

REVISTA

ABRV

Associação Brasileira de Pavimentação



PAVIMENTAÇÃO

ANO VII – Nº 26 – Outubro a Dezembro de 2012 – www.abpv.org.br – ISSN 1809-1865



**Monitoramento Ambiental
do Trecho Experimental Contendo
Areia Descartada de Fundição**

Raquel Luísa Pereira Carnin
Carlos Jorge da Cunha
Clauber José Bandeira da Costa



Rua Miguel Couto, 105 – Sobrelojas 204 e 205

20070-030 – Rio de Janeiro – RJ

Tel: (21) 2233-2020 / 2263-5794 – Fax: (21) 2233-0709

CONSELHO EDITORIAL

Diretoria da ABPV

COORDENAÇÃO GERAL

Arqtª Georgina Libório Azevedo

georgina@abpv.org.br

MTb 31365-RJ

JORNALISTA RESPONSÁVEL

Jean Pierre M. Santiago

jpierrems@abpv.org.br

MTb 27170-RJ

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO

Presidente: Engº José Pedro dos Santos Vieira Costa

Vice-Presidente: Engº Eduardo Alberto Ricci

Diretor Financeiro: Arqtª Georgina Libório Azevedo

Diretor Administrativo: Engº Fernando Augusto Júnior

Diretor Técnico: Engª Michéle Dal Toé Casagrande

Diretor de Divulgação: Engº Cristiano da Costa Moreira

COMITÊ TÉCNICO-CIENTÍFICO

Engº Alfredo Monteiro de Castro Neto; Engº Antônio Fortunato Marcon; Engº Armando Morilha Junior; Engº Atahualpa Schmitz da S. Prego; Engº Carlos Yukio Suzuki; Engº Cassio Eduardo Lima de Paiva; Engª Consuelo Alves da Frota; Engº Cristiano da Costa Moreira; Engº Djalma Rocha A. M. Pereira; Engº Douglas Fadul Villibor; Engº Dultevir Guerreiro Vilar de Melo; Engº Edinaldo Afonso Marques de Mélo; Engº Eduardo Alberto Ricci; Engº Fernando Augusto Jr.; Engº Genésio Almeida da Silva; Arqtª Gilda Collet Bruna; Engº Glicério Trichês; Engº Heitor Roberto Giampaglia; Engº Jacques de Medina; Engº João Menescal Fabrício; Engº João Vicente Falabella Fabrício; Engº João Virgílio Merighi; Engº Jorge Augusto Pereira Ceratti; Engº José Pedro dos Santos Vieira Costa; Engº José Leomar Fernandes Junior; Engº José Tadeu Balbo; Engº José Vidal Nardi; Engª Laura Mª Goretti da Motta; Engª Leni F. M. Leite; Engº Leto Momm; Engª Liedi Legi B. Bernucci; Engª Luciana Nogueira Dantas; Engº Luiz Miguel de Miranda; Engº Marcello Roberto Rangel Pestana; Engº Márcio Muniz de Farias; Engº Márcílio Augusto Neves; Engª Maria da Conceição M. Azevedo; Engª Michéle Dal Toé Casagrande; Engº Nilton de Souza Campelo; Engº Paulo Romeu Assunção Gontijo; Engª Prepredigna D. E. Almeida da Silva; Engª Rita Moura Fortes; Engº Silvio Rodrigues Filho; Engº Saul Birman; Engº Walter Canales Sant'ana; Engº Washington Pérez Nuñez.

Tradução: Mariana Ricci

Capa: Alvaro Magalhães

Editoração: Algo+ Soluções – Maristela Carneiro

Revisão: Mariflor Rocha e Eveline Vieira Machado

Impressão: Gráfica e Editora Cruzado Ltda.

Tiragem: 10.000 exemplares – **Periodicidade:** Trimestral



Nossa capa

Trecho da duplicação
da Rodovia
AL- 101 Sul

Foto de Paulo Rios

Sumário

- 2 EDITORIAL
- 3 41ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO REALIZADA EM FORTALEZA
- 6 DUPLICAÇÃO DA RODOVIA AL 101 SUL
- 9 SEÇÃO DE NOTAS
- 14 OBRAS DE INFRAESTRUTURA NO BRASIL
Aracaju – Sergipe
- 17 ESPAÇO JURÍDICO
Enfim, o Novo Código Florestal (NCF): algumas constatações iniciais
Victor Athayde
- ARTIGOS TÉCNICOS
- 19 Monitoramento Ambiental do Trecho Experimental Contendo Areia Descartada de Fundição
Raquel Luísa Pereira Carnin, Carlos Jorge da Cunha e Claubert José Bandeira da Costa
- 32 Estudo do Comportamento de um Solo Estabilizado com Cinzas de Incineração de Resíduo Sólido Urbano Para Aplicação em Camadas de Base de Pavimentos
Gino Omar Calderón Vizcarra, Michéle Dal Toé Casagrande e Laura Maria Goretti da Motta
- 48 Avaliação Funcional e Estrutural de um Trecho Experimental em Pavimento Rígido: Estudo de Caso Br-101/Ne Lote-05-PB – Obra de Duplicação
José Carvalho Filho, John Kennedy Guedes Rodrigues e Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
- 59 Estimativa de Produção de Acabadoras de Asfalto na Construção de Camadas Betuminosas
Wilbert Raymundo Ríos Sotomayor e Cassio Eduardo Lima de Paiva

EDITORIAL

Mais uma vez, chegamos ao fim do ano. A Revista PAVIMENTAÇÃO trouxe ao longo de suas edições um espectro de artigos importantes sobre os temas que estiveram na pauta do dia das universidades brasileiras e nos ambientes acadêmicos internacionais. Por aqui, passaram renomados pesquisadores que contribuem sempre com grandes trabalhos e pesquisas para o setor da engenharia de pavimentos.

De certo, a contribuição não fica apenas na publicação das pesquisas, mas na apresentação das novas tecnologias. Queremos acreditar que as obras de infraestrutura rodoviária de todo o País estejam usufruindo deste ganho técnico, fazendo valer a contribuição científica brasileira, valorizando e aplaudindo nossos pesquisadores.

Nesta última edição do ano, destacamos as grandes obras que estão sendo feitas no País em duas reportagens que mostram o crescimento do Nordeste: em Alagoas, com a duplicação da AL 101 Sul e em Sergipe, a modernização da capital Aracaju ajudando a criar condições para a plena cidadania. As reportagens mostram os investimentos locais e a dedicação dos técnicos e gestores no setor de infraestrutura.

Nos artigos técnicos, começamos com um monitoramento ambiental do trecho experimental contendo areia descartada de fundição, de autoria dos Engenheiros Raquel Luísa Pereira Carnin, Carlos Jorge da Cunha e Clauber José Bandeira da Costa.

Dos pesquisadores Gino Omar Cálderón Vizcarra, Michéle Dal Toé Casagrande e Laura Maria Goretti da Motta, o segundo artigo mostra um estudo de comportamento de solo estabilizado com cinza de incineração de resíduo sólido urbano para a aplicação em camadas de base de pavimentos.

O terceiro artigo traz a avaliação funcional e estrutural de um trecho experimental em pavimento rígido. Trata-se de um estudo de caso da BR-101/NE, Lote 05-PB, Obra de Duplicação. Os autores são o Engenheiro civil José Carvalho Filho e os professores da Universidade

Federal de Campina Grande, John Kennedy Guedes Rodrigues e Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena.

O quarto e último artigo apresenta uma estimativa de produção de acabadoras de asfalto na construção de camadas betuminosas – um estudo dos Engenheiros Wilbert Raymundo Rios Sotomayor e Cassio Eduardo Lima de Paiva.

Destacamos ainda a realização da 41ª Reunião Anual Pavimentação, entre 3 e 5 de outubro em Fortaleza. Mais uma vez, a capital cearense sediou o maior evento de pavimentação do País. E novamente, o evento logrou grande sucesso, recebendo profissionais, técnicos, acadêmicos e pesquisadores de vários Estados brasileiros e também ilustres personalidades estrangeiras.

Deixamos as congratulações a todos os profissionais e estudantes de Engenharia e Arquitetura pelas comemorações dos dias do Engenheiro e do Arquiteto, 11 e 15 de dezembro. A valorização da profissão e o respeito a estes profissionais serão sempre uma bandeira da ABPv.

Para 2013, espera-se um ano de grande movimentação na engenharia nacional. Em atenção aos cronogramas das obras de infraestrutura que estão sendo realizadas no País, as expectativas são de trabalho intenso, movimentando toda a cadeia do setor em prol de uma execução de excelência e implementação de técnicas inovadoras da engenharia nacional.

A ABPv e a Revista PAVIMENTAÇÃO acompanham de perto estes movimentos importantes que descrevemos, e apresentará tudo o que de mais moderno e eficiente está sendo utilizado, no sentido de aplaudir os esforços de nossos profissionais e mostrar as perspectivas de um Brasil comprometido com o desenvolvimento de sua infraestrutura, propiciando melhores condições de vida para seu povo.

Finalmente, queremos externar para os leitores nossas felicitações de um excelente encerramento de 2012, e que o próximo ano seja de grandes realizações, tanto no plano profissional quanto no pessoal.

Conselho Editorial

41ª Reunião Anual de Pavimentação é realizada em Fortaleza



1. Sr. Julio Xavier Rangel, Diretor-Superintendente da Associação Brasileira dos Departamentos Estaduais de Estradas e Rodagem – ABDER, neste ato representando o Presidente, Sr. Carlos Pereira e Silva, 2. Sr. José Sergio Fontenele de Azevedo, Superintendente do Departamento Estadual de Rodovias – DER, 3. Sr. Eduardo Bellaguarda, Gerente de Comercialização da Lubnor, representando a Petrobras, 4. Sr. José de Paula Barros Neto, Diretor do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará – UFC, neste ato representando o Magnífico Reitor Jesualdo Pereira Farias, 5. Sr. José Pedro dos Santos Vieira Costa, Diretor Presidente da Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, 6. Sr. Profº Jorge Soares, Chefe do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará - UFC e Coordenador Geral dos Eventos, 7. Exmo. Sr. Adahil Fontenele, Secretário da Infraestrutura do Estado do Ceará, neste ato representando o Exmo. Sr. Governador do Estado do Ceará, Cid Ferreira Gomes, 8. José Ademar Gondim Vasconcelos, Presidente da Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza – ETUFOR e da Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania – AMC, representando a Exma. Sra. Prefeita de Fortaleza, Luizianne de Oliveira Lins, 9. Sr. General Jorge Ernesto Pinto Fraxe, Diretor Geral do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, 10. Sr. Victor Cesar da Frota Pinto – Presidente do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Ceará – CREA-CE.

Entre os dias 3 e 5 de outubro, o Centro de Eventos do Ceará, em Fortaleza, sediou a 41ª Reunião Anual de Pavimentação - RAPv. Com mais de 600 participantes, o evento teve a presença de várias autoridades nacionais e internacionais do setor de engenharia de infraestrutura promovendo amplos debates, discussões e apresentação de trabalhos nos três dias de duração do evento.

Na solenidade de abertura, o General Jorge Fraxe, atual Diretor do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte - DNIT, expôs os obstáculos que a autarquia federal vem passando e apontou os acertos que vêm se destacando-se.

Mencionou grandes obras que serão licitadas, dentre as quais a duplicação da BR-381 entre Belo Horizonte e Go-



vernador Valadares, e da BR-116 no Rio Grande do Sul. Informou também que a meta do DNIT é ter todos os 58 mil quilômetros da malha federal cobertos por contratos de manutenção estruturados até dezembro deste ano. Lembrou que estamos vivenciando um momento importantíssimo para a infraestrutura do País por conta dos projetos do PAC e das obras da Copa de 2014. E destacou que a execução destas obras estão ganhando maior agilidade em função do Regime Diferenciado de Contratação – RDC, instrumento que desburocratiza a Lei 8.666/1993, a chamada Lei de Licitações. No rol de inovação, o DNIT passará a disponibilizar em seu site o acesso aos boletins de medição das obras executadas. O BEM – Boletim Eletrônico de Medição – vai fornecer, *on-line*, as informações referentes à execução física e aos pagamentos efetuados dos contratos de obras. O intuito é conferir transparência à autarquia.

O Diretor-Presidente da ABPv, Eng. José Pedro dos Santos Vieira, discursou abordando o incansável esforço dos pesquisadores e engenheiros de todo o Brasil na busca pela qualidade de excelência na técnica da pavimentação. E ressaltou a importância da RAPv, do Simpósio Internacional e da ExpoPavimentação para toda a comunidade envolvida: *“A oportunidade que ora encontramos, nos permite não apenas saber do que se passa no Brasil, mas também o que o mundo está discutindo sobre a pavimentação, permite-nos a conexão com o que está sendo vislumbrado e, por conseguinte, ao que estão aptos a compartilhar. E nós, pesquisadores, profissionais e acadêmicos brasileiros, muito temos também o que compartilhar”*.

DIVERSOS ÓRGÃOS E ASSOCIAÇÕES PRESENTES

Estiveram presentes na Reunião Anual de Pavimentação diversos órgãos e associações, tais como, a Associação Brasileira dos Departamentos de Estradas de Rodagens

PRÊMIO MARIO KBALEM RESTOM



1º Homenageado: In Memoriam: Engenheiro José Valdanel Alencar Castelo Branco, recebido por sua esposa Sra. Sandra Arruda, fez a entrega Profª Verônica Castelo Branco.



2º Homenageado: Roberto Ribeiro, fez a entrega Prof. Jorge Soares..



3º Homenageado: Franklin José Chaves, fez a entrega do Prêmio o Eng. José Pedro dos Santos Vieira Costa.

– ABDER, Agência Nacional de Transporte Terrestre – ANTT, e várias concessionárias responsáveis pela malha viária do País.

Juntamente com a 41ª RAPv, ocorreu a primeira edição da ExpoPavimentação, uma feira de materiais e equipamentos para a pavimentação. Órgãos e empresas apresentaram seus produtos e serviços, tais como a Marcosa, Itatiba,

Road Expo 2013, ARMTEC, SENGE-CE e CREA-CE, Prefeitura de Fortaleza, Atlas Copco, Betunel, Insttale, COPA, Bonafer, ABCP, Magna, Solotest, Huesker, ACO, Greca, Solocap, Petrobras, DER-CE, Pavesys, Engevias, Convias, ABPv, Ultrazag, Cenarcom, DNIT, Inbec e PL Mármore.

A reunião contou ainda com nove sessões técnicas e cinco palestras internacionais e quatro nacionais. As internacionais foram proferidas por Richard Kim (EUA): “Improving Performance of Chip Seals Using Advanced Design, Testing, Analysis, and Construction”; Becky Mc Daniel (EUA, Presidente da AAPT): “Performance of Recycled Materials for Asphalt Surfaces”; Gabriele Tebaldi (Itália): “Crack propagation and fracture energy in hot mix asphalt”; Manfred Partl (Suíça): “Lab and Full-Scale Testing of Asphalt”; e Sudaram Logaraj (EUA): “Sustainable Technologies”.



Já as palestras nacionais ficaram a cargo do Engº Ilonir Tonial (Petrobras/BR): “Entenda a relação dos parâmetros da especificação de produtos asfálticos com seu desempenho”; do General Jorge Pinto Fraxe (Diretor-geral do DNIT): “Perspectivas de Investimentos em Rodovias”, do Engº Carlos Pereira de Carvalho e Silva (Presidente ABDER): “Cide – uma partilha injusta e incerta”; e da arquiteta Therezinha Dias: “SMS Saúde, Meio Ambiente e Segurança na Cadeia Produtiva de Asfaltos”.



A mesa redonda tratou do tema: MWV Asphalt Innovations: “Round Table Seminar on Development and Implementation of Warm Mix Asphalt for Brazil: Global Experiences” (Desenvolvimento e Implementação de Misturas Mornas no Brasil: Experiências Globais).



Na noite do dia 4, um jantar de confraternização no late Clube de Fortaleza selou o evento, com a presença do sanfoneiro Waldonys, apresentando um *show* de cultura regional.

No último dia, às 14 horas, deu-se o encerramento do evento com a fala do Prof. Jorge Soares, coordenador do evento, e do Engº Cristiano da Costa Moreira, Diretor de Divulgação da ABPv. Ambos falaram de suas percepções sobre mais uma Reunião Anual de Pavimentação promovida pela ABPv e a receptividade nordestina.

Destacaram ainda o papel da Associação como entidade técnico-cultural, sem fins lucrativos, que, desde 1959, vem contribuindo para a pavimentação brasileira, seja através dos eventos, seja através da oferta de seus cursos reconhecidos em todo o Brasil.

Ao final, foi feita uma menção aos apoiadores do evento: Ministério da Educação, Governo do Estado do Ceará, DNIT, DER, CNPq, CAPES, SENGE. CE, Sindi Ônibus; aos patrocinadores: Akzo Nobel, ABCR, ABDER, Confea, Crea-CE, SENAI, Petrobras, CR Almeida, MWV Evotherm, Quimigel Ltda, Ecorodovias, Sinduscon CE; e à Coordenação sob responsabilidade da UFC e ASTEF.

Duplicação da Rodovia AL-101 Sul

Reportagem: Georgina Libório Azevedo

Colaborou: Jean Pierre M. Santiago

Viaduto do Francês - Foto: Paulo Rios

Em outubro, deste ano foram concluídas as obras da AL 101 Sul, importante rodovia alagoana que foi inaugurada em 1979 e, agora, teve 25,8 km duplicados entre o Pontal da Barra, em Maceió, e o Trevo do Gunga, na Barra de São Miguel. A rodovia é a principal via de ligação entre a capital e o sul do Estado.



Marcos Vital

O Departamento de Estradas de Rodagem de Alagoas (DER-AL), através do seu Diretor-Presidente, o economista Marcos Vital, mostra o que uma gestão séria e competente é capaz de realizar em benefício de um Estado. Marcos começou melhorando o bem-estar dos funcionários através de

uma repaginação e reengenharia no quadro funcional do órgão fazendo uma adequação do tempo e redução dos custos, medidas que levaram à união dos setores internos e gerou uma transparência nos gastos públicos, chegando a resultados recente-

mente impossíveis, servindo de exemplo para as demais instituições.

Muitas foram as dificuldades e maiores ainda os obstáculos a serem transpostos, mas com uma equipe de primeira, unida aos demais órgãos públicos da administração direta e com o objetivo bem definido através dessa obra grandiosa (concluir a duplicação da AL-101 Sul), inseriu o DER-AL no cenário brasileiro com extremo louvor.

O cuidado da obra se deu desde a remoção dos moradores da comunidade do Jacaré, que ocupavam as margens da rodovia há cerca de 50 anos, em parceria com a Seinfra (Secretaria de Infraestrutura de Alagoas) criando o residencial Recanto da Ilha para o assentamento das famílias.

As obras que fizeram parte da duplicação da AL-101 Sul incluíram a duplicação de quatro pontes: as pontes Maceiozinho (30 m), Niquim (70 m), Massagueira (257 m) e Mundaú, antiga Divaldo Suruagy (376 m), e a construção de três viadutos: o viaduto da Barra de São Miguel, medindo 90 metros, que passou a ter duas faixas; o viaduto do Francês, também de duas faixas, medindo 108 metros; e o viaduto do Detran, de faixa única, no sentido Barra de São Miguel-Maceió, e extensão de 54 metros.



Viaduto do DETRAN (durante a construção) - Foto Georgina Libório

O viaduto do Detran foi uma obra realizada em concreto protendido. Para sua construção, foi utilizada a concepção estrutural em caixão perdido. Vale salientar que foram adotados dois vãos de 22,5 metros em balanços de 4,5 metros.

Em termos estéticos, a obra tornou-se uma das mais elegantes entre as realizadas no projeto de duplicação da rodovia AL-101 Sul. O motivo disso está na conjunção de sua curvatura com a protensão acima aludida, conferindo-lhe mais suavidade e beleza.



Ponte Divaldo Suruagy - Foto Paulo Rios

A ponte Divaldo Suruagy foi a maior obra de arte executada na rodovia. Na sua construção, os engenheiros relataram que surgiram algumas dificuldades para a realização das fundações, pois detectaram no terreno a existência de matacões (pedras soltas), que constituiu uma situação de bastante singularidade, geologicamente falando. Para contornar a dificuldade de cravação das estacas, foi necessário lançar mão de equipamentos com dispositivo pneumático e técnicas não previstas no projeto original. Isso possibilitou a execução do empreendimento com fundação em perfis metálicos.

HOMENAGENS

Três personalidades que se destacaram na busca pelo desenvolvimento de Alagoas foram homenageadas pelo Governo do Estado, prestando nome aos viadutos que compõem o trecho duplicado da rodovia. O odontólogo Fernando José Rocha Medeiros teve seu nome emprestado ao viaduto localizado no município da Barra de São Miguel. O outro homenageado é o renomado advogado Ardel de Arthur Jucá, para o viaduto localizado no trecho do Francês, na cidade de Marechal Deodoro. Por fim, o viaduto localizado à altura do Departamento Estadual de Trânsito (Detran), na divisa entre Maceió e Marechal Deodoro, recebeu o nome do engenheiro falecido recentemente, Beroaldo Maia Gomes, um dos ícones pensantes do desenvolvimento de Alagoas.



Foto dos Engenheiros

Merecem destaque todos os profissionais envolvidos na obra, mas, em especial, o trabalho dos fiscais Engenheiros Cícero Jacinto e Juarez Vasconcelos, e do assistente de planejamento do DER-AL, Eng. Sebastião Braga Mota.

DESENVOLVIMENTO REGIONAL E TURISMO

A obra de duplicação do trecho da rodovia AL-101-Sul é de grande importância para a região sul do Estado, pois promoverá o desenvolvimento e o turismo de Alagoas. São 26 quilômetros duplicados, possibilitando não apenas um melhor fluxo de veículos, mas uma rodovia totalmente construída para uma política de crescimento numa região que se consolida como polos industrial e turístico. Com essa duplicação, foram gerados quase 500 postos de trabalho. A estimativa é que mais oportunidades de emprego sejam geradas com o dinamismo turístico.

A nova rodovia fortalecerá, principalmente, o turismo da região das Lagoas e Mares do Sul. As cidades turísticas da Barra de São Miguel e Marechal Deodoro (Francês) estão sendo beneficiadas com a ação do Governo de Alagoas. A duplicação também desafoga o trânsito daqueles que utilizam a rodovia AL-101 Sul como entrada e saída de Maceió. Além da facilidade de acesso, novas empresas e redes de hotelaria estão instalando-se na região, favorecendo o aumento do fluxo de turistas nas cidades do entorno.

RESIDENCIAL RECANTO DA ILHA

Para a duplicação da rodovia, o Governo de Alagoas precisou desocupar uma extensa área da margem direita da AL-101 Sul, onde 110 famílias viviam irregularmente há décadas. A faixa ocupada faz parte da conhecida comunidade do Jacaré, que margeava os dois lados da rodovia totalizando 212 famílias que viviam sem infraestrutura, saneamento e condições dignas de moradia.

De acordo com o termo de compromisso assinado entre a Secretaria de Infraestrutura – Seinfra, e os moradores da comunidade, todas as famílias receberão novas casas do Governo de Alagoas no Residencial Recanto da Ilha, que está em construção a 100 metros da rodovia, em Barra Nova. O Estado assegurou ainda o pagamento de aluguéis sociais às famílias deslocadas, durante o prazo

de construção do residencial. A Seinfra também organizou uma comissão de moradores para visitar periodicamente as obras da construção.

O Residencial Recanto da Ilha terá 250 unidades habitacionais, e está inserido no Programa Alagoas Tem Pressa. Os recursos provêm do Programa Minha Casa, Minha Vida 2. Cada casa do conjunto possui dois quartos, banheiro, salas de estar e jantar, cozinha, área de serviço e varanda.

O projeto inclui ainda a implantação completa da infraestrutura, incluindo energia elétrica, abastecimento de água, drenagem, esgotamento sanitário e calçamento, bem como a instalação de equipamentos públicos de esporte e lazer, com quadra poliesportiva, equipamentos de ginástica, *playground* e outros espaços de convivência.



Seção de notas da Revista PAVIMENTAÇÃO

mariana@abpv.org.br

ANIVERSÁRIO DE 53 ANOS DA ABPV



Da esquerda para direita: 1- Engº Luiz Francisco Muniz da Silva; 2- Major Engº Antonio Carlos Rodrigues Guimarães; 3- Engº José Pedro dos Santos Vieira Costa (Presidente da ABPV) e 4- Engº Helio Suêvo Rodriguez.

A ABPV comemorou 53 anos de fundação realizando três palestras e promovendo uma confraternização de fim de ano, no dia 13 de novembro, na sede da associação, no Rio de Janeiro.

Participaram do evento o major Engenheiro Antônio Carlos Rodrigues Guimarães, do Instituto Militar de Engenharia – IME, que proferiu palestra com o tema “Avaliação de Materiais para Sublastro da Ferrovia de Carajás”; o Engenheiro Luiz Francisco Muniz da Silva, da Muniz&Spada, que falou sobre a “Aplicação da Mecânica dos Pavimentos à Ferrovia” e o Engenheiro Hélio Suêvo Rodriguez, da empresa Central Logística, que abordou o tema “Superestrutura ferroviária”.

Estiveram presentes a Diretoria da ABPV, convidados e diversos profissionais que buscavam aprofundamento

sobre as temáticas oferecidas. Ao final do evento, um coquetel brindou a comemoração dos 53 anos da Associação Brasileira de Pavimentação.

TRANSPQUIP LATIN AMERICA

São Paulo sediou o 5º Encontro das Indústrias de Infraestrutura para Transportes da América Latina, entre os dias 21 e 23 de novembro, no Pavilhão Azul, Expo Center Norte. A edição deste ano reuniu vendedores e compradores de equipamentos e serviços para rodovias, ferrovias, portos, vias fluviais e aeroportos. Com projeção internacional, o TranspoQuip fornece uma visão completa desses setores por meio do conhecimento dos mercados e das evoluções tecnológicas de cada uma das modalidades do evento.



BAUMA

A Feira Internacional de Máquinas, Veículos e Equipamentos para a Construção foi realizada em Xangai, China, entre os dias 27 e 30 de novembro. A pujança das apresentações dos expositores atraiu visitantes de todo o mundo, que foram conferir as novidades e as tendências desse setor da construção pesada.

BCINDIA - BAUMA CONEXPO SHOW

Bons prognósticos antevêm o sucesso da Feira Internacional de Maquinário de Construção, Maquinário para Minas e Veículos de Construção. O evento fornecerá à indústria de construção internacional uma plataforma profissional de *networking*, investimentos e troca de conhecimentos e ideias. A inauguração da feira, em 2011, teve repercussão de destaque ao colocar seu padrão de qualidade à prova. O evento se realizará entre os dias 5 e 8 de fevereiro de 2013, na cidade indiana de Mumbai.

PROFESSOR ALEMÃO FAZ PALESTRA EM MINAS GERAIS

O Prof^o Dr. Ing. Jurgen Hutschenreuther, do Departamento de Construção Rodoviária da Universidade de Bauhaus, na Alemanha, proferiu uma palestra dia 28 de novembro, em Belo Horizonte, sobre a Tecnologia de Misturas Mornas e seus Benefícios.

O evento foi promovido pela ABPv, regional de Minas Gerais, através do seu Coordenador regional e Diretor de divulgação da ABPv, Engenheiro Cristiano Costa Moreira, em parceria com o CREA-MG e com a intermediação do Engenheiro Klaus Budenbender, Diretor da Klama Representações.

CURIOSIDADES

REMOÇÃO DO PETRÓLEO VAZADO COM ÍMÃS E NANOTECNOLOGIA

As companhias de petróleo terão em breve uma ferramenta inteligente que envolve nanotecnologia e ímãs para auxiliar na limpeza do vazamento de petróleo.

Os vazamentos advindos de petroleiros e plataformas são um perigo constante ao ecossistema marinho e de custo elevado. Acredita-se que o vazamento do Golfo do México de 2010 foi o pior desastre ambiental na história dos Estados Unidos, com um custo de US\$ 40 bilhões.

Entretanto, os pesquisadores do MIT dizem que descobriram um método para recuperar o petróleo depois de um vazamento usando ímãs. O petróleo não é magnético, mas, se misturado com nanopartículas com ferro, pode ser separado magneticamente da água. As nanopartículas podem, posteriormente, ser removidas para que o petróleo seja reutilizado. A substância líquida seria, então, filtrada com o uso dos ímãs para separar o petróleo da água, sendo esta devolvida ao mar, e o petróleo levado à refinaria.

Até agora, apenas dois métodos principais eram usados: dispersantes químicos, que quebram o petróleo; e desnatação, uma técnica em que o óleo é retirado da superfície da água. Apesar dos impactos negativos na vida marinha, a técnica de magnetismo ainda encontra dificuldade em aceitação.

NOTÍCIAS

A ABPv presta sua homenagem a dois engenheiros que faleceram recentemente: Jorge Omar Agnusdei e Carlos Alberto da Silva Paranhos. Ambos eram associados e deixaram um legado de grandes trabalhos no campo da Engenharia.

Jorge Omar Agnusdei faleceu no dia 8 de outubro, na Argentina. Era Vice-Presidente da Comissão Permanente de Asfalto da Argentina, secretário permanente do Cila e um grande estudioso de asfalto em toda a América Latina.

Carlos Alberto Silva Paranhos era membro da Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, destacou-se com o apoio e empenho na viabilização dos primeiros cursos da ABPv, coordenados pelo Engenheiro Jorge Eduardo Salathé.

Uma grande perda para a engenharia e uma referência para todos os profissionais.

Cursos da ABPv

Sinalização de Segurança Viária

14 a 16/08/2012

Nelson Mattos

Drenagem de Ferrovias e Aeródromos -

11 a 14/12/2012.

Francisco José de d'Almeida Diogo e Marcelo Miranda Reis



Básico de Materiais e Serviços Asfálticos

21 a 23/8/2012

Luciana Nogueira Dantas e Dilma dos Santos Garçon

Dimensionamento de Pavimentos -

09 a 13/07/2012

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães, Dalter Pacheco Godinho e Ben-Hur Albuquerque e Silva



Drenagem Urbana

28 a 30/08/2012

Francisco José d'Almeida Diogo



Próximos Eventos:

19ª RPU – Reunião de Pavimentação Urbana
Cuiabá, MT – 3 a 5/07/2013

42ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação
Gramado, RS – de 12 a 14/11/2013.

**Se a sua única contribuição
para o esporte tem sido pagar
a mensalidade da academia
e não ir, vai adorar saber disso:
você pode direcionar
1% do imposto de renda da
sua empresa para associar sua
marca a projetos esportivos.**

Lei de Incentivo ao Esporte. Ganha você, ganha o esporte, ganha o Brasil inteiro.
Acesse www.esporte.gov.br e saiba mais.



Ministério do
Esporte

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO E PAÍS SEM POBREZA







Obras de infraestrutura no Brasil Aracaju – Sergipe

Nós da Revista PAVIMENTAÇÃO estamos fazendo um levantamento das obras de infraestrutura no Brasil e destacamos Aracaju - SE que tem vivido nas últimas décadas um verdadeiro *boom* imobiliário. A cidade, que já recebeu o título de “Capital da qualidade de vida”, vem passando por um acelerado processo de desenvolvimento, principalmente na área de mobilidade urbana. Somente na última década, foram construídas duas pontes, ligando-a a outras cidades, um viaduto, além da pavimentação de vários conjuntos habitacionais.

Em parte, o crescimento da capital tem sido impulsionado por investimentos do setor público, que tenta acompanhar os índices de desenvolvimento do município. A Prefeitura de Aracaju, por meio da Empresa Municipal de Obras e Urbanização (Emurb), vem investindo na infraestrutura da malha viária de vários bairros.

Fundada há 37 anos, a Emurb é a empresa do município que está à frente das transformações pelas quais Aracaju tem passado na última década. O órgão possui uma unidade de produção com duas usinas. Localizada no km 4 da Rodovia João Bebe Água, no município de São Cristóvão, a unidade produz de 70 a 100 toneladas de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) por dia, de segunda a sábado, de acordo com a necessidade.

Foto Amael Oliveira



O Engenheiro Paulo Costa, Diretor de Obras da Emurb, falou à *Revista PAVIMENTAÇÃO* sobre a infraestrutura que está sendo levantada na capital sergipana.

Revista PAVIMENTAÇÃO – No que diz respeito à ligação viária da cidade, o que já foi feito e quais as perspectivas que a população pode observar?

Eng. Paulo Costa – Entre as obras realizadas ultimamente pela empresa, a ligação viária do Engenho Novo é uma das que terão maior impacto social na comunidade beneficiada. A iniciativa compreende a interligação entre duas comunidades, os bairros Santo Antônio e Cidade Nova, na zona norte da capital.

Com a conclusão da obra, o percurso entre os dois bairros será encurtado em mais de três quilômetros. Orçado em cerca de R\$ 1,9 milhão com recursos próprios, o projeto prevê as etapas de terraplenagem, pavimentação em paralelepípedo, implantação das redes de esgoto e drenagem pluvial.

A previsão é de que todas as etapas da obra sejam finalizadas em torno de 10 meses. A ligação viária do Engenho Novo é realmente uma iniciativa importante para os aracajuanos, pois reduz as distâncias entre dois bairros da cidade. Com o seu término, teremos entregado à população uma nova via de acesso, que vai desafogar o trânsito na região.

Revista PAVIMENTAÇÃO – Qual é a importância do complexo viário do rio Poxim, na zona sul de Aracaju?

Eng. Paulo Costa – É muito importante para o crescimento da capital sergipana. Esse complexo viário compreende a construção de uma ponte, já finalizada, de um viaduto e a abertura de novas avenidas.

No mês de junho deste ano, foi iniciada a terceira e última etapa da obra, que é um dos maiores projetos arquitetônicos já realizados pela Prefeitura de Aracaju na última década. O complexo viário da Avenida Tancredo Neves, principal via que interliga os pontos extremos da cidade, está orçado em aproximadamente R\$ 26,8 milhões. Os recursos, financiados pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), estão sendo aplicados na edificação do viaduto e na abertura de novas avenidas. A obra deverá ser concluída em 18 meses.

Essa obra é, sem dúvida, um marco para a capital, que será beneficiada em muitos aspectos. Com a conclusão desse amplo projeto, a cidade terá um novo eixo viário

que vai ligar os bairros Jardins, Inácio Barbosa e Santa Maria, passando pelo conjunto Augusto Franco, que é um dos maiores conjuntos habitacionais da América Latina.

Revista PAVIMENTAÇÃO – Como fica a questão da política habitacional da cidade? Existem planos para acompanhar o crescimento da cidade e reduzir o déficit habitacional?

Eng. Paulo Costa – Sim, existem. Para acompanhar o crescimento da cidade e reduzir o déficit habitacional, a Prefeitura de Aracaju também construiu um novo bairro com mais de duas mil moradias populares. Inaugurado em 2010, o bairro 17 de Março foi erguido graças à parceria com os Governos estadual e federal, por meio do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC).

O novo complexo habitacional conta com toda a infraestrutura básica: terraplenagem, drenagem, pavimentação, redes de água, esgoto e energia em todas as etapas. Todas as unidades estão sendo entregues gratuitamente a famílias cadastradas pela Secretaria Municipal de Assistência Social e Cidadania (Semasc). O volume de investimento nessas obras ultrapassa a marca de R\$ 30 milhões, incluindo a construção das casas, blocos de apartamentos e a infraestrutura da área. Além disso, está prevista a construção de vários equipamentos urbanos, tais como, praças, escolas, unidade de saúde, centro de referência em assistência social (Cras), entre outros.

Não se trata somente da redução do déficit habitacional, mas também do crescimento ordenado, evitando a formação de favelas, um dos maiores problemas das grandes cidades. O objetivo também é garantir o direito a uma moradia digna, fundamental para a melhoria da qualidade de vida da população.



Alto Jaqueira



Bairro 17 de Março

Foto de Jorge Henrique



3^o
edição

BRAZIL ROAD EXPO 2013

TUDO SOBRE INFRAESTRUTURA VIÁRIA E RODOVIÁRIA

19 | 21
MARÇO

**TRANSAMÉRICA
EXPO CENTER**
São Paulo • Brasil

Expo: 11h-20h
Summit: 9h-18h

VENHA VISITAR O EVENTO
e conheça todas as novidades
e lançamentos do setor.

- ◆ **15.000m² de EXPOSIÇÃO**
INDOOR E OUTDOOR
- ◆ **250 EXPOSITORES**
NACIONAIS E INTERNACIONAIS

Faça já seu credenciamento online!
www.brazilroadexpo.com.br

Vagas limitadas
««««««««««««««««

BRAZIL ROAD SUMMIT

Mais de 60 palestras divididas
em 16 programas sobre:

- Investimentos em Rodovias
- Pavimentação
- Infraestrutura Viária
- Pontes, Viadutos e Túneis
- Drenagem
- Geotecnia
- Segurança Rodoviária
- Muito mais

Veja a programação completa no
site e saiba como se inscrever!

Apoio Oficial:



Co. Aérea Oficial:



Realização:





Victor Athayde

Enfim, o Novo Código Florestal (NCF): algumas constatações iniciais

1. Uma memória sobre o recente trâmite do então projeto de lei

No fim do mês de maio de 2012 foi publicada a Lei Federal nº 12.651/12, conhecida como o Novo Código Florestal.

Não foi um caminho pacífico, o projeto dessa lei, de nº 1.876/1999, tramitou 13 anos no Congresso Nacional.

Para se ter uma ideia, após a sua aprovação na Câmara dos Deputados, em segundo turno, foi para a sanção presidencial, de onde saiu com 32 alterações feitas por meio da Medida Provisória nº 571/2012 e com mais 12 vetos.

Por isso, o Novo Código só ganhou contornos definitivos quando a referida medida provisória virou lei ordinária (nº 12.727/2012), o que aconteceu em 18 de outubro de 2012 com a sua publicação.

O processo legislativo já não é mais um caminho misterioso, que somente os estudantes do Direito sabem o trajeto, já está acessível através da imprensa que divulga, diuturnamente, o diálogo institucional Executivo x Legislativo.

As expressões “falta de acordo para a votação” e “trancar a pauta” já viraram corriqueiras nos telejornais.

Em razão disso, presumo que o leitor desta coluna saiba que medida provisória é um ato do Poder Executivo que, ao ser publicado, tem força de lei (que é um ato origina-

do, exclusivamente, do Poder Legislativo), mas que deve ser apreciado, em caráter de preferência, pelo Congresso Nacional (Câmara e Senado) para vir a ser, enfim, uma.

Resumindo: a medida provisória que a presidente Dilma Rousseff firmou em maio de 2012, virou uma lei em outubro, após tramitar no Congresso, sofrer alterações pelos legisladores e, principalmente, ter 9 vetos por parte daquela.

Agora repetindo: o caminho foi polêmico e espinhoso.

Entretanto, atualmente se tem uma norma florestal nova, em vigor.

2. Alguns dos reflexos práticos relevantes do NCF

O leitor, curioso, pode indagar o que muda com essa nova lei.

A resposta pode ser a mais abrangente, mas vou apontar-lhes, apenas, o que julgo essencial, em pontos.

O primeiro deles, entendo, é em relação à definição de atividade de Utilidade Pública que tem o salvo-conduto para intervir, mediante compensação, em Áreas de Preservação Permanente.

Ressalto que a atividade de pavimentação (como não poderia ser diferente) e a mineração (que é a atividade que fornece a matéria-prima para se pavimentar) foram con-

sideradas de Utilidade Pública. Logo, tanto a extração de minerais em áreas protegidas por lei quanto a instalação de rodovias e estradas nessas áreas, por exemplo, estão legalmente permitidas.

Além disso, e ainda falando de pavimentação e mineração, tais atividades são qualificadas como de “uso alternativo do solo”, o que lhes permite, por exceção, a supressão de vegetação nativa, mediante compensação.

São duas permissões muito importantes para o desenvolvimento dessas atividades, já que a maioria não possui tais prerrogativas.

Um fato que reputo curioso é o custo que pode vir a ser associado à mineração, atividade base da pavimentação.

Isso porque a lei exige a recuperação da mata ciliar dos corpos hídricos, e determina a variação da largura da recuperação em metros, conforme o módulo fiscal de onde está, por exemplo, o rio.

Isso quer dizer que, municípios vizinhos, que possuem módulos fiscais diferentes, podem ter variação dessa faixa a ser recuperada. Há casos em que cidades limítrofes têm diferença de 30 hectares.

Por exemplo, imaginemos um município que tenha o módulo fiscal de 50 hectares e seu vizinho, com 20 hectares (este fato existe).

Conforme o art. 61-A do NCF, imóveis rurais semelhantes de, por exemplo, 100 hectares em cada um deles, enseja-

rão a recuperação de faixas distintas: naquele, oito metros (§1º do art. 61-A) e nesse, no mínimo 20 metros (§4º, II do art. 61-A).

Ora, é claro que essa obrigação onera a produção mineral no município com menor módulo fiscal, sendo que a mineração ocorre, essencialmente, nas áreas rurais.

Feita essa despreziosa conjecturação, me volto aos aspectos administrativos, *en passant*.

Para a gestão desses cenários, foram criados alguns instrumentos para a Administração Pública, como, por exemplo, o Cadastro Ambiental Rural (CAR) e Programas de Regularização Ambiental (PRA).

Ambos permitirão aos órgãos públicos de controle ambiental fiscalizar e monitorar a recuperação das matas ripárias (ou ciliares) nas áreas rurais, mas eles ainda necessitam de regulamentação específica, por isso, não me aventuro a tecer maiores comentários, mas já adianto: será com eles que os governos monitorarão o cumprimento da lei e poderão converter multas já aplicadas em benefícios ao meio ambiente.

Como se vê, ainda que de forma superficial, o Novo Código Florestal veio impor obrigações aos cidadãos, mas, também, consolidou questões jurídicas importantes em benefício aos administrados (a intervenção em APPs, por exemplo) e incumbiu os Poderes Públicos, em suas diversas esferas, em levar a Política Ambiental a sério.

Victor Athayde

Este espaço destina-se à publicação de artigos encaminhados à Revista pelos profissionais que se dispõem a colaborar promovendo com os demais técnicos o debate de diversos temas atuais e relevantes. Os artigos devem ser enviados para redacao@revistapavimentacao.org.br de acordo com as normas vigentes no sítio www.revistapavimentacao.org.br. Os trabalhos são apresentados na íntegra, sendo de responsabilidade do autor toda a informação nele contida.

Monitoramento Ambiental do Trecho Experimental Contendo Areia Descartada de Fundição*

Raquel Luísa Pereira Carnin

Engenheira ambiental, Tupy S.A. E-mail: raquel@tupy.com.br.

Carlos Jorge da Cunha

Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Clauber José Bandeira da Costa

Departamento de Transportes, Instituto Militar de Engenharia (IME).

RESUMO

As areias de fundição representam um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção. Somente no Brasil, são gerados cerca de 3 milhões de toneladas por ano. A maior parte desses resíduos é disposta em aterros com custos para os geradores e impactos ambientais. Este artigo avalia a possível alteração de qualidade causada pela aplicação da areia descartada de fundição por meio de monitoramentos ambientais num trecho experimental. O monitoramento consistiu na premissa de viabilizar ambientalmente a aplicação de areia descartada de fundição na construção de um trecho experimental de concreto asfáltico usinado a quente na Estrada dos Tenentes, marginal da BR-381, Rodovia Fernão Dias, do município de Extrema do Estado de Minas Gerais.

Palavras-chave: areia descartada de fundição; monitoramento ambiental; trecho experimental.

ABSTRACT

The foundry sands represent one of industrial solid waste with higher production volume. Only in Brazil are raised about 3 million tons per year. Most of this waste is disposed of in landfills with costs for generators and environmental impacts. The aim of this study was to evaluate the possible change in quality caused by the application of spent foundry sand through environmental monitoring in environmental stretch. Environmental monitoring was the premise of enabling the application of environmentally spent foundry sand in the construction of an experimental section of the street of the Tenentes, marginal BR 381 highway Fernão Dias in the municipality of Extrema state of the Minas Gerais.

Keywords: discarded foundry sand; environmental monitoring; experimental section.

*Os autores deste artigo gostariam de registrar os seus agradecimentos às seguintes instituições: Tupy S.A., Fagor Ederlan, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e Instituto Militar de Engenharia (em especial ao Coronel Paulo Roberto Dias Morales).

I. INTRODUÇÃO

As areias de fundição representam um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção. Somente no Brasil, são gerados cerca de 3 milhões de toneladas por ano (Abifa, 2009).

A extração da areia usada para a construção civil aliada ao acúmulo de areia descartada de fundição em aterros causa significativos impactos ambientais. Por isso, o reaproveitamento da areia descartada de fundição deveria ser incentivado para a redução do quantitativo de areia extraído da natureza.

Alguns estudos preliminares sobre o uso de areia descartada de fundição como agregado para aplicações na construção civil já foram feitos no Brasil (Carnin, 2008; Coutinho, 2004; Stefenon, 2003; Bonet, 2002, Bonin, 1995 e Bina *et al.*, 2000) com resultados satisfatórios.

O relatório desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2006) demonstra que os maiores volumes de areia descartada de fundição estão sendo utilizados em geotécnica, em aplicações como em bases de estradas e cobertura de aterros. Destaca que, dependendo da qualidade da areia descartada de fundição, esta poderá ser um excelente agregado para a produção de cimento Portland, concreto asfáltico e produtos de concreto. Em casos mais restritos, a areia descartada de fundição está sendo usada em solos agrícolas e outras aplicações, tais como, a compostagem.

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

No Brasil, tanto no Estado de Santa Catarina como no Estado de São Paulo, a areia descartada de fundição pode ser utilizada em concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural de acordo com as normas legais de cada um dos Estados de Santa Catarina, Resolução Consema 011/2008; e São Paulo Decisão de Diretoria nº 152/2007/C/E.

Trechos experimentais são ferramentas utilizadas para a análise ambiental para possíveis materiais rodoviários. Com o objetivo de avaliar a adição de areia

descartada de fundição em concreto asfáltico, foi realizado o monitoramento de risco potencial ao meio ambiente para os materiais aplicados na pista experimental por meio dos ensaios de lixiviação, solubilização e água percolada.

A areia descartada de fundição é apresentada a seguir apenas como ADF, por se tratar de uma sigla já consagrada no âmbito das fundições e dos órgãos públicos ambientais do Brasil, ao se referir ao assunto.

I.1. REVISÃO DE LITERATURA

I.1.1. A areia de fundição

A areia de fundição é uma mistura de vários elementos que se combinam dando características de perfeita trabalhabilidade da mistura que compõe a caixa de moldagem.

Maleabilidade, compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência a esforços mecânicos, tais como, compressão e tração, expansividade volumétrica, permeabilidade e perfeita desmoldagem são algumas características que a areia adquire devido à sua mistura (Bonin, 1995).

A areia de fundição é constituída basicamente por: areia, pó de carvão, bentonita e água.

O principal componente da areia utilizada nas fundições é um agregado fino, mineralogicamente puro, denominado "areia-base". A areia-base é constituída essencialmente de sílica (óxido de silício, SiO_2).

A bentonita é um silicato de alumina hidratado (contém em sua composição silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, potássio e sódio). É formada por lamelas, sendo classificada pela espessura das mesmas.

De um modo geral, o pó de carvão é formado por matéria volátil, carbono fixo, cinzas, água e enxofre.

A característica principal da água na mistura da areia de moldagem é tornar possível a propriedade coesiva dos elementos da mistura pelo aumento da umidade.

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

1.1.2. Preparo da areia de fundição

O processo de moldagem é do tipo regenerativo. O material que chega ao final do ciclo de trabalho retorna por meio de correias transportadoras ao início do processo, reutilizando a mesma areia. Pelos motivos de perda de volume e da descaracterização dos componentes da mistura, torna-se necessário o descarte de parte da areia de fundição, gerando a areia descartada de fundição (ADF) e a frequente reposição de matérias-primas e o controle de qualidade.

A areia de fundição é preparada por meio da descarga de areia nova e areia usada, com a quantidade de

água calculada por um controlador de compatibilidade, de modo que a areia caia na máquina de moldar com a umidade final pretendida. A quantidade de água certa para o teor de bentonita pode ser verificada no momento em que é efetuada a mistura, podendo esta ser corrigida (Schulz, 2005). Os demais aditivos são injetados no recipiente de mistura, que funciona continuamente.

O misturador é o elemento principal para a preparação da areia de fundição, onde são misturadas a areia lavada e areia de retorno, bentonitas ativada e natural, pó de carvão e água. Na figura 1, pode-se verificar o aspecto físico das bentonitas e do pó de carvão.

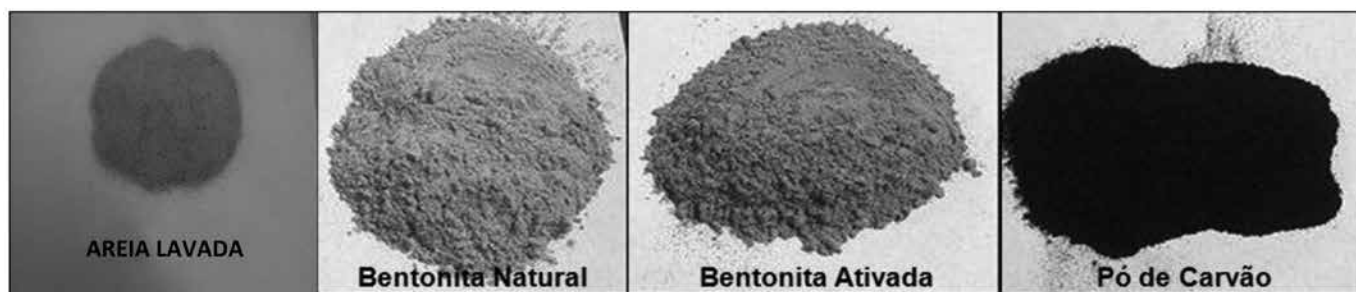


Figura 1 – Matérias-primas da areia de fundição (Pereira, 2005)

1.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O TRECHO EXPERIMENTAL

Para verificar o comportamento ambiental da mistura asfáltica com ADF, sob atuação das variações climáticas de temperaturas e efeito da umidade, foi construído um trecho experimental com a execução do monitoramento ambiental.

Em 2006, foi realizada uma parceria da Tupy S.A. com o Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT), Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e Instituto Militar de Engenharia (IME) para a execução de um trecho experimental contendo ADF. Na parceria, foi incluída a Fundição Fagor com sede na cidade de Extrema (MG), que forneceu a ADF gerada pela empresa, para fins de comparação de resultados.

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

O trecho experimental foi implantado considerando a execução de seis segmentos, sendo que serão apresentados neste artigo os três segmentos equivalentes ao CA (tabela 1).

Tabela 1 – Demonstrativo dos segmentos para estudo do ADF como agregado em pavimentação realizado em Extrema (MG)

Mistura a Frio	Concreto Asfáltico (CA)
Areia convencional	Areia convencional
ADF Fagor	ADF Fagor
ADF Tupy	ADF Tupy

Os três segmentos com o revestimento tipo pré-misturado a frio são com areia convencional, com ADF gerada da Fundição Fagor, localizada em Extrema (MG) e da Tupy S.A., localizada em Joinville (SC).

A extensão executada foi de 120 metros de comprimento, com largura de 6,50 m. O trecho experimental foi aberto ao tráfego comercial com volume médio/dia de 44 veículos, com estimativa do número de aplica-

ções de carga padrão (8,2 t) ao longo de 10 anos de $N = 1,1 \times 10^6$.

A estrutura foi formada por 5 cm de espessura de revestimento em CA; 15 cm de base composta com material tipo bica corrida, fornecida pela Prefeitura Municipal de Extrema, assente sobre subleito heterogêneo.

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

Tubos de coleta foram instalados no meio de cada trecho evitando, dessa forma, a contaminação causada por materiais de trechos vizinhos. A água da chuva percolada no trecho experimental foi coletada por seringas e transferida para frascos plásticos com vedação.

A água da chuva percolada no trecho experimental foi coletada por seis seringas e transferida para frascos plásticos com vedação. Foram analisadas quimicamente nas datas padrão de 30, 60, 90 dias, para a aferição de materiais carreados por lixiviação e solubilização do asfalto em plena carga e 180 e 365 dias, para a determinação de eventuais alterações sob condições climáticas e maior índice de ocorrências de fraturas e oxidação do concreto.

Foram extraídos corpos de prova do trecho para a realização de análises de lixiviação e solubilização.

1.2.1. Dosagem da mistura

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

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

Foram adicionados dois diferentes teores de ADF nas misturas asfálticas, sendo que a Mistura Tupy com 10% e a Mistura Fagor com 8%, comparando a um “traço-base” denominado de Concreto Asfáltico Referência, cujas porcentagens dos materiais são as seguintes: 20% de brita nº 1; 35% de pedrisco; 35% de pó de pedrisco e 10% de ADF.

Para o Concreto Asfáltico Tupy, foram adotadas as seguintes porcentagens de materiais: 25% de brita 1; 30% de pedrisco; 35% de pó de pedrisco e 10% de ADF. Para a mistura de Concreto Asfáltico Fagor, foram aplicados: 25% de brita nº 1; 30% de pedrisco; 37% de pó de pedrisco e 10% de ADF.

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

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

2. METODOLOGIA

Em 2007, foi executado, na Estrada dos Tenentes na cidade de Extrema (MG), um trecho experimental com revestimento asfáltico tipo CA empregando o ligante tipo CAP 50/70. Os agregados utilizados na elaboração do trecho experimental foram: brita nº 1, pedrisco e pó de pedra; sendo a brita nº 1 procedente da pedreira Basalto V e o pedrisco e pó de pedra, da pedreira Basalto II de natureza mineralógica basáltica. Foi realizada a análise granulométrica dos agregados e da ADF da Tupy e da ADF da Fagor.

Foi desenvolvido um convênio tecnológico acordado entre a Tupy S.A. e a Fundação Fagor Ederlan com o Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT), Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e Instituto Militar de Engenharia (IME). O convênio previa que o desempenho funcional estava sob a responsabilidade do IME e do IPR.

O trecho experimental foi executado pela Prefeitura Municipal de Extrema no período de 9 a 13/4/2007, com o objetivo de obter dados comparativos.

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

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

Para a composição da curva granulométrica do projeto, foram selecionadas seis frações: brita nº 1, pedrisco, pó de pedrisco, ADF Tupy, ADF Fagor e areia convencional. As características granulométricas dos agregados graúdos e miúdos são apresentadas na tabela 2.

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

Para verificar a resistência mecânica do trecho experimental, foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (DNER-ME 138/1994), módulo de resiliência de misturas asfálticas (DNER-ME 133/1994), todos na temperatura controlada de 25° C, além da caracterização dos materiais empregados na pista estudada.

2.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Para a realização do ensaio de resistência à tração, seguiram-se os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 15087/2004, que define os passos e os equipamentos utilizados no ensaio de resistência à tração.

2.2. ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

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

O procedimento para a obtenção do módulo de resiliência consistiu na determinação de três valores do

módulo durante a realização de três ciclos de ensaio para cada corpo de prova. Cada ciclo foi composto por uma quantidade determinada de golpes de condicionamento e 10 golpes para a determinação do módulo. Para o primeiro ciclo, utilizaram-se 40 golpes de condicionamento e 10 golpes para os dois últimos ciclos.

2.3. ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO (NBR 10.005)

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

2.4. ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO (NBR 10.006)

Uma amostra do resíduo seco é peneirada em malha de 9,5 mm e 250 g do material passante são transferidos para um frasco contendo 2.500 ml de água deionizada. O frasco foi coberto e deixado em repouso por sete dias, em temperatura até 25° C. O filtrado obtido é denominado de extrato solubilizado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise granulométrica estão apresentados na tabela 2.

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

A dosagem foi realizada no Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), com a utilização do ligante asfáltico CAP 50/70. Foram adicionados dois diferentes teores de ADF às misturas asfálticas (CA Tupy com 10% e CA Fagor com 8%), comparando a um “traço-base” denominado de CA Referência, cujas porcentagens dos materiais foram as seguintes: 20% de brita nº 1; 35% de pedrisco; 35% de pó de pedrisco e 10% de areia convencional.

Tabela 2 – Análise granulométrica dos agregados

Material	Brita nº 1	Pedrisco	Pó de Pedrisco	ADF Tupy	ADF Fagor	Areia Convencional
76,2 mm: 3"	100	100	100	100	100	100
50,8 mm: 2"	100	100	100	100	100	100
38,1 mm: 1 1/2"	100	100	100	100	100	100
25,4 mm: 1"	100	100	100	100	100	100
19,1 mm: 3/4"	99	100	100	100	100	100
12,7 mm: 1/2"	61	100	100	100	100	100
9,5 mm: 3/8"	18	100	100	100	100	100
4,8 mm: nº 4	1	29	98	100	100	100
2,0 mm: nº 10	1	2	65	100	100	98
0,42 mm: nº 40	1	2	27	77	92	13
0,18 mm: nº 80	1	2	19	17	13	5
0,074 mm: nº 200	1	2	12	4	1	1

Tabela 3 – Composição granulométrica do CA Tupy e Fagor

Peneiras	CA Tupy	CA Fagor	CA Referência	Faixa "C" DNIT (%)	
				Limite Inferior	Limite Superior
19,1 mm: 3/4"	100	100	100	100,0	100,0
12,7 mm: 1/2"	90	90	88,4	85,0	100,0
9,5 mm: 3/8"	80	80	81,3	75,0	100,0
4,8 mm: nº 4	53	53	52,6	50,0	85,0
2,0 mm: nº 10	34	33	34,4	30,0	75,0
0,42 mm: nº 40	18	18	20,2	15,0	40,0
0,18 mm: nº 80	9	9	11,9	8,0	30,0
0,074 mm: nº 200	5	5	6,7	5,0	10,0

Para o CA Tupy, foram utilizadas as seguintes porcentagens de materiais: 25% de brita nº 1; 30% de pedrisco; 35% de pó de pedrisco e 10% de ADF.

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

Os resultados apresentados na tabela 3 demonstram que a composição granulométrica e a curva de distribuição granulométrica contendo a ADF da Tupy foram enquadradas na Faixa "C" do DNIT, assim como a ADF da Fagor.

O cimento asfáltico de petróleo escolhido foi o CAP 50/70 por ser indicado para a aplicação em CA. O material foi fornecido pela Ipiranga Asfaltos localizada em Paulínia (SP), produzido pela refinaria Replan.

Foram determinados os parâmetros Marshall e o teor ótimo de ligante para a mistura empregando o CAP

50/70, obtendo-se um teor ótimo de 5,3% (CA Tupy e CA Fagor). Esse teor também foi aplicado na execução do trecho experimental da Estrada dos Tenentes. As especificações do DNIT para a camada de revestimento estão na tabela 4.

Tabela 4 – Características das misturas

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

Todos os parâmetros Marshall estão dentro da faixa especificada pelo DNIT 031/2006 – ES. A mistura pre-

parada com a ADF da Fagor apresentou o parâmetro “porcentagem de vazios” muito próximo ao do permitido pela norma.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) foram realizados em prensa Marshall no laboratório do IPR.

Na tabela 5, estão apresentados os resultados dos ensaios realizados em corpos de prova confecciona-

dos com 5,3% de ligante asfáltico, para cada mistura estudada.

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

Tabela 5 – Resistência à tração (RT)

Local de Obtenção dos Corpos de Prova	Corpos de Prova	RT a 25° C (MPa)	Desvio-padrão
Moldados em Laboratório	CA (10% ADF Tupy)	0,92	0,04
	CA (8% ADF Fagor)	0,95	0,02
	CA (8% Areia Convencional)	0,99	0,03
Moldados no Trecho Experimental	CA (10% ADF Tupy)	1,83	0,05
	CA (10% ADF Fagor)	1,84	0,05
	CA (10% Areia Convencional)	1,96	0,03
Extraídos do Trecho Experimental	CA (10% ADF Tupy)	0,98	0,03
	CA (10% ADF Fagor)	1,07	0,04
	CA (10% Areia Convencional)	0,83	0,06

A importância do ensaio de resiliência é justificada por ser o mesmo utilizado para o cálculo de tensões e deformações nos pavimentos. Com relação aos resultados dos ensaios de MR (tabela 6), os valores encontrados foram:

- Para os corpos de prova moldados em laboratório: com 10% ADF Tupy > com 8% Areia Convencional > com 8% ADF Fagor.
- Para os corpos de prova moldados no trecho experimental: com 10% ADF Tupy > com 10% Areia Convencional > com 10% ADF Fagor.
- Para os corpos de prova extraídos do trecho: com 10% Areia Convencional > com 10% ADF Tupy > com 10% ADF Fagor.

A tabela 7 apresenta as médias dos módulos de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) dos corpos de prova, tanto os moldados em laboratório como os extraídos do trecho experimental, após 30 dias de abertura ao tráfego comercial. A mistura asfáltica da Tupy apresentou um módulo de resiliência superior ao da Fagor, conseqüentemente, o resultado da relação MR/RT também foi superior.

Os valores correspondentes aos corpos de prova de CAUQ dosados no laboratório, conforme foi verifica-

do, mantiveram-se muito próximos dos valores obtidos das misturas extraídas do trecho experimental, por meio de sonda rotativa.

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

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

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

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

Tabela 6 – Resultados do módulo de resiliência (MR) das misturas

Local	Composição do CA	Módulo Resiliente			MR Médio (MPa)
		Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	
Moldados no Laboratório	Com 10% ADF Tupy	3.533	3.500	3.506	3.935
		4.152	3.755	3.984	
		4.643	4.056	4.187	
Moldados no Trecho	Com 8% ADF Fagor	3.178	3.336	3.040	3.216
		3.112	3.090	2.768	
		3.462	3.514	3.442	
Moldados no Trecho	Com 8% Areia Convencional	3.831	3.587	3.771	3.838
		4.081	3.884	3.874	
		4.656	4.485	4.408	
Moldados no Trecho	Com 10% ADF Tupy	4.713	4.656	4.589	4.356
		3.840	3.941	3.914	
		4.469	4.307	4.343	
Moldados no Trecho	Com 10% ADF Fagor	2.170	2.323	2.145	3.447
		4.113	3.298	3.852	
		3.640	3.649	3.703	
Moldados no Trecho	Com 10% Areia Convencional	3.918	3.991	3.821	3.663
		3.021	3.623	3.602	
		7.309	7.479	7.418	
Extraídos do Trecho	Com 10% ADF Tupy	7.263	7.298	7.252	7.467
		8.046	7.583	7.551	
		8.470	8.594	8.832	
Extraídos do Trecho	Com 10% ADF Fagor	8.030	7.493	7.065	7.351
		5.736	6.191	5.745	
		6.969	7.030	6.896	
Extraídos do Trecho	Com 10% Areia Convencional	9.239	9.102	9.250	8.171
		8.698	8.297	8.055	

Tabela 7 – Média dos MR e RT dos corpos de prova do trecho experimental e do laboratório

Ensaio	CA Tupy		CA Fagor		CA sem ADF
	10% ADF	10% ADF	8% ADF	10% ADF	
	Moldado em Laboratório	Extraído da Pista após 30 Dias	Moldado em Laboratório	Extraído da Pista após 30 Dias	Extraído da Pista após 30 Dias
MR (MPa)	3.987	4.494	3.179	3.575	3.673
RT (MPa)	0,92	0,98	0,95	1,07	0,83

Os ensaios de lixiviação e solubilização de acordo com a norma de classificação de resíduos NBR 10.004 foram realizados na ADF da Tupy (tabela 8).

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

A fim de compreender a influência dos diversos materiais nos parâmetros críticos na ADF e no corpo de

prova com ADF, eles também foram analisados nas matérias-primas (bentonita natural e ativada, pó de carvão e areia lavada) e os resultados podem ser vistos na tabela 9. Nessa tabela, também consta a análise da areia verde de fundição (AVF), preparada em laboratório e que não passou pelo processo de fundição.

O elemento sódio aparece na areia lavada utilizada na produção da areia de fundição (tabela 9). Outra fonte de sódio é a bentonita – o seu teor de sódio é justamente o responsável pela sua utilização no processo da areia de moldagem, uma vez que a hidratação dos íons de sódio causa o inchamento entre as lamelas da bentonita.

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

Os teores de alumínio e sulfato excedem aos limites permitidos no extrato solubilizado da Norma NBR 10.004 e classificam a ADF como Classe II A (tabela 8).

As matérias-primas da AVF, bentonita natural e ativada e o pó de carvão (Tabela 9), todas de origem mineral, caso fossem consideradas como resíduos sólidos, seriam classificadas como não inertes pela norma ABNT NBR 10.004.

Foram analisados os corpos de prova preparados com 15% de areia convencional e os corpos de prova com 15% de ADF. Os resultados podem ser vistos na tabela 10.

Os corpos de prova foram triturados, antes do preparo dos extratos, para expor os possíveis contaminantes ao líquido extrator, simulando o pior cenário de risco ambiental.

A comparação entre os parâmetros críticos da ADF e os do corpo de prova com 15% de ADF permite afirmar que o ligante asfáltico reduziu a extração de todos os íons medidos (tabelas 8 e 10).

Conforme os resultados apresentados na tabela 11, os elementos que ultrapassam os valores máximos permitidos da NBR 10.004 da ADF da Fagor são o alumínio, ferro e manganês. A concentração dos parâmetros alumínio, sódio e sulfato são bem maiores na ADF da Tupy que na da Fagor, sugerindo que estes são influenciados pela salinização da ADF Tupy com a água de abastecimento. Os teores de ferro são parecidos na ADF de ambas as fundições.

Tabela 8 – Parâmetros químicos no lixiviado e no solubilizado da ADF da Tupy

Parâmetros	Lixiviado (mg/l)			Solubilizado (mg/l)		
	NBR 10.005			NBR 10.006		
	Resultado	LQ ¹	VMP ²	Resultado	LQ ¹	VMP ²
Alumínio				55,45	0,05	0,2
Arsênio	< LQ	0,005	1	0,01	0,005	0,01
Bário	0,476	0,003	70	0,5	0,003	0,7
Cádmio	< LQ	0,03	0,5	< LQ	0,004	0,005
Chumbo	< LQ	0,2	1	< LQ	0,003	0,01
Cloretos				104	1	250
Cobre				0,02	0,01	2
Cromo total	< LQ	0,08	5	< LQ	0,013	0,05
Fenóis totais				< LQ	0,001	0,01
Ferro				20,7	0,02	0,3
Fluoretos	0,58	0,07	150	1,32	0,07	1,5
Manganês				0,13	0,02	0,1
Mercúrio	< LQ	0,0002	0,1	< LQ	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				1,2	0,3	10
Prata	< LQ	0,05	5	< LQ	0,01	0,05
Selênio				< LQ	0,007	0,01
Sódio				210	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				300	1	250
Zinco				< LQ	0,01	5

¹ LQ= Limite de Quantificação. ² VMP = Valor Máximo Permitido.
Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

Tabela 9 – Comparativo dos cinco parâmetros críticos do solubilizado das matérias-primas constituintes da areia verde de fundição (AVF)

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

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

Tabela 10 – Comparativo dos cinco parâmetros críticos do solubilizado da Areia Convencional, do CAP 50/70 e de dois corpos de prova com e sem ADF

Parâmetros	Areia Convencional	CAP	Corpo de Prova sem ADF	Corpo de Prova com ADF
Alumínio	14,9	0,013	0,025	0,17
Ferro	4,55	< LQ	0,041	< LQ
Manganês	0,052	< LQ	0,025	< LQ
Sódio	0,94	0,35	0,72	5,98
Sulfato	4	< LQ	< LQ	< LQ

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

Tabela 11 – Parâmetros químicos no lixiviado e no solubilizado da ADF da Fagor

Parâmetros	Lixiviado (mg/l)			Solubilizado (mg/l)		
	NBR 10.005			NBR 10.006		
	Resultado	LQ ¹	VMP ²	Resultado	LQ ¹	VMP ²
Alumínio				0,45	0,05	0,2
Ferro				15,45	0,02	0,3
Manganês				1,08	0,02	0,1
Sódio				92,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				104,00	1	250

ND: Não detectado. ¹ LQ = Limite de Quantificação. ² VMP = Valor Máximo Permitido.

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

3.1. ADIÇÃO DE ADF NAS MISTURAS ASFÁLTICAS DO TRECHO EXPERIMENTAL

O corpo de prova contendo 10% de ADF Tupy atendeu a todos os requisitos exigidos, sendo, portanto, classificado como um material inerte. Na tabela 12, encontram-se os resultados do ensaio do lixiviado e do solubilizado do corpo de prova, contendo 10% de ADF Tupy.

Os resultados ambientais do CA, com 10% de ADF da Fagor, apresentaram alumínio e ferro acima do permitido, conforme se observa na tabela 13.

Os íons solubilizados da ADF da Fagor foram o alumínio (0,45 mg/l) e o ferro (15,45 mg/l), porém, quando foram adicionados 10% de ADF na mistura asfáltica,

apresentaram no ensaio de solubilização cerca de 0,25 mg/l de alumínio e 0,38 mg/l de ferro, e o manganês não foi solubilizado, mostrando que houve uma redução significativa desses íons.

3.2. ANÁLISE DO PERCOLADO DO TRECHO

Foram analisadas as misturas contendo ADF da Tupy, Fagor e Areia Convencional, e seus resultados são descritos nas tabelas 9, 10 e 11, respectivamente.

Todas as misturas analisadas apresentaram alumínio e ferro acima do estabelecido para o solubilizado, porém, não se pode afirmar que esses íons foram solubilizados somente por influência da ADF ou da Areia Convencional.

nal, pois a lixiviação envolve alguns fatores como, por exemplo, contato das superfícies externas ou internas do material com a água; reações químicas complexas influenciadas pela composição da água e seu pH, carbono dissolvido, disponibilidade de oxigênio; adsorção superficial dos produtos e transporte da água contendo as espécies lixiviadas para o meio externo.

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

Tabela 12 – Parâmetros químicos no lixiviado e no solubilizado da amostra de CA com 10% de ADF da Tupy

Parâmetros	Lixiviado (mg/l)			Solubilizado (mg/l)		
	NBR 10.005			NBR 10.006		
	Resultado	LQ ¹	VMP ²	Resultado	LQ ¹	VMP ²
Alumínio				0,18	0,05	0,2
Arsênio	< LQ	0,005	1	< LQ	0,005	0,01
Bário	0,15	0,003	70	< LQ	0,003	0,7
Cádmio	< LQ	0,03	0,5	< LQ	0,004	0,005
Chumbo	< LQ	0,2	1	< LQ	0,003	0,01
Cloretos				82,00	1	250
Cobre				< LQ	0,01	2
Cromo total	< LQ	0,08	5	< LQ	0,013	0,05
Fenóis totais				< LQ	0,001	0,01
Ferro				0,23	0,02	0,3
Fluoretos	0,32	0,07	150	0,10	0,07	1,5
Manganês				< LQ	0,02	0,1
Mercurio	< LQ	0,0002	0,1	< LQ	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				< LQ	0,3	10
Prata	< LQ	0,05	5	< LQ	0,01	0,05
Selênio				< LQ	0,007	0,01
Sódio				4,32	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				< LQ	1	250
Zinco				< LQ	0,01	5

ND: Não detectado. ¹ LQ = Limite de Quantificação. ² VMP = Valor Máximo Permitido.

Tabela 13 – Parâmetros químicos no lixiviado e no solubilizado da amostra de CA com 10% de ADF da Fagor

Parâmetros	Lixiviado (mg/l)			Solubilizado (mg/l)		
	NBR 10.005			NBR 10.006		
	Resultado	LQ ¹	VMP ²	Resultado	LQ ¹	VMP ²
Alumínio				0,25	0,05	0,2
Ferro				0,38	0,02	0,3
Manganês				0,10	0,02	0,1
Sódio				92,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				88,5	1	250

ND: Não detectado. ¹ LQ = Limite de Quantificação. ² VMP = Valor Máximo Permitido.

Tabela 14 – Parâmetros químicos no lixiviado e no solubilizado do percolado do trecho CA com 10% de ADF da Tupy

Parâmetros	Lixiviado (mg/l)			Solubilizado (mg/l)		
	NBR 10.005			NBR 10.006		
	Resultado	LQ ¹	VMP ²	Resultado	LQ ¹	VMP ²
Alumínio				1,30	0,05	0,2
Ferro				20,16	0,02	0,3
Manganês				ND	0,02	0,1
Sódio				45	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				96	1	250

ND: Não detectado. ¹ LQ = Limite de Quantificação. ² VMP = Valor Máximo Permitido.

Tabela 15 – Parâmetros químicos no lixiviado e no solubilizado do percolado do trecho CA com 10% de ADF da Fagor

Parâmetros	Lixiviado (mg/l)			Solubilizado (mg/l)		
	NBR 10.005			NBR 10.006		
	Resultado	LQ ¹	VMP ²	Resultado	LQ ¹	VMP ²
Alumínio				0,95	0,05	0,2
Ferro				34,32	0,02	0,3
Manganês				0,10	0,02	0,1
Sódio				28,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				74,00	1	250

ND: Não detectado. ¹ LQ = Limite de Quantificação. ² VMP = Valor Máximo Permitido.

Tabela 16 – Parâmetros químicos no lixiviado e no solubilizado do percolado do trecho CA com 10% de areia convencional pela NBR 10.004 (2004)

Parâmetros	Lixiviado (mg/l)			Solubilizado (mg/l)		
	NBR 10.005			NBR 10.006		
	Resultado	LQ ¹	VMP ²	Resultado	LQ ¹	VMP ²
Alumínio				0,72	0,05	0,2
Ferro				16,47	0,02	0,3
Manganês				0,05	0,02	0,1
Sódio				31,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				68,00	1	250

ND: Não detectado. ¹ LQ = Limite de Quantificação. ² VMP = Valor Máximo Permitido.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

As análises ambientais do percolado obtido do trecho não foram significativas, visto que há interferência de vários fatores, como, por exemplo, poeira, água da

chuva e arraste de materiais dos carros que trafegam sobre o pavimento. A pesquisa demonstrou que o encapsulamento dos resíduos com ligante asfáltico (CAP) é um processo eficiente para a estabilização dos metais presentes em excesso.

Diante dos resultados dos ensaios ambientais realizados em corpos de prova contendo Areia Convencional e ADF, pode ser afirmado que os materiais não apresentam riscos ao meio ambiente.

No entanto, esses ensaios classificam a ADF como não inerte, ou seja, um resíduo industrial classe IIA. Porém, a areia convencional usada em pavimentação apresen-

tou parâmetros acima do permitido pela legislação. Outro fator relevante é que as matérias-primas constituintes da areia verde de fundição (AVF) também apresentaram parâmetros acima do especificado pela norma NBR 10.004. Esses resultados mostram falhas na Norma NBR 10.004 em avaliar o potencial de agressão ao meio ambiente causada por resíduos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). 2009. (www.abifa.org.br).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Resíduos sólidos – classificação – NBR 10.004/2004. Rio de Janeiro, 2004.

_____. Lixiviação de resíduos – procedimento – NBR 10.005/2004. Rio de Janeiro, 2004.

_____. Solubilização de resíduos – procedimento – NBR 10.006/2004. Rio de Janeiro, 2004.

_____. Agregados – terminologia – NBR 9.935. Rio de Janeiro, 2005.

BINA, Paulo; ALVES, José H.; BONIN, André L.; YOSHIMURA, Humberto N. *Metodologia de análise e aprovação de utilização de rejeitos industriais na construção civil: estudo de caso de uso de areia de fundição de descarte para pavimentação*. Monobeton Soluções Tecnológicas Ltda. – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT. São Paulo, 2000.

BONET, Ivan Iveraldo. *Valorização do resíduo areia de fundição (RAF) incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 127p.

BONIN, André Luís. *Reutilização da areia preta de fundição na construção civil*. In: CONGRESSO DE FUNDIÇÃO. São Paulo, p. 203-221. Set. 1995.

CARNIN, Raquel Luísa Pereira. *Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas*.

Em contrapartida, por meio dos resultados de classificação de resíduos sólidos realizados nos corpos de prova, comprovou-se que o concreto asfáltico contendo ADF foi classificado como resíduo inerte.

Tese (Doutorado) – Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas. UFPR, 2008, 152p.

COUTINHO NETO, B. *Reaproveitamento do resíduo de fundição em misturas asfálticas*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos. Departamento de Transportes. São Carlos, 2004. 197p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO (IBP). *Informações básicas sobre materiais asfálticos*. 6ª ed. Rio de Janeiro, 1999.

LEITE, Leni, F. M. *Estudos reológicos de cimentos asfálticos*. Dissertação (Mestrado) – COPPE/UFRJ, 1994.

PINTO, Salomão. *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. Tese (Doutorado) – Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

RESOLUÇÃO CONSEMA 011/2008. Critérios para a utilização de ADF de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto não estrutural. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. Conselho Estadual do Meio Ambiente – Consema. Estado de Santa Catarina, 2008, 14p.

SCHULZ, Marco Aurélio. *Valorização de resíduos sólidos provenientes da indústria de fundição: estudo na produção de artefatos de concreto para construção civil*. Universidade da Região de Joinville. Monografia de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental. 126p. 2005.

STEFENON, Fernando. *Incorporação de resíduos industriais em concreto betuminoso usinado a quente*. Universidade de Caxias do Sul. Mestrado Profissionalizante em Engenharia. Caxias do Sul, 2003.

Estudo do Comportamento de um Solo Estabilizado com Cinzas de Incineração de Resíduo Sólido Urbano para Aplicação em Camadas de Base de Pavimentos

Gino Omar Calderón Vizcarra

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Brasil.

E-mail: ginocalderon@hotmail.com.

Michéle Dal Toé Casagrande

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil.

E-mail: michele_casagrande@puc-rio.br.

Laura Maria Goretti da Motta

Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/Coppe, Rio de Janeiro, Brasil.

E-mail: laura@coc.ufrj.br.

RESUMO

Este estudo apresenta a caracterização de cinzas obtidas da incineração de resíduo sólido urbano (RSU) em usina geradora de energia elétrica, tendo como objetivo avaliar sua aplicabilidade em camadas de base de pavimentos rodoviários, pela mistura dessas cinzas a um solo argiloso não laterítico regional. Foram realizados ensaios de caracterizações química, física e mecânica, para o solo puro e para o mesmo com a adição de diferentes teores de cinzas (20 e 40%), bem como o dimensionamento mecanístico-empírico para uma estrutura típica de pavimento. A cinza volante diminuiu a expansibilidade do solo, apresentando um aumento no valor de CBR e módulo resiliente. Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo dependentes do teor e do tipo de cinza utilizado, ressaltando o emprego positivo da cinza volante de RSU para a aplicação em camadas de base de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: cinzas de incineração de resíduo sólido urbano (RSU); cinza volante; cinza de fundo; estabilização de solos; base de pavimentos.

ABSTRACT

This study presents the characteristics of Municipal Solid Waste (MSW) incineration ash obtained from electric energy generation place, to evaluate the MSW ash applicability in base road pavements layers through the ash mixture with a non-lateritic regional clay soil. Chemical, physical, mechanical tests and the mechanistic-empirical design for a typical pavement structure were carried out on the pure soil and also in the soil mixture with the addition of different ash content (20 and 40%). Fly ash reduced the soil swelling, showing an increase in the CBR and resilient modulus value. The results were satisfactory, being dependent on the content and type of ash used, highlighting the positive work of MSW fly ash for use on layers pavements base.

Keywords: Municipal Solid Waste (MSW) incineration ashes, fly ash, bottom ash, soil stabilization, pavements base.

*Os autores querem expressar seus agradecimentos ao CNPq pelo apoio financeiro (Projeto MCT/CNPq 14/2009, Processo 480748/2009-8), à Usina Verde pelo fornecimento das cinzas para o estudo realizado e ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Coppe/UFRJ, que permitiu a realização dos ensaios desta pesquisa.

I. INTRODUÇÃO

Em muitos lugares ao redor do mundo, onde a alta demanda por materiais de construção em comparação à disponibilidade de materiais naturais, assim como a falta de espaço para a disposição de resíduos são problemas, a utilização de subprodutos e resíduos para a construção de rodovias tem sido vista como uma solução apropriada para reduzir a quantidade de resíduos a dispor e fornecer materiais alternativos para a indústria da construção. Um caso típico desses materiais alternativos são as cinzas de incineração de resíduos sólidos urbanos produzidos em usinas e que são usados para a construção de rodovias (Badreddine, 2009).

As características químicas de cinzas e resíduos são a maior preocupação a respeito da sua classificação como resíduo perigoso ou não perigoso e a escolha do tipo de disposição final que deveria ter (Wiles, 1996).

Dentro desse contexto, este artigo avalia a aplicação de cinzas, obtidas da incineração de resíduo sólido urbano (RSU) em usinas geradoras de energia elétrica, para sua utilização em camadas de base de pavimentos rodoviários, pela mistura dessas cinzas com um solo argiloso não laterítico regional. Os resultados obtidos foram satisfatórios, ressaltando o emprego positivo da cinza volante de RSU para a aplicação em camadas de base de pavimentos rodoviários.

I.1.A INCINERAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO

A Usina Verde é uma empresa de capital privado situada na cidade universitária da UFRJ, Ilha do Fun-

ção, e tem como objetivo apresentar soluções ambientais para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos, pelo processo de incineração com cogeração de energia.

A Usina Verde recebe diariamente 30 toneladas de RSU da Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (Comlurb). A figura 1 mostra a composição do RSU após o processo de reciclagem da Usina Verde.

Na triagem, os materiais recicláveis são segregados manualmente e com o auxílio de detectores de metais. Em seguida, o RSU é triturado e o material fino separado com o auxílio de peneira rotativa e encaminhado para a secagem, visando à redução do teor de umidade. O RSU triturado passa por nova moagem, em moinho de facas, e é depositado em um silo. Esses resíduos são encaminhados para o forno de incineração, que opera a uma temperatura de 950° C. Durante o processo de combustão, são produzidas duas cinzas: a cinza de fundo e a cinza volante. A cinza de fundo é depositada no fundo da câmara de pós-combustão, encaminhada ao tanque de decantação e disposta em caçambas. Os gases quentes e a cinza volante (*fly-ash*) são exauridos da câmara de pós-combustão e aspirados para a caldeira de recuperação, onde ocorre o aproveitamento energético (cogeração de energia).

Posteriormente, os gases são neutralizados em um conjunto de lavadores e, em seguida, os gases limpos são aspirados e descarregados na atmosfera. A solução de lavagem é recolhida nos tanques de decantação onde ocorre a neutralização com as cinzas do próprio processo e hidróxido de cálcio, o que ocasiona a mineralização (decantação dos sais), sendo essa solução posteriormente reaproveitada no processo de lavagem (recirculação). Em seguida, a cinza volante é encaminhada para os tanques de decantação onde periodicamente é retirada e armazenada em caçambas (figura 2).

Ao final do processo de incineração, são obtidos de 8 a 10%, em volume, das duas cinzas, que representam cerca de 80% de cinza pesada (de fundo) e 20% de cinza volante (Fontes, 2008).

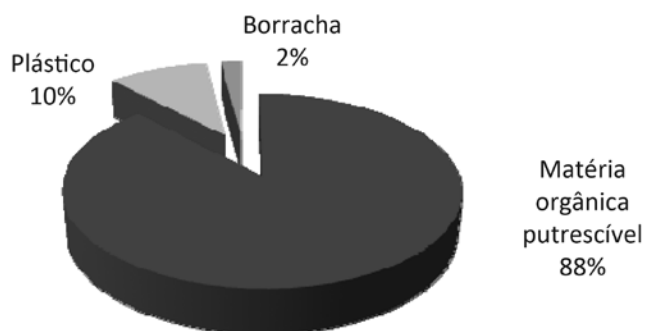


Figura 1 – Composição do RSU (Fontes, 2008)

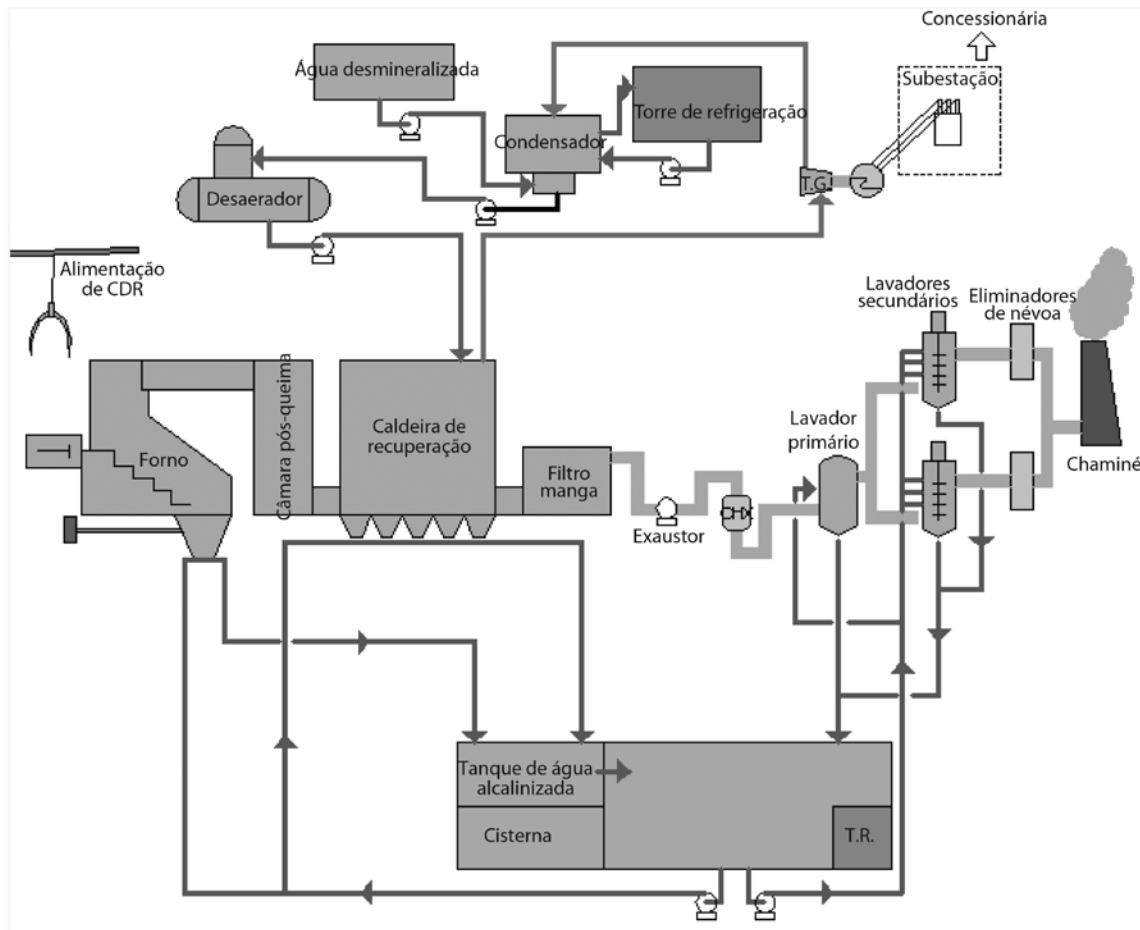


Figura 2 – Processo de incineração do RSU

2. OBJETIVOS

O objetivo deste artigo é avaliar a influência da adição de cinzas de resíduo sólido urbano em relação a:

- Características físico-químicas do solo.
- Propriedades mecânicas quanto à resistência e à deformabilidade.
- Aplicabilidade em estruturas de pavimentos.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

O solo argiloso não laterítico (figura 3) é procedente de uma jazida localizada no município de Campo Grande, RJ. A cinza volante (figura 4) e a cinza de fundo (figura 5) são provenientes da queima do resíduo sólido urbano (RSU) na Usina Verde, que fica localizada na Ilha

do Fundão, município do Rio de Janeiro, RJ. O quadro 1 traz os símbolos utilizados neste artigo, que descrevem os materiais e as misturas.

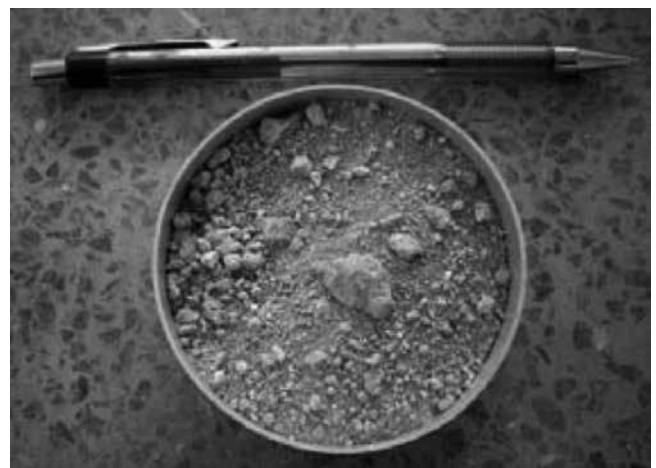


Figura 3 – Solo da jazida de Campo Grande, RJ (2009)



Figura 4 – Cinza volante de RSU da Usina Verde (2009)



Figura 5 – Cinza de fundo de RSU da Usina Verde (2009)

Quadro I – Símbolos referentes a cada material/mistura

Material/ mistura	% de Solo	% de Cinza volante	% de Cinza de fundo	Símbolo
Solo	100	0	0	S
Mistura 1	60	40	0	S60/CV40
Mistura 2	60	0	40	S60/CF40
Mistura 3	80	20	0	S80/CV20
Mistura 4	80	0	20	S80/CF20

3.2. ENSAIOS REALIZADOS

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E AMBIENTAL

A composição química total semiquantitativa das amostras de cinzas foi obtida mediante a técnica de

espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX). As amostras foram submetidas à análise por EDX em um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva, modelo EDX-720, marca Shimadzu no Laboratório de Estruturas (Labest) da Coppe/UFRJ.

A análise mineralógica foi realizada mediante a difração de raios X com equipamento D8 Focus Bruker no laboratório de estruturas da Coppe/UFRJ.

Ensaio de lixiviação segundo a Norma NBR 10005:2004 (ABNT, 2004) e a solubilização segundo a Norma NBR 10006:2004 (ABNT, 2004) foram realizados com a finalidade de classificar as cinzas e a mistura solo-cinza segundo o procedimento descrito na norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004).

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os ensaios de limite de liquidez (LL) e plasticidade (LP) foram realizados segundo a NBR 6459/84 e a NBR 7180/84, respectivamente. A análise granulométrica foi realizada conforme a NBR 7181/84, no solo destorroado e nas cinzas. Realizou-se esse ensaio por meio de peneiramento e sedimentação. Para a etapa correspondente à sedimentação, foram realizados ensaios com defloculante (hexametáfosfato de sódio).

A metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1995) tem por objetivo a classificação de solos tropicais e foi desenvolvida segundo a norma DNER-ME 258/94.

O ensaio de compactação foi realizado na energia Proctor Modificado, segundo a norma NBR 7182/86, com o intuito de determinar a umidade ótima de compactação ($w_{ótima}$) e a massa específica seca aparente máxima ($\gamma_{d\text{máx}}$) para o solo natural e as misturas solo-cinza, as quais foram umedecidas e armazenadas na câmara úmida, um dia antes da compactação. Foi realizado utilizando um molde cilíndrico de 10 cm de diâmetro e altura de 12,73 cm. Aplicaram-se 27 golpes com um soquete metálico de 4,54 kg, caindo de uma altura de 45,72 cm até completar 5 camadas. Ao final do ensaio, foram determinadas a umidade e a massa específica seca aparente.

3.2.3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

3.2.3.1. Ensaio de módulo de resiliência

Define-se módulo de resiliência (MR) de um solo como a relação entre a tensão desvio (σ_d) aplicada repetidamente em uma amostra de solo em ensaio triaxial e a correspondente deformação específica recuperável ou resiliente (ε_r), conforme é mostrado na equação 1 (DNER-ME 131/94, AASHTO TP46-94 (1996)).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

Onde:

M_R : módulo de resiliência;

σ_d : tensão desvio cíclica ($\sigma_1 - \sigma_3$);

ε_r : deformação resiliente (vertical).

O ensaio de módulo de resiliência (MR) foi realizado conforme o método proposto pela Coppe/UFRJ, apresentado em Medina e Motta (2005). Para a mistura S60/CV40, o ensaio se realizou com sete dias de cura do corpo de prova envolvido em sacolas de poliuretano para evitar a perda de umidade. O quadro 2 mostra os níveis de tensão aplicados para obter o módulo resiliente.

Quadro 2 – Tensões aplicadas durante o ensaio de módulo resiliente

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1/σ_3
0,021	0,021	2
	0,041	3
	0,062	4
0,034	0,034	2
	0,069	3
	0,103	4
0,051	0,051	2
	0,103	3
	0,155	4
0,069	0,069	2
	0,137	3
	0,206	4
0,103	0,103	2
	0,206	3
	0,309	4
0,137	0,137	2
	0,275	3
	0,412	4

O modelo composto utilizado neste artigo relaciona o módulo de resiliência à tensão confinante e a tensão desvio, conforme apresentado na equação 2.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (2)$$

Onde:

M_R : módulo de resiliência (MPa);

σ_3 : pressão confinante (MPa);

σ_d : tensão desvio cíclica ($\sigma_1 - \sigma_3$) (MPa);

k_1, k_2 e k_3 : coeficientes de regressão, derivados de resultados de ensaios em laboratório.

Foram moldados três corpos de prova para cada material ou mistura na umidade ótima e ensaiados no equipamento triaxial dinâmico da Coppe/UFRJ, dos quais se obtiveram valores de módulo resiliente (MR) para diferentes valores de tensão, tanto confinante (s_3) como desviadora (s_d). A partir desses valores, conseguiu-se obter, por correlação estatística, os coeficientes k_1, k_2 e k_3 do modelo composto, com a ajuda do Programa Computacional Statistica (Statsoft, 2004).

3.2.3.2. Ensaio de deformação permanente

Os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita em Guimarães (2009), utilizando os mesmos moldes do ensaio de módulo resiliente. Um total de 500 mil ciclos de carga foram empregados para cada espécime. Três ensaios foram realizados na mistura S60/CV40, na condição de máxima densidade seca, nos níveis de tensões apresentados no quadro 3.

Quadro 3 – Ensaios de deformação permanente

Número de ensaio	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)
1	0,098	0,294
2	0,118	0,353
3	0,098	0,392

3.2.3.3. Ensaio de CBR

O ensaio de CBR se realizou conforme a norma ABNT NBR 9895/87 – Solo – índice de suporte Califórnia, na umidade ótima, em três corpos de prova (solo, solo-cinza volante, solo cinza de fundo).

3.2.4. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO

Assumiu-se uma estrutura do pavimento tal como se apresenta na figura 6, com dados de tráfego (quadro 4) e clima da cidade do Rio de Janeiro, com a finalidade de ver o efeito da adição de cinza volante no solo em um projeto de pavimentação. A espessura e as propriedades mecânicas da camada asfáltica e de subleito permanecem constantes, e só a espessura da base é mudada, segundo os parâmetros de resiliência de cada material. Após a execução dos ensaios nas misturas e no solo puro, procedeu-se ao dimensionamento de uma rodovia, pelo método mecanístico-empírico, utilizando-se o programa computacional SisPAV (Franco, 2007).

Quadro 4 – Dados do tráfego

Configuração	Rodas	Volume/ano	Carga (kg)
Eixo duplo	4	100.000	8.200



Pressão dos pneus = 0,552 MPa

Mistura asfáltica Modelo elástico linear M.R. = 4193 MPa	$\nu = 0,337$ $e = 7,5$ cm
Base Modelo composto $k_1, k_2, k_3 =$ variável (Tabela 5)	$\nu = 0,35$ $e =$ variável (Figura 15)
Subleito Modelo elástico linear M.R. = 52 MPa	$\nu = 0,4$

Figura 6 – Estrutura do pavimento adotada

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A composição química do solo em estudo é apresentada no quadro 5. Os componentes principais do solo, que são normalmente encontrados nos solos residuais, são SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , os quais participam ativa-

mente do processo de estabilização química do solo (Rezende, 1999).

Quadro 5 – Compostos químicos predominantes do solo em estudo

Composto	Concentração (%)
SiO_2	43,08-36,8
Al_2O_3	38,68-35,15
Fe_2O_3	13,45-20,96
TiO_2	0,93-1,76
K_2O	2,1-4,04

No quadro 6, apresenta-se a composição química da cinza volante do RSU em estudo. Essa composição é comparada com a análise feita por Fontes (2008) sobre cinzas volantes de RSU da Usina Verde e também com análises de cinzas volantes de RSU de diversos países recompiladas por Lam (2010).

Quadro 6 – Composição química da cinza volante de RSU

Composto	Vizcarra (2010)	Concentração (%)	
		Fontes (2008)	Lam (2010)
SiO_2	21,2-12,9	44,26	6,35-27,52
Al_2O_3	15,4-12,2	18,16	0,92-12,7
Fe_2O_3	5,3-7,7	9,27	0,63-5,04
SO_3	9,8-5,2	0,64	5,18-14,4
CaO	32,3-45,3	15,39	16,6-45,42
Cl	6,6-4,7	–	–
TiO_2	3,3-4,7	3,25	0,85-3,12
K_2O	2,6-4,1	2,61	2,03-8,9
P_2O_5	1,28-0	2,94	1,56-2,7
ZnO	0,5-1,1	0,46	–
Cr_2O_3	0,1-0,2	0,16	–
MnO	0,1-0	0,13	–
SrO	0,1-0,2	0,04	–
ZrO_2	0,08-0,1	0,04	–
CuO	0,08-0	0,06	–
PbO	0,08-0	0,11	–
MgO	–	2,23	1,38-3,16
Na_2O	–	–	2,93-8,9
V_2O_5	0-0,25	–	–

No quadro 7, apresenta-se a composição química da cinza de fundo do RSU em estudo, que é comparada com o estudo feito por Arm (2003) e outros estudos recompilados por Lam (2010).

Quadro 7 – Composição química da cinza de fundo de RSU

Composto	Concentração (%)		
	Vizcarra (2010)	Arm (2003)	Lam (2010)
SiO ₂	27,0-37,7	46	5,44-49,38
Al ₂ O ₃	14,1-19,1	10	1,26-18
Fe ₂ O ₃	10,0-6,6	9	1,21-13,3
SO ₃	1,3-3,6	–	0,5-12,73
CaO	20,1-31,8	15	13,86-50,39
Cl	2,3-3,8	–	–
TiO ₂	3,6-5,5	–	0,92-2,36
K ₂ O	2,1-3,0	–	0,88-7,41
P ₂ O ₅	0-1,0	–	0,85-6,9
ZnO	0,9-1,8	–	–
Cr ₂ O ₃	0-0,19	–	–
MnO	0,10-0,16	–	–
SrO	0,05-0,14	–	–
ZrO ₂	0,11-0,12	–	–
CuO	0-0,344	–	–
Ac	0-0,036	–	–
Br	0-0,009	–	–
Rb ₂ O	0-0,014	–	–
MgO	0-1,722	2	1,6-3,3
Na ₂ O	–	–	3,3-17,19
V ₂ O ₅	0-0,43	–	–

É notória a diferença tanto nos teores de óxidos principais (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃), quanto nos teores de CaO e SO₃, os quais têm influência nas reações de estabilização. Isso demonstra a variabilidade da composição química das cinzas de RSU.

4.2. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Nas figuras 7, 8 e 9 são apresentados os resultados dos ensaios da difração de raios X no solo, cinza volante de RSU e cinza de fundo de RSU, respectivamente. Na figura 7, pode ser identificada a presença de muscovita, gehlenita, quartzo, calcita, dolomita e hematita, também encontrados por Fontes (2008).

4.3. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

4.3.1. Cinza volante

As concentrações de parâmetros inorgânicos do ensaio de lixiviação são apresentadas no quadro 8.

As concentrações de parâmetros inorgânicos do ensaio de solubilização são apresentadas no quadro 9.

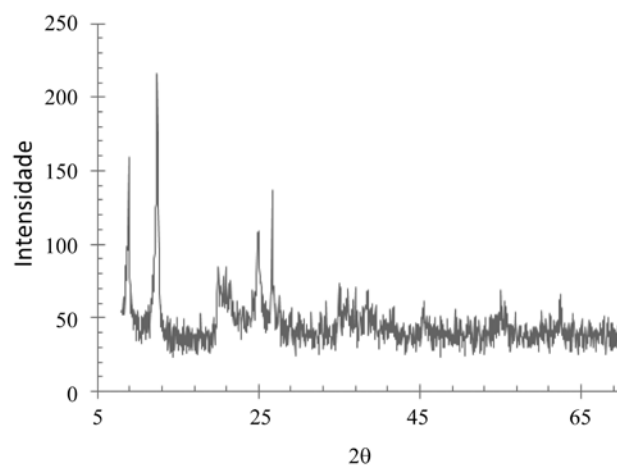


Figura 7 – Difração de raios X do solo em estudo

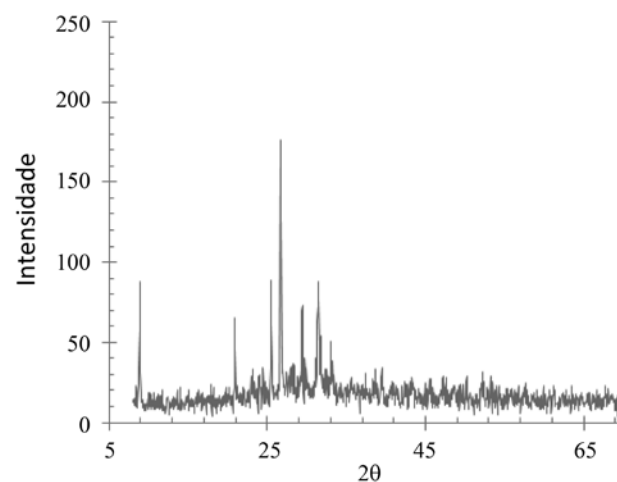


Figura 8 – Difração de raios X da cinza volante

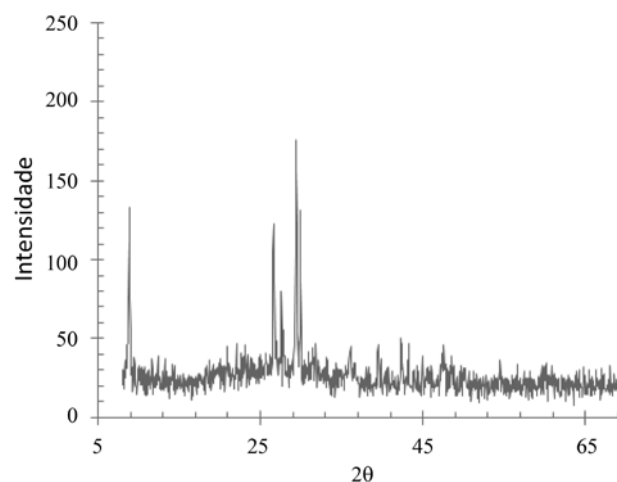


Figura 9 – Difração de raios X da cinza de fundo

Quadro 8 – Resultados do ensaio de lixiviação – parâmetros inorgânicos na cinza volante

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/l)	VMP	Método de referência
Arsênio	0,27	1	SM21 3120 B
Bário	0,52	70	SM21 3120 B
Cádmio	0,05	0,5	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,03	1	SM21 3120 B
Cromo total	0,75	5	SM21 3120 B
Fluoretos	2,01	150	SM21 4500-F C
Mercúrio	< 0,0005	0,1	EPA 7470 A
Prata	0,02	5	SM21 3120 B
Selênio	< 0,05	1	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no quadro 8, como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de lixiviação, têm concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo F da Norma NBR 10004:2004, pelo qual o resíduo é classificado como não perigoso.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no quadro 9, como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de solubilização, têm con-

centrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo G da Norma NBR 10004:2004, exceto o alumínio, cloretos, cromo total e sulfatos, pelo qual o resíduo é classificado como não inerte.

4.3.2. Cinza de fundo

As concentrações de parâmetros inorgânicos do ensaio de lixiviação são apresentadas no quadro 10.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no quadro 10, como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de lixiviação, têm concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo F da Norma NBR 10004:2004, pelo qual o resíduo é classificado como não perigoso.

As concentrações de parâmetros inorgânicos do ensaio de solubilização são apresentadas no quadro 11.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no quadro 11, como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de solubilização, têm concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo G da Norma NBR 10004:2004, exceto cloretos e sulfatos, pelo qual o resíduo é classificado como não inerte.

Quadro 9 – Resultados do Ensaio de Solubilização – parâmetros inorgânicos na cinza volante.

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/l)	VMP	Método de referência
Alumínio	0,31	0,2	SM21 3120 B
Arsênio	< 0,001	0,01	SM21 3120 B mod
Bário	0,41	0,7	SM21 3120 B
Cádmio	< 0,003	0,005	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Cianetos	< 0,005	0,07	SM21 4500-CN C/4500-CN F
Cloretos	783	250	SM21 4500- Cl D
Cobre	0,01	2	SM21 3120 B
Cromo total	1,99	0,05	SM21 3120 B
Ferro	0,22	0,3	SM21 3120 B
Fluoretos	0,56	1,5	SM21 4500-F C
Manganês	< 0,002	0,1	SM21 3120 B
Mercúrio	< 0,0005	0,001	EPA 7470 A
Nitrato (como N)	2,10	10	SM21 4500- NO ₃ F
Prata	< 0,003	0,05	SM21 3120 B
Selênio	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Sódio	85,2	200	SM21 3120 B
Sulfato (expresso como SO ₄)	650	250	SM21 4500- SO ₄ ⁻² E
Surfactantes	< 0,40	0,5	SM21 5540 C
Zinco	0,04	5	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004.

Quadro 10 – Resultados do ensaio de lixiviação – parâmetros inorgânicos na cinza de fundo

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/l)	VMP	Método de referência
Arsênio	< 0,04	1	SM21 3120 B
Bário	0,68	70	SM21 3120 B
Cádmio	0,06	0,5	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,03	1	SM21 3120 B
Cromo total	0,03	5	SM21 3120 B
Fluoretos	1,30	150	SM21 4500-F C
Mercúrio	< 0,0005	0,1	EPA 7470 A
Prata	< 0,003	5	SM21 3120 B
Selênio	< 0,05	1	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004.

Quadro 11 – Resultados do ensaio de solubilização – parâmetros inorgânicos na cinza de fundo

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/l)	VMP	Método de referência
Alumínio	0,08	0,2	SM21 3120 B
Arsênio	< 0,001	0,01	SM21 3120 B mod
Bário	0,19	0,7	SM21 3120 B
Cádmio	< 0,003	0,005	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Cianetos	< 0,005	0,07	SM21 4500-CN C/4500-CN F
Cloretos	271	250	SM21 4500- Cl D
Cobre	0,02	2	SM21 3120 B
Cromo total	< 0,002	0,05	SM21 3120 B
Ferro	0,06	0,3	SM21 3120 B
Fluoretos	0,56	1,5	SM21 4500-F C
Manganês	< 0,002	0,1	SM21 3120 B
Mercúrio	< 0,0005	0,001	EPA 7470 A
Nitrato (como N)	3,80	10	SM21 4500- NO ₃ F
Prata	< 0,003	0,05	SM21 3120 B
Selênio	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Sódio	236	200	SM21 3120 B
Sulfato (expresso como SO ₄)	290	250	SM21 4500- SO ₄ ²⁻ E
Surfactantes	< 0,40	0,5	SM21 5540 C
Zinco	0,11	5	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004.

4.3.3. Mistura S60/CV40: solo (60%) – cinza volante (40%)

As concentrações de parâmetros inorgânicos do ensaio de lixiviação são apresentadas no quadro 12, e os parâmetros inorgânicos do ensaio de solubilização são apresentados no quadro 13.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no quadro 12, como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de lixiviação, têm concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo F da Norma NBR 10004:2004, pelo qual o resíduo é classificado como não perigoso.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no quadro 13, como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de solubilização, têm concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo G da Norma NBR 10004:2004, exceto o alumínio, cloretos, cromo total e sulfatos, pelo qual o resíduo é classificado como não inerte.

Quadro 12 – Resultados do ensaio de lixiviação – parâmetros inorgânicos na mistura de solo (60%) com cinza volante (40%).

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/l)	VMP	Método de referência
Arsênio	0,08	1	SM21 3120 B
Bário	0,42	70	SM21 3120 B
Cádmio	0,007	0,5	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,03	1	SM21 3120 B
Cromo total	0,25	5	SM21 3120 B
Fluoretos	1,70	150	SM21 4500-F C
Mercúrio	< 0,0005	0,1	EPA 7470 A
Prata	< 0,003	5	SM21 3120 B
Selênio	< 0,05	1	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004.

Quadro 13 – Resultados do ensaio de solubilização – parâmetros inorgânicos na mistura de solo (60%) com cinza volante (40%).

Parâmetros	Resultados analíticos(mg/l)	VMP	Método de referência
Alumínio	0,70	0,2	SM21 3120 B
Arsênio	< 0,001	0,01	SM21 3120 B mod
Bário	0,20	0,7	SM21 3120 B
Cádmio	< 0,003	0,005	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Cianetos	< 0,005	0,07	SM21 4500-CN C/4500-CN F
Cloretos	389	250	SM21 4500- Cl D
Cobre	0,06	2	SM21 3120 B
Cromo total	0,88	0,05	SM21 3120 B
Ferro	0,09	0,3	SM21 3120 B
Fluoretos	0,76	1,5	SM21 4500-F C
Manganês	< 0,002	0,1	SM21 3120 B

Parâmetros	Resultados analíticos(mg/l)	VMP	Método de referência
Mercúrio	< 0,0005	0,001	EPA 7470 A
Nitrato (como N)	0,90	10	SM21 4500- NO ₃ F
Prata	< 0,003	0,05	SM21 3120 B
Selênio	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Sódio	362	200	SM21 3120 B
Sulfato (expresso como SO ₄)	600	250	SM21 4500- SO ₄ ⁻² E
Surfactantes	< 0,40	0,5	SM21 5540 C
Zinco	0,03	5	SM21 3120 B

4.4. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.4.1. Granulometria

São apresentadas, na figura 10, as curvas granulométricas do solo, cinza volante e cinza de fundo, mostrando o caráter arenoso das cinzas.

4.4.2. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg para as cinzas puras não puderam ser determinados, devido ao comportamento granular do material que, durante o ensaio, não apresentou características plásticas para a sua realização. A inserção da cinza volante diminui o limite li-

quido e o índice de plasticidade, e aumenta o limite plástico do solo, como mostrado na figura 11.

Não se tem referências de resultados anteriores da mistura solo-cinza de RSU, sendo neste artigo comparados com outros realizados com misturas de solo-cinza de carvão, por ser um material semelhante. Os resultados são parecidos com o estudo feito por Bin-Shafique *et al.* (2009), no qual a adição de cinza volante de carvão reduziu o índice de plasticidade de um solo expansivo (de 57 até 32%, para um teor de 5% de cinza) e um solo mole (de 26 a 18%, para um teor de 5% de cinza), ambos os solos do Estado de Texas, EUA. Nalbantoglu (2004) testou uma cinza volante de carvão para avaliar o seu efeito estabilizador sobre dois solos expansivos da ilha de Chipre. No seu estudo, determinou a redução do índice de plasticidade de solos altamente plásticos com a inserção da cinza volante, mas com menor influência no índice de plasticidade de solos de baixa plasticidade. Ele concluiu que partículas menores, maiores superfícies específicas e menor cristalinidade fazem com que os minerais de argila tenham maior suscetibilidade à ação da cinza.

Na figura 12, é apresentado o efeito da adição de cinza de fundo no solo, sendo a tendência a mesma que a da cinza volante, reduzindo o índice de plasticidade.

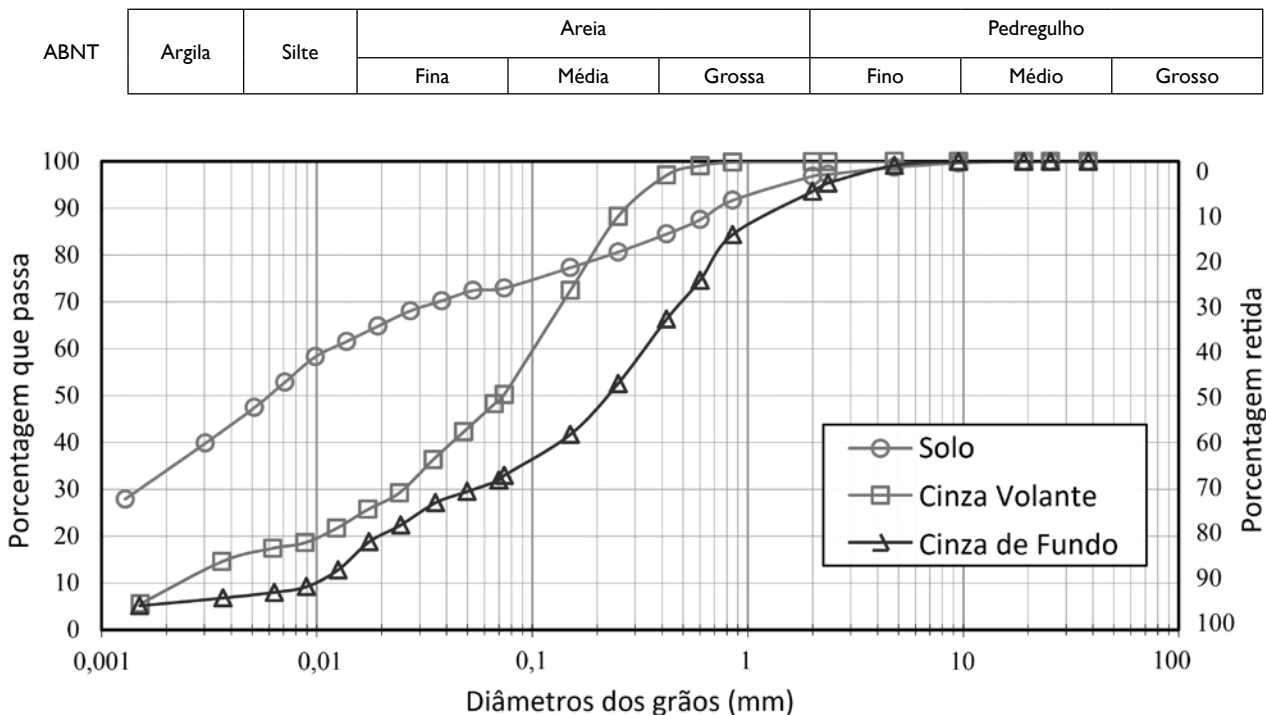


Figura 10 – Granulometria do solo, cinza volante e cinza de fundo

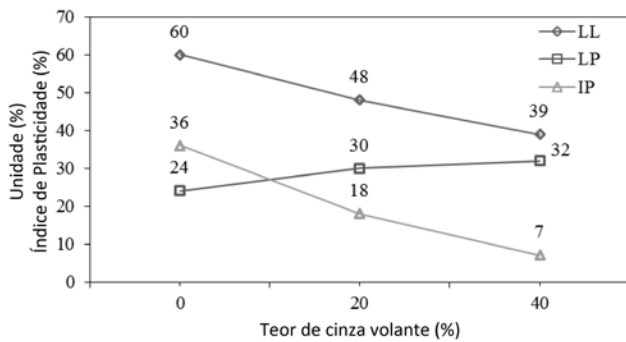


Figura 11 –Variação dos limites de Atterberg e índice de plasticidade com o teor de cinza volante

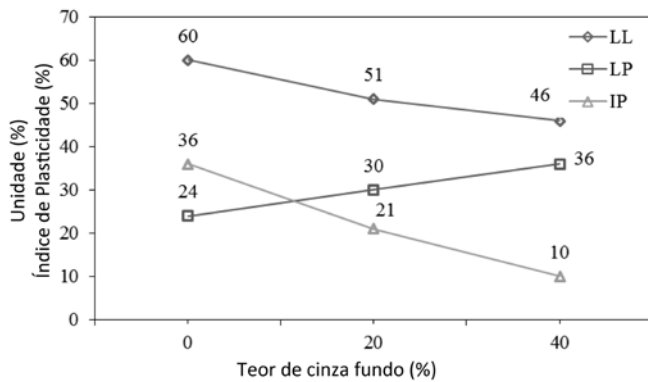


Figura 12 –Variação dos limites de Atterberg e índice de plasticidade com o teor de cinza de fundo

4.4.3. Classificação MCT

Com relação à classificação MCT, foram obtidos os seguintes parâmetros: $c' = 1,62$; $d' = 50,0$; $e' = 1,39$. O solo é classificado como NG', de comportamento "não laterítico-argiloso" (figura 13). Esses solos, quando compactados nas condições de umidade ótima e massa específica aparente máxima da energia normal, apresentam características das argilas tradicionais muito plásticas e expansivas. O emprego desses solos se prende às res-

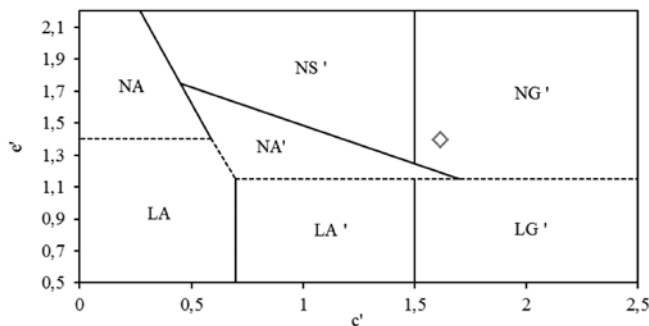


Figura 13 – Classificação MCT

trições consequentes à sua elevada expansibilidade, plasticidade, compressibilidade e contração, quando submetidos à secagem; seu emprego não é recomendado para a base de pavimentos, sendo uns dos piores solos para fins de pavimentação, entre os solos tropicais (Nogami e Villibor, 1995).

4.4.4. Compactação

Das curvas de compactação do solo e das misturas com cinza volante obtidas a partir dos ensaios de Proctor Modificado, pode-se indicar que, ao aumentar o teor de cinza volante na mistura, a máxima densidade aparente seca tende a diminuir. Reparou-se também que o teor de umidade ótima decresce para um teor de 20% de cinza volante e cresce para um teor de 40% (figura 14). Como pode ser observado na figura 15, ao aumentar o teor de cinza de fundo na mistura, a máxima densidade aparente seca tende a diminuir. O teor de umidade ótima decresce para os teores de 20% e 40% de cinza de fundo.

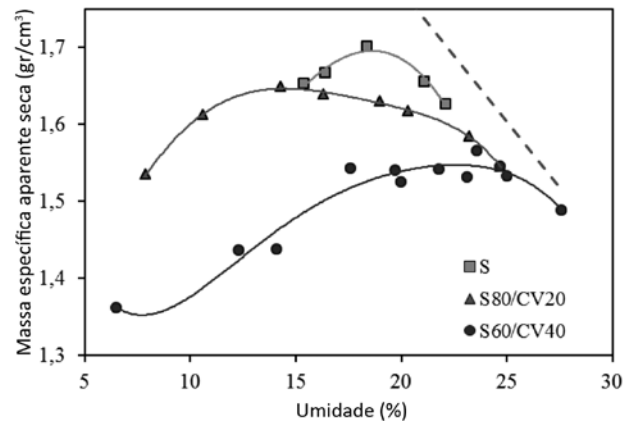


Figura 14 – Curva de compactação do solo e misturas com cinza volante.

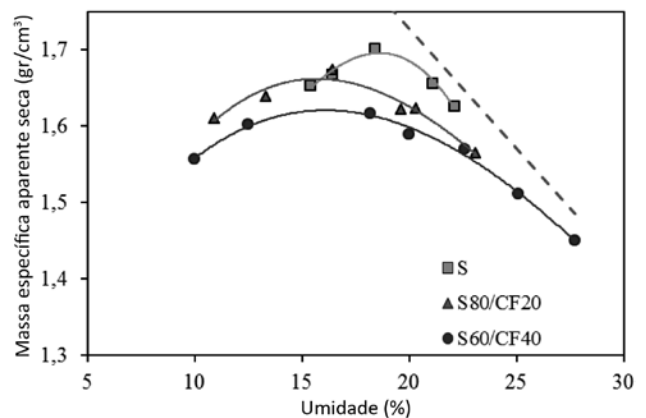


Figura 15 – Curva de compactação do solo e misturas com cinza volante

Quadro 14 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima

Material ou mistura	w _{otm} (%)	γ _{d máx} (g/cm ³)
S	18,5	1,718
S80/CV20	14,3	1,650
S60/CV40	22,5	1,555
S80/CF20	16,5	1,672
S60/CF40	16,0	1,622

4.5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.5.1. Módulo resiliente

As figuras 16, 17 e 18 esquematizam as superfícies no espaço tridimensional $s_3 \times s_d \times MR$ para uma faixa de tensões normalmente experimentadas em pavimentos, as quais foram geradas por ajuste baseado no modelo composto. O propósito de obter tais superfícies é para a previsão de módulos resilientes para diversas combinações de tensão confinante e desviadora.

Os resultados obtidos dos ensaios de módulo de resiliência demonstram que o solo em estudo é dependente da tensão desviadora e, mesmo adicionando as cinzas, esse comportamento não muda. Dos modelos obtidos, aprecia-se que quanto maior a tensão desviadora, menor o valor do módulo resiliente.

Quadro 15 – Valores dos coeficientes do modelo composto para cada mistura, compactados na umidade ótima.

Material ou mistura	k ₁	k ₂	k ₃
S	185,2712	0,1772	-0,4197
S80/CV20	305,5556	0,2939	-0,4708
S60/CV40*	181,3510	0,2364	-0,4482
S60/CV40**	311,1900	0,2100	-0,3400
S80/CF20	120,3640	0,1259	-0,5194
S60/CF40	112,3940	0,0799	-0,3898

* Com 7 dias de cura após compactação.

** Com 21 dias de cura após compactação.

A mistura com 20% de cinza volante melhorou o comportamento mecânico do solo puro, a mistura com 40% de cinza volante piorou o comportamento mecânico, mas melhorou com o tempo de cura (figura 19). Outro fator de influência é o número de ciclos de carregamento, que foram comparados os valores de módulo

resiliente para um mesmo corpo de prova ensaiado antes e após 500 mil ciclos de carga (figura 20). O módulo resiliente melhorou com o carregamento cíclico.

A mistura com 20% de cinza volante foi avaliada para vários teores de umidade. Os resultados indicaram que o módulo resiliente aumentou com o decaimento do teor de umidade (figura 21).

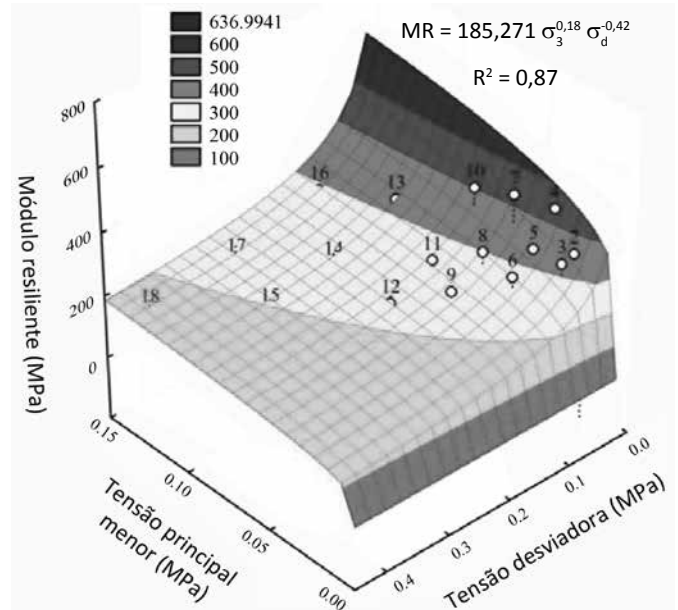


Figura 16 – Gráfico 3D do modelo composto do módulo resiliente do solo puro

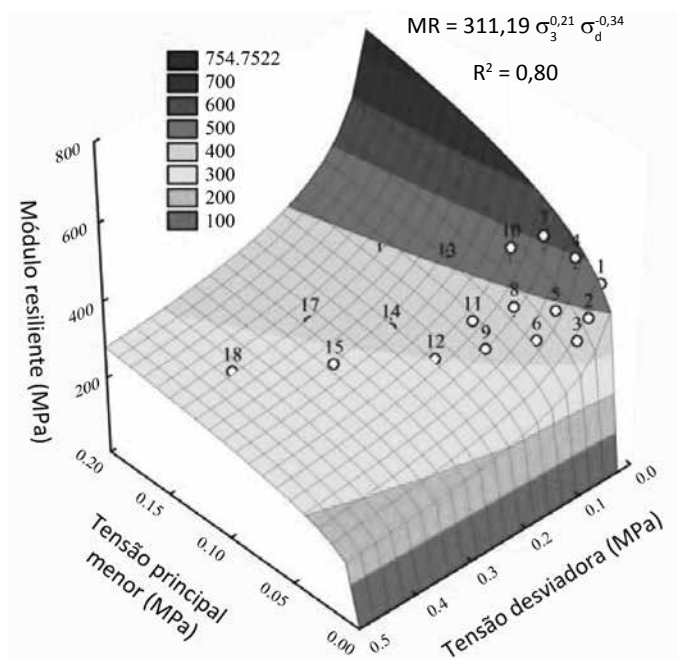


Figura 17 – Gráfico 3D do modelo composto do módulo resiliente da mistura S60/CV40 com 21 dias de cura

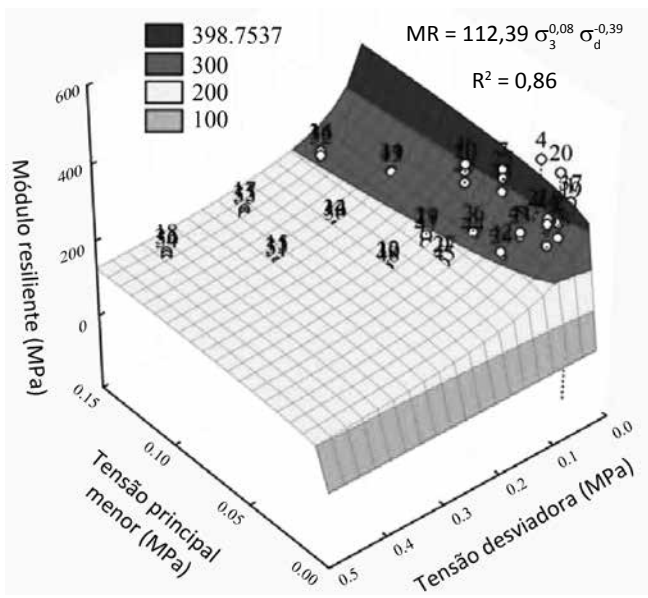


Figura 18 – Gráfico 3D do modelo composto do módulo resiliente da mistura S60/CF40

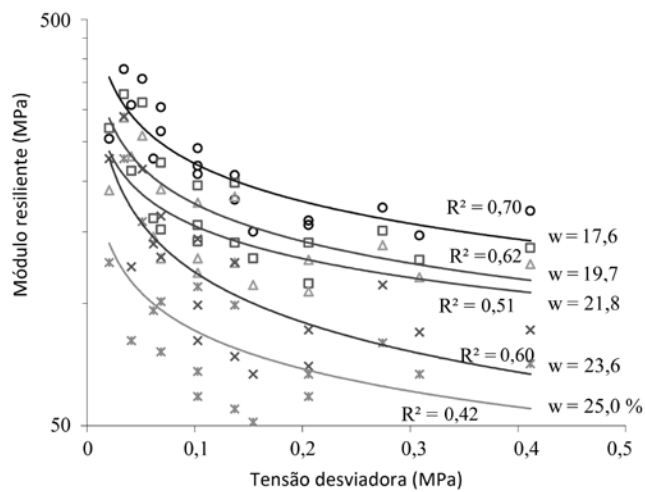


Figura 21 – Módulo resiliente vs. tensão do solo com 20% de cinza volante – variação da umidade

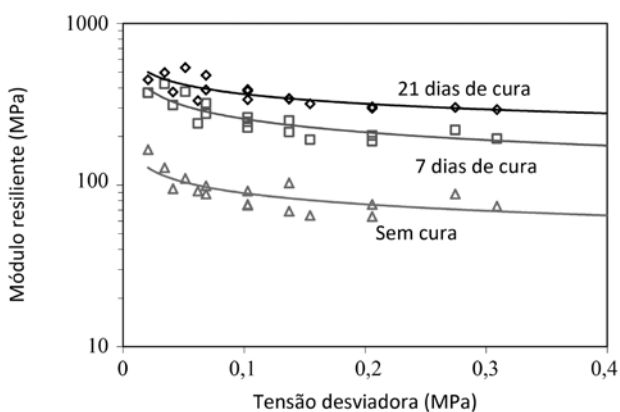


Figura 19 – Módulo resiliente vs. tensão do solo com 40% de cinza volante – variação do tempo de cura

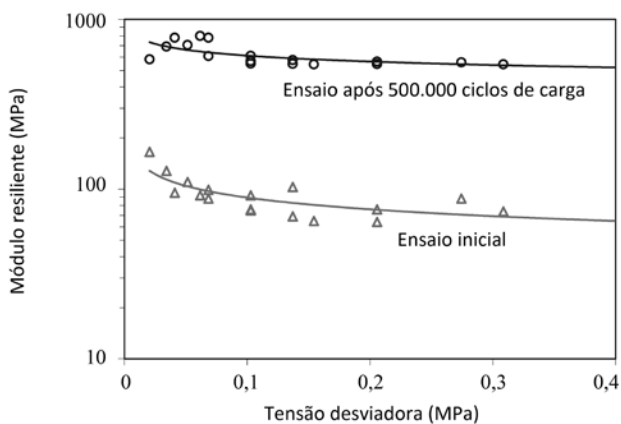


Figura 20 – Módulo resiliente vs. tensão do solo com 40% de cinza volante – variação do número de ciclos

4.5.2. Deformação permanente

Como mostrado na figura 22, a deformação permanente tende a estabilizar atingindo um platô. É observado que o ensaio 3 tem uma alta deformação permanente, isto devido ao incremento das tensões aplicadas no ensaio.

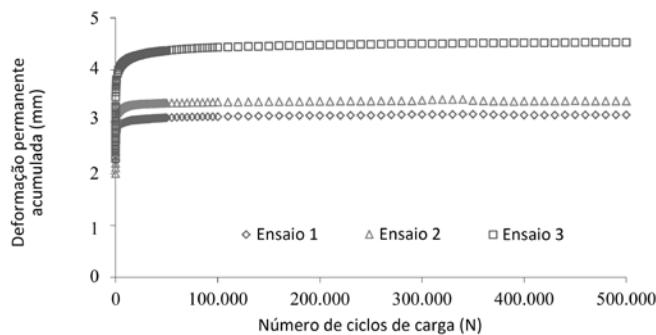


Figura 22 – Deformação permanente acumulada ao longo dos ciclos de aplicação de cargas

O módulo resiliente é incrementado com o número de ciclos de carregamento (figura 23), e isso pode ser explicado pela diminuição da deformação elástica (figura 24).

Foi pesquisada a ocorrência da acomodação plástica (*shakedown*) utilizando um modelo de comportamento desenvolvido por Dawson e Wellner, citado por Werkmeister (2003). Os resultados do ensaio de deformação permanente para a mistura solo-cinza volante são apresentados na figura 25, visando à pesquisa do *shakedown*.

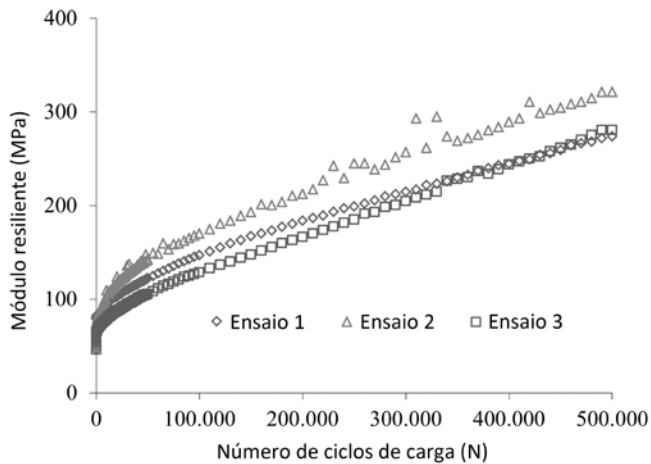


Figura 23 –Variação do módulo resiliente ao longo do ensaio de deformação permanente

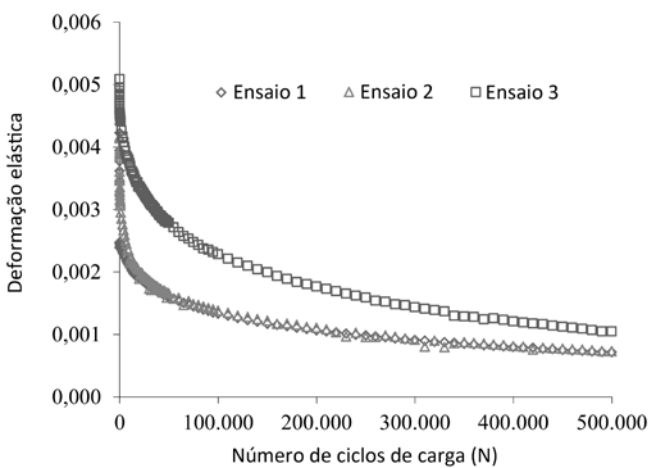


Figura 24 –Variação de deformação elástica ao longo do ensaio de deformação permanente

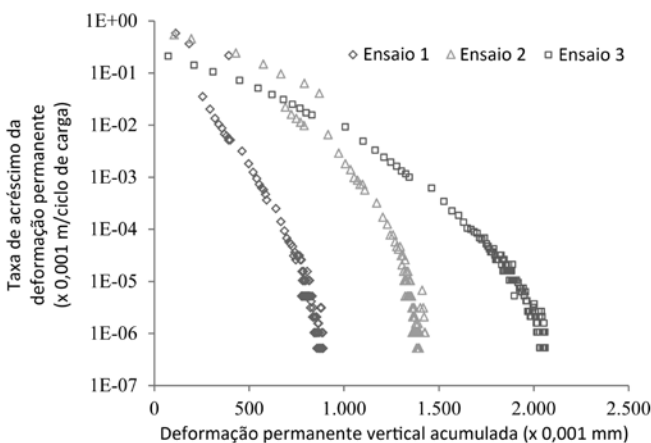


Figura 25 – Pesquisa da ocorrência do *shakedown*

Analisando a figura 25, percebe-se que todos os ensaios conduzidos com a mistura solo-cinza volante apresentaram um típico comportamento de nível A, ou seja, mostraram o acomodamento plástico (*shakedown*), conforme o modelo proposto por Werkmeister (2003). A caracterização do comportamento de nível A se dá tanto pela forma da curva, aproximadamente paralela ao eixo vertical, quanto pelo fato de a taxa de acréscimo da deformação permanente ter atingido a ordem de grandeza de 10^{-7} ($\times 10^{-3}$ m/ciclo de carga). Ou seja, nos ciclos finais de aplicação de carga, o corpo de prova teve sua deformação permanente aumentada em apenas 10^{-7} mm a cada novo ciclo.

O modelo de Uzan (Uzan, 1982) foi utilizado para a previsão da deformação permanente, tendo como resultado a equação seguinte:

$$\epsilon_p / \epsilon_r = 0,4268 \cdot N^{-0,2945} \quad (3)$$

A curva de correlação com os resultados dos testes são apresentados na figura 26.

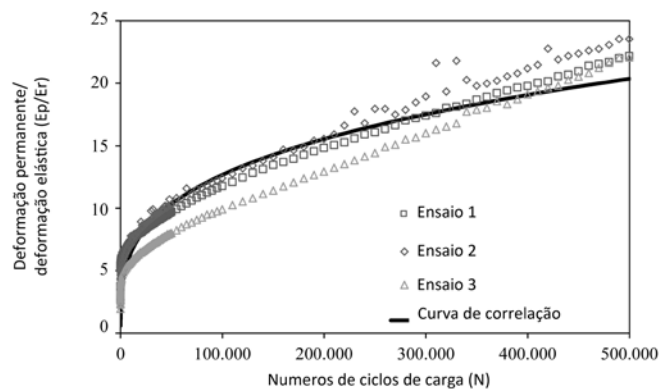


Figura 26 – Curva de correlação do modelo de Uzan

4.5.3. CBR

Os valores de expansão e CBR são apresentados nas figuras 27 e 28, respectivamente. Observa-se que a cinza volante diminui a expansibilidade do material quanto maior o seu teor. Em contrapartida, os teores altos de cinza volante, quando adicionados ao solo, podem piorar o seu comportamento mecânico, resultando em uma maior espessura de camada.

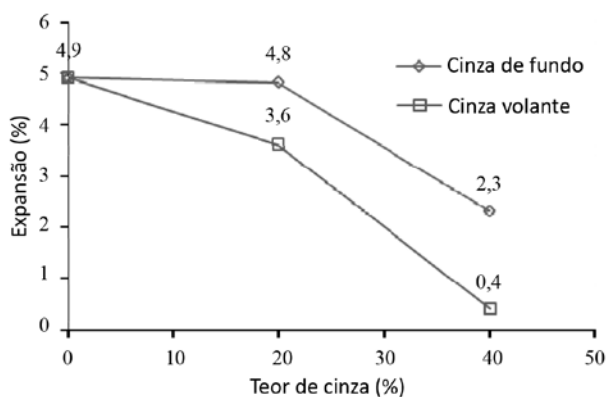


Figura 27 –Variação da expansão do solo com o teor de cinza aos 4 dias de imersão

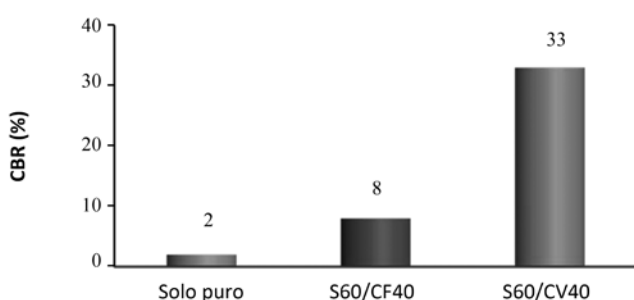


Figura 28 –Valores de CBR na umidade ótima

A cinza de fundo também diminuiu a expansibilidade do solo, embora não tenha sido tão eficiente quanto a cinza volante, ressaltando que o comportamento de misturas com cinzas deve ser cuidadosamente avaliado para os diversos teores, analisando os resultados físicos, químicos, ambientais e mecânicos em conjunto. A adição de cinza volante aumentou o valor do CBR do solo puro em 16 vezes. Entretanto, a inserção da cinza de fundo aumentou em quatro vezes o valor do CBR. Esse resultado concorda com os resultados obtidos por Farias (2005), que realizou ensaios de CBR com misturas de solo-cinza de fundo de carvão.

4.6. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO TÍPICO

Dos ensaios de módulo resiliente, notou-se que as misturas com cinza volante apresentam maiores valores de módulo resiliente que as misturas com cinza de fundo, uma vez que o dimensionamento do pavimento se fez só com este tipo de cinza. A figura 29 apresenta as espessuras de camadas em função do período de projeto para cada tipo de mistura, as quais foram obtidas mediante o programa computacional SisPav (Franco, 2007). A mistu-

ra com 20% de cinza volante melhorou o comportamento mecânico do solo puro, o que se revela pela diminuição da espessura da camada de base em comparação ao solo puro, para um mesmo nível de carregamento e mesmos parâmetros (critérios) de dimensionamento.

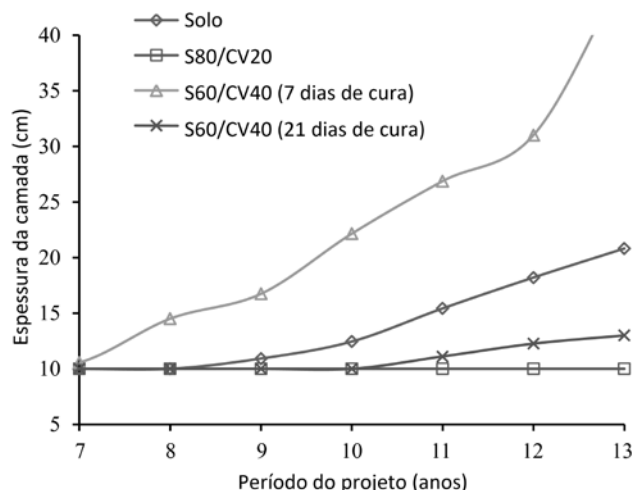


Figura 29 –Variação das espessuras de camada em função do período do projeto.

No Prêmio Odebrecht 2010, foi realizada uma análise econômica sobre a utilização da cinza volante de RSU em base de pavimentos, na qual se conclui que apresenta vantagens com respeito a outros materiais, salientando também as vantagens ambientais.

5. CONCLUSÕES

Caracterizaram-se os materiais estudados com o intuito de conhecer suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. As propriedades do solo foram modificadas pela ação das cinzas. Essas mudanças foram influenciadas por parâmetros, tais como, teor de cinza, umidade, tempo de cura e número de ciclos de carga.

O solo puro estudado apresentou comportamento mecânico, em termos de módulo resiliente e expansibilidade, inapropriado para as bases de pavimentos. Os ensaios conduzidos com as misturas solo-cinza volante e solo-cinza de fundo procuraram pesquisar a influência dessas cinzas no comportamento mecânico, sendo que a cinza volante, em teor de 40% e com tempo de cura mínimo de 21 dias, conseguiu melhorar o desempenho do solo em termos de módulo resiliente e expansibilidade.

Foram realizadas análises ambientais caracterizando as cinzas como resíduo não perigoso – não inerte, o qual potencializa a utilização desses resíduos na base de pavimentos. Esses resultados iniciais deverão ser complementados com outros ensaios que nos permitam dar viabilidade ambiental.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). AASHTO TP46-94. *Standard test method for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*. Washington, DC, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459/84. *Determinação do limite de liquidez*.

_____. NBR 7180/1984. *Determinação do limite de plasticidade*.

_____. NBR 7181/1984. *Análise granulométrica*.

_____. NBR 7182/1986. *Ensaio de compactação*.

_____. NBR 9895/1987. *Solo – índice de suporte Califórnia*.

_____. NBR 10005/2004. *Lixiviação de resíduos – procedimento*.

_____. NBR 10006/2004. *Solubilização de resíduos – procedimento*.

ARM, M. *Mechanical properties of residues as unbound road materials – experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag*. Doctoral thesis (Department of Land and Water Resource Engineering), Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden, 2003.

BIN-SHAFIQUE, S.; KAHMAN, K.; YAYKIRAN, M.; AZFAR, I. The long-term performance of two fly ash stabilized fine-grained soil sub-bases. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). DNER-ME 131/94. *Solos – determinação do módulo de resiliência*. Norma Rodoviária, Método de Ensaio, 1994.

_____. DNER-CLA 259/1996: *Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura*. Rio de Janeiro, 1996.

FARIAS, E.R. de. *A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação – análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental*. Dissertação (Mestrado), UFSC, Santa Catarina, SC, Brasil, 2005.

Pelos resultados obtidos conclui-se que as misturas com inserção de cinzas de RSU apresentaram um comportamento mecânico compatível com as exigências de um pavimento de baixo volume de tráfego, sendo que isso dependerá da utilização dos teores de cinza e umidades adequados.

FONTES, C.M.A. *Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho*. Tese (Doutorado), Coppe/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

FRANCO, F.A.C.P. *Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPAV*. Tese (Doutorado), Coppe/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

GUIMARÃES, A.C.R. *Um método mecânico empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese (Doutorado), Coppe/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. *Mecânica dos pavimentos*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005. 570p.

NALBANTOGLU, Z. Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, nº 18, p. 377-381, 2004.

NASCIMENTO, R.R. *Utilização de agregados de argila calcinada em pavimentação: uma alternativa para o estado do Acre*. Dissertação (Mestrado), Coppe/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. *Pavimentos de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo: Editora Villibor, 1995. 240p.

PRÊMIO ODEBRECHT PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Livro comemorativo 2010: compilação dos melhores trabalhos. Rio de Janeiro, 2011.

STATSOFT, INC. Programa Computacional Statistica 7.0. EUA, 2004.

VIZCARRA, G.O.C. *Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos*. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 2010.

WERKMEISTER, S. *Permanent deformation behavior of unbound granular materials in pavement construction*. These. Technical University of Dresden, 2003.

Avaliação Funcional e Estrutural de um Trecho Experimental em Pavimento Rígido: Estudo de Caso Br-101/NE Lote-05-PB - Obra de Duplicação

José Carvalho Filho

Engenheiro civil, mestre de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).
E-mail: kafilho@hotmail.com.

John Kennedy Guedes Rodrigues

Professor, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, UFCG.
E-mail: profkennedy@hotmail.com.

Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Professor, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, UFCG.
E-mail: lucenafb@uol.com.br.

RESUMO

Com o surgimento do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), houve um aumento na quantidade de obras rodoviárias de grande porte. Muitas delas com a utilização de pavimento rígido que, apesar de ter um valor inicial elevado, exige um número menor de intervenções; tornando-o mais viável que o pavimento flexível para alguns especialistas. Com o aumento na malha viária do país, tornam-se óbvias as exigências de intensificar estudos sobre as condições de controle e execução de projetos rodoviários; entre elas o estudo da irregularidade longitudinal, que está diretamente ligada à segurança e ao conforto quanto ao rolamento dos veículos sobre o pavimento. Este artigo estuda as condições funcionais e estruturais de um trecho experimental de rodovia em pavimento rígido – duplicação e restauração da BR-101/NE: lote 05/PB – com o auxílio de equipamentos, tais como, Viga Benkelman, Falling Weight Deflectometer (FWD), Perfilógrafo Califórnia e Nível e Mira, na busca de desenvolver melhores procedimentos de controle nas execuções de obras de pavimentação em concreto simples de cimento Portland. Os resultados indicam a importância da avaliação estrutural e funcional da rodovia, bem como o estudo das propriedades mecânicas no controle e na execução das camadas que compõem o pavimento rígido para a garantia da sua adequação funcional e estrutural. Embora os procedimentos técnicos

como medidas de irregularidade e deflexões tenham sido feitos em épocas diferentes, os estudos indicam que não existe uma relação de causa e efeito entre elas. Essa inexistência de relação, em geral, deve-se ao tempo de vida do elemento, uma vez que, neste artigo, trata-se de um pavimento novo.

Palavras-chave: avaliação de pavimentos; irregularidade longitudinal; deflexões.

ABSTRACT

With the appearance of Brazilian Development Acceleration Program there has been an increase in the amount of works on the country highways, many of them making use of rigid pavement, which, despite having an initial high cost, demands much fewer interventions, being thus, at long term, and for some experts, much more viable than flexible pavement. With the increase of the road mesh in our country, it becomes obvious the demand for major studies about control and execution of highway projects, among them the study of longitudinal roughness, which is directly linked to security and easiness of vehicles rolling on pavement. This paper aims to study the functional and structural conditions of an experimental highway rigid pavement stretch – Duplication and Restoration of BR – 10/NE: Lot 05/PB – with the aid of equipment such as: “the Benkelman Beam”, the Falling Weight Deflectometer (FWD), the Perfi-

lograph California, and “Level and Pole”, aiming to develop better procedures of control and execution of paving works using simple concrete of Portland cement. Results point out the importance of the functional and structural evaluation of the pavement as well as the study of mechanical properties in the control and execution of the layers that compose the rigid pavement, for the guarantee of its functional and structural adequacy. Although roughness and

deflections measures are made in different periods of time, studies show that a cause and effect relationship between them does not exist. This in turn, must probably be inherent to the addition of permanent deformation as well as the conditions of structure and pavement surfaces.

Keywords: pavement evaluation, longitudinal roughness, deflections.

I. INTRODUÇÃO

Observam-se nos últimos anos grandes investimentos realizados na área de infraestrutura de transportes, que é de fundamental importância para o desenvolvimento de um país. A boa conservação das rodovias é necessária para alavancar o desenvolvimento social e econômico de uma região, que pode ser observado a partir do crescimento de setores inerentes ao turismo, à indústria, ao comércio e aos serviços.

O transporte rodoviário, por ser o principal meio de transporte do país, necessita de uma atenção especial. Apesar de se verificar nos últimos anos um aumento de aplicações de grandes valores nos orçamentos em infraestrutura de transportes, observa-se o quanto os países desenvolvidos destacam-se no controle, fiscalização de irregularidades funcionais e manutenção dos pavimentos.

A qualidade do pavimento influi diretamente no conforto e na segurança dos deslocamentos, podendo o pavimento, em caso de más condições, causar vários transtornos e acidentes graves aos usuários, sendo que para cada tipo de pavimento e problema apresentado, existe uma medida corretiva ou minimizadora do problema.

Com o aumento na malha viária do país, cresceram as exigências de maiores estudos sobre as condições de execução e projeto, entre elas, o estudo da irregularidade longitudinal, que está diretamente ligada à segurança e ao conforto de rolamento do pavimento. Tendo por desígnio relatar a importância do tema desenvolvido neste artigo com relação à qualidade, aos custos operacionais e à vida útil do pavimento, espera-se que os usuários, a partir destes conhecimentos prévios, exijam mais dos órgãos fiscalizadores.

Abordaram-se diversas formas de avaliação funcional de pavimentos, em especial a irregularidade longitudinal, sendo enfatizadas as realizadas com a utilização do equipamento Perfilógrafo Califórnia e o Nível de Mira, relatando, assim, a importância do estudo das propriedades físicas, de estado e mecânicas dos materiais que compõem a estrutura rodoviária e as análises dos procedimentos de controle e execução para o melhoramento dos pavimentos, principalmente compostos por concreto simples de cimento Portland.

2. METODOLOGIA

2.1. TRECHO EXPERIMENTAL E CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

O subtrecho experimental situado na Rodovia BR-101, precisamente entre a entrada da Rodovia Estadual PB-025 (Lucena) e a divisa dos Estados da Paraíba com Pernambuco, à altura do km 115, possui uma extensão total de 54,90 km. E nesse subtrecho, foi escolhido um trecho experimental de 320 metros de comprimento com estrutura em pavimento tipo rígido para a realização dos procedimentos de ensaios físicos, de estado e mecânicos. A escolha foi por ser um trecho homogêneo e de fácil acesso, onde todo o processo construtivo pode ser acompanhado, possibilitando verificar todas as suas peculiaridades.

Realizou-se um inventário para obter informações sobre o projeto executivo, vinculado e fornecido pelo Batalhão de Engenharia Militar, de forma a subsidiar e melhor embasar as inferências sobre a estrutura do pavimento do trecho escolhido desta pesquisa. Entre as informações obtidas, por meio do inventário, constam a seção transversal, as propriedades mecânicas dos materiais e a fotodocumentação do trecho.

No dimensionamento do pavimento rígido, foi utilizado o método da Portland Cement Association 1984 (PCA/1984). Em função da intensidade do tráfego pesado, adotou-se uma sub-base de 10 cm de concreto compactado a rolo (CCR). O coeficiente de recalque do sistema subleito/sub-base foi de $K_{sb} = 144 \text{ MPa/m}$,

equivalente a um CBR de 10%. O fator de segurança de carga tem o valor de $F_{sc} = 1,20$. O período de projeto utilizado foi de 20 anos. O pavimento foi dimensionado, ainda, com juntas com barras de transferência e não possuindo acostamento de concreto, como é mostrado na figura 1.

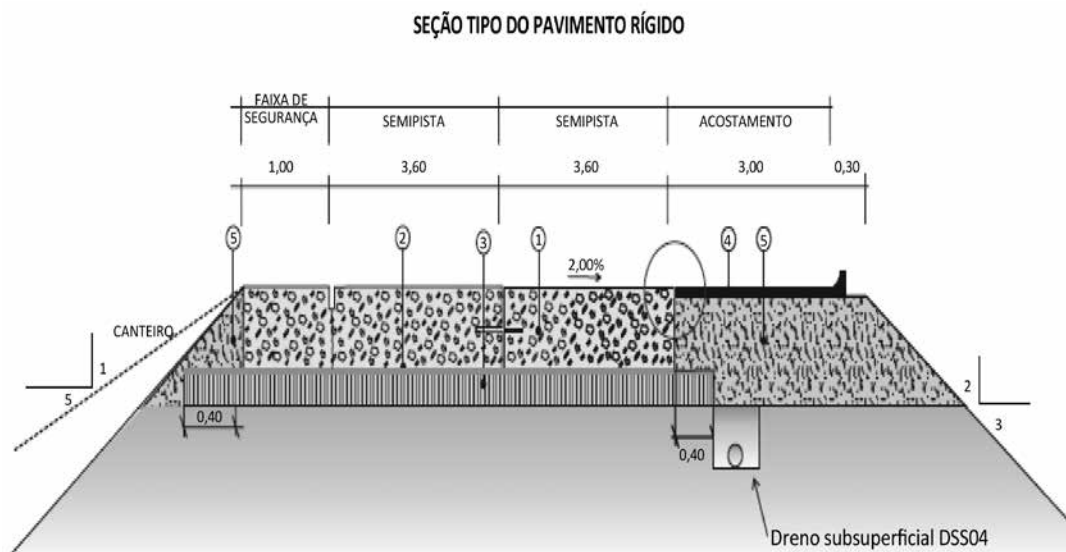


Figura 1 – Seção tipo da seção transversal do pavimento rígido
Fonte: DNIT Projeto executivo – Lote 05/PB.

Para o controle de qualidade dos serviços, foram instalados, no canteiro de obras do 2º Batalhão de Engenharia de Construção, os laboratórios de solo, asfalto e concreto. Foram montadas equipes de topografia para o controle das cotas topográficas de projeto, respeitando também as superlarguras e as superelevações da duplicação.

2.2. ENSAIOS TÉCNICOS NÃO DESTRUTIVOS

Os métodos de ensaio utilizados para a realização das avaliações estrutural e funcional do pavimento foram baseados em normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da American Society for Testing and Materials (ASTM). Utilizaram-se os ensaios de CBR e compressão simples para avaliar as propriedades mecânicas das misturas, ou seja, sua resistência ao cisalhamento e às tensões efetivas, estabilidade, fluência para verificar se estavam enquadradas dentro dos valores mínimos exigidos pelo DNIT.

2.2.1. Avaliação estrutural

Para a realização da avaliação estrutural não destrutiva, foram utilizados a Viga Benkelman e o Falling Weith Deflectometer (FWD) a partir de procedimentos normatizados pelo DNIT.

2.2.1.1. Viga Benkelman

As medidas de deflexões com a Viga Benkelman foram realizadas a partir de levantamento contínuo e sistemático dos valores máximos (D_o) sobre uma camada de terraplenagem com 60 cm de espessura e uma camada de concreto compactado a rolo (CCR) com 10 cm, como pode ser observado na figura 2a. Os procedimentos normatizados adotados foram:

- DNIT ME – 24/1994: Determinação das deflexões pela Viga Benkelman;
- DNIT ME – 133/2010: Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman;
- DNIT PRO 175/1994: Aferição da Viga Benkelman.

2.2.1.2. Falling Weight Deflectometer

As medidas de deflexões com o emprego do Falling Weight Deflectometer (FWD) foram realizadas sobre a superfície da placa de concreto, de acordo com a Norma do DNIT PRO 273/1996 (Determinações das deflexões utilizando o Deflectômetro por Impacto tipo Falling Weight Deflectometer – FWD), como pode ser visto na figura 2b. As medidas de deflexões com o auxílio do FWD foram realizadas nas trilhas de rodas externas e internas para as duas faixas de rolamento do trecho experimental antes da liberação do tráfego conforme a Figura 2a.



(a) Viga Benkelman



(b) FWD

Figura 2 – Medição das deflexões no trecho

2.2.2. Avaliação funcional

Para a realização da avaliação funcional, e consequente medida da irregularidade longitudinal, utilizou-se o Perfilógrafo Califórnia e o método do Nível e Mira a partir dos procedimentos normatizados pelo DNIT.

2.2.2.1. Perfilógrafo Califórnia

Para a determinação do índice de perfil (IP), foram realizadas medidas do perfil longitudinal nas superfícies da placa de concreto do trecho experimental, localizadas nas trilhas de roda externa e interna para cada faixa de rolamento, com o auxílio do equipamento Perfilógrafo Califórnia, apresentado na figura 3a. A execução dessas medições foi feita de acordo com a Norma da ASTM E 1274-2003, antes da liberação do trecho experimental ao tráfego.

O índice de perfil (IP) foi obtido a partir da soma de valores absolutos dos desvios (picos e depressões) que excederam os limites de uma faixa neutra, de largura adotada igual a 5 mm, sendo seu valor expresso em milímetros por quilômetro (mm/km). Para a obtenção do índice de perfil em cada faixa de rolamento, mediram-se os índices em cada trilha de roda (interna e externa) e, depois, foi calculada a média dos índices encontrados.



(a) Perfilógrafo Califórnia



(b) Nível e Mira

Figura 3 – Medições da irregularidade longitudinal no trecho

2.2.2.2. Nível e Mira

Para a determinação do quociente de irregularidade (QI), foram realizadas medidas do perfil longitudinal nas superfícies da placa de concreto do trecho experimental, localizadas nas trilhas de roda externa e interna para cada faixa de rolamento, com o auxílio do Nível e Mira, figura 3b. A execução dessas medições foi feita de acordo com a Norma ES-173/1986 do DNIT, após dois anos da liberação do trecho experimental ao tráfego.

3. RESULTADOS

3.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Os resultados obtidos nos ensaios dos materiais utilizados na terraplenagem do trecho experimental, referentes à classificação do solo, peso específico aparente seco máximo, umidade ótima e expansão, são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas do material (solo) utilizado na terraplenagem

Classificação do solo	Densidade máxima (Kg/m ³)	Umidade ótima (%)	Expansão (%)
A.2.4	1.997	10	0,04

A tabela 2 apresenta os resultados das propriedades mecânicas dos materiais utilizados no trecho experimental em comparação com os índices estabelecidos no projeto.

Tabela 2 – Comparativo das propriedades de estado dos materiais com índices estabelecidos no projeto

Propriedades de estado	Média	Limite de projeto
CBR(%) – Subleito	18%	10%
Grau de compactação terraplenagem	101,73%	100%
Resistência à tração na flexão CCR	2,42 MPa	1,80 MPa
Grau de compactação CCR	101,30%	97%
Resistência à tração na flexão do concreto	5,23MPa	4,50 MPa
Espessura da placa	23,72 cm	22 cm

3.2. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

A seguir, serão apresentados e analisados os resultados obtidos durante a avaliação estrutural com o auxílio da Viga Benkelman e do FWD.

3.2.1. Viga Benkelman

Nas figuras 4 a 6, estão lançadas em gráficos as deflexões medidas no topo da camada de terraplenagem (localizadas nas bordas externa e interna, e eixo) em função dos pontos mensurados pertencentes ao trecho experimental.

Para a camada de terraplenagem, os valores medidos de deflexão ponto a ponto, inclusive a média aritmética e a deflexão característica ($x + \sigma$), estiveram relativamente abaixo do valor limite do projeto de execução (120 x 0,01 mm).

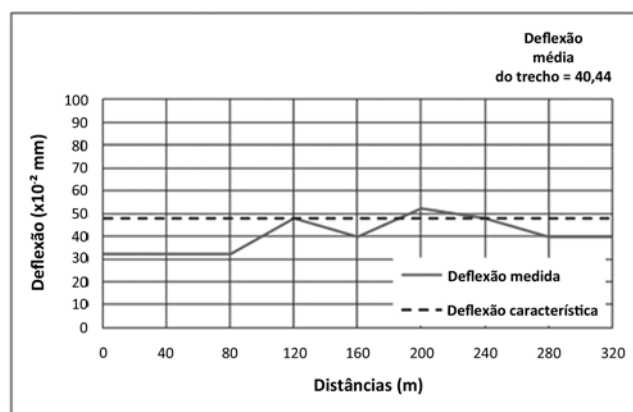


Figura 4 – Deflexões do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego da Viga Benkelman na borda externa da terraplenagem

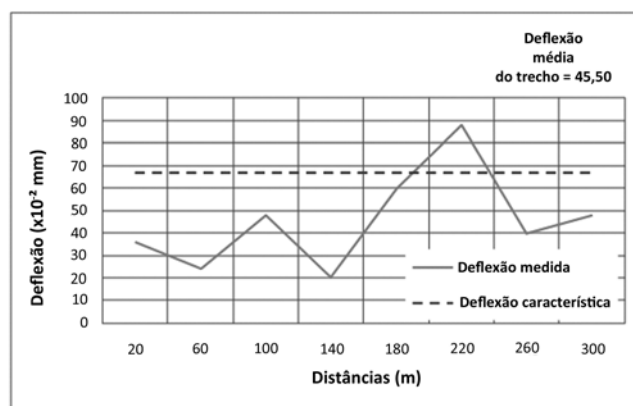


Figura 5 – Deflexões do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego da Viga Benkelman no eixo da terraplenagem

Nas figuras 7 e 8, estão lançadas em gráficos as deflexões medidas no topo da camada de CCR (localizadas nas bordas externa e interna da camada) em função dos pontos mensurados pertencentes aos trechos experimentais.

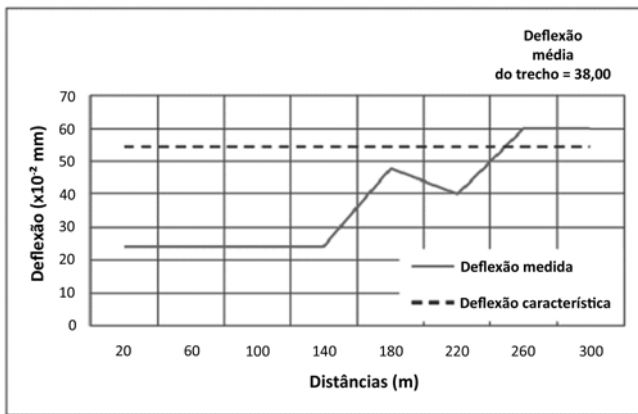


Figura 6 – Deflexões do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego da Viga Benkelman na borda interna da terraplenagem

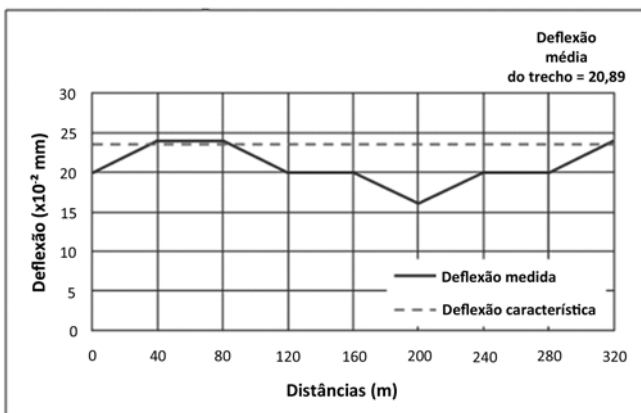


Figura 7 – Deflexões do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego da Viga Benkelman na borda externa do CCR

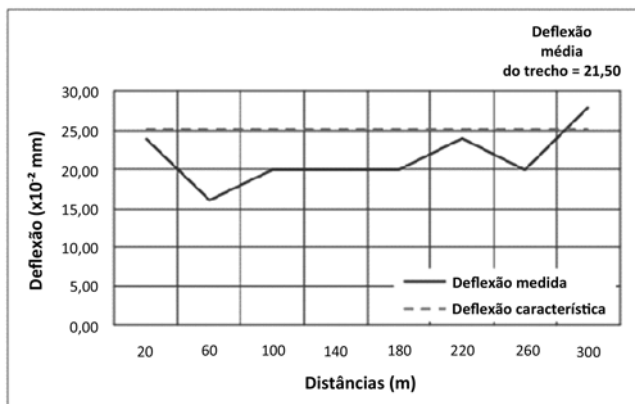


Figura 8 – Deflexões do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego da Viga Benkelman na borda interna do CCR

Para a camada de CCR, os valores medidos de deflexão ponto a ponto, inclusive a média aritmética e a deflexão característica ($x + \sigma$), estiveram relativamente abaixo do valor limite do projeto de execução ($65 \times 0,01\text{mm}$). O efeito da adição da camada de CCR sobre as deflexões, para o trecho em estudo, teve uma redução de quase 50% em termos absolutos. Como consequência, houve um aumento da rigidez da estrutura do pavimento subjacente à placa de concreto, o que proporciona uma combinação das deformações entre as camadas do pavimento inteiro.

3.2.2. Falling Weight Deflectometer

Nas figuras 9 a 12, estão lançadas em gráficos as deflexões medidas na superfície da placa de concreto em função dos pontos mensurados pertencentes ao trecho experimental localizados no meio de cada placa e nos lados direito e esquerdo da junta longitudinal.

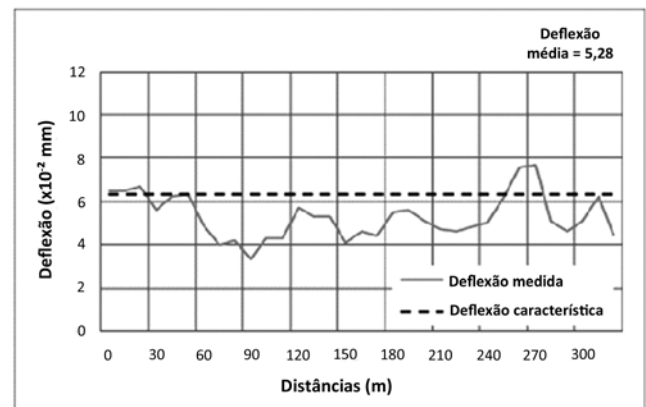


Figura 9 – Deflexões do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego do FWD na faixa de rolamento externa no meio da placa

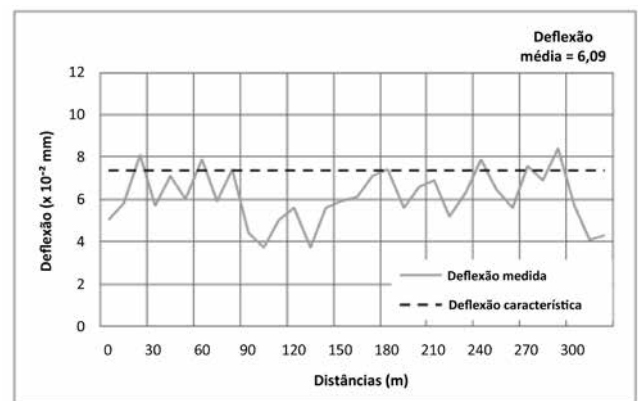


Figura 10 – Deflexões do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego do FWD na faixa de rolamento externa na junta longitudinal

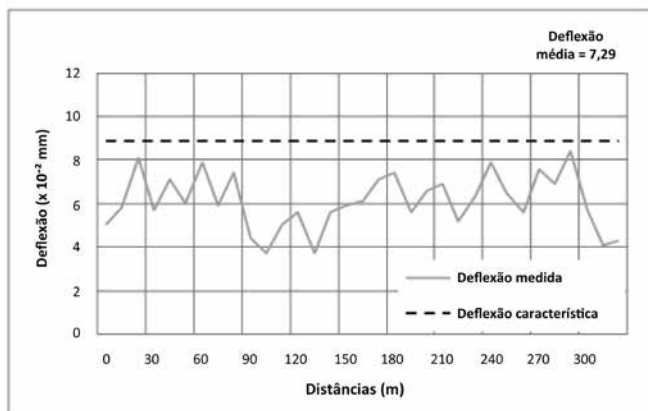


Figura 11 – Deflexões do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego do FWD na faixa de rolamento interna na junta longitudinal

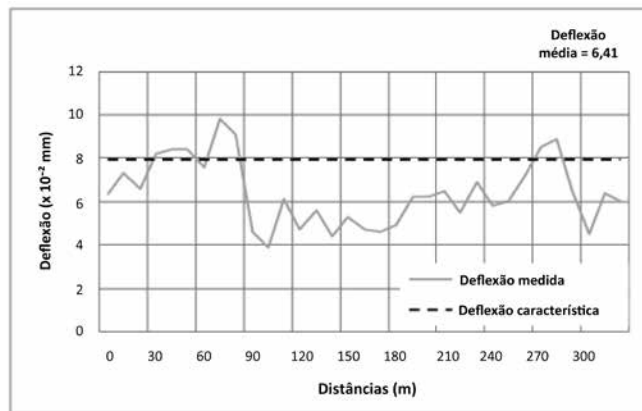


Figura 12 – Deflexões do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego do FWD na faixa de rolamento interna no meio da placa

Quadro 1 – Reduções das deflexões médias obtidas em função da adição das diferentes camadas do pavimento

Localização	Viga Benkelman		FWD	Reduções (%)		
	Terraplenagem	CCR		Placa	CCR/Terrap	(Placa + CCR)/Terrap
Faixa externa trilha externa	40,44	20,89	5,28	48,35	86,93	74,70
Faixa externa trilha interna	45,50	-	6,69	-	85,29	-
Faixa interna trilha interna						
Faixa interna trilha externa	38,00	21,50	6,41	43,42	83,13	70,18

Portanto, o conjunto placa de concreto mais base em CCR promove uma redução de 85% na deflexão sobre o valor medido na camada de terraplenagem, por consequência, a placa promove uma redução em média de 72,50% e a camada de CCR contribui com uma redução de 12,50%. Pode-se inferir que “para a estrutura do pavimento rígido em estudo, a redução maior se deve à camada de concreto de cimento Portland”.

3.3. AVALIAÇÃO FUNCIONAL

A seguir, serão apresentados e analisados os resultados obtidos durante a avaliação funcional cujos dados foram obtidos com o auxílio do Perfilógrafo Califórnia e do Nível e Mira.

3.3.1. Perfilógrafo Califórnia

Na figuras 13 a 16, estão lançados em gráficos os índices de perfil obtidos nos pontos preestabelecidos no topo da placa de concreto do trecho experimental, segundo o projeto atendendo à norma ASTM E 1274-2003.

Em todos os casos, observa-se que os valores do IP, ponto a ponto, estão muito abaixo do valor limite do projeto de execução (≤ 240 mm/km), com variação do índice do trecho entre 79 mm/km e 120 mm/km, aproximadamente. Com isso, nenhuma medida corretiva deverá ser executada na superfície do trecho experimental.

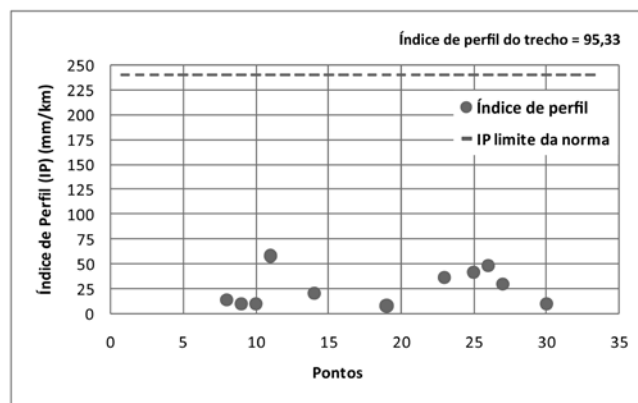


Figura 13 – Índice de perfil ponto a ponto da faixa de rolamento externa trilha roda externa

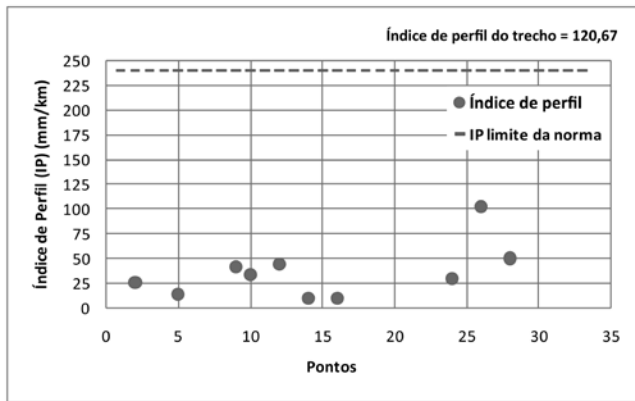


Figura 14 – Índice de perfil ponto a ponto da faixa de rolamento externa trilha roda interna

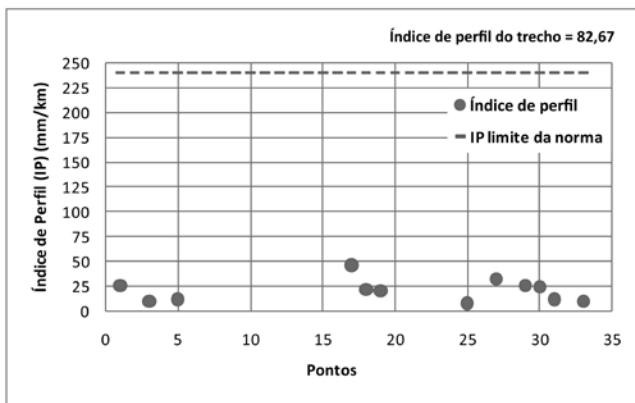


Figura 15 – Índice de perfil ponto a ponto da faixa de rolamento interna trilha roda interna

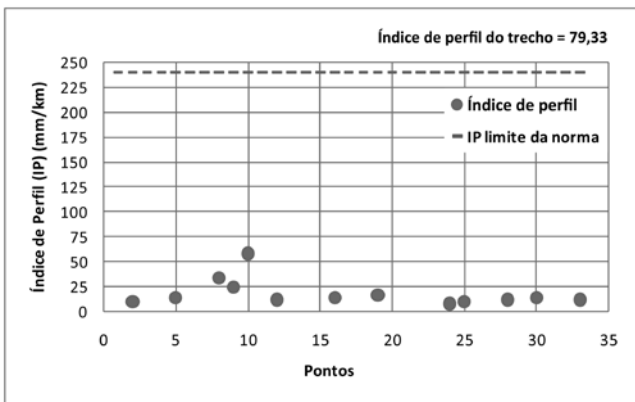


Figura 16 – Índice de perfil ponto a ponto da faixa de rolamento interna trilha roda externa

3.3.2. Nível e Mira

As figuras 17 a 20 apresentam, ponto a ponto do trecho experimental, os índices de irregularidades em função do quociente de irregularidade (QI) e do índice

de irregularidade internacional (IRI) obtidos no topo da placa de concreto.

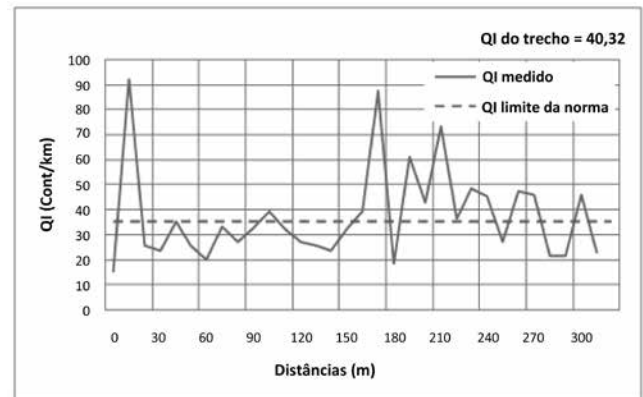


Figura 17 – Irregularidades em QI do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego do Nível e Mira na faixa de rolamento externa trilha externa

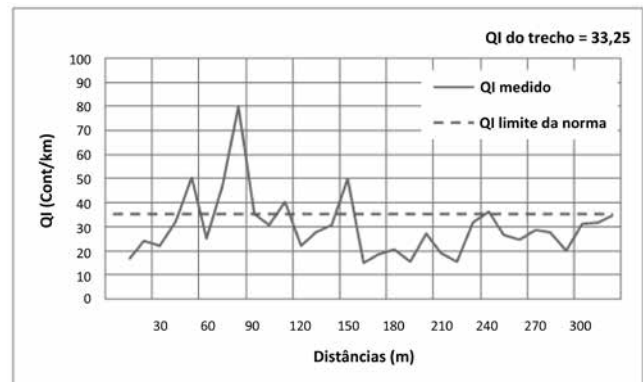


Figura 18 – Irregularidades em QI do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego do Nível e Mira na faixa de rolamento externa trilha interna

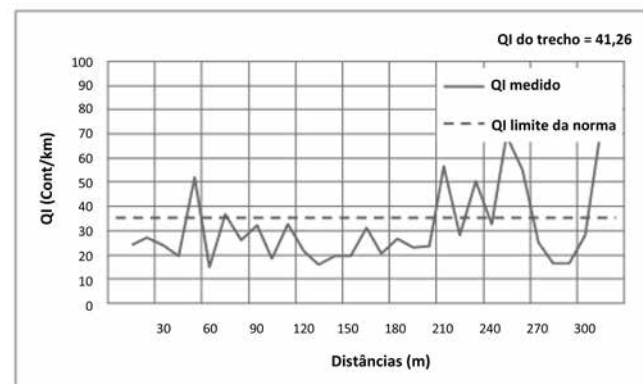


Figura 19 – Irregularidades em QI do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego do Nível e Mira na faixa de rolamento interna trilha interna

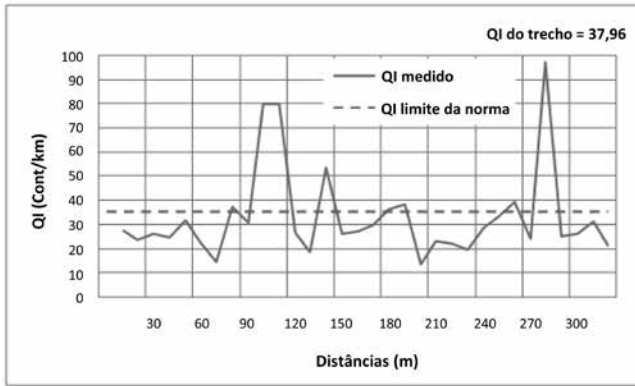


Figura 20 – Irregularidades em QI do trecho experimental ponto a ponto medidas com emprego do Nível e Mira na faixa de rolamento interna borda externa

Numa análise preliminar sobre os resultados obtidos e considerando a classificação constante no quadro 2, pode-se inferir que “os valores obtidos para o IRI e para o QI indicam que o desempenho funcional do trecho experimental encontra-se classificado como sendo um pavimento novo, mesmo com os valores do QI e do IRI para o trecho em questão estando acima dos limites preconizados pelas normas brasileiras ($QI \leq 35$ cont./km; $IRI \leq 2,7$: Norma ES 049/2009 do DNIT).

Quadro 2 – Escala do IRI para várias condições de pavimentos (DNIT-ES 049/2009)
Fonte: Balbo, (2009).

Escala IRI (m/km)	Condição Típica	Vias não pavimentadas e irregulares	Pavimentos deteriorados	Vias não pavimentadas conservadas	Pavimentos antigos	Pavimentos novos	Pistas de aeroportos e autoestradas	Velocidade de uso normal (km/h)
16	depressões fortes e panelas	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	50
14								
12	depressões pequenas e médias frequentes	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	60
10								
8	depressões menores e frequentes	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	80
6								
4	imperfeições na superfície	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	100
2								
0	perfeição absoluta	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	[Sombreado escuro]	

Em nenhuma hipótese, esses valores corroboram para os índices de classificação do trecho experimental estudado de um pavimento com “Perfeição absoluta”, visto que estão acima de 13 cont./km para o QI e 1 m/km para o IRI, e que são os padrões americanos de pavimento rígido recém-construído. O trecho em estudo foi avaliado após dois anos de liberação ao tráfego, ao contrário do que ocorreu com as medições realizadas com o Perfilógrafo Califórnia, que foi antes da liberação.

4. CONCLUSÕES

4.1. QUANTO ÀS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para a execução das camadas de terraplenagem estão dentro das especificações de projeto, sendo que o CBR médio dos materiais ultrapassou a exigência mínima de projeto em cerca de 80% e o grau de compactação médio dessas camadas ultrapassou em mais de 1,73%, tornando-os valores satisfatórios.

O concreto compactado a rolo (CCR) empregado no trecho experimental apresentou uma resistência média à tração na flexão superior à do projeto em mais de 34%, com um grau de compactação acima do estabelecido no projeto em mais de 4%, atendendo bem quanto às suas características mecânicas.

O concreto utilizado na execução do pavimento rígido (placa de concreto) superou o mínimo estabelecido no projeto executivo quanto à resistência à tração na flexão em mais de 15%.

4.2. QUANTO À AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

As deflexões médias apresentadas na camada de terraplenagem medidas pela Viga Benkelman apresentaram resultados bem abaixo do estabelecido no projeto. Houve uma redução de mais de 62% da deflexão do projeto no maior valor médio apresentado.

O CCR também apresentou resultados satisfatórios quanto às deflexões medidas com o auxílio da Viga Benkelman, onde o valor da média da maior deflexão verificada no trecho é ainda menor que a determinada no projeto, específica para esse tipo de ensaio, em

quase 67%, demonstrando que o conjunto terraplenagem + CCR forma uma estrutura estável para receber o pavimento rígido.

Verificou-se a grande redução das deflexões à medida que se sobrepõe uma camada de pavimento mais rígida, como já era de se esperar. A placa de concreto no conjunto placa + CCR tem um papel preponderante na redução das deflexões, proporcionando uma redução de 72,50%, enquanto o CCR contribui com apenas uma redução de 12,50% do total de aproximadamente 85%.

A Viga Benkelman, por possuir parâmetros estabelecidos no projeto executivo, mostrou-se bastante eficaz para o controle da execução das camadas inferiores do pavimento.

4.3. QUANTO À AVALIAÇÃO FUNCIONAL

As irregularidades medidas pelo Perfilógrafo Califórnia foram menores que o estabelecido na norma vigente, tanto ponto a ponto como para cada trilha de roda das duas faixas de rolamento do trecho experimental.

O maior índice de perfil (IP) medido nas quatro trilhas de roda foi ainda cerca de 50% abaixo do estabelecido na Norma ES 049/2009 do DNIT, para os pavimentos novos, mostrando que o pavimento antes da liberação do tráfego possuía todas as condições de conforto quanto à irregularidade do pavimento.

Três das quatro faixas de rolamento apresentaram o quociente de irregularidade (QI) e, conseqüentemente, índice de irregularidade internacional (IRI) acima do estabelecido na norma, o que se deve aos dois anos submetidos ao tráfego intenso e, certamente, a melhor acomodação das camadas, o que não coloca em hipótese alguma o pavimento em condições de intervenção quanto às irregularidades.

Ficou evidente a grande dificuldade em correlacionar o índice de perfil com o quociente de irregularidade, visto que o perfil longitudinal fornecido pelo Perfilógrafo Califórnia é obtido com o auxílio de leituras contínuas, enquanto o Nível e Mira fornecem leituras de 50 cm em 50 cm, o que pode proporcionar muitas divergências nesse intervalo, já que suas medições são realizadas em bases diferentes.

5. AGRADECIMENTOS

À UFCG, pelo apoio na realização deste projeto de pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test method for measuring pavement roughness using a profilograph. ASTM E 1274-03, Estados Unidos, 2003.

BALBO, J.T. *Pavimentos de concreto*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT-ES 173/1986: Método de Nível e Mira para calibração de sistemas medidores de irregularidade tipo resposta. Rio de Janeiro, 1986.

_____. DNIT-PRO 164/1994: Calibração e controle de sistemas de medidores de irregularidade de superfície de pavimento (sistemas integradores IPR/USP e Maysmeter). Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNIT-ME 024/1994: Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNIT-PRO 175/1994: Aferição da Viga Benkelman, Rio de Janeiro, 1994.

Ao 2º Batalhão de Engenharia de Construção, por disponibilizar todos os meios necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

_____. DNIT-PRO 273/1996 Determinações das deflexões utilizando o deflectômetro por impacto tipo Falling Weight Deflectometer – FWD, Rio de Janeiro, 1996.

_____. DNIT-PRO 062/2004: Pavimento rígido – avaliação objetiva. Rio de Janeiro, 2004.

_____. DNIT-ES 049/2009: Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma deslizante. Rio de Janeiro, 2009.

_____. DNIT-ME 133/2010: Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman, Rio de Janeiro, 2010.

FARIAS, M.M.; SOUZA, R.O. Irregularidade longitudinal e sua influência na avaliação funcional de pavimentos. In: VII ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, Vitória, 2002.

SOUZA, R.O. *Influência da irregularidade longitudinal na avaliação de pavimentos*. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.



VICCOL VIEIRA COSTA CONSTRUÇÕES LTDA.

**EDIFICAÇÕES - SANEAMENTO - TERRAPLENAGEM - PAVIMENTAÇÃO
PONTES - VIADUTOS - INSTALAÇÕES ELÉTRICAS - SINALIZAÇÃO
ADMINISTRAÇÃO - LOCAÇÃO DE MÃO DE OBRA**

**RUA DR. WILSON BARBOSA DE MELO, 23 - ATALAIA - CEP 49.037 590
ARACAJU - SERGIPE - FONE: 79 - 3223 - 2159
CGC - 01-.662.968/0001-46 - INSC. ESTADUAL - 27.098.730-4**

Estimativa de Produção de Acabadoras de Asfalto na Construção de Camadas Betuminosas

Wilbert Raymundo Ríos Sotomayor

Engenheiro civil, mestre em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

Cassio Eduardo Lima de Paiva

Professor, doutor, mestre em Engenharia civil, Unicamp.

RESUMO

A construção de revestimentos asfálticos com espessura superior a 30 mm exige um espalhamento cuidadoso realizado pela vibroacabadora ou pela pavimentadora de forma a resultar em uma superfície nivelada da mistura usinada. Para o planejamento construtivo de um revestimento asfáltico usinado, sempre é necessária a estimativa da produção da vibroacabadora. Este artigo apresenta uma análise das variáveis que condicionam a produção desse equipamento a partir de dados disponíveis nas literaturas técnicas nacional e estrangeira. Foram identificadas fórmulas para o cálculo da produção das pavimentadoras e, a partir das variáveis identificadas e das suas faixas de variação, foi desenvolvido um gráfico estimativo de produção para uma pavimentadora de pneu executando uma faixa de rolamento com 3,7 m de largura.

Palavras-chave: pavimentação; pavimentadora; cálculo de produção.

ABSTRACT

The surface course at least 30 mm thickness constructed by an asphalt paver finisher requires careful spread to obtain an even surface. To build this asphalt layer it is always demanded an adequate equipment production planning. This paper shows an analysis of the main paver production variables to meet the highest production from the available technical literature data. The research identified production formulas and highlighted variables and conditions related to a 3.7 m width asphalt paver finisher, graphically shown to turn easier planning activities.

Keywords: asphalt pavement; asphalt paver finisher; pavement production.

INTRODUÇÃO

A construção de rodovias tem um papel vital para o escoamento da produção agrícola e industrial, sendo, muitas vezes, a única opção para o transporte de mercadorias entre os centros produtores e consumidores, assim como até portos e aeroportos.

Uma obra rodoviária se caracteriza por ter custos consideráveis na sua concepção e, principalmente, na sua execução. Um fator importante desses custos é a for-

te incidência da utilização de equipamentos pesados. Essa forte incidência ocorre tanto nos serviços de terraplenagem quanto nos de pavimentação.

O sucesso na execução de uma obra rodoviária (do ponto de vista técnico-econômico) depende da rapidez da construção da estrada. Essa produtividade é obtida alocando para a obra uma quantidade maior de equipamentos e sendo conhecido o real desempenho dos mesmos.

Este artigo descreve e analisa as variáveis que influenciam a produção de uma distribuidora de asfalto ou pavimentadora na execução de uma camada asfáltica.

2. PAVIMENTADORAS DE ASFALTO

Segundo a National Asphalt Pavement Association (NAPA, 1996), o conhecimento sobre como trabalha uma pavimentadora e a forma como ela produz material uniforme podem ser reduzidos a dois conceitos básicos: a ação do autonivelamento da mesa pavimentadora e o procedimento para mover o material recebido, desde a caçamba receptora na frente da pavimentadora até a área antes da mesa.

As pavimentadoras ou vibroacabadoras foram introduzidas durante os anos 1930, sendo capazes de colocar uma ampla gama de consistências e espessuras de materiais. A largura da máquina pode ser alterada para satisfazer o desenho da via e sua produção potencial é consideravelmente maior que os métodos manuais (Harris, 1994).

A função da pavimentadora de asfalto é colocar uma determinada mistura de projeto sobre uma superfície irregular, enquanto reúne as especificações de superfície, textura e uniformidade (NAPA, 1996).

Segundo o Instituto de Asfalto (1989), as acabadoras modernas movimentam-se sobre esteiras ou com rodas pneumáticas. Esses equipamentos podem colocar uma

camada de pelo menos 25 milímetros até, aproximadamente, 250 milímetros de espessura, na largura de 1,8 a 9,8 metros. A velocidade de execução está geralmente na gama de 3 a 20 metros por minuto.

Esses equipamentos são compostos essencialmente de uma unidade tratora e uma unidade de mesa acabadora. A unidade tratora fornece a força motriz por meio de esteiras e rodas pneumáticas que se deslocam sobre a base do pavimento. Inclui o motor, tremonha receptora, transportadora de alimentação, roscas sem fim de espalhamento, controles e assento do operador. A unidade de mesa acabadora raspa, compacta parcialmente e alisa a superfície do “pano” asfáltico, quando puxada para a frente. A figura 1 apresenta as partes constituintes de uma vibroacabadora asfáltica.

Jeuffroy (1973) indica que a parte ativa da pavimentadora é a viga alisadora ou *screed*, que está unida a um braço de tração, articulado sobre o bastidor da máquina. O conjunto de braço e viga passeia sobre a mistura e está em equilíbrio sob o efeito de três forças: o peso do equipamento, o esforço de tração na articulação e a reação da mistura sob o *screed*.

Scherocman e Materson (1984) indicam que o *screed* vibratório desses equipamentos permite que a mistura seja pré-compactada. Essa pré-compactação, antes da compactação convencional com o rolo, reduz o esforço de compactação necessário pelos rolos antes de alcançar a densidade e o teor de vazios apropriados.

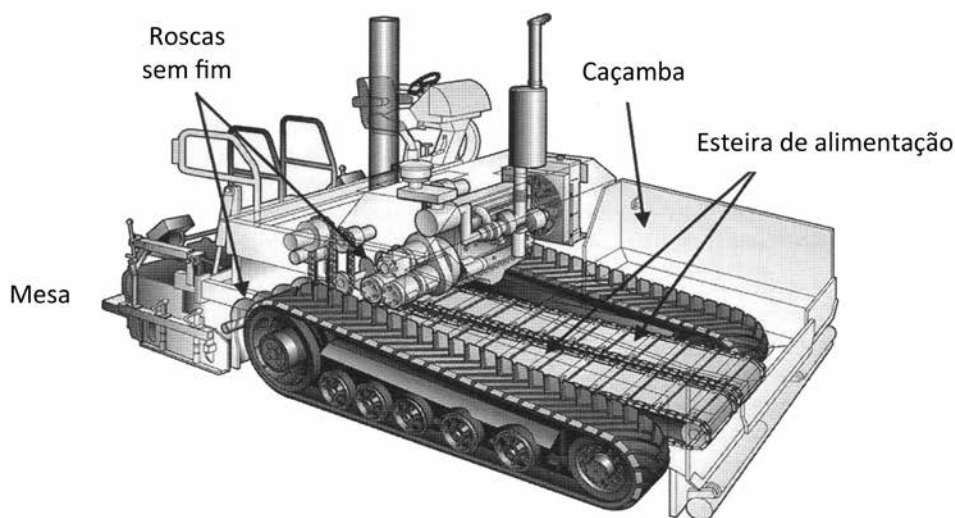


Figura 1 – Partes integrantes da pavimentadora de asfalto

Fonte: Adaptado de NAPA (1996).

Atualmente, as pavimentadoras também cumprem a função dos espalhadores de agregados e misturas estabilizadas com cimento secos. Como é conhecido, o uso de agregados pétreos em obras de pavimentação asfáltica é bastante comum. Esses agregados minerais são aplicados em camadas, devendo ser espalhados em espessuras determinadas e uniformes. Os dispositivos para essa finalidade são os espalhadores de agregados (*spreader*), que se diferenciam em função da espessura da camada de pedra britada que se deseja obter. Os espalhadores de agregados são empregados para a execução de tratamentos superficiais betuminosos, no caso de camadas finas ou delgadas. Para as camadas mais espessas, as pavimentadoras podem ser empregadas no espalhamento de britas granulares, solo-cimento, solo-brita, pré-misturados a frio com ligantes betuminosos, entre outros (Guimarães, 2001).

A NAPA (1996) indica que um aspecto fundamental de uma pavimentação uniforme é manter uma velocidade constante. Nos equipamentos mais antigos, o controle da velocidade ficava a cargo do operador do equipamento. A maior parte das pavimentadoras de asfalto modernas está equipada com dispositivos de “controle de velocidade”, os quais facilitam o trabalho do operador de manter a velocidade de pavimentação estabelecida.

Segundo a Dynapac (1989), o Instituto de Asfalto (1989), a Caterpillar (1995) e a TRB (2000), a velocidade da pavimentadora é determinada pelo volume de material fornecido à máquina que depende do volume de produção da usina de asfalto. A velocidade da pavimentadora deve ser a mais constante possível, já que variações na velocidade trazem como resultado diferentes níveis de pré-compactação. Os melhores resultados são obtidos quando há equilíbrio entre o volume de produção da usina e a capacidade de espalhamento na pista.

Segundo a Caterpillar (1995), o índice de compactação depende de diversos fatores: projeto da mistura, velocidade de pavimentação, espessura da camada e velocidade dos vibradores.

A Australian Asphalt Pavement Association (AAPA, 2001) e a Dynapac (1989) indicam que a velocidade de

avanço de uma pavimentadora necessária para equilibrar a produção na usina obtém-se pela equação 1.

$$V_{pav} = \frac{Q_{usina} \times 1000}{60 \times l \times e \times \rho} \dots (m/min) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

V_{pav} = velocidade de avanço da pavimentadora, em metros/minuto;

Q_{usina} = volume de produção da usina, em toneladas/hora;

l = largura do espalhamento do equipamento, em metros;

e = espessura da camada compactada, em milímetros;

ρ = densidade da mistura compactada, em toneladas/metro cúbico.

Alternativamente, a produção de uma pavimentadora para uma determinada velocidade pode ser calculada a partir da equação 2.

$$Q_{pav} = \frac{60 \times V_{pav} \times l \times e \times \rho \times E}{1000} \dots (ton/h) \quad \text{Equação 2}$$

Nesta equação, a Dynapac (1989) incorpora o fator de eficiência do equipamento (E).

Além disso, o Instituto de Asfalto (1987) apresentou o *Speed Number* ou números de velocidades para a determinação das velocidades das pavimentadoras em função do volume de produção da usina e da densidade da mistura compactada. As velocidades do equipamento são expressas na equação 3.

$$V_{pav} = \frac{SpeedNumber}{l \times e} \dots (m/min) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

V_{pav} = velocidade do equipamento, em metros/minuto;

Speed Number = números de velocidade indicados na tabela 1;

l = largura de espalhamento, em metros;

e = espessura da camada compactada, em centímetros.

Segundo Geller (1984), as misturas asfálticas, quando colocadas na pista, deverão ter uma porcentagem de empolamento dependendo da granulometria do agregado que as compõe. Essas características são apresentadas na tabela 2.

Tabela 1 – Speed Number para uso na equação da velocidade da pavimentadora

Densidade da mistura (ton/m ³)	Volume de produção (ton/h)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
2.0	83,3	166,7	250,0	333,3	416,7	500,0	583,3	666,7	750,0	833,3
2.1	79,4	158,7	238,1	317,5	396,8	476,2	555,6	634,9	714,3	793,6
2.2	75,8	151,5	227,3	303,0	378,8	454,5	530,3	606,1	681,8	757,6
2.3	72,5	144,9	217,4	289,8	362,3	434,9	507,2	579,7	652,2	724,6
2.4	69,4	138,9	208,3	277,8	347,2	416,7	486,1	555,6	625,0	694,4

Fonte: Adaptado do Instituto de Asfalto (1987).

Tabela 2 – Espessuras típicas de colocação de misturas betuminosas considerando o empolamento

Espessura colocada mm (pol)	Espessura compactada mm (pol)	Quantidade total a ser compactada mm (pol)
32 a 38 (1,25 a 1,50)	25 (1,0)	6 a 13 (0,25 a 0,50)
51 a 57 (2,00 a 2,25)	38 (1,5)	13 a 19 (0,50 a 0,75)
64 a 79 (2,50 a 2,75)	51 (2,0)	13 a 19 (0,50 a 0,75)
83 a 89 (3,25 a 3,50)	64 (2,5)	19 a 25 (0,75 a 1,00)
102 (4,0)	76 (3,0)	25 (1,0)

Fonte: Adaptado de Geller (1984).

3. PRODUÇÃO DAS PAVIMENTADORAS DE ASFALTO

A velocidade da pavimentadora e a taxa de produção da usina fornecedora, as quais estão diretamente ligadas, são as variáveis mais importantes para o correto cálculo de produção de uma pavimentadora. Incrementando a velocidade de pavimentação de acordo com a faixa recomendada na tabela 1, será possível incrementar a produção das pavimentadoras com a devida segurança. As outras variáveis, tais como, a largura do espalhamento e a espessura da camada, dependem do acondicionamento do equipamento.

Depois de identificadas as variáveis que conformam a equação 1, apresentam-se nas tabelas 3, 4 e 5 as principais características técnicas fornecidas pelos fabri-

cantes, nos catálogos das pavimentadoras de asfalto, inclusive a produção teórica sugerida.

Da análise feita das tabelas 3, 4 e 5, pode-se perceber que os fabricantes fornecem as duas variáveis de produção ligadas diretamente ao equipamento: a faixa de larguras e as velocidades de operação.

A largura da pavimentação, pelos catálogos consultados, apresenta-se entre 1,70 m e 9,00 m para as pavimentadoras sobre pneus, e entre 1,70 m e 16,00 m, para as pavimentadoras sobre esteiras.

Para as velocidades, os catálogos apresentam seus valores máximos, segundo a capacidade de cada equipamento. As máximas velocidades variam entre 18 m/min e 114 m/min, para as pavimentadoras sobre pneus, entre 16 m/min e 67 m/min, para as pavimentadoras sobre esteiras. Essa informação é muito abrangente, já que os trabalhos de pavimentação são realizados com velocidades bem menores que 114 m/min.

Com o inconveniente descrito no parágrafo anterior, além de ser preciso uma bibliografia que recomende uma faixa de valores das outras variáveis envolvidas na produção das pavimentadoras, foi feita uma pesquisa nos livros e manuais técnicos disponíveis no mercado brasileiro, obtendo-se como resultado a tabela 6.

Na tabela 6, apresenta-se a recomendação feita pelos diferentes autores consultados, referente às variáveis de produção das pavimentadoras.

Tabela 3 – Características técnicas das pavimentadoras de pneus

Fabricante	Modelo	Potência bruta	Largura padrão da pavimentação (m)	Largura máxima da pavimentação (m)	Velocidade máxima da pavimentação (m/min)	Produção teórica (ton/h)
Caterpillar	AP-800D	97 kW/130 HP	2,44	6,10	76,00	-
	BG-230	80 kW/107 HP	2,44	6,10	76,00	-
	BG-240C	114 kW/153 HP	3,05	7,40	122,00	-
	BG-260C	118 kW/158 HP	3,05	7,40	114,00	-
	AP-1000B	118 kW/158 HP	3,05	9,14	114,00	-
Terex	VD 421	54 kW/73 cv	2,50	4,55	48,00	400,00
	VD 621	117 HP	2,60	6,00	54,00	450,00
	VD 721	113 kW/154 HP	2,60	6,00	54,00	600,00
Dynapac	F6W	50 kW/68 HP	1,70	4,10	32,00	250,00
	F8W	66 kW/90 HP	2,00	5,00	35,00	350,00
	F9W	78 kW/106 HP	2,00	5,25	35,00	400,00
	F121W	116 kW/158 HP	2,50	6,50	32,00	600,00
	F161W	116 kW/158 HP	2,50	7,00	26,50	650,00
Ciber	SA 230	31 kW/45 cv	2,00	3,84	30,00	100,00
	SA 115CR	78 kW/105 cv	2,55	4,75	40,00	400,00
	AF 4500	105 cv	1,70	4,20	30,00	300,00
	AF 5500	105 cv	1,90	5,30	30,00	450,00
Vogele	SUPER 1203	57 kW/78 PS	1,70	4,00	25,00	150,00
	SUPER 1603-2	84 kW/114 PS	2,55	7,00	18,00	400,00
	SUPER 1803-2	121 kW/165 PS	2,55	8,00	18,00	600,00

Fonte: Adaptado de catálogos técnicos Caterpillar, Terex, Dynapac, Ciber, Vogele.

Tabela 4 – Características técnicas das pavimentadoras de esteiras

Fabricante	Modelo	Potência bruta	Largura padrão da pavimentação (m)	Largura máxima da pavimentação (m)	Velocidade máxima da pavimentação (m/min)	Produção teórica (ton/h)
Caterpillar (*Movil-Track Pavers)	BG-225C	90 kW/121 HP	2,44	6,10	67,00	-
	AP-650B	97 kW/130 HP	2,44	6,10	67,00	-
	BG-245C	130 kW/174 HP	3,05	7,40	60,10	-
	AP-1050B	130 kW/174 HP	3,05	9,14	65,60	-
	AP-1055B*	130 kW/174 HP	3,05	9,14	65,60	-
	BG-2455C*	130 kW/174 HP	3,05	7,40	60,10	-
Terex	VD 400	54 kW/73 cv	2,50	4,55	30,00	400,00
	VD 600	117 HP	2,60	6,00	33,00	450,00
	VD 700	113 kW/154 HP	2,60	6,00	33,00	600,00

Tabela 4 – Características técnicas das pavimentadoras de esteiras (continuação)

Fabricante	Modelo	Potência bruta	Largura padrão da pavimentação (m)	Largura máxima da pavimentação (m)	Velocidade máxima da pavimentação (m/min)	Produção teórica (ton/h)
Dynapac	F4C	33 kW/45 HP	1,20	3,10	20,00	200,00
	F5C	33 kW/45 HP	1,20	3,10	20,00	200,00
	F5CS	39 kW/53 HP	1,20	4,40	16,00	300,00
	F6C	50 kW/68 HP	1,70	4,60	32,00	300,00
	F8C	74 kW/100 HP	2,00	7,50	22,40	400,00
	F121C	116 kW/158 HP	2,50	9,00	20,00	600,00
	F141C	129 kW/173 HP	2,50	9,00	20,00	750,00
	F150C	131 kW/178 HP	2,50	9,00	20,00	750,00
	F181C	153 kW/205 HP	2,50	9,00	20,00	800,00
	F182CS	172 kW/230 HP	2,50	13,50	23,00	900,00
	F300CS	259 kW	3,00	16,00	20,00	1500,00

Fonte: Adaptado de catálogos técnicos Caterpillar, Terex, Dynapac.

Tabela 5 – Características técnicas das pavimentadoras de esteiras (continuação)

Fabricante	Modelo	Potência bruta	Largura padrão da pavimentação (m)	Largura máxima da pavimentação (m)	Velocidade máxima da pavimentação (m/min)	Produção teórica (ton/h)
Ciber	SA 114CR	78 kW/105 cv	2,55	4,75	23,00	400,00
	AF 4000	105 cv	1,70	4,20	27,00	300,00
	AF 5000	105 cv	1,90	5,30	30,00	450,00
	AF 6000	155 cv	2,55	6,00	30,00	600,00
Vogele	SUPER 1600-2	84 kW/114 PS	2,55	8,00	24,00	600,00
	SUPER 1800-2	121 kW/165 PS	2,55	10,00	24,00	700,00
	SUPER 1800SF	133 kW/181 PS	2,55	6,50	18,00	400,00
	SUPER 1900-2	129 kW/175 PS	2,55	11,00	25,00	900,00
	SUPER 2100-2	160 kW/218 PS	2,55	13,00	25,00	1100,00
	SUPER 2500	209 kW/284 PS	3,00	16,00	18,00	1500,00

Fonte: Adaptado de catálogos técnicos Ciber, Vogele.

Tabela 6 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção das pavimentadoras de asfalto

Autor	Variável	Recomendação
AAPA (2001)	V	3 a 15 m/min.
	e	25 a 100 milímetros
Abram I. (2001)	E	0,60 a 0,80
Caterpillar (1995)	V	A velocidade é determinada pelo volume de material fornecido à máquina. A velocidade ótima em uma operação de pavimentação é a que proporciona deslocamento da máquina com velocidade constante.

Autor	Variável	Recomendação
Dynapac (1989)	V	Com screed não vibratório: 4 a 10 m/min
		Com screed vibratório: > 20 m/min
Instituto de Asfalto (1989)	V	3 a 20 m/min
	e	25 até 250 milímetros
Napa (1996)	E	0,75 a 0,85

Fonte: Adaptado de Abram, Caterpillar, Dynapac, Instituto de Asfalto e NAPA.

Da análise das tabelas anteriores, foi desenvolvida a tabela 7, que apresenta uma faixa de valores aceitáveis para a estimativa de produção das pavimentadoras.

Tabela 7 – Variáveis de produção recomendadas para as pavimentadoras de asfalto

Variáveis de produção das pavimentadoras de asfalto	Valores recomendados
l (m)	Pavimentadoras de pneus: 1,70 até 9,00 Pavimentadoras de esteiras: 1,20 até 16,00
V (m/min)	3 a 10
e (m)	0,025 a 0,10 (1" a 4")
E	0,75

Definidas as faixas de valores que fazem parte da produção das pavimentadoras de asfalto, foi elaborado o seguinte ábaco para a determinação da estimativa de produção. A eficiência (E) deverá ser multiplicada pelo valor obtido dos ábacos de produção bruta com a finalidade de obter o valor da produção líquida.

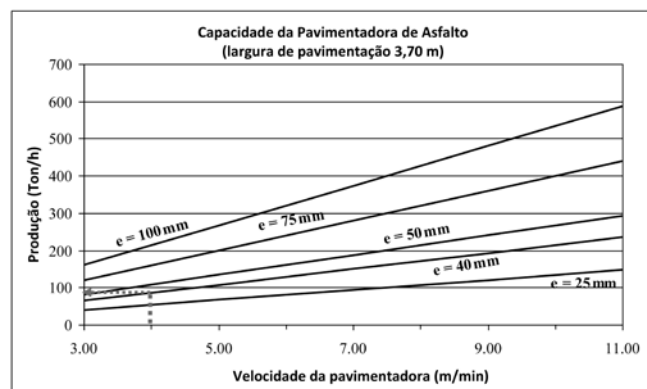


Figura 2 – Ábaco da capacidade de produção bruta de uma pavimentadora de asfalto no espalhamento de camadas de espessura “e”, densidade de compactação de 2,4 ton/m³ e largura de pavimentação de 3,70 m

Como um exemplo de emprego do gráfico desenvolvido, tem-se para uma velocidade de 4 m/min na execução de uma camada com espessura acabada de 40 mm, uma produção bruta estimada em 86 ton/h. Se fosse considerada uma eficiência de 75%, resultaria numa produção efetiva de 64,5 ton/h.

No gráfico da figura 2, ilustram-se as velocidades de pavimentação para as várias espessuras de asfalto, largura de espalhamento de 3,7 m e densidade típica de compactação de 2,4 ton/m³. As velocidades utilizadas no gráfico

da figura 2 foram definidas a partir dos valores indicados pelo Instituto do Asfalto Americano (tabela 6); no Brasil, empregam-se os menores valores de velocidade.

Naturalmente, durante a execução de uma camada betuminosa pré-usinada, a produção da pavimentadora ainda pode ser afetada pelo volume descarregado pelo caminhão, pela abertura das bordas laterais do silo de alimentação, pela vibração da mesa distribuidora e outros fatores que podem afetar o correto rendimento do equipamento em função da sua correta operação por seu condutor.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Quando se inicia o planejamento da construção de um pavimento rodoviário, vários itens são importantes, pois afetam diretamente a economia do projeto. Entre eles, destaca-se a definição do equipamento mínimo necessário para sua execução. A determinação antecipada da estimativa de produção das máquinas envolvidas é crucial, já que com essa análise, será possível ter uma ideia do número de unidades de cada tipo de equipamento, da constituição de cada frota e se as metas serão alcançadas no prazo previsto.

A informação para o cálculo da produção dos equipamentos envolvidos na construção de um pavimento asfáltico rodoviário, como foi tratado neste artigo, encontra-se muito dispersa. Os manuais e as especificações técnicas recebidos, quando se adquire um equipamento pesado, contêm uma série de informações, mas nem todas, no entanto, são de interesse do engenheiro civil. As informações de caráter produtivo ficam no meio de um conjunto de especificações mecânicas, nem sempre estando disponíveis para grande parte dos engenheiros e pessoas ligadas à execução e à implantação da estrada.

No desenvolvimento deste artigo, procurou-se coletar a maior quantidade de literatura disponível referente à produção dos equipamentos em estudo. A bibliografia baseou-se em manuais técnicos de órgãos internacionais, tais como, a NAPA, a TRB, a AAPA e o Instituto de Asfalto, referentes à produção e à execução de camadas betuminosas, além dos manuais dos principais órgãos brasileiros

como, por exemplo, o DNIT, o DER-SP e a PMSP. E ainda, catálogos de vários fabricantes de equipamentos.

Com o estudo detalhado do processo construtivo, procurou-se exemplificar uma metodologia de determinação da produtividade e do tempo dos equipamentos de escopo.

Em face do exposto, os dados coletados, apesar de estarem dispersos, foram reunidos e compilados de forma ordenada e permitindo seu emprego posterior. Foram identificadas fórmulas que permitem a estimativa

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASPHALT INSTITUTE. *Asphalt paving manual*. Manual Series nº 8 (MS-8), 3ª ed. EUA, 1987.

_____. *The asphalt handbook*. Manual Series nº 4 (MS-4), EUA, 1989.

AUSTRALIAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Asphalt paving speed*. Pavement work tips – nº 31. Nov. 2001. Disponível em: <<http://www.aapa.asn.au/content/aapa/download/worktips31.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2007.

CATERPILLAR. *Manual de pavimentação*. Brasil, 1995.

DYNAPAC. *Compaction and paving, theory and practice*. Sweden: Dynapac AB, 1989.

GELLER Myron. *Compaction equipment for asphalt mixtures*. Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, ASTM STP 829, F.T. Wagner, Ed., American Society for Testing and Materials, 1984.

GUIMARÃES, N. *Equipamentos de construção e conservação*. Paraná: UFPR, 2001.

HARRIS Frank. *Modern construction and ground engineering equipment and methods*. 2ª ed. Londres: Longman Scientific and Technical, 1994.

6. CATÁLOGOS TÉCNICOS CONSULTADOS

CASE. *Motoniveladoras 845*. Catálogo técnico. Brasil, 2006.

CATERPILLAR. *Caterpillar paving products – solution guide*. Catálogo técnico. 2000.

_____. *Pavimentadoras de asfalto AP 800D, BG 230, BG 240C, BG 260C*. Especificações técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: <<http://brasil.cat.com/cda/layout?m=62803&x=12>>. Acesso em: 15 jan. 2006.

_____. *Asphalt pavers – track pavers AP 1055D, AP 650B, BG 225C, BG 245C*. Especificações técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: <http://brasil.cat.com/cda/layout?m=62803&x=12>. Acesso em: 15 jan. 2006.

_____. *Pavimentadoras de asfalto – Sistema Movil Track BG 2455C*. Especificações técnicas. Brasil, 2006. Disponível em:

da produção das pavimentadoras. A partir delas, será possível compreender melhor as variáveis que condicionam a produção de uma vibroacabadora.

A partir da fórmula 1, foi desenvolvido um gráfico para um tipo de pavimentadora de pneus e apresentado um exemplo prático de sua utilização. Para outras situações específicas, será possível desenvolver gráficos semelhantes que permitam a imediata estimativa da produção das vibroacabadoras.

JEUFFROY G. *Proyecto y construcción de carreteras*. Tomo II. Materiales, Maquinaria, Técnica de Ejecución de Obras. Traduzido por Fonseca J.M. Espanha: Editores Técnicos Associados, 1973.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Balancing production rates in hot mix asphalt operations*. Information Series 120. EUA, 1996.

_____. *Calidad en la operación de maquinas pavimentadoras*. Serie informativa 125. EUA, 1996.

SCHEROCMAN, J. A.; MARTENSON, E. D. *Placement of asphalt concrete mixtures*. Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, ASTM STP 829, F.T. Wagner, Ed., American Society for Testing and Materials, 1984.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. *Hot-mix asphalt paving handbook 2000*. TRB, National Research Council. Washington, DC, 2000. Disponível em: <http://www.airweb.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgAdvisoryCircular.nsf/0/84D53D0D6AAF8DCF8625721800554A26?OpenDocument&Highlight=ac%20150>. Acesso em: 5 out. 2007.

<<http://brasil.cat.com/cda/layout?m=62803&x=12>>. Acesso em: 15 jan. 2006.

DYNAPAC. *Pavimentadoras de rodas F6W, F8W, F9W, F121W, F161W*. Especificações técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: <http://www.dynapac.com.br/templates/CategoryList___11193.aspx>. Acesso em: 15 out. 2006.

_____. *Pavimentadoras de esteiras F4C, F5C, F5CS, F6C, F8C, F121C, F141C, F150C, F181C, F182CS, F300CS*. Especificações técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: <http://www.dynapac.com.br/templates/CategoryList___11193.aspx>. Acesso em: 15 out. 2006.

TEREX ROADBUILDING. *Vibroacabadoras Série 400*. Catálogo técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.

_____. *Vibroacabadoras Série 600*. Catálogo técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.

_____. *Vibroacabadoras Série 700*. Catálogo técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.

WIRTGEN GROUP/CIBER. *Linha de produtos América Latina*. Catálogo técnico. Porto Alegre, Brasil, 2001.

_____. *Linha de produtos*. Catálogo técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.

_____. *Terminadora AF4000*. Catálogo técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.

_____. *Vibroacabadora AF4500*. Catálogo técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.

_____. *Vibroacabadora AF5000*. Catálogo técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.

_____. *Vibroacabadora AF6000M*. Catálogo técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.

_____. *Vibroacabadoras de asfalto – SA 114CR sobre esteiras / SA 115CR sobre pneus*. Catálogo técnico. Porto Alegre, Brasil, 2001.

WIRTGEN GROUP/VOEGELE. *Super 1600-1, extendedora sobre orugas*. Catálogo técnico. Alemanha, 2006.

_____. *Super 1800-1, extendedora sobre orugas*. Catálogo técnico. Alemanha, 2006.

_____. *Extendedora sobre rodas Super 1203, Super 1603-2, Super 1803-2*. Especificações técnicas. Alemanha, 2006. Disponível em: <http://www.voegele-ag.com/en/produkte/super_serie/radfertiger/SUPER_Serie_-_Uebersicht__Rad.html>. Acesso em: 15 out. 2006.

_____. *Extendedora sobre esteiras Super 1600-2, Super 1800-2, Super 1800-2SF, Super 1900-2, Super 2100-2, Super 2500*. Especificações técnicas. Alemanha, 2006. Disponível em: <http://www.voegele-ag.com/en/produkte/super_serie/raupenfertiger/Uebersicht__Raupenfertiger.html>. Acesso em: 15 out. 2006.



EQUIPAMENTOS

Desde 1988, fabricando equipamentos para laboratório de solos, asfaltos, concretos e agregados. A Solocap é uma empresa inovadora que prioriza a excelência e o bom atendimento, oferecendo a sua empresa a mais completa linha de equipamentos técnicos e científicos de alta qualidade.

LANÇAMENTO!!!

Prensa Hidráulica Elétrica Digital
150 Tf ou 200 Tf

Soquete CBR / Próctor automático

Extratora à gasolina

Rice test

Abrasão Losangeles

Máquina universal de ensaios

SERVIÇOS

Possuímos laboratórios modernos e uma equipe altamente qualificada, capaz de realizar todos os ensaios geotécnicos em solos, asfaltos, concretos e materiais betuminosos. Fazemos o controle de qualidade e o projeto para sua pavimentação. Todos os trabalhos de consultoria e controle são específicos às necessidades da sua empresa.



SOLOCAP GEOTECNOLOGIA RODOVIÁRIA LTDA.
Av. dos Açudes, nº 99 - Alto dos Pinheiros - Belo Horizonte / MG
Fone: (31) 3047-7460 e-mail: vendas@solocap.com.br / solocap@solocap.com.br
www.solocap.com.br

Revista PAVIMENTAÇÃO

Normas básicas para submissão de artigos e contribuições técnicas

1. A Revista PAVIMENTAÇÃO é uma publicação técnica e científica de divulgação da ABPv. As contribuições para a revista devem ser de caráter exclusivamente técnico e estão abertas aos sócios e aos profissionais da Engenharia Rodoviária, Ferroviária e Aeroportuária nacional e internacional.
2. A Revista pode também apresentar eventualmente matérias especiais redigidas pelo seu corpo técnico editorial e pela diretoria da ABPv como forma de divulgação de opiniões ou comentários considerados relevantes como “voz” da ABPv.
3. Os artigos e contribuições como nota técnica, inéditos, podem ser enviados em qualquer época do ano para serem publicados em uma das quatro edições anuais ou até no ano seguinte dependendo do número de matérias selecionadas.
4. Os trabalhos, sejam científicos, sejam técnicos ou de outra natureza encaminhados para eventual publicação, serão submetidos a avaliação de três profissionais que compõem o Comitê Técnico-Científico da Revista, escolhidos de acordo com o perfil do material a ser julgado. Aos avaliadores não será dado a conhecer os autores do artigo ou trabalho antes da avaliação e também é vedada a divulgação para os autores da identidade dos avaliadores.
5. Os avaliadores recebem da ABPv um questionário indicativo dos itens a serem avaliados em cada contribuição para Revista PAVIMENTAÇÃO, podendo sugerir três opções de encaminhamento:
 - (i) O trabalho é aceito para publicação;
 - (ii) O trabalho não é aceito para publicação e será então devolvido aos autores;
 - (iii) O trabalho poderá vir a ser aceito caso os autores concordem em fazer algumas modificações sugeridas por um ou mais avaliadores.
6. Cabe à Diretoria da ABPv julgar os casos omissos e autorizar a publicação de contribuições de caráter não técnico, eventualmente, em função dos assuntos abordados e da disponibilidade de espaço.
7. O resultado da avaliação de qualquer material encaminhado à Revista PAVIMENTAÇÃO será levado ao conhecimento dos autores dos mesmos informando o destino que será dado à sua contribuição que pode ser: publicação imediata no próximo número a ser lançado, publicação em número subsequente devido ao excesso de contribuições ou não publicação.
8. O Autor ou autores das contribuições aceitas para publicação devem concordar com a reprodução de seu material sem nenhum direito a qualquer custo de direitos autorais já que a ABPv é uma entidade sem fins lucrativos e a Revista PAVIMENTAÇÃO destina-se preferencialmente aos sócios e não será utilizada para venda com fins lucrativos.
9. As contribuições para a Revista PAVIMENTAÇÃO devem ser encaminhadas de preferência por meio digital, podendo estar em formato PDF somente na fase de julgamento pelo Comitê. Os originais deverão ser produzidos em programa Microsoft Word. As figuras deverão ser fornecidas em separado, com resolução mínima de 300dpi. Caso a foto seja digital, a resolução deverá ser de no mínimo de 3.2 mega pixels. Não sendo as fotos do(s) autor(es), este(s) será(ão) responsável(eis) por declarar os créditos das mesmas e obter a autorização para publicação. Nos gráficos, evitar utilizar cores e dar preferência a símbolos que possam distinguir claramente as informações relevantes da figura. Nas tabelas não devem ser utilizadas formatações, bordas ou sombreamentos. As tabelas devem ser bem nítidas, identificadas com numeração própria e título. As equações podem ser criadas por um aplicativo externo, podem ser feitas com fontes de símbolos ou com o editor de equações do próprio programa usado para o trabalho. Em qualquer caso, elas devem ser numeradas consecutivamente ao longo do documento. As unidades deverão ser expressas no SI.
10. As contribuições podem ser de no mínimo 2 e de no máximo 15 páginas em formato A4, editoradas em fonte Times New Roman, tamanho 12, espaço simples. Número maior de páginas poderá ser aceito em casos excepcionais a critério da Editoria da Revista.
11. Os textos deverão ser escritos em português, em linguagem adequada e correta, sendo de responsabilidade do(s) autor(res) a revisão ortográfica, as referências bibliográficas devem seguir o padrão ABNT, tipo por citação de sobrenome e ano (ex. MATHEUS, 1994) e preferencialmente os artigos devem apresentar um resumo de 200 a 300 palavras, resumo em inglês de igual conteúdo do resumo em português (ABSTRACT) e indicar de 3 a 5 palavras-chaves. Artigos em outros idiomas podem eventualmente serem aceitos a critério da Editoria da revista.
12. Estas especificações podem ser eventualmente revistas a critério da Editoria da Revista e da Diretoria da ABPv a qualquer tempo, cabendo aos artigos e contribuições já submetidos se adequarem seguindo as regras existentes à época da submissão do seu material.