIMF	1,15	0,092
APÓ	1,09	0,030

Fonte: Autoria própria (2014)

Com exceção da areia da macharia as outras misturas melhoraram suas propriedades à tração, tendo como maior valor a mistura AIMF, onde há a inserção de 5% de areia IMF.

5.6. Módulo de resiliência (Mr)

A fim de analisar a tensão-deformação das estruturas dos pavimentos, o módulo de resiliência Mr tem como objetivo caracterizar a deformabilidade destas misturas. Para execução deste ensaio foram ensaiados 3 corpos de prova para cada tipo de mistura, totalizando 15 CPs, estes foram analisados em duas direções, a 0º e a 90º, para que se obtivesse maior confiabilidade de sua integridade estrutural, tais ensaios foram realizados no laboratório de engenharia civil de Santa Maria da UFSM. A execução do ensaio em duas direções segue como recomendação do laboratório, pois às vezes durante as moldagens podem ser formados dentro do corpo de prova bolsas de ar, entre agregados e até mesmo vácuos estruturais (fendas) estes oriundos da compactação do mesmo, para que os resultados do ensaio não seja então comprometido por estes acasos estruturais faz-se estas duas leituras e

adota-se sua média como referência. A Tabela 18 apresenta as médias das leituras nos CPs juntamente com seus desvios padrões e coeficientes de variação.

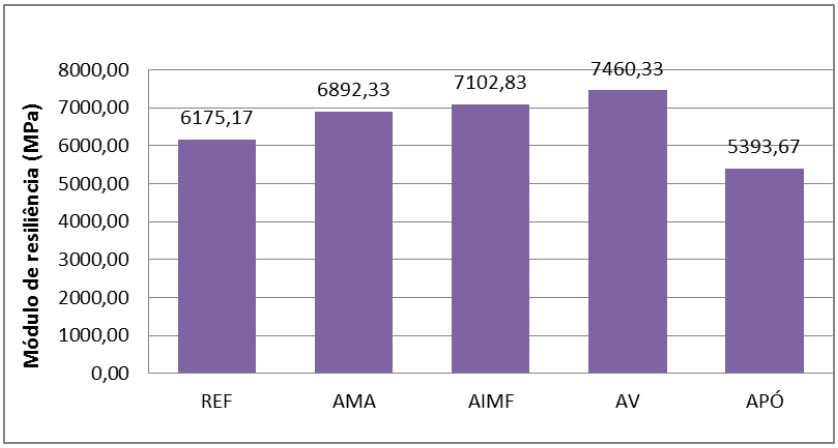
Tabela 18: Resultados de Mr encontrados em ambas as direções

CPs	H (mm)	D (mm)	MRm (0°)	σ (Mpa)	CV (%)	MRm (90°)	σ (Mpa)	CV (%)
REF 01	60,40	102,0	6387	252,16	3,95	6470	280,59	4,34
REF 02	60,20	102,0	6492	301,88	4,65	5991	187,82	3,13
REF 03	60,50	102,0	6023	171,2	2,84	5688	113,17	1,99
AMA 01	59,60	102,0	7024	230,52	3,28	6284	232,64	3,70
AMA 02	59,80	102,0	6777	395,8	5,84	6866	153,08	2,23
AMA 03	60,67	102,0	7001	373,1	5,33	7402	162,09	2,19
AIMF 01	60,63	102,0	7750	291,12	3,65	7670	142,59	1,86
AIMF 02	61,00	102,0	7043	186,44	2,65	7016	262,14	3,74
AIMF 03	60,70	102,0	7043	302,08	4,10	6095	105,76	1,74
AV 01	60,56	102,0	7177	242,69	3,38	6789	271,66	4,00
AV 02	61,33	102,0	7661	247,47	3,23	7106	284,15	4,00
AV 03	60,20	102,0	7921	337,91	4,27	8108	177,29	2,19
APÓ 01	60,53	102,0	3911	76,86	1,97	3325	56,39	1,70
APÓ 02	60,60	102,0	6586	311,04	4,55	6614	134,08	2,03
APÓ 03	60,70	102,0	7095	225,99	3,19	4831	153,37	3,17

Fonte: Autoria própria (2014)

Um resumo dos resultados obtidos no ensaio de Mr está apresentado no Gráfico 10, através desta análise constatou-se que o maior valor encontrado foi o da mistura AV (7460,33 Mpa) e o menor valor da mistura APÓ (5393,67 Mpa). Em relação à mistura de referência REF a mistura AV apresentou acréscimo de 20.81% enquanto a mistura APÓ apresentou decréscimo de 14.49%.

Gráfico 10: Resultados médios de Mr



Fonte Autoria própria (2014)

5.6 Módulo de resiliência x Resistência à tração

A relação Mr/Rt permite inferir o comportamento das misturas asfálticas com relação ao trincamento. Quanto menor o valor da relação, maior flexibilidade terá a mistura, unida a uma boa resistência à tração (NEVES FILHO, et al.,2004 apud Budny, 2009).

A Tabela 19 apresenta os resultados da relação Mr/Rt, ressalta-se que os resultados deste ensaio não significam perda ou ganho no desempenho da mistura, pois uma relação Mr/Rt alta ou baixa é selecionada de acordo um caso específico de aplicação. Como por exemplo, um determinado tipo de tráfego, clima ou tipo da estrutura, entretanto analisando as misturas disponíveis percebe-se que a mistura com menor vida de fadiga seria a AMA.

Tabela 19: Relação Mr/Rt

Misturas	Mr	Rt	Mr/Rt
REF	6175,17	1,04	5937,66
AMA	6892,33	0,70	9846,19
AIMF	7102,83	1,10	6457,12
AV	7460,33	1,15	6487,24
APÓ	5393,67	1,09	4948,32

Fonte: Autoria própria (2014)

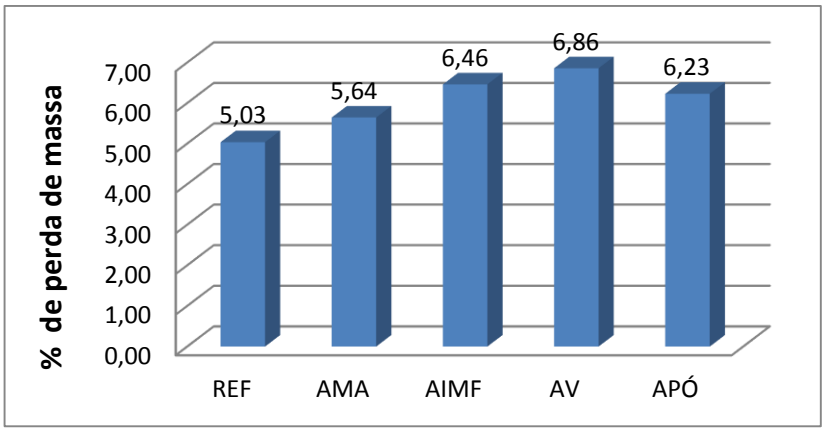
5.7 Perda de massa – Metodologia Cantabro

A análise da perda de massa foi realizada através da máquina de Los Angeles no laboratório de engenharia civil da UFSM, em Santa Maria, onde os CPs são submetidos a 300 revoluções a fim de simular o dano que o tráfego causaria. Os CPs são pesados antes e depois das revoluções e a diferença entre esses pesos é tida como a perda de massa sofrida.

Misturas com elevados teores de ligante acabam por perder menos massa, devido ao poder cimentício que o mesmo apresenta, entretanto como as misturas em análise apresentam o mesmo teor de ligante este não torna-se característica a ser analisada. O Gráfico 11 apresenta a perda de massa de cada mistura e nos mostra que as areias de fundição não diminuem a perda de massa, todas elas sofreram aumentos quando comparadas a mistura de referência.

Mesmo não tendo sua perda de massa diminuída com a inserção da areia de fundição, as misturas tornam-se satisfatórias quando analisadas em relação à especificação DNER–ME 383/99, que maximiza a perda em 25%.

Gráfico 11: Perda de massa das misturas



Fonte: Autoria própria (2014)

5.8 Dano por umidade – Metodologia Lottman Modificado

O ensaio que determina o dano por umidade deve ser realizado com corpos de prova que apresentem volume de vazios em torno de 7% ±1, e este valor é encontrado por meio de estimativas, neste caso, diminuindo os golpes de compactação até que se chegasse perto do valor esperado. Moldou-se 2 corpos de prova com cada número de golpes determinado, foram 4 estimativas, com 15, 20, 25 e 30 golpes até que seu volume de vazios estivesse dentro do

estipulado, a Tabela 20 apresenta os valores encontrados após cada compactação. Percebe-se que quando a moldagem aconteceu com 20 e 25 golpes todos os valores de volume de vazios ficaram dentro da faixa estipulada por norma, entretanto como as areias de fundição apresentam características distintas durante suas compactações , optou-se pela moldagem com 20 golpes, a fim de garantir uma maior margem enquadramento para as futuras misturas.

Tabela 20: Golpes de compactação para Lottman

Geometria 15 Golpes				***Pesos***		***Densidades***			***Vazios***		
% CAP	***Nº CP***	***h (cm)***	***d(cm)***	***no ar***	***na água***	***volume***	***D aparente***	***Dmáx teórica***	***ar***	***agregado***	***RBV***
4,5	1	6,49	10,14	1250,45	742,94	507,5	2,464	2,695	8,6	19,6	56,3
4,5	2	6,50	10,13	1245,91	741,27	504,6	2,469	2,695	8,4	19,5	56,9
média		***6,50***	***10,14***	***1248,18***	***742,11***	***506,08***	***2,47***	***2,70***	***8,49***	***19,56***	***56,57***
Geometria 20 Golpes				***Pesos***		***Densidades***			***Vazios***		
4,5	1	6,42	10,13	1244,18	744,91	499,3	2,492	2,695	7,5	18,7	59,7
4,5	2	6,44	10,16	1248,09	744,73	503,4	2,480	2,695	8,0	19,1	58,1
média		***6,43***	***10,15***	***1246,14***	***744,82***	***501,32***	***2,49***	***2,70***	***7,78***	***18,93***	***58,93***
Geometria 25 Golpes				***Pesos***		***Densidades***			***Vazios***		
4,5	1	6,32	10,14	1243,54	748,54	495,0	2,512	2,695	6,8	18,1	**62,4**
4,5	2	6,37	10,13	1247,07	745,85	501,2	2,488	2,695	7,7	18,9	**59,2**
média		***6,35***	***10,14***	***1245,31***	***747,20***	***498,11***	***2,50***	***2,70***	***7,24***	***18,46***	***60,80***
Geometria 30 Golpes				***Pesos***		***Densidades***			***Vazios***		
4,5	1	6,22	10,16	1240,01	749,86	490,2	2,530	2,695	6,1	17,5	**64,9**
4,5	2	6,26	10,15	1246,11	748,91	497,2	2,506	2,695	7,0	18,3	**61,6**
média		***6,24***	***10,16***	***1243,06***	***749,39***	***493,68***	***2,52***	***2,70***	***6,58***	***17,88***	***63,24***

Fonte: Autoria própria (2014)

Após esta determinação prosseguiu-se a moldagem da maneira corriqueira, moldou-se 6 corpos de prova para cada mistura com areia de fundição com 20 golpes e depois dividiu-se em 2 grupos, cada grupo com 3 corpos de priva de cada mistura. O primeiro grupo de amostras que segue representado pela Figura 19 apenas teve sua temperatura estabilizada à 25°C durante duas horas após sua desmoldagem e rompidos à tração como de costume. Seus valores foram anotados, estes receberam o nome Rt1 que serão explicitados ao decorrer do subitem, sendo adotada a média das misturas para determinado valor.

Figura 19: CPs sem condicionamento

Fonte: Autoria própria (2014)

O condicionamento das misturas do segundo grupo de amostras aconteceu no laboratório de engenharia civil da UNIJUÍ. Primeiramente as amostras foram levadas à bomba de vácuo onde o ar de seu interior foi parcialmente preenchido com água, posterior a isso, inseriu-se sobre o CP conforme preconiza a norma NBR15617/2011 10ml de água destilada e então os mesmos foram vedadas e condicionadas durante 16 horas à temperatura de -18 °C, decorrido esse tempo às mesmas foram submersas à 60 °C por mais24 horas e para finalizar o ensaio as amostras foram estabilizadas a 25 °C durante duas horas e então, rompidas, estes resultados receberam o nome de Rt2 e esta sequência citada segue apresentada pela Figura 20.

Após obtenção destes dados, encontrou-se a resistência à tração retida (RRt), que trata-se da divisão dos resultados do grupo que recebe condicionamento pelo que não recebe, e que deve ser analisada em porcentagem, pois através deste resultado é que descobre-se se as misturas satisfazem ou não as diretrizes brasileiras, estes dados estão discriminados na Tabela 21.

Figura 20: Sequência de condicionamentos dos CPs

Fonte: Autoria própria (2014)

De acordo com análise dos resultados a mistura que apresentou maior RRt e consequentemente melhor resistência retida à tração foi a com adição de areia de Macharia

(AMA)com 97,92%, tendo melhora de quase 6% em relação a mistura de referência, já a mistura APÓ apresentou e menor porcentagem, 85,21% , com diminuição também em torno de 6%. Para especificação Superpave são aceitas somente dosagens com RRt superior a 80%, ou seja, neste caso, todas as misturas atenderiam a especificação normativa.

Tabela 21: Resultados da Metodologia Lottman Modificado

Misturas	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Rt1	Rt2	RRt
REF	6,69	10,16	0,893593236	0,821730843	91,96%
AMA	6,48	10,14	0,93101746	0,911621263	97,92%
AIMF	6,43	10,14	0,957222435	0,82698809	86,39%
AV	6,37	10,18	0,938972229	0,886625346	94,43%
APÓ	6,48	10,15	0,917247253	0,781598011	85,21%

Fonte: Autoria própria (2014)

5.9. Análise estatística

Depois de decorridos todos os ensaios determinados para as misturas dosadas com areia de fundição procederam-se a interpretação de seus dados a fim de se encontrar a melhor mistura para cada parâmetro. Após a análise dos dados isoladamente teve-se como ideia que fosse escolhida uma areia que se comportasse de maneira constante em todos os ensaios e desta forma pudesse ser chamada de “melhor mistura” e fosse então a recomendada pelo trabalho.

Para que a “melhor mistura” fosse encontrada recorreu-se ao método estatístico de análise de variâncias, o conhecido método ANOVA. Este método refere-se a diversas amostras experimentais condicionadas sob mesmo critério, no nosso caso diferentes tipos de mistura e diferentes tipos de ensaios, mas com um critério em comum, todos os resultados apresentados em MPa. Através desta condição igualitária procedeu-se a execução dos cálculos a fim de se obter a “melhor mistura”. As fórmulas seguidas foram citadas anteriormente durante a metodologia. A Tabela 22 apresenta os primeiros parâmetros para se prosseguir a análise, que seriam identificar o número de tratamentos analisados, as misturas e variáveis.

A Tabela 23 apresenta a segunda parte dos cálculos, que consiste em encontrar o somatório das misturas, somatório elevado ao quadrado, média, desvio padrão elevado ao quadrado, desvio padrão e coeficiente de variação, respectivamente de cada uma das misturas em análise em relação aos ensaios realizados.

Tabela 22: Levantamento de dados

Fontes de variação	GL	SQ	QM
Ensaios	2	29459282,27	14729641,13
Tipos de mistura	13	118627071,3	9125159,329
Total	14	148086353,5	-

Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 23: Parâmetros iniciais necessários para a análise

	REF	AMA	AIMF	AV	APÓ
RRt (MPa)	1,04	0,7	1,1	1,15	1,09
Lottman (MPa)	0,85766	0,921315	0,8921	0,912799	0,849415
Resiliência (MPa)	6175,17	6892,33	7102,83	7460,33	5393,67
Ɛxi	6177,06766	6893,951315	7104,8221	7462,392799	5395,609415
Ɛxi²	38132726,35	47504214,17	50450196,01	55656525,86	29091677,98
média das misturas	2059,02255	2297,98377	2368,27403	2487,46427	1798,53647
S²	3564,6883	3978,8205	4100,2457	4306,6281	3113,4770
S	59,70501	63,07789	64,03316	65,62490	55,79854
CV	0,02900	0,02745	0,02704	0,02638	0,03102

Fonte: Autoria própria (2014)

Calculados os parâmetros inicias necessários para a ANOVA, parte-se para a análise dos quadrados que antecedem o cálculo para o teste F e estão apresentados na Tabela 24, este teste resulta em dois F, um Fcal que é dado através de fórmula e um Ftabela que é encontrado em tabela ANEXO B, que é quando se tem o número de amostras elevado ao numero de tratamentos, no nosso caso este valor é de 13^2.

Tabela 24: Análise dos quadrados

Ɛti²	220961133,9
r	7,5
SQG	148086353,5
QMT	14729641,13
QMR	9125159,329
Fcal	1,61418
Ftabela	3,81

Fonte: Autoria Própria (2014)

Como o Fcal encontrado foi maior do que zero (>0) isto significa que existe, pelo menos, uma diferença significativa entre os efeitos dos tratamentos, ou seja, existe uma mistura que pode ser considerada estável em todos os ensaios a que foi solicitada e por isso é considerada a "melhor mistura". Para que fosse determinado então qual das misturas manteria esta estabilidade, procedeu-se o teste de Tukey.

O valor encontrado para DMS (diferença mínima significativa) determina o valor que deve ser tomado como referência, procede-se então com as diferenças entre as médias das misturas como estão apresentadas na Tabela 25 e o valor que mais próximo chegar da DMS, é o da mistura que melhor se enquadrou nos requisitos exigidos pelos ensaios a que foi submetida.

Percebe-se através destas diferenças de médias que a maioria dos materiais apresentou valor negativo, isto decorre do fato dos valores utilizados serem altos, como por exemplo, os resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência chegou a referenciar 5000 MPa enquanto resultados obtidos na resistência à tração não ultrapassaram 2 MPa. Em observação aos valores encontrados ressalta-se então que a mistura que apresentou maior constância foi a APÓ, que possui inserção de 5% de areia de fundição do pó do exaustor.

Tabela 25: Teste de Tukey

TESTE DE TUKEY		
DMS =	**3375,2895**	
q =	3,06	
med REF - med AMA		-238,961218
med REF - med AIMF		-309,251480
med REF - med AV		-428,441713
med REF - med APÓ		**260,486082**

Fonte: Autoria própria (2014)

5.10. Análise da lixiviação

A classificação dos resíduos é baseada normalmente na avaliação do comportamento deste em contato com um solvente. Assim, a lixiviação é o procedimento mais utilizado para analisar a potencialidade de transferência de matéria para o meio natural.

Para análise do material lixiviado, moldou-se um corpo de prova para cada tipo de areia de fundição e também o com material convencional (agregados pétreos e ligante), todos com o teor de projeto de ligante, após a moldagem, estes CPs foram rompidos com o objetivo simplesmente de romper a estrutura moldada, visando prosseguir a análise do material, o mesmo foi separado em cubos de 1cm x 1cm e após encaminhado ao laboratório de cerâmica da UFRGS.

O ANEXO C apresenta a quantidade de material químico encontrado em cada tipo de areia de fundição e sua análise em relação a NBR 10005, no presente anexo encontra-se o limite de cada material estipulado em norma e a quantidade encontrada na mistura.

Como resultado do estudo de lixiviação, tem-se que todas as areias testadas no trabalho, apresentam porcentagens inferiores de todos os elementos químicos, ou seja, estes materiais são aprovados por norma e não possuem característica de reagente químico.

Este resultado nos garante segurança ambiental quanto ao manuseio das areias de fundição e estimula sua aplicação em campo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como principal objetivo avaliar, através de ensaios laboratoriais e de uma aplicação experimental, a reutilização do material areias de fundição na dosagem do concreto asfáltico convencional, utilizado para a camadas de rolamento de pavimentos flexíveis, a seguir são apresentadas conclusões de acordo com os ensaios realizados com cada mistura e após uma conclusão geral sobre qual a areia que se manteve estável em todos os resultados e por isso poderia ser considerada a melhor misturas do estudo.

6.1. Conclusões

Com os resultados obtidos nos ensaios realizados e dos dados analisados foi possível chegas as seguintes conclusões.

6.1.1. Dosagem Marshall

Todos os parâmetros analisados durante a dosagem Marshall satisfazem as normativas brasileiras, mas o fator de maior preponderância nestas misturas é a quantidade de ligante que a mistura apresenta. No caso das misturas ensaiadas nenhuma apresentou considerável redução no teor de ligante, o que não compromete os dados em nenhum requisito, entretanto não seleciona nenhuma mistura como base em um primeiro momento.

Os teores de ligante se mantiveram estáveis e então foram adotados em 4,5% para todas as misturas, a fim de melhorar o entendimento dos dados posteriores.

6.1.2. Resistência à tração

Após execução do ensaio de resistência à tração, contatou-se que quase todas as misturas apresentaram aumento em sua resistência quando relacionadas com a mistura de referência, a única exceção foi à mistura AMA que apresentou apenas 0.70Mpa. Através deste requisito a mistura que melhor se enquadrou com a AIMF com 1.15Mpa de resistência.

Como não houve redução na quantidade de ligante, teoricamente todas as misturas estavam sendo executadas da mesma maneira, ou seja, a distinção encontrada entre os dados refere-se às características próprias de cada areia, como coesão e aderência entre os grãos.

6.1.3. Módulo de Resiliência

Como análise ao ensaio de módulo de resiliência tem-se que o maior valor foi apresentado pela mistura AV com 7460.33MPa e o menor valor apresentado pela mistura APÓ com 5393.67 MPa estes dois picos, máximo e mínimo, variam em relação à mistura de referência REF que apresentada resiliência de 6175.17 MPa. De acordo com pesquisadores, os valores para módulo de resiliência devem se manter acima de 3000 para serem considerados satisfatórios, neste caso, todos atendem as exigências.

6.1.4. Módulo de Resiliência x Resistência à tração

Como método para qualificar a diferença entre esses dois parâmetros têm-se que quanto menor a relação , maior a flexibilidade encontrada e sua resistência à tração. A mistura que apresentou o menor coeficiente foi a APÓ 4948.32 MPa, ou seja, apresenta maior flexibilidade, resistência à tração e também resistência a fadiga. A mistura com menor vida a fadiga neste caso foi a AMA com 9846.19 MPa.

6.1.5. Perda de massa

A perda de massa caracteriza a resistência que a mistura tem ao desgaste, quanto menor este coeficiente mais resistente é considerado a amostra. A maior perda de massa foi apresentada pela mistura AV com 6.86% e a menor foi à mistura REF com 5.03%. Embora, de acordo com estes dados verifica-se que a inserção de areias de fundição no concreto asfáltico não parece favorável, ela enquadra-se sim na especificação normativa, já que a mesma admite uma perda de massa aceitável em até 25%.

6.1.6. Metodologia Lottman Modificado

Depois de submetidos ao resfriamento por 16 horas a temperatura de -18ºC e depois ao condicionamento por 24 horas a 60ºC, os corpos de prova foram rompidos e seus dados referentes ao condicionamento juntaram-se aos CPs que não receberam condicionamento, para que fosse feita a análise.

A mistura que apresentou melhor resultado foi a AMA com 97.92% e o menor resultado veio da mistura APÓ com 85.21%, ambos os resultados acabaram variando cerca de 6% com relação à mistura de referência. Para serem aceitos pelas normativas brasileiras e

poderem posteriormente ser submetidos ao método Superave, todos os CPs devem apresentar lottman acima de 80%, no caso deste trabalho isto se cumpriu e as amostras foram então, aprovadas.

6.1.7. Análise estatística

A mistura dita como “melhor mistura” foi a APÓ, que contém 5% de inserção de pó do exaustor na dosagem de concreto asfáltico convencional, esta mistura mesmo apresentando material mais fino que as demais foi a que manteve melhor constância em todos os resultados estipulados no trabalho.

O material pó do exaustor possui manuseio complicado devido ao seu módulo de finura, entretanto preenche os vazios de maneira uniforme e apresenta perda de massa dentro dos parâmetros exigidos (6.23%), ou seja, poderá ser aplicada em campo e em larga escala se assim for desejado pelas empresas de fundição e de pavimentação, este fato se comprova também pela análise de lixiviação que classifica os elementos constituintes deste resíduo como não perigosos ao meio ambiente.

6.2. Aceitação de misturas

Após seus resultados interpretados isoladamente de acordo com cada ensaio a que foram submetidos, as misturas apresentaram valores diferentes e divergentes entre si, entretanto deste a análise de resistência de cada corpo de prova os resultados obtidos acabaram por satisfazes todas as especificações brasileiras que serviam como parâmetro de aceitação, desta forma salienta-se que todas as inserções de areia de fundição ao concreto asfáltico usinado à quente satisfazem suas condições e por isso possuem repetibilidade.

De acordo com o ensaio de lixiviação apresentado estas inserções não comprometem o lençol freático do local de aplicação, sendo assim uma alternativa viável ecologicamente para recuperação de pavimentos e também à construção de novos. Havendo acordo entre empresas fundiárias e de pavimentação podem ser feitos novos experimentos aumentando a quantidade de material inserido na mistura e com isso a credibilidade destes resultados.

Ressalta-se que com os valores obtidos neste estudo, a substituição de agregado por areia de fundição pode tornar-se corriqueira desde que dentro das proporções aqui analisadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas.** Soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283 resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage**. USA, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos** – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____, **ABNT NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**, Rio de Janeiro – RJ, 2004.

_____, **ABNT NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**, Rio de Janeiro – RJ, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS - **ABETRE**, Disponível em < http://www.abetre.org.br/ >, acesso em 16 de abril de 2014.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p., il.

BUDNY, Jaelson. **Avaliação dos efeitos dos diferentes tipos de cal em misturas de concreto asfáltico**. 2009. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – UNIJUÍ, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.

PNRS, Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 12.305, de 2010. **Dispõem sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Disponível em < http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>, acesso em 5 de maio de 2014.

BERNUCCI, Leidi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008. 501 p.

CAVALCANTE, L. S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas.** Rio de Janeiro, 2010. Dissertação (Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia – COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 196p.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira; REIS, Rafael Marcal Martins de. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. 2010. 110 f. Instituto Pavimentar, 29 de Março de 2014.

CORRENTE, Antônio Édson. **Notas de aula de Estatística e Probabilidade**. 2010. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 10 de Outubro de 2014.

COUTINHO, Benedito Neto. **Avaliação do reaproveitamento de areais de fundição como agregados em misturas asfálticas**. 2004. 293 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Transportes) – USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 08 de Abril de 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 03: Misturas betuminosas a quente** – Penetração de material betuminoso, 1973, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME03-73.pdf> Acesso em 12/abril/2014.

_____,DNER-ME 035: Agregados – Determinação da abrasão "Los Angeles, 1998, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME035-98.pdf> Acesso em 08/maio/2014.

_____,**DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente** - ensaio Marshall, 1995, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME043-95.pdf> Acesso em 02/abril/2014.

_____,**DNER-ME 080: Solos** – Análise granulométrica por peneiramento, 1994, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME080-94.pdf> Acesso em 28/abril/2014.

_____,**DNER-ME 120: Coleta de agregados**, Rio de Janeiro – RJ, 1997, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-PRO120-97.pdf> Acesso em 9/abril/2014.

_____,**DNER-ME 383: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero** - ensaio Cantabro, Rio de Janeiro – RJ, 1999, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME383-99.pdf> Acesso em 4/abril/2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT 031-ES: Pavimentos flexíveis -Concreto asfáltico** -Especificação de serviço, Rio de Janeiro– RJ, 2006, Disponível em<http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/DNIT031_2006_ES.pdf>, Acesso em 22/mar/2014.

_____,**DNIT 081-ME: Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo** – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 1998, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT081_1998_ME.pdf> Acesso em 21/abril/2014.

_____,**DNIT 135-ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas -Determinação do módulo de resiliência** – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 2010, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT135_2010_ME.pdf> Acesso em 20/abril/2014.

_____,**DNIT 136-ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas –Determinação da resistência à tração por compressão diametral** – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 2010, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT136_2010_ME.pdf> Acesso em 18/abril/2014.

HIRSH, Fábio. **Estudo do Comportamento de Misturas Asfálticas Preparadas com Diferentes Tipos de Ligantes.** 130f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.

KONDIC. **Princípios Metalúrgicos de Fundição**. Tradução de Cláudio Mariotto e outros. São Paulo: Polígono, Ed, da Universidade de São Paulo. 1973.

KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez. **Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através de sua incorporação a solos argilosos**. 2012. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Transportes) – USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 6 de Abril de 2014.

MOTTA, Laura Maria Goretti. **Princípios de Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas**. Tradução Comentada, IBP – Instituto brasileiro do Petróleo, 41p. 2000.

PASCHE, Eduardo. **Análise do desempenho de misturas asfálticas com incorporação de material fresado e cal**. 2013. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – UNIJUÍ, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.

PATRIOTA, M.B. **Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus – processo seco**. 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (IPEA), Disponível em <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/versao_preliminar_pnrs_wm.pdf>, acesso em 20 de maio de 2014.

SIEGEL, M, et al. **Fundição, Notas de Aula, ABM – Associação Brasileira de Metais.** 13ª ed. São Paulo: Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, 1982.

SENÇO, Wlastermir de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1ª Ed. São Paulo: Ed. Pini, 2001. V. 2,

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DA AREIA MACHARIA

Dados do Interessado:

Interessado:	FUNDIMISA FUNDIÇÃO E USINAGEM LTDA
Endereço:	Rua Giruá, 50 - Distrito Industrial - Santo Ângelo/RS

Dados da Amostra:

Local de coleta: Caixas / Bag's / Caçambas	
Material coletado: Resíduo de Areia de Fundição (ADF) - Amostra 2 - Macharia	
Data de coleta: 6/8/2013	**Data de recebimento:** 08/08/13 20:38:25
Responsável pela coleta: Interessado	
Observações: Classificar amostra segundo NBR 10.004/2004	
Período de análise: 08/08/13 20:38:25 à 30/08/13 08:40:35	
Data da publicação: 30/08/13 11:31:10	**Data de emissão do relatório:** 30/08/13 13:26:15

1. Origem do Resíduo

Resíduo de areia gerado no processo de confecção dos machos.

2. Descrição do processo de segregação e seus constituintes principais

O resíduo é segregado em caixas e/ou caçambas e Bag's. No setor de macharia são confeccionados os machos que são utilizados para formar as cavidades das peças. As matérias-primas envolvidas neste processo são: areia, resinas e catalisadores.

3. Inflamabilidade

Não produz fogo em condições normais de temperatura e pressão nem sob fricção, absorção de umidade ou por alterações químicas espontâneas.

4. Corrosividade pH 1:1 = 6,0

Não corrosivo, pois o pH situa-se acima de 2,0 e abaixo de 12,5.

5. Patogenicidade Não avaliado.

Optou-se por fazer a análise de fenol na massa bruta para verificar se havia concentração residual de fenol na amostra. O resultado foi de 0,139 mg Fenol/Kg.
A concentração encontrada de fenol está abaixo da concentração considerada como tóxica para organismos aquáticos;
Peixes: Salmo Gairdneri: CL50 (24h)= 5,6 a 113 mg/L
Daphnia SP: DLo = 16 mg/L
Scenedesmus Quadricauda = 7,5 mg/L
Desta forma, mesmo apresentando residual de fenol na amostra o resíduo pode ser considerado como: Resíduo Classe II – Não Perigoso.

Resultados da amostra

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.004 - Massa Bruta

Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.004:2004**	**M**

Fenol	mg Fenol/Kg	0,139	0,025	---	83

NBR 10.004/2004 - Massa bruta					
Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.004:2004**	**M**
Cianeto	mg CN/Kg	< 0,004	0,004	250	21
pH Solução 1:1	-	6,00	---	---	227
Sulfeto	mg S-2/Kg	< 0,10	0,100	500	70
Umidade	%	0,081	0,0001	---	25

Massa Bruta: De acordo com a NBR 10.004:2004 - Classificação de resíduos sólidos - item Massa bruta: O(s) parâmetro(s) satisfazem os limites permitidos.

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.005 - Lixiviado

NBR 10.005/2004 - Lixiviado					
Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.005:2004**	**M**
Arsênio	mg As/L	< 0,006	0,0060	1,0	242
Bário	mg Ba/L	36,2	0,0010	70,0	242
Cádmio	mg Cd/L	< 0,001	0,0010	0,5	242
Chumbo	mg Pb/L	< 0,007	0,0070	1,0	242
Cromo	mg Cr/L	0,028	0,0030	5,0	242
Fluoreto	mg F/L	< 0,05	0,050	150	58
Mercúrio	mg Hg/L	< 0,0002	0,0002	0,1	242
pH à 25ºC	-	4,96	-	---	98
Prata	mg Ag/L	< 0,006	0,0060	5,0	242
Selênio	mg Se/L	< 0,013	0,013	1,0	242

Lixiviado: De acordo com a NBR 10.005:2004 - Classificação de resíduos sólidos - item Lixiviado - anexo F.: O(s) parâmetro(s) satisfazem os limites permitidos, portanto o resíduo apresentou-se como NÃO TÓXICO.

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.005 - Lixiviado

NBR 10.006/2004 - Solubilizado					
Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.006:2004**	**M**
Alumínio	mg Al/L	0,0159	0,0060	0,2	242
Arsênio	mg As/L	< 0,006	0,0060	0,01	242
Bário	mg Ba/L	< 0,001	0,0010	0,7	242
Cádmio	mg Cd/L	< 0,001	0,0010	0,005	242
Chumbo	mg Pb/L	< 0,007	0,0070	0,01	242
Cianeto	mg CN/L	< 0,004	0,004	0,07	21
Cloreto	mg Cl/L	439	5,00	250	108
Cobre	mg Cu/L	< 0,006	0,0060	2,0	242
Cromo	mg Cr/L	< 0,003	0,0030	0,05	242
Fenóis Totais	mgFenol/L	1,70	0,003	0,01	83

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.005 - Lixiviado

NBR 10.006/2004 - Solubilizado					
Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.006:2004**	**M**
Ferro	mg Fe/L	0,018	0,0060	0,3	242
Fluoreto	mg F/L	< 0,05	0,050	1,5	58
Manganês	mg Mn/L	0,0058	0,0010	0,1	242
Mercúrio	mg Hg/L	< 0,0002	0,0002	0,001	242
Nitrato	mg N-NO3/L	< 0,20	0,200	10,0	48
pH à 25ºC	-	3,63	-	---	98
Prata	mg Ag/L	< 0,006	0,0060	0,05	242
Selênio	mg Se/L	< 0,013	0,013	0,01	242
Sódio	mg Na/L	2,34	0,13	200	242
Sulfato Total	mg SO4/L	< 4,0	4,00	250	60
Surfactantes	mg MBAS/L	< 0,1	0,100	0,5	59
Zinco	mg Zn/L	0,0086	0,0050	5,0	242

Solubilizado: De acordo com a NBR 10.006:2004 - Classificação de resíduos sólidos - item Solubilizado - anexo G.: O(s) parâmetro(s) Cloreto, Fenóis Totais ultrapassam os limites máximos permitidos.

Classificação: Em função dos resultados obtidos, o resíduo apresentou-se como NÃO PERIGOSO- CLASSE II A - NÃO INERTE.

Legendas:

L.Q. – Limite de Quantificação.
N.A. – Não se aplica.
N.D. – Não Detectado.
VR – Valor de Referência.
(***) : Análise prejudicada em função da característica da amostra.
(M): Métodos de Referência

Métodos de Referência (M)

21	SM 4500 CN E
25	Gravimétrico
48	Salicilato
58	SM 4500 F-D
59	SM 5540 C
60	SM 4500 SO4 E
70	Azul de Metileno
83	SM 5530 D
98	NBR 14339:1999
108	SM 4500 Cl-C
227	ABNT NBR 10004:2004
242	PP.TEC.POP 55 conforme EPA Método 200.7/2001

Bibliografia:

APHA : American Public Health Association.
EPA : Environmental Protection Agency.
Farmacopéia Brasileira 5ª edição-2010 / Método Cinético Turbidimétrico.
NBR: Norma Brasileira.
SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 22nd edition:2012

Observações:

- Para amostras sólidas: os resultados são expressos em base seca.
- Cadastro na FEPAM Nº 00070/2011-DL válido até 22/11/2013
- Os dados brutos referentes à amostra são armazenados em arquivo físico pelo prazo de 5 anos a contar da emissão deste relatório.
- Os Relatórios de Análise referentes à amostra serão armazenados eletronicamente pelo prazo de 10 anos a contar da emissão deste relatório.
- Os resultados contidos neste Relatório de Análise aplicam-se somente a amostra ensaiada.
- Padrão de Emissão: Padrão de emissão conforme Portaria/Resolução/Norma.
- Período de análise: Conforme Procedimento interno PP.COL.POP1 - Rev. 16 - Guia de Coleta e Preservação de Amostras.
- Proibida a reprodução parcial deste documento.
- Coleta: Coletas realizadas pelo Green Lab seguem os seguintes procedimentos internos disponíveis em nosso site:
- PP.COL.POP1 – Rev. 16 - Guia de Coleta e Preservação de Amostras
- PP.COL.POP2 – Rev. 10 - Coletas
- PP.COL.IT2 – Rev. 8 - Coleta de Efluentes e Águas Gerais
- PP.COL.IT5 – Rev. 10 - Coleta de Água de Diálise
- PP.COL.IT6 – Rev. 9 - Coleta de Águas Superficiais
- PP.COL.IT7 – Rev. 8 - Coleta de Águas Subterrâneas (Poços de Monitoramento e Piezômetros)
- PP.COL.IT8 – Rev. 8 - Coleta de Resíduo Sólido
- PP.COL.IT9 – Rev. 8 - Coleta de Águas Nobres - PP.COL.IT10 – Rev. 8 - Coleta de Solos

"As coletas realizadas pelo Interessado seguem conforme os procedimentos disponibilizados pelo Green Lab ou procedimentos internos do cliente, neste caso, a veracidade das informações é de responsabilidade do mesmo."

Responsável Técnico

Graciema Formolo Pellini
Responsável Técnico - CRQ-V 05200428

ANEXO B – CLASSIFICAÇÃO DA AREIA IMF

Dados do Interessado:

Interessado:	FUNDIMISA FUNDIÇÃO E USINAGEM LTDA
Endereço:	Rua Giruá, 50 - Distrito Industrial - Santo Ângelo/RS

Dados da Amostra:

Local de coleta: Caçambas / Bag's	
Material coletado: Resíduo de Areia de Fundição (ADF) - Amostra 1 - Moldagem IMF (No Bake)	
Data de coleta: 6/8/2013	**Data de recebimento:** 08/08/13 20:28:06
Responsável pela coleta: Interessado	
Observações: Classificar amostra segundo NBR 10.004/2004	
Período de análise: 08/08/13 20:28:06 à 30/08/13 08:40:05	
Data da publicação: 30/08/13 11:31:05	**Data de emissão do relatório:** 30/08/13 13:26:15

Origem do Resíduo

Resíduo de areia gerado na fabricação dos moldes para posterior vazamento e pó captado pelos exaustores do setor de moldagem.

Descrição do processo de segregação e seus constituintes principais

O resíduo é segregado em caçambas ou Bag's. No setor de moldagem IMF são preparados os moldes de areia com o modelo da peça a ser produzida para posterior vazamento do metal líquido, os produtos utilizados para a confecção dos moldes são: areia, resinas e catalisadores.

Inflamabilidade

Não produz fogo em condições normais de temperatura e pressão nem sob fricção, absorção de umidade ou por alterações químicas espontâneas.

Corro sivida de pH 1:1 = 7,0

Não corrosivo, pois o pH situa-se acima de 2,0 e abaixo de 12,5.

5. Patogeni cidade

Não avaliado.

Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.004:2004**	**M**

Optou-se por fazer a análise de fenol na massa bruta para verificar se havia concentração residual de fenol na amostra. O resultado foi de 0,070 mg Fenol/Kg.
A concentração encontrada de fenol está abaixo da concentração considerada como tóxica para organismos aquáticos;
Peixes: Salmo Gairdneri: CL50 (24h)= 5,6 a 113 mg/L
Daphnia SP: DLo = 16 mg/L
Scenedesmus Quadricauda = 7,5 mg/L
Desta forma, mesmo apresentando residual de fenol na amostra o resíduo pode ser considerado como: Resíduo Classe II – Não Perigoso.

Resultados da amostra

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.004 - Massa Bruta

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.004 - Massa Bruta

Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.004:2004**	**M**
Fenol	mg Fenol/Kg	0,070	0,025	---	83

NBR 10.004/2004 - Massa bruta					
Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.004:2004**	**M**
Cianeto	mg CN/Kg	< 0,004	0,004	250	21
pH Solução 1:1	-	7,00	---	---	227
Sulfeto	mg S-2/Kg	< 0,10	0,100	500	70
Umidade	%	0,210	0,0001	---	25

Massa Bruta: De acordo com a NBR 10.004:2004 - Classificação de resíduos sólidos - item Massa bruta: O(s) parâmetro(s) satisfazem os limites permitidos.

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.005 - Lixiviado

NBR 10.005/2004 - Lixiviado					
Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.005:2004**	**M**
Arsênio	mg As/L	< 0,006	0,0060	1,0	242
Bário	mg Ba/L	1,160	0,0010	70,0	242
Cádmio	mg Cd/L	< 0,001	0,0010	0,5	242
Chumbo	mg Pb/L	< 0,007	0,0070	1,0	242

Cromo	mg Cr/L	0,023	0,0030	5,0	242
Fluoreto	mg F/L	< 0,05	0,050	150	58
Mercúrio	mg Hg/L	< 0,0002	0,0002	0,1	242
pH à 25ºC	-	5,32	-	---	98
Prata	mg Ag/L	< 0,006	0,0060	5,0	242
Selênio	mg Se/L	< 0,013	0,013	1,0	242

Lixiviado: De acordo com a NBR 10.005:2004 - Classificação de resíduos sólidos - item Lixiviado - anexo F.: O(s) parâmetro(s) satisfazem os limites permitidos, portanto o resíduo apresentou-se como NÃO TÓXICO.

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.005 - Lixiviado

NBR 10.006/2004 - Solubilizado					
Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.006:2004**	**M**
Alumínio	mg Al/L	0,0546	0,0060	0,2	242
Arsênio	mg As/L	< 0,006	0,0060	0,01	242
Bário	mg Ba/L	0,0059	0,0010	0,7	242
Cádmio	mg Cd/L	< 0,001	0,0010	0,005	242

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.005 - Lixiviado

NBR 10.006/2004 - Solubilizado					
Parâmetros	**Unidade**	**Resultados**	**LQ**	**VR NBR 10.006:2004**	**M**
Chumbo	mg Pb/L	< 0,007	0,0070	0,01	242
Cianeto	mg CN/L	< 0,004	0,004	0,07	21
Cloreto	mg Cl/L	627	5,00	250	108
Cobre	mg Cu/L	< 0,006	0,0060	2,0	242
Cromo	mg Cr/L	< 0,003	0,0030	0,05	242
Fenóis Totais	mgFenol/L	< 0,003	0,003	0,01	83
Ferro	mg Fe/L	0,095	0,0060	0,3	242
Fluoreto	mg F/L	< 0,05	0,050	1,5	58
Manganês	mg Mn/L	0,021	0,0010	0,1	242
Mercúrio	mg Hg/L	< 0,0002	0,0002	0,001	242
Nitrato	mg N-NO3/L	0,356	0,200	10,0	48
pH à 25ºC	-	7,19	-	---	98
Prata	mg Ag/L	< 0,006	0,0060	0,05	242

Selênio	mg Se/L	< 0,013	0,013	0,01	242
Sódio	mg Na/L	6,84	0,13	200	242
Sulfato Total	mg SO4/L	< 4,0	4,00	250	60
Surfactantes	mg MBAS/L	< 0,1	0,100	0,5	59
Zinco	mg Zn/L	0,041	0,0050	5,0	242

Solubilizado: De acordo com a NBR 10.006:2004 - Classificação de resíduos sólidos - item Solubilizado - anexo G.: O(s) parâmetro(s) Cloreto ultrapassam os limites máximos permitidos.

Classificação: Em função dos resultados obtidos, o resíduo apresentou-se como NÃO PERIGOSO- CLASSE II A - NÃO INERTE.

Legendas:

L.Q. – Limite de Quantificação.
N.A. – Não se aplica.
N.D. – Não Detectado.
VR – Valor de Referência.
(***) : Análise prejudicada em função da característica da amostra.
(M): Métodos de Referência

Métodos de Referência (M)

21	SM 4500 CN E
25	Gravimétrico
48	Salicilato
58	SM 4500 F-D
59	SM 5540 C
60	SM 4500 SO4 E
70	Azul de Metileno
83	SM 5530 D
98	NBR 14339:1999
108	SM 4500 Cl-C
227	ABNT NBR 10004:2004
242	PP.TEC.POP 55 conforme EPA Método 200.7/2001

Bibliografia:

APHA : American Public Health Association.
EPA : Environmental Protection Agency.
Farmacopéia Brasileira 5ª edição-2010 / Método Cinético Turbidimétrico.
NBR: Norma Brasileira.
SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 22nd edition:2012

Observações:

- Para amostras sólidas: os resultados são expressos em base seca.
- Cadastro na FEPAM Nº 00070/2011-DL válido até 22/11/2013

- Os dados brutos referentes à amostra são armazenados em arquivo físico pelo prazo de 5 anos a contar da emissão deste relatório.
- Os Relatórios de Análise referentes à amostra serão armazenados eletronicamente pelo prazo de 10 anos a contar da emissão deste relatório.
- Os resultados contidos neste Relatório de Análise aplicam-se somente a amostra ensaiada.
- Padrão de Emissão: Padrão de emissão conforme Portaria/Resolução/Norma.
- Período de análise: Conforme Procedimento interno PP.COL.POP1 - Rev. 16 - Guia de Coleta e Preservação de Amostras.
- Proibida a reprodução parcial deste documento.
- Coleta: Coletas realizadas pelo Green Lab seguem os seguintes procedimentos internos disponíveis em nosso site:
- PP.COL.POP1 – Rev. 16 - Guia de Coleta e Preservação de Amostras
- PP.COL.POP2 – Rev. 10 - Coletas
- PP.COL.IT2 – Rev. 8 - Coleta de Efluentes e Águas Gerais
- PP.COL.IT5 – Rev. 10 - Coleta de Água de Diálise
- PP.COL.IT6 – Rev. 9 - Coleta de Águas Superficiais
- PP.COL.IT7 – Rev. 8 - Coleta de Águas Subterrâneas (Poços de Monitoramento e Piezômetros)
- PP.COL.IT8 – Rev. 8 - Coleta de Resíduo Sólido
- PP.COL.IT9 – Rev. 8 - Coleta de Águas Nobres - PP.COL.IT10 – Rev. 8 - Coleta de Solos

"As coletas realizadas pelo Interessado seguem conforme os procedimentos disponibilizados pelo Green Lab ou procedimentos internos do cliente, neste caso, a veracidade das informações é de responsabilidade do mesmo."

Responsável Técnico

Graciema Formolo Pellini
Responsável Técnico - CRQ-V 05200428

ANEXO C – LIXIVIAÇÃO DA MISTURA

Universidade Federal do Rio Grande do
Escola de
Departamento de

Laboratório de Materiais

LAUDO TÉCNICO

MATERIAL: Formulações com resíduo de areia de fundição (ADF)

Amostras:

1. **Macharia 50%**
2. **Areia verde 20% BC**
3. **Areia verde**
4. **Areia verde 50% QC**
5. **Areia de macharia**
6. **Areia pó de exaustor**
7. **Areia de IMF**
8. **Areia verde 10%**

ENSAIO REALIZADO: Lixiviação: ABNT NBR 10005/ 2004

Parâmetros: ABNT NBR 10004/2004 (Anexo F)

Fone: (051) 33083637 fax: (051) 3308 3405 Av. Osvaldo Aranha, 99 - sala 709
CEP 90035-190 Centro - Porto Alegre - RS

LACER

Universidade Federal do Rio Grande
Escola de
Departamento de

Laboratório de Materiais

Resultados:

	Elementos analisados							
	Cd	Cr total	Pb	As	Se	Ag	Ba	Hg
	Limite Máximo NBR 10.004 (mg/L)							
	0,5	5,0	1,0	1,0	1,0	5,0	70,0	0,1
Amostras	Valores medidos (mg/L)							
Macharia 50%	< 0,002	0,06	< 0,01	< 0,02	0,04	0,02	0,51	0,000489
Areia verde 20% BC	< 0,002	0,02	< 0,01	< 0,02	0,03	0,03	0,24	ND
Areia verde	< 0,002	< 0,004	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 0,01	0,04	0,000243
Areia verde 50% QC	< 0,002	0,05	< 0,01	< 0,02	0,04	0,02	0,44	ND
Areia de Macharia	< 0,002	< 0,004	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 0,01	0,06	ND
Areia Pó de Exaustor	< 0,002	< 0,004	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 0,01	0,09	0,000319
Areia de IMF	< 0,002	< 0,004	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 0,01	0,01	ND
Areia verde 10%	< 0,002	0,07	< 0,01	< 0,02	0,04	0,03	0,25	ND

ND = Não detectado

Comentários: Nenhum dos elementos analisados ultrapassou o limite máximo indicados pela norma técnica ABNT NBR 10004. Classifica-se desta forma como **Resíduo Não Perigoso**

Classe II.

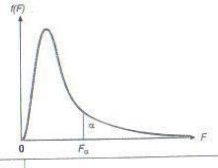
Entretanto, para uma classificação final em relação a **Resíduo Não Inerte Classe II,** é necessário proceder ao ensaio de solubilização de acordo com a norma **ABNT NBR 10006.**

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Chefe do Laboratório de Materiais Cerâmicos
LACER-DEMAT-EE-UFRGS

Fone: (051) 33083637 fax: (051) 3308 3405 Av. Osvaldo Aranha, 99 - sala 709
CEP 90035-190 Centro - Porto Alegre - RS

ANEXO D – TABELA MÉTODO DA ANOVA (FTAB)

TABELA IV Valores Críticos de F: Valores de $F_{0,05}$

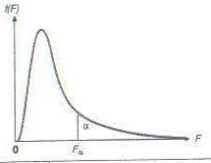


A Tabela IV apresenta valores para os quais a área à sua direita sob a distribuição F, com os graus de liberdade indicados (área sombreada à direita de $F\alpha$), é igual a α.

Graus de Liberdade do Denominador (ν_2) \ Graus de Liberdade do Numerador (ν_1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88

FONTE: De M.Merrington e C.M.Thompson, "Tables of Percentage Points of the Inverted Beta (F) - Distribution", *Biometrika*, 1943, 33, 73-78. Reproduzido com autorização dos curadores de *Biometrika*.

TABELA IV Valores críticos de F: Valores de $F_{0,05}$ (conclusão)



A Tabela IV apresenta valores para os quais a área à sua direita sob a distribuição F, com os graus de liberdade indicados (área sombreada à direita de $F\alpha$), é igual a α.

Graus de Liberdade do Denominador (ν_2) \ Graus de Liberdade do Numerador (ν_1)	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	241,9	243,9	245,9	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3
2	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00