

Estudos Geotécnicos de Corte e Subleito de Estrada Implantada e a ser implantada - Parte I

Douglas Fadiul Villibors e Driely Mariane Lancarovici Alves

EXPEDIENTE

REVISTA PAVIMENTAÇÃO

Ano XIII • Nº 49 - Jul - Set 2018

ISSN 1809 - 1865

Rua Miguel Couto, 105 • Sobrelójas 204 e 205

CEP 20070-030 • Rio de Janeiro • RJ

Tel • (21) 2233-2020 | 2263-5794 Fax • (21) 2233-0709

CONSELHO EDITORIAL

Diretoria da ABPv

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 • Eng. Eduardo Alberto Ricci

Vice-Presidente • Eng. José Pedro dos S. Vieira Costa

Diretor Financeiro • Eng. Leonardo Santana Cavalcanti

Diretor Administrativo • Eng. Fernando Augusto Junior

Diretora Técnica • Prof. Michéle Dal Tóe Casagrande

Diretor de Divulgação • Prof. Luiz Miguel de Miranda

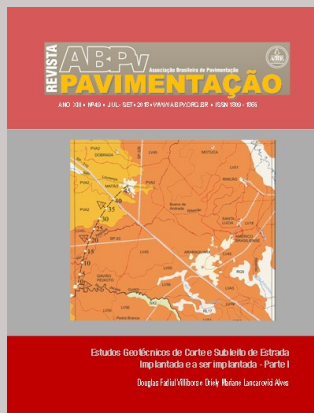
COMITÊ TÉCNICO-CIENTÍFICO

Eng. Alfredo Monteiro de Castro Neto • Eng. Antônio Fortunato Marcon • Eng. Armando Morilha Junior • Eng. Atahualpa Schmitz da S. Prego • Eng. Ben-Hur de Albuquerque e Silva • Eng. Carlos Yukio Suzuki • Eng. Cassio Eduardo Lima de Paiva • Eng. Consuelo Alves da Frota • Eng. Cristiano da Costa Moreira • Eng. Djalma Rocha A. M. Pereira • Eng. Douglas Fadul Villibor • Eng. Edinaldo Afonso M. de Mélo • Eng. Eduardo Alberto Ricci • Eng. Fernando Augusto Junior • Eng. Genésio Almeida da Silva • Arq. Gilda Collet Bruna • Eng. Glicério Trichês • Eng. Heitor Roberto Giampaglia • Eng. Jacques de Medina • Eng. João Vicente Fala-bella Fabrício • Eng. João Virgílio Merighi • Eng. Jorge Augusto Pereira Ceratti • Eng. José Pedro dos S. Vieira Costa • Eng. José Leomar Fernandes Junior • Eng. José Tadeu Balbo • Eng. José Vidal Nardi • Eng. Laura Maria Goretti da Motta • Eng. Leni F. M. Leite • Eng. Leto Momm • Eng. Liedi Legi B. Bernucci • Eng. Luciana Nogueira Dantas • Eng. Luiz Miguel de Miranda • Eng. Marcello Roberto Rangel Pestana • Eng. Márcio Muniz de Farias • Eng. Marcílio Augusto Neves • Eng. Maria da Conceição M. Azevedo • Eng. Michéle Dal Toé Casagrande • Eng. Nilton de Souza Campelo • Eng. Paulo Romeu Assunção Gontijo • Eng. Pre-predigna D. E. Almeida da Silva • Eng. Rita Moura Fortes • Eng.º Rui José da Silva Nabais • Eng. Silvio Rodrigues Filho • Eng. Saul Birman • Eng. Valmir Bonfim • Eng. Walter Canales Sant'ana • Eng. Washington Pérez Nuñez.

Periodicidade • Trimestral



NOSSA CAPA



Regiões Tropicais

Envie sua foto para: abpv@abpv.org.br

SUMÁRIO

EDITORIAL 3

CADERNO DE TECNOLOGIA

ESTUDOS GEOTÉCNICOS PARA REGIÕES TROPICAIS – NOVAS CONSIDERAÇÕES 5

Douglas Fadul Villibor

Driely Mariane Lancarovic Alves

ARTIGO

CONSIDERAÇÕES SOBRE METODOLOGIAS PARA O DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CAMADA CIMENTADA 20

Gabriel Lima
Carlos Suzuki

EDITORIAL

A Associação Brasileira de Pavimentação apresenta o Caderno de Tecnologia e artigo técnico nesta 49ª edição, sendo eles:

ESTUDOS GEOTÉCNICOS PARA REGIÕES TROPICAIS – NOVAS CONSIDERAÇÕES

PARTE I:

ESTUDOS GEOTÉCNICOS DE CORTE E SUBLEITO DE ESTRADA IMPLANTADA E A SER IMPLANTADA

Douglas Fadul Villibor

Diretor Científico e de Pesquisa da Egis Brasil

Driely Mariane Lancarovici Alves

Engenheira Civil da área Científica e de Pesquisa da Egis Brasil

CONSIDERAÇÕES SOBRE METODOLOGIAS PARA O DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CAMADA CIMENTADA

Gabriel Lima

Carlos Suzuki

O envio de artigos, notas técnicas e temas para o Caderno de Tecnologia são aguardados para avaliação e possível publicação.

A Revista Pavimentação é um instrumento disseminador de informações concernentes ao desenvolvimento do nosso país. Participe através do link de submissão que se encontra no site www.abpv.org.br.

Conselho Editorial



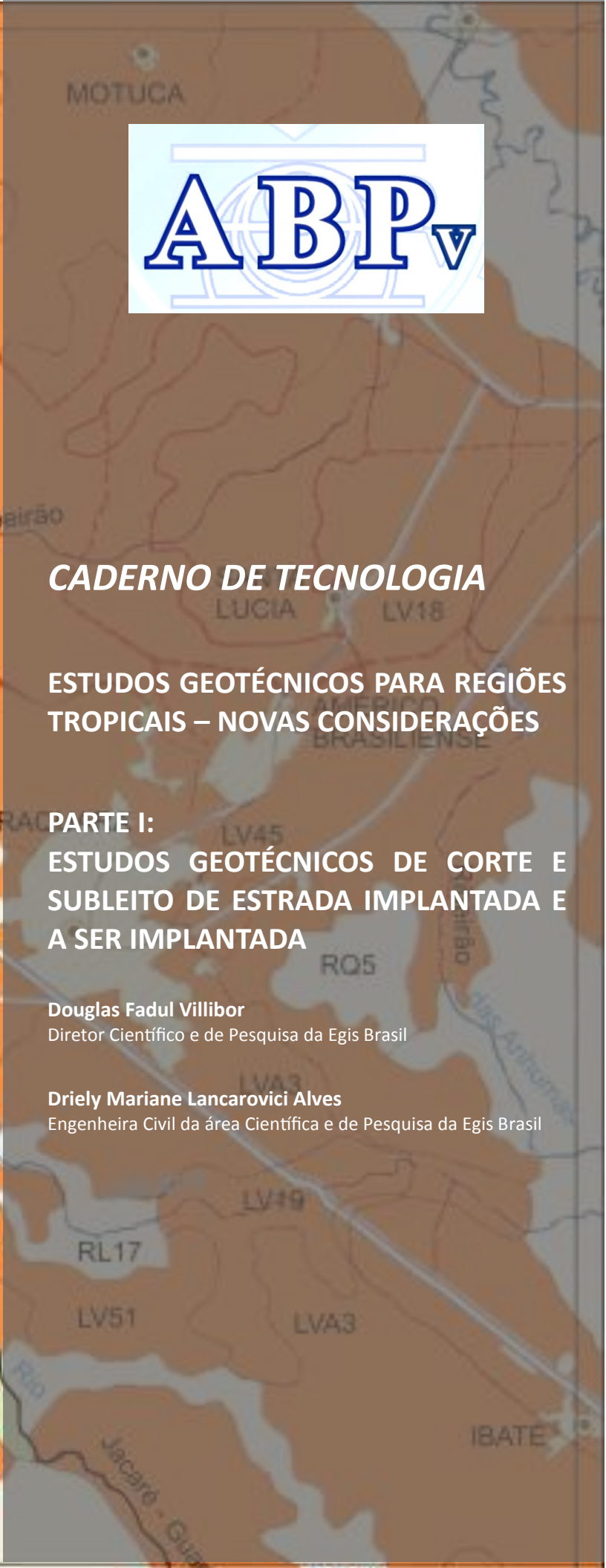
CADERNO DE TECNOLOGIA

ESTUDOS GEOTÉCNICOS PARA REGIÕES TROPICAIS – NOVAS CONSIDERAÇÕES

PARTE I: ESTUDOS GEOTÉCNICOS DE CORTE E SUBLEITO DE ESTRADA IMPLANTADA E A SER IMPLANTADA

Douglas Fadul Villibor
Diretor Científico e de Pesquisa da Egis Brasil

Driely Mariane Lancaróvici Alves
Engenheira Civil da área Científica e de Pesquisa da Egis Brasil



ESTUDOS GEOTÉCNICOS PARA REGIÕES TROPICAIS – NOVAS CONSIDERAÇÕES

PARTE I: ESTUDOS GEOTÉCNICOS DE CORTE E SUBLEITO DE ESTRADA IMPLANTADA E A SER IMPLANTADA

Douglas Fadul Villibor

Diretor Científico e de Pesquisa da Egis Brasil

Driely Mariane Lancarovici Alves

Engenheira Civil da área Científica e de Pesquisa da Egis Brasil

Os autores agradecem à ABPv pela oportunidade de divulgação deste trabalho técnico e à Egis-Brasil, que possibilitou sua elaboração como contribuição ao desenvolvimento tecnológico do estudo de solos tropicais na área de infraestrutura no Brasil.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho abrange os estudos geotécnicos de subleitos, cortes e ocorrências para jazidas, para dimensionamento de pavimentos flexíveis. No Brasil, esses estudos são realizados por meio de procedimentos tradicionais, desenvolvidos para solos de regiões não tropicais. Exemplos disso são as recomendações preconizadas no *Manual de Pavimentação* (DNIT, 2006), adotadas por diversos órgãos rodoviários do Brasil.

Um dos maiores progressos nesses estudos relaciona-se à obrigatoriedade da execução da determinação da capacidade de suporte do solo (CBR), introduzida no Brasil em 1978 pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, antigo DNER). Esse procedimento utiliza a classificação e a caracterização de solos por meio de suas propriedades índices (granulometria, LL, IP e IG). No entanto, esse procedimento é inadequado para esse fim, pois, não permitem estimar, corretamente, as propriedades dos solos tropicais que ocorrem no Brasil, como os lateríticos e os saprolíticos, de origens genéticas diferentes.

Em 1980, Nogami e Villibor propuseram um novo procedimento para o estudo geotécnico dos solos finos, por meio da Sistemática MCT, fundamentada nas peculiaridades das condições ambientais tropicais e nas características de seus solos. Esta sistemática foi adotada pelo DER-SP (Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo) a partir de 1988, contemplando em seu método de dimensionamento IP-DE-P00/001 em 2006.

A fase de estudos geotécnicos é uma das mais importantes no dimensionamento de pavimentos e deve ser conduzida por geotécnicos com experiência no estudo de solos em regiões tropicais. Se não for realizada corretamente, com certeza, conduzirá a projetos de pavimentos deficientes e/ou onerosos. Além disso, este estudo por meio das sondagens fornece subsídios para indicar os locais em que ocorre nível d'água próximo à superfície do subleito, onde há necessidade de seu rebaixamento, por meio do projeto de drenagem profunda.

Neste trabalho é proposto o estudo geotécnico do subleito por meio da Sistemática MCT, para solo de granulação fina e grossa, sendo este último complementado pelos ensaios tradicionais de granulometria e CBR. Serão estudadas investigações geotécnicas restritas às camadas de solos que apresentem textura de, no máximo, pedregulho e solos possíveis de serem amostrados por meio de perfuração a trado e/ou por abertura de cavas em solos friáveis. Os principais produtos deste estudo são:

- **Definição dos universos de solos do subleito:** Caracterização do subleito quanto à classificação MCT e G-MCT, suporte e expansão dos seus solos, tanto dos cortes como dos aterros, para dimensionamento do pavimento. Geralmente um bom projeto precisa levar em conta que o final de terraplenagem deve ser proveniente dos melhores cortes para subleito do aterro;
- **Qualificação de ocorrências para camadas do pavimento:** Estudo de ocorrências para a qualificação de jazidas para camadas de base, sub-base e reforço, além de ocorrências para o uso como caixa de empréstimo para camadas de substituição de solos impróprios do subleito.

Além do exposto, com as investigações geotécnicas, deverão ser cadastradas as ocorrências de materiais beneficiados, como pedreiras e areais nas proximidades do trecho, para uso em camadas de rolamento e em misturas com solos (solo agregado) para uso em base e sub-base.

Os dados geotécnicos obtidos em campo e laboratório permitem elaborar o traçado do perfil geotécnico das camadas de solo, com suas propriedades, indicando os diversos universos de solos que ocorrem no segmento estudado, caracterizados pela classificação MCT G-MCT e pelos seus valores estatísticos de suporte e expansão.

Esses estudos são adequados para rodovias de até tráfego meio pesado, caracterizado por $N < 5 \times 10^6$ solicitações do eixo padrão simples de 8,2 t. Para tráfego elevado, estes estudos geotécnicos devem ser ampliados com a obtenção de outras propriedades de interesse, em especial, pela determinação do módulo de resiliência do subleito e das camadas de solos preconizados no estudo de jazidas ou materiais granulares.

Não serão tratados aqui os estudos geotécnicos ligados a fundação de aterros, estabilização de taludes, estudo de jazidas como areais e pedreiras (fonte de material pétreo), assim como materiais granulares saprolíticos, para camadas do pavimento. Mais detalhes sobre estes estudos podem ser obtidos por meio do *Manual de Implantação Básica de Rodovia* (DNIT, 2010).

ESTUDO DO SUBLEITO

O subleito é o terreno de fundação do pavimento, estudado geralmente até 1,5 m de profundidade. Os estudos abrangem rodovias já implantadas e a ser implantadas, sendo divididos em duas fases:

- **Fase Preliminar:** Obtenção de dados geotécnicos existentes de cortes e subleitos, a fim de orientar a programação dos estudos da Fase Básica;
- **Fase Básica:** Execução do estudo geotécnico detalhado, que permite o projeto de dimensionamento e de drenagem do pavimento.

Esta fase engloba os serviços de levantamento de campo, ensaios laboratoriais e elaboração dos perfis geotécnicos das camadas dos solos com suas propriedades de interesse.

FASE PRELIMINAR

Tanto para as estradas já implantadas e a ser implantadas, esta fase consiste na obtenção de dados do solo da região, na faixa de interesse, por meio das informações quanto aos dados preexistentes, geológicos e pedológicos do local. Para mais detalhes sobre a obtenção dos dados pedológicos e geológicos, recomenda-se a leitura de Villibor e Nogami (1995 e 2009) e Nogami (2005).

Dados Preexistentes

São os dados provenientes de projetos anteriores, obtidos por órgãos como DER, DNIT, entre outros. Tem-se como exemplo os dados obtidos do projeto geotécnico de terraplenagem de estradas já implantadas.

Dados Geológicos

São os dados obtidos por meio de mapas geológicos, destacando-se o Mapa Geológico RADAMBRASIL (1983). No caso de implantação de estradas, esses dados são fundamentais, pois possibilitam:

- Inferir os solos de alterações ocorrentes, de acordo com a rocha matriz presente a elas associadas. Por exemplo, em regiões com presença de rocha de granito, espera-se encontrar solos saprolíticos dos grupos da MCT: NS', NA ou NG', provenientes de sua alteração;
- Verificar a ocorrência de recobrimentos sedimentares, não consolidados, que podem pertencer à classe de solos de comportamento laterítico.

Dados Pedológicos

Pela importância dos dados pedológicos na Fase Preliminar, acrescida da pouca divulgação de sua associação com a sistemática MCT, serão apresentados alguns aspectos de maior relevância para esse fim.

Esses dados são disponibilizados em mapas pedológicos, desenvolvidos para orientar o planejamento do uso do solo tanto para fins agro-silvo-pastoris como geotécnicos. Ainda, para o estudo geotécnico de solos tropicais, os dados pedológicos também auxiliam na previsão de ocorrências de solos lateríticos, além de outras propriedades.

No Brasil tem-se utilizado o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (1999), que foi a base da elaboração do mapa pedológico do Estado de São Paulo, em 1999, pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Os levantamentos pedológicos fornecem informações, sobre os atributos dos solos superficiais, até 2,0 m de profundidade da superfície do terreno, englobando principalmente, os horizontes A e B. Na Figura 1 é apresentado um perfil onde o horizonte A ocorre solo com matéria orgânica e raízes, sendo o B de solo de caráter laterítico.



Figura 1- perfil de solo com horizontes A e B.
 FONTE: NUNES, J. O. R. Org. (2010).

Essas ocorrências, constituídas de solos não consolidados, comumente apresentam grande uniformidade ao longo de sua profundidade. Por exemplo, é comum que as ocorrências de solos tropicais, em especial os lateríticos, apresentem camadas uniformes e de espessuras da ordem de 5,0 m, provenientes de sua formação.

Os atributos pedológicos das ocorrências de solos, tais como sua classe pedológica, cor, granulometria, espessura, plasticidade, permitem estimar a Classificação MCT e outras propriedades de interesse, fornecendo subsídios para um planejamento adequado para a Fase Básica dos estudos. A seguir são apresentados alguns atributos pedológicos das ocorrências de solos:

Classe Pedológica: É o atributo de maior relevância para a programação do estudo geotécnico preliminar, pois indica o caráter genético do solo. A fração fina da amostra de solo ($\phi < 2,0$ mm) é correlacionável com a classificação MCT e suas propriedades, permitindo, quase sempre, inferir se o solo pertence à classe L ou N. Na Tabela 1 são apresentadas, sinteticamente, as classes pedológicas mais promissoras quanto ao seu comportamento laterítico, segundo a classificação MCT.

TABELA 1 - ORIENTAÇÃO PRELIMINAR DO CARÁTER LATERÍTICO DA OCORRÊNCIA

Classe pedológica:	Latossolos	Argilossolos	Neossolos
	LV e LVA	PVA	RQ
Caráter laterítico:	Mais promissoras	Promissoras	Menos promissoras

Dentro dos latossolos ocorrem diversas unidades de mapeamento constituídas de variedades de solos de granulometria de textura média a arenosa das classes LV (latossolo vermelho) e LVA (latossolo vermelho-amarelo). Estas unidades são as mais promissoras para seu aproveitamento como ocorrência de solo arenoso fino laterítico (SAFL). As unidades de mapeamento da classe PVA (argilossolo vermelho-amarelo), das texturas acima, são as mais promissoras da ordem dos argilossolos para esse fim.

Villibor e Nogami (2009), com dados do laboratório do DER-SP, associaram os solos das classes pedológicas com a classificação e as propriedades mecânicas e hídricas, obtidas pela MCT, em amostra utilizadas em camadas de pavimentos. O estudo das propriedades abrangeu as ocorrências da Região Central do Estado de São Paulo, sendo 97% das amostras coletadas pertencentes às classes LV e PVA.

Quanto à Classificação MCT, todas as amostras ensaiadas apresentaram comportamento laterítico e granulometria variando desde argilosos até arenosos, conforme indicado na Figura 2.

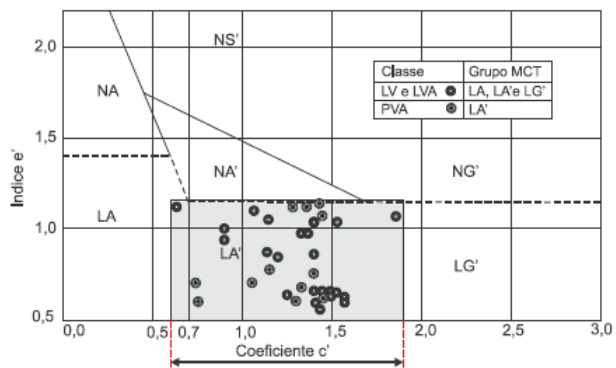


Figura 2- Posição das amostras de solos das Classes LV, LVA (23 amostras) e PVA (12 amostras). FONTE: VILLIBOR E NOGAMI (2009).

Os valores das propriedades mecânicas e hídricas, obtidas pela MCT, possibilitaram a elaboração de “Famílias de Histogramas” para os solos coletados pertencentes às classes pedológicas citadas. Na Figura 3 são apresentados os histogramas das propriedades de Mini-CBR, expansão e contração. Os dados obtidos mostram que as informações pedológicas constituem uma orientação muito confiável para estudo da fase preliminar.

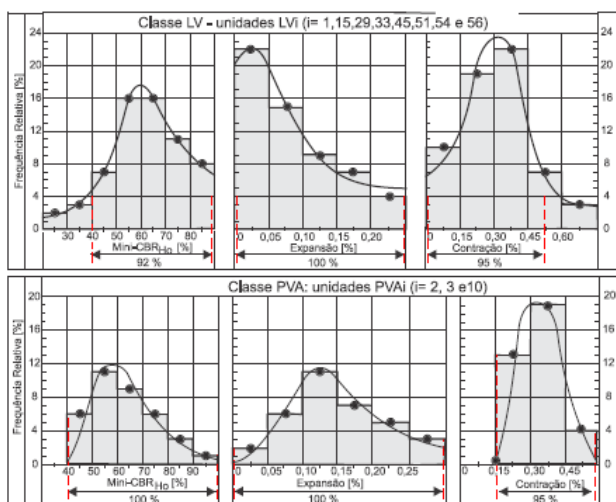


Figura 3- Histogramas das propriedades obtidas das Classes LV e PVA. FONTE: VILLIBOR E NOGAMI (2009).

Como exemplo da utilização dos dados pedológicos para previsão das propriedades do solo, é apresentado na Figura 4 o Mapa Pedológico e o traçado de uma estrada a ser implantada (entre estacas ST-0 e ST-45), na região de Araraquara-SP. Além disso, são indicadas três ocorrências para estudo de jazidas (J1, J2 e J3). Observa-se ao longo do traçado da estrada a ocorrência das unidades pedológicas LV55, LV45 e PVA2, de textura arenosa a média. Segundo as correlações referidas indicadas nas Figuras 2 e 3, estas unidades pedológicas são promissoras quanto ao comportamento laterítico da MCT.

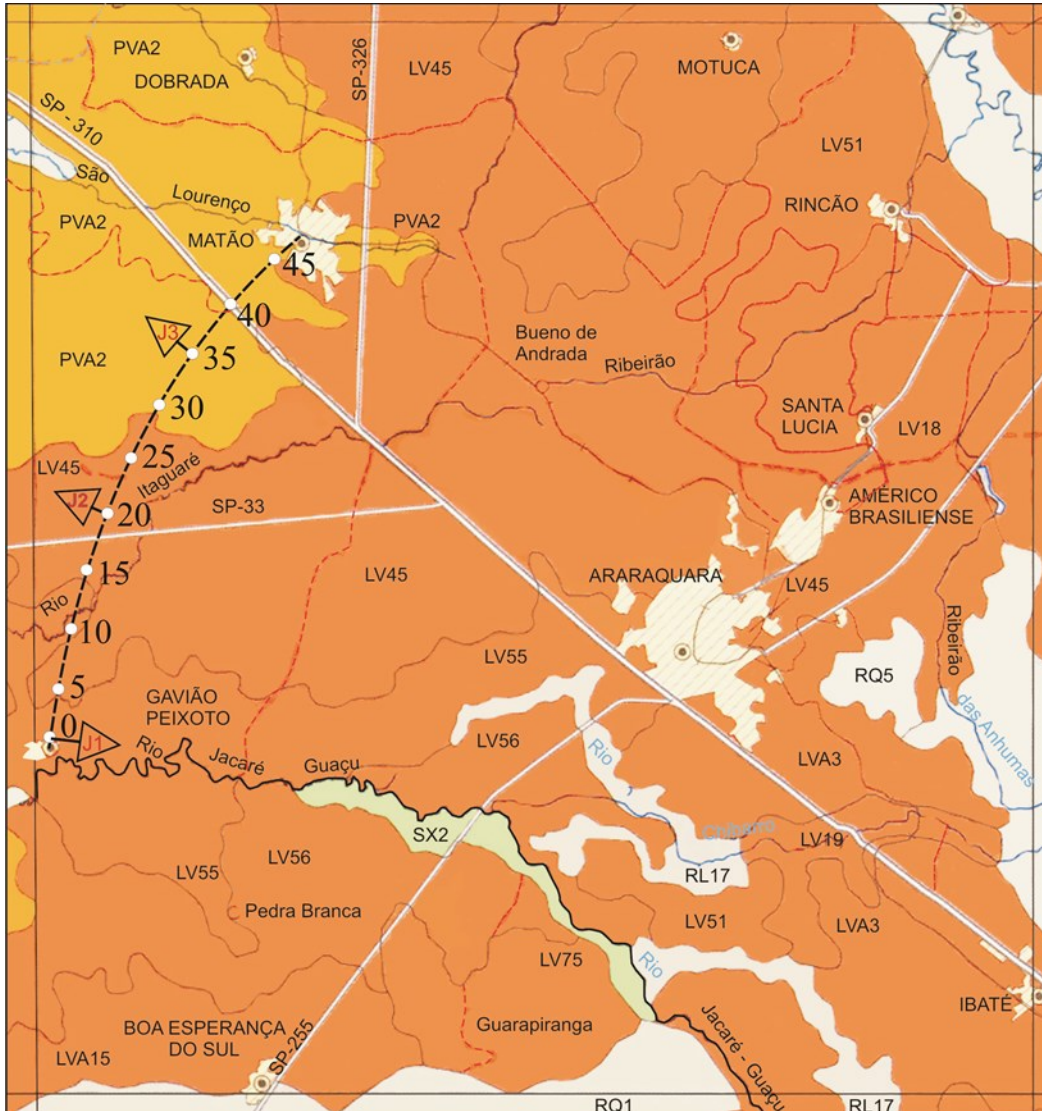


Figura 4 - Mapa Pedológico – Região de Araraquara/SP. Escala do original 1:500.000. FONTE: OLNEIRA (1999)

Cor: As áreas que apresentam as cores vermelha, amarela, marrom e alaranjada, são indicativas de solos da classe L; já as esbranquiçadas e/ou variegadas, da classe N.

Granulometria (ou textura): Os solos lateríticos podem ocorrer com as seguintes granulometrias:

Arenosa: aproximadamente > 70% de fração areia e < 15% de fração argila;

Média: aproximadamente < 35% de fração argila, com exclusão da arenosa;

Argilosa: aproximadamente > 35% de fração argila;

Os limites granulométricos adotados são:

Areia: 0,05 a 2,0 mm de diâmetro;

Silte: 0,002 a 0,05 mm de diâmetro;

Argila: < 0,002 mm de diâmetro.

Ressalta-se que esta classificação textural não coincide com a granulométrica utilizada pela MCT.

Espessura e plasticidade: As camadas de solos lateríticos podem ocorrer em grandes espessuras, sendo comuns camadas superiores a 5,0 m, adequadas para uso como jazidas de solos.

Quanto à sua plasticidade estes solos abrangem, desde solos sem coesão, portanto com baixa plasticidade (areias lateríticas), até solos com elevada coesão, como os solos de alta plasticidade (argilas lateríticas).

Inspeção Preliminar

A inspeção preliminar de campo, realizada por geotécnico especializado, permite a obtenção de informações sobre a ocorrência de solos lateríticos e saprolíticos, fundamentais nos estudos geotécnicos, em projetos de pavimentação em regiões tropicais. Infelizmente, esta inspeção não é usual, com exceção em projetos geotécnicos para grandes obras viárias.

Estrada implantada

Essa inspeção é de suma importância para o estudo geotécnico que consiste na observação dos solos dos taludes de corte e do leito da estrada. Esse fato é comum, em especial, em estradas vicinais que necessitam de melhoramentos, juntamente com sua pavimentação, pelo aumento do volume de tráfego causado pelo desenvolvimento da região.

Antes do início da sondagem, o geotécnico deverá, sempre que possível, observar e anotar no boletim de sondagem os dados visuais do aspecto do solo do leito da estrada e das camadas de solo dos taludes existentes, com ênfase nos seguintes aspectos:

- Aspecto do leito da estrada: um diagnóstico de suma importância é verificar se o leito carroçável apresenta em sua superfície blocos resistentes ao rolamento, mesmo em períodos de chuva.

A presença de blocos avermelhados e resistentes ao rolamento é um bom indício da ocorrência de solo laterítico ao longo da estrada. Blocos de dimensões superficiais da ordem de 40 x 40 cm, com largura das trincas de pequena espessura, geralmente, são solos do grupo LA' (laterítico areno-argiloso), ilustrado na Figura 5.

Quando há presença de blocos de 20 x 20 cm com trincas de grandes espessuras, preenchidas com solo desprendido da superfície, é de se esperar um solo do grupo LG' (laterítico argiloso), vide Figura 6.



Figura 5- Aspecto do leito de uma estrada implantada constituída de solo LA'

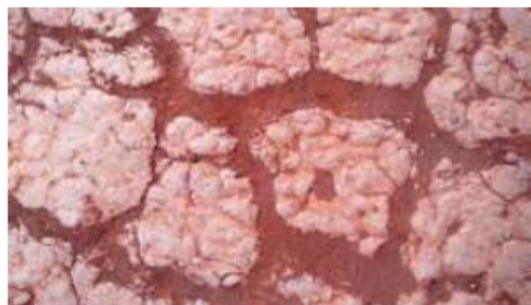


Figura 6- Aspecto do leito de uma estrada implantada constituída de solo LG'

No caso de ocorrência de camadas de areias soltas de cor avermelhada na superfície da estrada, sem a presença de trincas, indica provavelmente que o solo é uma areia laterítica.

- Presença da linha de seixos em taludes de outras estradas próximas: Esta linha é constituída de uma camada com agregados de pedregulho (quartzo, laterita, etc.) de espessura variável. A camada acima da linha, geralmente pertence à classe L, e a inferior, à classe N, conforme apresentado na Figura 7.



Figura 7 – Corte com presença de linha de séxos

- **Macrofábrica e cor das camadas de solo dos taludes:** A macrofábrica consiste na disposição espacial do solo quanto aos seus constituintes sólidos, vazios e de suas superfícies de descontinuidade, observáveis a olho nu. Taludes com solos de macrofábrica homogênea e cores vermelha, amarela, marrom e alaranjada indicam solos lateríticos (Figura 8). Os solos dos taludes de classe N apresentam macrofábrica heterogênea e cores cinza, esbranquiçada, rósea e manchada (vide Figura 9).



Figura 8 - Macroestrutura típica de um solo classe L



Figura 9 - Macroestrutura típica de um solo classe N

Nogami (1970) apresenta em detalhes a classificação de macrofábrica de solo tropicais, de suma importância para o entendimento do assunto; veja também Nogami e Villibor (1995).

- **Ocorrência de erosão e trincamento:** Em taludes de corte, em seu processo executivo, a camada superficial sofre uma compactação (da ordem de 30 cm). Muitas vezes, nas condições ambientais tropicais, essa camada, quando laterítica, sofre uma contração, produzindo no talude, trincamentos em blocos, sem erosão em sua superfície.

Quando no talude não ocorrem as características mencionadas, mas sim uma erosão intensa, geralmente, o solo constituinte apresenta comportamento não laterítico. Na Figura 10 é ilustrado um perfil com presença de solo laterítico (camada superior) e não laterítico (camada inferior).

As observações preliminares de campo, normalmente permitem a verificação do comportamento laterítico ou não do subleito. Também, auxiliam na identificação de áreas de alargamento de cortes, a serem estudadas para uso como jazidas e caixas de empréstimo.



Figura 10- Talude com presença de camadas de solo laterítico (superior) e não laterítico (inferior)

Estrada a ser implantada

Sempre que houver vias secundárias, próximas ao traçado da estrada a ser implantada, o geotécnico deverá realizar uma inspeção preliminar de campo, utilizando os conceitos já mencionados anteriormente, para a elaboração do estudo dessa estrada.

Essas observações de campo também permitem o melhor conhecimento dos solos da região, subsidiando o estudo de ocorrências de solos de comportamento laterítico, para uso como jazidas e caixas de empréstimos. Estas, quando necessárias e economicamente viáveis, podem ser usadas no projeto geotécnico da estrada a ser implantada.

FASE BÁSICA

Após o planejamento proposto na Fase Preliminar, realizam-se os serviços da Fase Básica para a execução dos estudos geotécnicos definitivos. Essa fase é dividida em duas: rodovias implantadas e a ser implantadas.

Serviços de Escritório

Visa ao planejamento dos serviços de sondagem, que abrange desde a coleta de amostras das camadas de solos, até a determinação de suas características naturais e nível d'água, quando presente, a fim de permitir a realização de estudos geotécnicos laboratoriais. Entendem-se por camadas de solos como massas de solos contínuas e homogêneas, do ponto de vista da classificação geotécnica, aqui adotada pela MCT.

O planejamento da sondagem é obtido a partir do estudo da Fase Preliminar, ao longo do traçado, realizado pelo geotécnico. Com essas informações, o mesmo emitirá uma nota de serviço de sondagem (Tabela 2), para a equipe de campo, com as seguintes informações:

- Indicação dos tipos de equipamentos a serem utilizados, definidos em função da profundidade e do tipo do material a ser sondado, previsto na Fase Preliminar;
- Espaçamento sistemático dos furos de sondagem, atendendo basicamente às recomendações do *Manual de Implantação Básica de Rodovia* (DNIT, 2010), a saber:
 - Longitudinalmente, de preferência a cada 100 m, com no máximo 200 m entre furos e afastamento em relação ao eixo de 3,5 m, alternadamente eixo (E), lado esquerdo (LE), eixo (E) e lado direito (LD). Os furos de sondagem a trado são designados pela sigla ST e pelo número da estaca, seguido das letras E, LE ou LD.
- Para traçado com grande variação de tipos de solo, o espaçamento longitudinal poderá ser reduzido para 50 m, mantido o afastamento referido;
- Profundidade de cada furo, obtida entre as cotas do terreno e do greide de terraplenagem, acrescida de 1,5 m para caracterização do subleito e verificação do nível d'água;
- Estimativa dos volumes de amostras a serem coletados nos furos.

Uma das providências fundamentais para a definição do espaçamento longitudinal entre os furos de sondagem é proveniente da análise do geotécnico quanto à homogeneidade ou heterogeneidade do solo do subleito ou corte. A partir das informações no boletim de campo, caso verifique que o solo ao longo do traçado apresente classificação de campo homogênea, o geotécnico poderá diminuir a quantidade de ensaios. No entanto, caso seja constatado o contrário, poderá complementar a sondagem entre as executadas.

Estrada Implantada: Estudo do Subleito

Até meados da década de 70 a camada de solo representativa do subleito era estudada até uma profundidade de 0,60 m. Segundo Souza (1976), esta profundidade era discutível, pois há uma regra da Mecânica de Solos que preconiza que o subleito deve suportar 10% das tensões da carga externa (4,1 tf carga por roda dupla), resultando assim uma profundidade teórica de 1,75 m. No entanto, adotou-se para estudo do subleito a espessura de 1,5 m, que representa 16% da tensão externa. Esta profundidade coincide com a adotada para verificação do nível d’água nos serviços de sondagens e também com a preconizada pelo DER/SP para o estudo do subleito.

Na Figura 11 é apresentado um exemplo de locação dos furos de uma estrada já implantada.

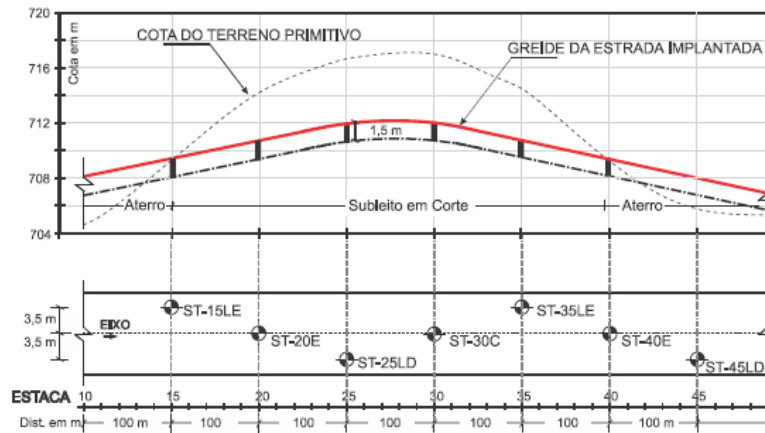


Figura 11- Locação dos furos de sondagem de um segmento de uma estrada implantada

Estrada a ser Implantada: Estudo do Corte e do Subleito

Neste caso, os serviços de campo realizados no estudo geotécnico são similares aos das rodovias implantadas, adaptando-se, entretanto os procedimentos para englobar o estudo dos cortes e do subleito.

O corte é o volume de solo escavado por equipamentos de terraplenagem, que compreende desde o terreno natural até a cota do greide de terraplenagem da estrada, escavado conforme projeto. O aterro é a camada de solo compactada, desde o terreno natural até o greide de terraplenagem do projeto, sendo esse solo proveniente de cortes ou caixas de empréstimo.

A sondagem deve ser executada em cada ponto de passagem (PP) de corte para aterro e um furo intermediário entre eles, em função de um corte simétrico ou assimétrico, conforme ilustrado na Figura 12 para cortes com extensão < 200 m e Figura 13 para os demais.

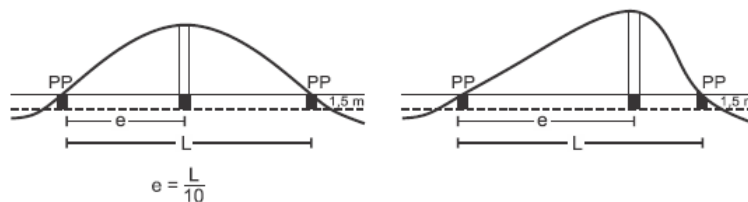


Figura 12- Espaçamento dos furos de sondagem em cortes com $L < 200 m$
 FONTE: PUBLICAÇÃO IPR – 742 (DNIT, 2010).

A profundidade a ser sondada, neste caso, deverá ser executada ao longo do corte até o greide de terraplenagem, para estudo de suas camadas, e prosseguir até 1,5 m abaixo, porém com a retirada de novas amostras para o estudo do subleito e a verificação do nível d’água, após 24 horas do término da sondagem.

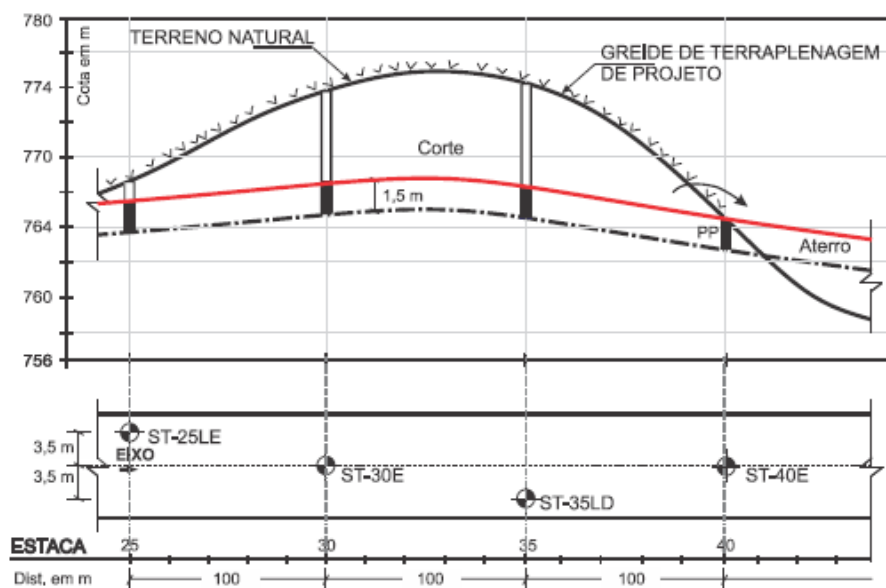


Figura 13- Localização dos furos de sondagem de um segmento de uma estrada a ser implantada

TABELA 2 – EXEMPLO DE NOTA DE SERVIÇO DE SONDAAGEM

Procedência: Rodovia...		Subtrecho: Est 15-45		Finalidade: Programação de sondagem de corte e subleito				
Estaca	Sondagem em Corte (m)				Subleito (m)			
	Cota Inicial	Cota Final	Profundidade	Motivo Paralisação	Cota Inicial	Cota Final	Profundidade	Motivo Paralisação
ST-25LE	766,5	765,5	1,0	cota final do furo	765,5	764,0	1,5	cota final do furo
ST-30E	771,5	766,0	5,5	cota final do furo	766,0	764,5	1,5	cota final do furo
ST-35LD	772	766,0	6,0	cota final do furo	766,0	764,5	1,5	cota final do furo
ST-40E	-	-	-	-	765,5 (PP)	764,0	1,5	cota final do furo
ST-50 + 15,0 m LE	-	-	-	-	763,5 (PP)	762,0	1,5	cota final do furo
ST-55E	771,5	765,0	6,5	cota final do furo	765,0	763,5	1,5	cota final do furo
ST-60LD	772	764,5	7,5	cota final do furo	764,5	763,0	1,5	cota final do furo
ST-65LE	-	-	-	-	763 (PP)	761,5	1,5	cota final do furo

Tipo de equipamento: Sondagem a Trado (ST) Sondador: João das Neves Data: 18/05/2017

Legenda: PP ponto de passagem de corte e aterro

Serviços de Campo

A) Sondagem

Pela sondagem, identificam-se os tipos de solos existentes ao longo do corte e subleito da estrada, por meio de sua resistência à perfuração, espessura das camadas, profundidade do nível d'água e ocorrência de rocha, quando existente. Para isto são utilizadas diversas técnicas, definidas em função da finalidade do estudo geotécnico.

Para o projeto de dimensionamento de pavimento, os tipos de sondagem têm os seguintes objetivos:

- Classificação expedita dos solos e amostragem para ensaios geotécnicos;
- Obtenção do tipo e da espessura de materiais de alteração de rocha ou rocha sã.

Tipos de equipamentos

Na Figura 14 estão apresentados os equipamentos mais comuns para atender aos objetivos referidos: trado cavadeira, trado torcido, trado caneco e trado holandês.

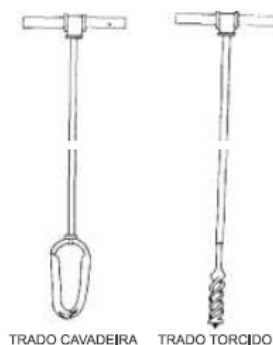


Figura 14 - Pinápais tipos de trados. FONTE: ABNT NBR 9603

Tipos de sondagem

Os tipos de sondagem são definidos em função da profundidade (x) e do tipo de material a ser sondado, a saber:

- Trado manual (cavadeira): para profundidade $x < 4$ m utilizado para a retirada de pequeno volume de amostra. Na impossibilidade da retirada de quantidade suficiente, devem ser executados poços de sondagem com pá e picareta, até a profundidade adequada para obter o volume necessário;
- Trado manual com tripé: para $4 < x < 10$ m, devem ser executados os primeiros 4 m com trado e o restante da sondagem com o mesmo equipamento, porém com o auxílio de tripé para apoio da haste;
- Poço: para $x < 4$ m, esta sondagem é executada por meio de escavação com pá e picareta, com área circular usualmente de diâmetro de 1,2 m, em geral, não é necessário o escoramento das paredes laterais. Para profundidades maiores, deve-se executar o escoramento por medida de segurança;
- Poço e trado manual: para profundidade $x > 10$ m, devem ser feitos os primeiros $(x - 10)$ m em sondagem a pá e picareta, e o complemento a trado;
- Percussão (SPT) e/ou rotativa: para qualquer profundidade, quando a sondagem tornar-se impenetrável a trado ou a pá e picareta, devem ser utilizados esses equipamentos para complementar a sondagem, até alcançar o subleito. Geralmente isto ocorrerá quando o material sondado for alteração de rocha ou rocha sã.

Quando for atingida uma camada compacta de rocha ou pedregulho, será indispensável obter amostras dessa camada para serem examinadas. Em geral, se os fragmentos obtidos forem constituídos de quartzo, pedregulho, concreção de limonita, trata-se apenas de uma camada de pequena espessura, que deverá portanto, ser perfurada com auxílio de barra-mina.

Quando uma sondagem a trado ou poço for impenetrável, antes de utilizar outro tipo de sondagem, devem ser feitos três furos adicionais equidistantes no raio de 2,0 m em relação à sondagem inicial. Esse procedimento visa identificar a ocorrência de matacão, bloco de rocha ou laje.

B) Amostragem

Consiste na separação dos solos obtidos em sondagens para classificação de campo baseada em exames tátil-visuais, cujas finalidades são a apresentação de perfis geotécnicos e a coleta de amostras representativas das camadas para ensaios laboratoriais.

À medida que as características do solo, principalmente cor e textura, permitirem a diferenciação das camadas sondadas, as amostras devem ser depositadas, ordenadamente (sentido horário ou anti-horário), em uma lona colocada próxima à boca do furo, conforme Figura 15.



Figura 15 – Amostras de camadas de solos retiradas de um furo

Em um mesmo furo, as amostras do subleito devem ser retiradas, separadamente, das amostras do corte, conforme boletim de sondagem (Tabela 3).

Classificação tátil-visual

Esta é uma classificação expedita realizada durante a sondagem, que tem como objetivo classificar, preliminarmente, as camadas constituintes de um perfil de uma ocorrência de solo, até a profundidade prospectada. Esta classificação consiste no processo de caracterização do solo por meio do exame tátil-visual, observando as características do solo principalmente quanto à sua textura, cor, plasticidade, compacidade, consistência, particularidades da constituição e formação do solo, laterítico ou não.

Textura: A classificação tátil-visual inicia-se pela sua textura, procurando-se classificá-las nas duas grandes divisões, solos grossos e solos finos.

Os solos na natureza são quase sempre constituídos pela mistura, em proporções variadas, das frações argila, silte, areia e pedregulho, que para os estudos geotécnicos são definidos como:

- Pedregulho: fração de solo que passa na peneira 76 mm e é retida na peneira de 2,0 mm;
- Areia Grossa: fração do solo compreendida entre as peneiras de 2,0 mm (nº 10) e 0,42 mm (nº 40);
- Areia Fina: fração de solo compreendida entre as peneiras de 0,42 mm (nº 40) e 0,075 mm (nº 200);
- Silte e Argila: fração de solo que passa na peneira de 0,075 mm.

Pelo tato, a fração areia é identificada esfregando-se uma pequena amostra entre as mãos, pois apresenta um forte atrito interno e, quando secas ao ar, não tem coesão entre os grãos. Os siltes, quando secos ao ar, formam torrões facilmente desagregáveis, diferentemente das argilas.

A designação da textura deve ser descrita da seguinte forma, por exemplo: areia pouco argilosa, areia argilosa, silte arenoso, argila muito arenosa, etc.

Cor: Embora seja uma característica subjetiva, são utilizadas as seguintes designações: branco, cinza, preto, marrom, amarelo, vermelho, roxo, azul e verde, admitindo-se ainda as designações complementares, claro e escuro. Quando as amostras apresentarem mais do que duas cores, deve ser utilizado o termo variegado. Usualmente, em muitos órgãos rodoviários, utiliza-se a escala de cores de Munsell (1954) para esse fim.

As amostras de solos lateríticos secas ao ar, segundo a tabela de cores de Munsell, apresentam predominantemente cor vermelha (2,5YR 5/6, 4/8, 4/6, 5/8), destacado na Figura 16, e vermelho-amarelado (5YR 6/6 à 4/6). As variedades marrom (7,5YR 4/4, 4/5, 5/6, 5/8) são, sobretudo, frequentes na área de ocorrência do latossolo vermelho-amarelo.

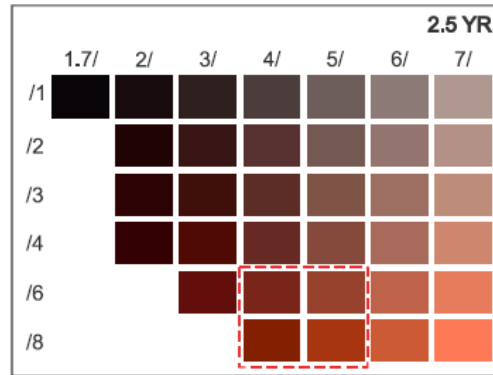


Figura 16 - Escala de cores de Munsell (1954) cores de 2.5 YR (Yellow Red). FONTE: MUNSELL, 1954.

As cores consideradas são determinadas no estado seco ao ar, podendo, caso isso não seja possível, ser discriminadas o estado úmido.

Em muitos casos, a cor permite identificar o solo; por exemplo, no caso de solo orgânico, as cores características são cinza escuro ou preto.

Plasticidade: Propriedade da fração fina do solo que avalia sua maior ou menor capacidade do solo de ser moldado, sob certas condições de umidade, sem variação do volume.

No campo, a plasticidade do solo pode ser verificada umedecendo-o quando necessário, moldando-se uma bolinha de solo da ordem de 2,0 cm de diâmetro; somente os solos plásticos permitem formar a bolinha, diferentemente das areias.

Compacidade: Propriedade física das areias expressa pelo índice de vazios em que elas se encontram, sendo designada pelos seguintes estados: muito fofa, fofa, média, compacta e muito compacta, que poderá ser estimada na perfuração.

Consistência: Propriedade dos solos que reflete as forças de coesão e de aderência, presentes nos solos em diferentes teores de umidade, sendo designada pelos seguintes estados: muito mole, mole, médio, rijo e duro. Pode ser medida pelo ensaio penetrométrico, por exemplo, no ensaio de Mini-CBR de campo ou penetrômetro sul-africano, que podem ser usados em sondagem de simples reconhecimento dos solos.

Particularidades da constituição: Indica a ocorrência de substâncias orgânicas visíveis (raízes, carvão, turfa, etc.), geralmente escuras e de odor característico, minerais pesados, micas, concreções lateríticas, rochas parcialmente intemperizadas e outros argilo-minerais, se possível, facilmente identificáveis na sondagem.

Formação do solo: Para classificação expedita, o geotécnico ou o sondador deverá indicar, sempre que possível, se o solo teve formação pedogenética pelo processo de laterização, designados solos lateríticos (solo L) ou por outros processos, aqui designados solos não lateríticos (solos N). As camadas de solo L são identificadas a partir das seguintes peculiaridades:

- O solo da camada é facilmente escavado, tendo em vista sua alta porosidade e baixa resistência *in natura*. Caso ocorra linha de seixos no perfil da sondagem, a camada sobrejacente a ela geralmente foi formada pelo processo de laterização (solo maduro) e seu solo apresenta-se nas cores: vermelho, amarelo, marrom e alaranjado;
- A amostra de solo representativa de sua camada é homogênea, não apresentando sinais de estrutura herdada da rocha de origem, assim como, ausência de mica;
- A fração de areia do solo é constituída, quase integralmente de quartzo, com grãos arredondados e/ou angulosos e com presença de uma película opaca que recobre parcialmente os grãos maiores, que lhe imprime uma coloração peculiar arroxeada, rósea ou amarelada.

Boletim de sondagem

Indica a finalidade do estudo e, para o furo de sondagem de cada estaca, os dados de localização, a posição e a espessura da amostra, a ocorrência de nível d'água e a descrição tátil-visual do solo das amostras. Na Tabela 3 está indicado um exemplo de boletim de sondagem preenchido.

TABELA 3 - EXEMPLO DE BOLETIM DE SONDAGEM

BOLETIM DE SONDAGEM A TRAVÉS									
Interessado: Departamento de Estradas		Subtrecho: Est 25-65		Finalidade: Estudo geotécnico de corte e subleito			Sondador: João das Neves		Data: 11/04/2015
Corte/ Subleito	Estaca	Furo	Amostra	Posição (m)		Espessura (m)	Nível d'água	Descrição do solo das amostras	
				De	Até				
Corte	25	ST-25LE	-	0,0	0,3	0,3	sem	Limpeza de solo superficial com presença de raízes	
Corte	25	ST-25LE	A ₁₋₂₅	0,3	1,0	0,7	sem	Solo arenoso vermelho laterítico com umidade natural (Hh)	
Subleito	25	ST-25LE	A ₂₋₂₅	1,0	2,2	1,2	sem	Solo arenoso vermelho laterítico com Hh	
Subleito	25	ST-25LE	-	2,2	2,3	0,1	sem	Linha de seixos	
Subleito	25	ST-25LE	A ₃₋₂₅	2,3	2,5	0,2	sem	Solo silto arenoso róseo com mica, não laterítico com Hh	
Término da Sondagem da Estaca 25									
Corte	30	ST-30E	-	0,0	0,3	0,3	sem	Limpeza de solo superficial com presença de raízes	
Corte	30	ST-30E	A ₁₋₃₀	0,3	2,0	1,7	sem	Solo arenoso vermelho laterítico com Hh	
Corte	30	ST-30E	A ₂₋₃₀	2,0	3,5	1,5	sem	Solo arenoso vermelho laterítico com Hh	
Corte	30	ST-30E	A ₃₋₃₀	3,5	5,5	2,0	sem	Solo silto arenoso róseo com mica, não laterítico com Hh	
Subleito	30	ST-30E	A ₄₋₃₀	5,5	7,0	1,5	sem	Solo silto arenoso róseo com mica, não laterítico com Hh	
Término da Sondagem da Estaca 30									
...									
...									
Subleito	65	ST-65LE	-	0,0	0,2	0,2	sem	Limpeza de solo superficial com presença de raízes	
Subleito	65	ST-65LE	A ₁₋₆₅	0,2	1,5	1,3	sem	Solo arenoso, vermelho, laterítico com umidade Hh	
Término da Sondagem da Estaca 65									

Cabe ressaltar a importância da indicação da provável gênese do solo da amostra, se laterítica ou não, pois ela está intimamente ligada a propriedades relevantes, com seus valores prováveis, que podem ser obtidos pela classificação MCT ou G-MCT de solos tropicais.

Para efeito de ilustração, apresenta-se na Figura 17 o perfil representativo dos furos ST-25LE, correspondente à estaca 25 lado esquerdo, com os dados do boletim de sondagem.

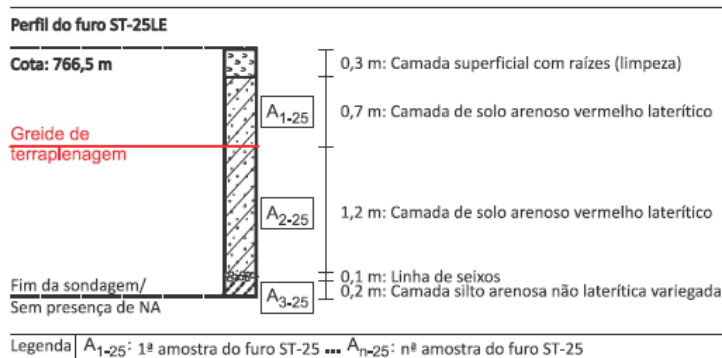


Figura 17- Perfil geotécnico de um furo sondado

Coleta de amostras

À medida que a sondagem e a classificação tátil-visual são executadas, são coletadas amostras deformadas, provenientes de cada camada, para a realização de ensaios de laboratório. As indeformadas devem ser retiradas em locais predeterminados.

■ Amostras deformadas

São obtidas a partir do quartearamento da totalidade do material sondado de cada camada de solo, provenientes do furo de sondagem.

A quantidade da amostra para camadas granulares é de 60 kg e para amostras de solos finos, 15 kg. Portanto é fundamental estimar a porcentagem de grãos de diâmetro máximo de 2,0 mm, visíveis a olho nu. A separação entre solos grossos e finos, além do tátil-visual, pode ser feita com auxílio de uma peneira de malha quadrada de abertura de 2,0 mm (nº 10), por peneiramento a seco ou lavagem. A coleta de amostras deformadas é apresentada na Figura 18.



Figura 18 - Coleta de amostra deformada

Cada amostra de determinado furo é numerada de acordo com as diferentes camadas de solo.

Cada amostra deve ser acondicionada convenientemente e provida de etiquetas com o número da estaca, do furo de sondagem e a profundidade de onde foi retirada.

■ Amostras indeformadas (quando indicada pelo geotécnico)

Estas diferem das amostras deformadas por manterem a estrutura original do solo *in situ*. Sua coleta é opcional, feita nos pontos de passagem, onde são realizadas as cavas, através do cilindro de cravação ou da caixa de forma prismática, para determinação da massa específica aparente natural, umidade natural e Mini-CBR, se necessário. Na abertura da cava obtêm-se, também, amostras deformadas para realização dos ensaios de caracterização, segundo a MCT.

Os cilindros de cravação são os mesmos utilizados nos ensaios da sistemática MCT (diâmetro = 50 mm e altura = 130 mm); para cada cava são obtidas quatro amostras, conforme disposição apresentada na Figura 19. O procedimento para obtenção de amostras indeformadas é padronizado pela NBR 9813:2016.

Para solos granulares a amostra indeformada é obtida em bloco de 30 x 30 x 30 cm, conforme preconizado pelo DNER-PRO 002/94, ilustrado na Figura 20. Esse método está limitado a pequenas profundidades, ao aparecimento do nível d'água e à instabilidade das paredes de escavação.

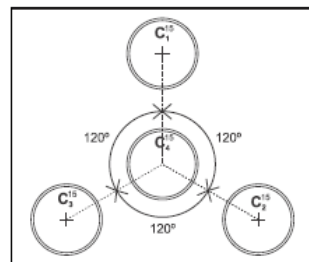


Figura 19- Disposição dos cilindros para retirada de amostras indeformadas

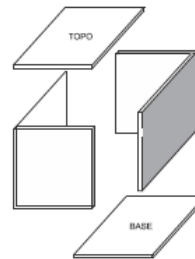


Figura 20 – Caixa para acondicionamento da amostra em bloco

As amostras devem ser acondicionadas, adequadamente, de modo que sua umidade da amostra não seja alterada. Na Figura 21, é apresentada uma amostra indeformada retirada *in situ*.



Figura 21- Retirada de uma amostra indeformada com cilindro Mini-CBR

C) Ensaios *in situ*

Os ensaios *in situ* são executados na base da cava para se obter as características do solo no seu estado natural, tanto no corte como no subleito, conforme abaixo:

- **Determinação da Massa Específica Aparente *in situ*, com emprego do frasco de areia (DNER-ME 092/94):** são realizados em cavas de área 80 x 80 cm na menor profundidade que represente o solo do corte, localizadas próximas aos furos de sondagem (vide Figura 22). A partir deste ensaio é determinada a massa específica aparente úmida do solo (ME_{am}). Este ensaio é ilustrado na Figura 22 e 23.



Figura 22- Abertura e preparo da base da cava



Figura 23- Ensaio de funil e areia

- **Determinação expedita do Mini-CBR por penetração dinâmica (DER M- 195/88):** este ensaio é opcional, a critério do geotécnico quando é diagnosticado na sondagem que o subleito é de alta resistência no estrado natural (solo de alteração). Neste ensaio obtém-se o índice de suporte Mini-CBR dinâmico (Mini-CBRd).

Serviços de Laboratório

A grande diferença dos estudos geotécnicos aqui propostos para regiões tropicais é a utilização dos ensaios da Sistemática MCT. Desta forma, não são empregados os ensaios da sistemática tradicional do Transportation Research Board (TRB), com os ensaios para determinação dos limites de consistência (LL e IP), para caracterização e classificação dos solos.

As amostras individuais coletadas durante a sondagem são encaminhadas ao laboratório para análise granulométrica e determinação do programa de ensaios a ser executado, para obtenção da classificação MCT ou G-MCT e propriedades mecânicas e hídricas.

Para descaracterizar a localização de uma amostra, muitos laboratórios quando a recebem para execução dos ensaios, substituem a indicação da estrada e localização da amostra por um número de registro para sua identificação.

O primeiro ensaio que as amostras são submetidas é a **Análise Granulométrica (por peneiramento simples)**, segundo NBR 7181/2016, utilizando as peneiras de abertura 25; 9,5; 4,8; 2,0; 0,42 e 0,075 mm. A partir do resultado desta análise, as amostras são submetidas aos ensaios do Programa I ou II conforme abaixo:

- **Programa I:** Execução de ensaios aplicados para solos de granulação fina, ou seja, solo que passa integralmente na peneira de 2,0 mm de abertura, podendo conter até 10% de fração retida na mesma, que deverá ser expurgada para a execução do estudo;
- **Programa II:** Execução de ensaios aplicados para solos de granulação grossa, neste caso definido como solo com presença de fração retida na peneira de 2,0 mm de abertura;

Ambos os programas tem a finalidade de definir os universos de solos do subleito, ao longo da rodovia, para fins de projeto de dimensionamento de pavimentos.

Na sua grande maioria, os solos do subleito são de granulação fina. A ocorrência de solos de granulação grossa em grandes extensões ao longo da estrada são pouco frequentes, ocorrendo no entanto em segmentos restritos quando originados de solos saprolíticos com resquícios granulares da rocha mãe.

Programa I: ensaios em amostras de solos de granulação fina

Neste programa utilizam-se os ensaios da Sistemática MCT para sua classificação e para a determinação das propriedades de compactação, suporte Mini-CBR e Expansão, conforme abaixo:

Para a classificação:

- **Ensaio de Compactação Mini-MCV (DER M-191/88):** Cada amostra é submetida ao ensaio Mini-MCV, com diferentes teores de umidade de compactação, resultando em 5 CPs;
- **Ensaio de Perda de Massa por Imersão (DER M-197/88):** Os 5 CPs obtidos no final da compactação Mini-MCV são submetidos a este ensaio.

A partir dos resultados destes ensaios, obtém-se a **classificação MCT** pelo **DER M-196/89**.

Para a obtenção das propriedades de compactação, índice de suporte e expansão:

- **Ensaio de Compactação Mini-Proctor (DER M-191/88):** Para cada amostra são compactados 5 CPs em diferentes teores de umidade, na **energia intermediária (EI)**, para solos dos grupos LA e LA' e, na **normal (EN)**, para os outros grupos da MCT. Por este método, determinam-se os parâmetros do solo: massa específica seca máxima ($MEAS_{máx}$) e umidade ótima (h_o);

Muitos trabalhos técnicos em diversas regiões do país mostram que para solos finos há uma ótima correlação dos valores obtidos pelo ensaio de Mini-Proctor e Proctor, tanto para EN e EI.

- **Ensaio Mini-CBR e Expansão (DER M-192/89):** Para cada amostra deve ser executado em 4 CPs com teores de umidade na energia indicada. Após imersos em água, com sobrecarga padrão, é medida a expansão do solo e, em sequência, a penetração para a obtenção do seu suporte. Os valores do índice de suporte e expansão na h_o servirão para definição do universo de solo.

Para solos finos com $\phi \leq 2,00$ mm, o DER-SP (M-191/88) e DNIT (DNER-ME 254/97) admitem a utilização do ensaio Mini-CBR em substituição ao tradicional para determinação do índice de suporte e expansão dos solos do subleito. Este procedimento vem sendo usado há mais de 30 anos com sucesso nas regiões sudeste, centro oeste e no nordeste na Bahia.

A recomendação da compactação e determinação do suporte do subleito de solos LA e LA' na EI conduz a um melhor desempenho do pavimento, devido:

- Facilidade de atingir a densidade correspondente a EI na execução de camadas com solos finos lateríticos arenosos, com uso de equipamentos modernos. Neste caso, geram camadas com estrutura íntegra e com alta resistência avaliada pelo Mini-CBR;
- Maior transmissão de energia para as camadas inferiores, quando da compactação do subleito; isto aumenta a densificação do solo *in natura*, em grandes profundidades, uma vez que são porosos e de baixo suporte, o que melhora significativamente o desempenho do pavimento.

A determinação das características resilientes do solo é opcional em função da indicação do geotécnico, conforme o ensaio:

- **Determinação do Módulo de Resiliência (DNIT: 134/2010-ME):** Para cada amostra, resultando no total de 20 kg, são compactados 3 CPs em diferentes teores de umidade, na energia EN ou EI. Neste método é determinado o módulo de resiliência (MR).

Este ensaio não é necessário para tráfego $N < 5.10^6$ solicitações do eixo padrão, cujos pavimentos são revestidos de tratamento superficial com até 3,5 cm de espessura.

Para tráfego com $N > 5.10^7$ solicitações, além do índice de suporte, a propriedade resiliente do subleito e das camadas do pavimento é importante para avaliar a vida de fadiga das camadas coesivas.

Para subleitos constituídos de solos passando 100% na peneira 2,0 mm, o DER IP-DE-P00-001 recomenda as seguintes expressões com uso do índice de suporte (IS) para estimar o módulo de resiliência:

Solos LA' e LG':

$$MR = 22 \cdot IS^{0,8} \quad (1)$$

Onde:

Solos NS' e NG':

$$MR = 18 \cdot IS^{0,64} \quad (2)$$

MR: Módulo de resiliência (MPa);

IS: Índice de suporte Califórnia (%).

Solos arenosos pouco ou não coesivos:

$$MR = 14 \cdot IS^{0,7} \quad (3)$$

Programa II: ensaios em amostras de solo de granulação grossa

O programa utiliza-se de um elenco de ensaios para a classificação G-MCT e para determinação de propriedades de compactação (Proctor), suporte CBR e Expansão. Para tanto é desenvolvido em duas séries:

- **1ª Série:** ensaios para o estudo da fração fina do solo, que passa na peneira de 2,0 mm;
- **2ª Série:** ensaios para o estudo do solo integral;

Para os ensaios a amostra deverá ser quarteada e fracionada, sendo retirada $\frac{1}{4}$ da amostra para o estudo da 1ª Série e o restante para o estudo da 2ª Série. Caso a fração de solo fino não tenha 2 kg, deve ser retirada a parte faltante por peneiramento da amostra integral.

1ª Série: Ensaios para a Classificação MCT da fração fina

Os ensaios desta fase são os indicados para a classificação no Programa I:

- **Ensaio de Compactação Mini-MCV (DER M-191/88);**
- **Ensaio de Perda de Massa por Imersão (DER M-197/88):**

Os resultados destes ensaios são utilizados para a **classificação MCT**, segundo **DER M-196/89**.

2ª Série: Classificação G-MCT e Ensaios de Compactação, Suporte e Expansão do Solo Integral

A **classificação G-MCT** é obtida com os resultados dos ensaios 1ª Série e da análise granulométrica do solo.

Para a obtenção das propriedades mecânicas e hídricas, a amostra de solo integral deve ser submetida aos ensaios:

- **Ensaio de Compactação Proctor (DER: M 13-71):** Para cada amostra são compactados 5 CPs em diferentes teores de umidade, na EI, quando a fração que passa na peneira de 2,0 mm pertencer ao grupo LA ou LA' e, na EN, para os outros grupos da MCT.

Por este método ensaio obtêm-se os parâmetros: massa específica seca máxima ($MEAS_{máx}$) e umidade ótima (h_o);

- **Ensaio de Suporte Califórnia, de Amostras Compactadas em Laboratório (DER: M 53-71):** Para cada amostra, estes ensaio deve ser executado em 4 CPs com teores de umidade na energia indicada. Após imersos em água, com sobrecarga padrão, são medidas a expansão e, em sequência, a penetração para a obtenção do suporte. Os valores do índice de suporte e expansão na h_o servirão para definição do universo de solo;

A avaliação das características resilientes do solo, deverá ser executado quando indicado pelo geotécnico:

- **Determinação do Módulo de Resiliência (DNIT: 134/2010-ME):** considerações da necessidade de utilização deste ensaio são as apresentadas no Programa I;

Os ensaios referidos para os Programas I e II, assim como as quantidades de amostras, são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4- QUANTIDADE DE AMOSTRA NA SONDAGEM DO SUBLEITO DA ESTACA X

Estaca X		
Programa de estudo	I	II
Granulação do solo	fina	grossa
Análise granulométrica	sim	sim
Classif. MCT	sim	-
Classif. G-MCT	-	sim
Ensaio Proctor	-	sim
Mini-Proctor	sim	-
CBR e Expansão	-	sim
Mini-CBR e Expansão	sim	-
Massa da amostra (kg)	15	60

Como exemplo, em um subtrecho de 3 km com 30 furos de sondagem no subleito, tem-se:

- Para solo de granulação fina:
30 amostras de 15 kg = 450 kg
- Para solo de granulação grossa:
30 amostras de 60 kg = 1800 kg

Resultados dos Ensaios de Laboratório e de Campo

Os resultados das propriedades dos solos obtidos em campo e laboratório são utilizados para o traçado do perfil geotécnico do subleito e determinação do universo de solos para definição dos segmentos homogêneos. Na Tabela 5 é indicado um modelo para apresentação dos resultados finais obtidos dos estudos de laboratório e campo, realizados no estudo de corte e subleito.

TABELA5- QUADRO RESUMO DE RESULTADOS DE ENSAIOS

Registro Amostra							
Posição	E						
	LD						
	LE						
Profundidade (m)							
GRANULOMETRIA	PENEIRAS (% QUE PASSA)	2"					
		1"					
		3/8"					
		4					
		10					
		40					
		200					
	% < 0,075 mm						
% < 2,00 mm							
PROPRIEDADES	CLASSIFICAÇÃO	MCT <input type="checkbox"/>					
		G-MCT <input type="checkbox"/>					
	COMPACTAÇÃO	Energia					
		hót (%)					
	Mini-Proctor <input type="checkbox"/> Proctor <input type="checkbox"/>	MEASm áx. (g/cm³)					
		CONDIÇÃO NATURAL	hn (%)				
	MEAnat.						
SUPORTE	Mini-CBR <input type="checkbox"/> CBR <input type="checkbox"/>	Exp. (%)					
		I.S. (%)					

Serviços de Escritório

Os serviços de escritório elaboram a produção dos documentos geotécnicos dos solos do corte do subleito dos trechos estudados. Estes documentos constam de plantas e perfis, que deverão conter as informações obtidas em campo e dos resultados de laboratório.

Um dos principais objetivos destes serviços é o traçado do perfil geotécnico das ocorrências de solos dos cortes e subleito ao longo de uma via.

Nesta fase a amostra, caracterizada pelo seu número de registro em laboratório, volta a ser identificada pelo local e estaca onde foi coletada.

Planta e Perfil Geotécnico

A partir do perfil geotécnico definitivo de cada furo, contendo os resultados dos ensaios de laboratório (Tabela 5) e complementado pelos dados do boletim de sondagem (Tabela 3), traça-se o perfil geotécnico longitudinal.

Neste perfil são indicadas informações gerais sobre a sondagem, tais como: distância entre os diversos furos e profundidade, cor e texturas das camadas de solo e propriedades de suporte e Expansão do solo, classificação MCT, entre outras, utilizando a convenção gráfica indicada na Figura 24.

Em última análise, os dados referidos permitirão ao projetista do pavimento definir os diversos universos de solos ao longo do traçado da estrada. Na Figura 25 é ilustrado um exemplo de perfil geotécnico, que contém as propriedades dos solos das camadas, obtidas em laboratório, e as informações apresentadas no boletim de sondagem (Tabela 3).

REPRESENTAÇÃO GRÁFICA						
GRUPO MCT						
GRUPO G-MCT	Obs.: → % de pedregulho					
OUTROS						

Figura 24 - Convenção gráfica dos grupos de solos da classificação MCT

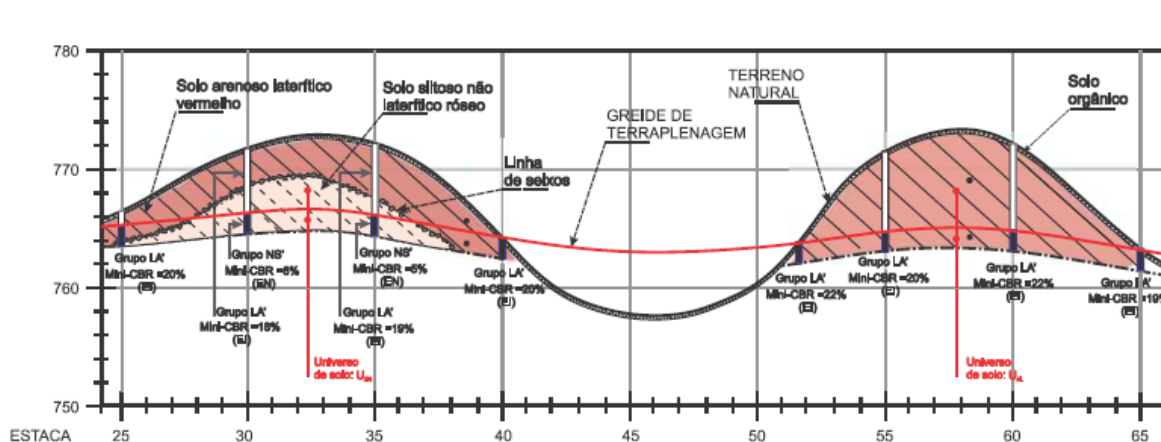


Figura 25 - Exemplo de perfil geotécnico longitudinal com universo de solos

Segmento Homogêneo e seu Índice de Suporte Estatístico (IS_E)

Um segmento homogêneo do subleito de um trecho será definido como a soma das extensões entre estacas, cujo solo pertença a um mesmo grupo MCT, obtida por meio da análise de seu perfil geotécnico. Para definir em qual segmento homogêneo pertence o subleito de um aterro, deve-se verificar o grupo MCT do corte utilizado para sua execução.

O Índice de Suporte Estatístico (IS_E) para cada segmento homogêneo é calculado, estatisticamente, com seus valores do suporte CBR e/ou Mini-CBR, obtidos de seu perfil geotécnico. O tratamento estatístico para obtenção do IS_E pode ser feito por meio da distribuição de t-Student e é calculado pelas expressões (4), (5) e (6), conforme IP-DE-P00/001 do DER-SP.

$$IS_E = \bar{IS} - \frac{\sigma \times t_{0,90}}{\sqrt{n-1}} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (IS_i - \bar{IS})^2}{n}} \quad (5)$$

$$\bar{IS} = \frac{\sum IS_i}{n} \quad (6)$$

IS_E: Índice de suporte CBR ou Mini-CBR estatístico de projeto (%);

IS_i: Índice de suporte CBR ou Mini-CBR individual (%);

\bar{IS} : Média aritmética do índice de suporte CBR ou Mini-CBR das "n" amostras ensaiadas (%);

n: Número de amostras (sugere-se n > 5);

t_{0,90}: Coeficiente de t-Student relativo ao intervalo de confiança de 90% (vide Tabela 6);

σ: Desvio padrão da população dos valores de IS das "n" amostras ensaiadas.

TABELA 6 - VALORES DO PORCENTUAL t_{0,90} EM FUNÇÃO DOS VALORES n-1

n-1	t _{0,90}	n-1	t _{0,90}	n-1	t _{0,90}	n-1	t _{0,90}
1	3,08	11	1,36	21	1,32	40	1,30
2	1,89	12	1,36	22	1,32	60	1,30
3	1,64	13	1,35	23	1,32	120	1,29
4	1,53	14	1,34	24	1,32	∞	1,28
5	1,48	15	1,34	25	1,32		
6	1,44	16	1,34	26	1,32		
7	1,42	17	1,33	27	1,31		
8	1,40	18	1,33	28	1,31		
9	1,38	19	1,33	29	1,31		
10	1,37	20	1,32	30	1,31		

n = nº de amostras

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Solo - Análise granulométrica, NBR 7181/2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Sondagem a trado, NBR 9603/2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Solo: Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação, NBR 9813/2016.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO - DER/SP. Ensaio de Suporte Califórnia, de amostras compactadas em laboratório, M 53/71. São Paulo, 1971.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO - DER/SP. Ensaio de compactação de solo, M 13/71. São Paulo, 1971.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO - DER/SP. Ensaio de compactação de solos em equipamento miniatura, M191/88. São Paulo, 1988.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO - DER/SP. Determinação expedita do Mini-CBR por penetração dinâmica, M195/88. São Paulo, 1988.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO - DER/SP. – Determinação da massa por imersão de solos compactados com equipamento miniatura, M197/88. São Paulo: 1988.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO - DER/SP. Determinação do índice de suporte Mini-CBR e de Expansão de solos compactados com equipamento miniatura, M192/89. São Paulo, 1989.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO - DER/SP. Classificação de solos tropicais, segundo a metodologia MCT, M196/89. São Paulo, 1989.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO - DER/SP. Projeto de Pavimentação, IP-DE-P00/001. São Paulo, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. Coleta de amostras indeformadas de solos, DNER-PRO 002/94. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. Solo - determinação da massa específica aparente, "in situ", com emprego do frasco de areia, DNER-ME 092/94. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão, DNER-ME 254/97. Rio de Janeiro, 1997.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Manual de Pavimentação, Publicação IPR - 719. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência, DNIT 134/2010-ME. Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Manual de Implantação Básica de Rodovia, Publicação IPR - 742. Rio de Janeiro, 2010.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999.
- MUNSELL COLLOR COMPANY. Munsell color soil charts. Baltimore, EUA, 1954.
- NOGAMI, J. S. (1970). Classificação e terminologia para macroestrutura de solos. Anais II Semana Paulista de Geologia Aplicada, vol.1, 55/67. APGA. São Paulo, 1970.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. v.1, pp. 30-41. Rio de Janeiro – RJ, 1981.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Villibor, 1995.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Nova conceituação do coeficiente c' da classificação geotécnica MCT. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Anais. ABPv. v.1. p.34-41. Brasília, 2000.
- NOGAMI, J. S.; Procedimento para Previsão Expedita e Preliminar das Ocorrências de Solos ao longo de Rodovias do Estado de São Paulo (não publicado). São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.portaldetecnologia.com.br/geotecnia/nota-tecnica-inedita-procedimento-para-previsao-expedita-e-preliminar-das-ocorrencias-de-solos-ao-longo-de-rodovias-do-estado-de-sao-paulo/>
- OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. Mapa pedológico do Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), 1999. Escala 1:500.000.

- RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais, vol. 32. Quadrícula SF 23/24 – Rio de Janeiro/Vitória. Rio de Janeiro, 1983.
- SOUZA, M. L. Pavimentação Rodoviária. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Publicação IPR – 609. v.3. Rio de Janeiro, 1976.
- VILLIBOR, D. F. Pavimentos econômicos. Novas considerações. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, 1981.
- VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. Tecnologia do Uso dos Solos Finos Lateríticos. Pavimentos Econômicos, São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

O DER-SP e o DNIT permitem usar o índice de suporte e expansão obtidos pelo ensaio Mini-CBR e expansão da MCT para os solos do subleito finos ($\phi < 2,0$ mm), em substituição aos obtidos no ensaio de CBR tradicional.

Em um segmento homogêneo, quando suas amostras apresentarem suporte Mini-CBR ou CBR, muito variáveis e/ou o número de amostras for $n < 5$, os serviços de campo e laboratório devem ser complementados, o que pode ser feito de várias maneiras com o:

- Reorganização e subdivisão do segmento homogêneo;
- Realização de ensaios em amostras coletadas e não ensaiadas, ou obtidas de novos furos de sondagem.

Após, é realizada uma nova análise estatística para verificar a normalidade das amostras.

Determinação do Universo de Solos

Será conceituado como universo de solos os que apresentarem a mesma classe segundo a MCT e/ou G-MCT, de comportamento laterítico ou não, e pertencerem a um mesmo intervalo de valores de capacidade suporte (Mini-CBR ou CBR).

Com os valores de IS_E (Mini-CBR ou CBR) e classe da MCT dos solos de cada segmento homogêneo, verifica-se, para fins de dimensionamento, a que universo o mesmo pertence, conforme Tabela 7.

TABELA 7 – DEFINIÇÃO DOS UNIVERSOS DE SOLOS DO SUBLEITO

Universo de Solo		Classe MCT ou G-MCT	IS_E CBR ou Mini-CBR		Expansão (E)
MCT	G-MCT		Intervalos	Qualidade	
U_{1L}	U_{1GL}	Classe L ou GL	< 4%	baixa	< 2%
U_{2L}	U_{2GL}		4% - 8%	baixa a média	
U_{3L}	U_{3GL}		> 8% - 12%	média a elevada	
U_{4L}	U_{4GL}		> 12%	elevada	
U_{1N}	U_{1GN}	Classe N ou GN	< 4%	baixa	< 2%
U_{2N}	U_{2GN}		4% - 8%	baixa a média	
U_{3N}	U_{3GN}		> 8% - 12%	média a elevada	
U_{4N}	U_{4GN}		> 12%	elevada	

Considerações sobre os intervalos de IS_E

Para determinação do universo de solos, onde o subleito apresente afloramentos de alteração de rocha, folhelhos e argilitos (geralmente com expansão > 2% e índice de suporte $\leq 3\%$), nestes locais devem ser realizados uma substituição de solo do subleito, por uma camada de 80 cm de solo de empréstimo de melhor qualidade e prever a execução de drenos profundos em suas laterais. Isto permite interceptar a água proveniente dos cortes, para que não ocorra um aumento excessivo de umidade da camada substituída, que poderá causar ondulações excessivas com ruptura do pavimento.

Para segmentos com solos do subleito apresentando $IS_E < 4\%$ e/ou expansão > 2%, deverá ser preconizada, nesse segmento, uma substituição do solo do local por solo de empréstimo de melhor qualidade quanto a estas propriedades, em uma espessura da ordem de 60 cm.

Um segmento homogêneo com subleito de alta qualidade, do universo U_4 ($IS_E > 12\%$), cujo $IS_E > 20\%$, deverá ser dimensionado com o valor máximo de $IS_E = 20\%$.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A maior vantagem dos estudos geotécnicos apresentados em relação aos tradicionais é a introdução da Sistemática MCT, desenvolvida especificamente para regiões de solos tropicais para estudo de cortes, subleitos e ocorrências de solos para uso em camadas nobres do pavimento.

Estes estudos permitem separar os universos de solo por meio de seu comportamento laterítico, considerando a gênese dos solos tropicais. Com isso, é possível dividir corretamente os segmentos homogêneos da estrada, o que não se consegue pelos procedimentos tradicionais.

Outra vantagem deste estudo é o pequeno volume de amostras necessário para a obtenção de uma série de propriedades mecânicas e hídricas de interesse direto nos estudos do subleito e na ocorrência de camadas nobre de pavimento. Estes estudos também permitem, frequentemente, reduzir as distâncias de transporte, devido à grande ocorrência dos solos tropicais qualificada para uso em camadas nobres de pavimentos.

Finalmente, ressalta-se que o avanço da tecnologia computacional, principalmente com o desenvolvimento do método BIM (Building Information Model) aplicado aos estudos geotécnicos. Este modelo permitirá que o engenheiro geotécnico tenha mais tempo para definir a melhor solução para o projeto do pavimento, pois grande parte do trabalho repetitivo, como por exemplo, o lançamento dos perfis de sondagens em planta e a criação das seções transversais de solos, será elaborado automaticamente pelos softwares de projeto.

A partir destas novas tecnologias, o engenheiro terá mais recursos para a interpretação das informações obtidas no campo e definir corretamente os perfis de solo do subleito e ocorrências, aproveitando a visualização 3d que os novos softwares disponibilizam e trabalhar em soluções mais eficientes e menos onerosas para os projetos.

Os serviços de campo também estão passando por uma grande revolução incorporando a tecnologia computacional aos trabalhos do dia a dia. Por exemplo, já é possível se obter sondagens georeferenciadas em tempo real, onde são carregados os boletins e imagens da amostra do solo na nuvem para o uso das equipes de escritório. Posteriormente os resultados são analisados e novas ferramentas permitem automatizar a extração de relatórios de sondagens.

Ressalta-se que, no entanto, para o uso adequado desta ferramenta é necessário que o engenheiro tenha treinamento e qualificação específica para um melhor entendimento das propriedades dos solos tropicais, para projetar com segurança um pavimento mais viável em relação aos tradicionais nos aspectos técnico e econômico.

Dentro desta diretriz, no Brasil, a Egis Engenharia e Consultoria tem investido pesado em treinamento dos seus profissionais e na implantação destes novos métodos e ferramentas na rotina de trabalho da empresa, principalmente no que se refere ao método BIM. A empresa se estruturou para informatizar todos os processos laboratoriais e, além disso, demonstra uma grande preocupação em se manter alinhada com as constantes atualizações da metodologia BIM, desenvolvendo rotinas e aplicativos exclusivos para a utilização em seus projetos de infraestrutura, aproveitando grande parte da experiência mundial do Grupo Egis na área BIM.



CONSIDERAÇÕES SOBRE METODOLOGIAS PARA O DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE PAVIMEN- TOS RECICLADOS COM CAMADA CIMENTADA

Gabriel Lima e Carlos Suzuki

RESUMO

As alternativas de reciclagem se apresentam com elevado potencial para acrescentar ganho à capacidade estrutural de um pavimento, simultaneamente, aproveitando os materiais compostos do pavimento existente, acarretando benefícios econômicos e ambientais, quando comparadas às soluções de reconstrução tradicionais. Diversos métodos de reciclagem de pavimentos têm sido aplicados no Brasil, particularmente, a reciclagem com adição de cimento, entretanto, não há um método consolidado para o dimensionamento estrutural dessa solução, o que gera dificuldades e muitas vezes desconfiança no seu emprego. Para se desenvolver um procedimento de dimensionamento que contemple esse tipo de solução, foram estudados métodos presentes na bibliografia internacional. Uma abordagem detalhada sobre cada método é apresentada, denotando seus principais aspectos, resultando em uma proposta de procedimento para o dimensionamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas com cimento, de forma a atender a metodologia do Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) aplicando conceitos de análise mecanicista. A fim de corroborar os assuntos abordados, foi realizado um estudo paramétrico com o desenvolvimento de equações para correlação entre as deformações críticas esperadas na estrutura reciclada, resultando em modelos de dimensionamento para a camada reciclada com cimento e, por fim, o estudo de caso com o dimensionamento estrutural pelos métodos abordados.

PALAVRAS-CHAVE: : Pavimentos semirrígidos, dimensionamento estrutural, reciclagem profunda, cimento.

ABSTRACT

Recycling alternatives are presented with a high potential to add gain to the structural capacity of a pavement, making use of the existing pavement composite materials while bringing economic and environmental benefits when compared to traditional reconstruction techniques. Several methods of pavement recycling have been applied in Brazil, particularly the recycling with cement addition; however, there is no consolidated method for the structural design of this solution, which generates difficulties and often distrust regarding its employment. In order to develop a design procedure taking into account this sort of solution, methods described in international bibliography have been examined. A detailed approach to each method denoting its main aspects is presented, resulting in a proposed procedure for the structural design of pavements with cement recycled layers so as to comply with the methodology contained in the Paving Manual of National Department of Transport Infrastructure (DNIT) by applying concepts of mechanistic analysis. In order to corroborate the issues discussed, a parametric study has been carried out with the development of equations to correlate the critical deformations expected in the recycled structure, resulting in design models for the cement recycled layer and finally, the case study of a structural design using the methods discussed.

KEYWORDS: Semi-rigid pavements, structural design, deep recycling, cement.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a preservação do meio ambiente, diante da extração de recursos e descartes de resíduos de demolição, bem como a obtenção de novos materiais, têm tornado a reciclagem uma alternativa atraente. A utilização de pavimentos asfálticos com camada reciclada com adição de cimento contribui para a menor extração de agregados virgens da natureza e mitiga o descarte de resíduos oriundos de pavimentos demolidos. Para que a técnica de reciclagem seja adotada como uma alternativa de reabilitação de pavimentos deteriorados, as decisões devem ser pautadas por fatores técnicos e econômicos, não somente ambientais.

A técnica da reciclagem tem sido utilizada no Brasil, como alternativa de recuperação de pavimentos, desde meados de 1980, no entanto, existem poucos documentos técnicos que retratam essa tecnologia, quanto menos o seu dimensionamento estrutural, necessário para prever um desempenho adequado ao pavimento.

2. RECICLAGEM PROFUNDA COM CIMENTO

Conceitos de sustentabilidade como reuso e reciclagem estão intimamente ligados à origem das técnicas de pavimentação. A reciclagem também está presente, seja no processo e reaplicação de materiais do próprio pavimento, seja na incorporação e utilização de resíduos oriundos das mais diversas áreas da indústria, como borracha (pneus), escórias de aciaria, resíduos da construção civil e demolição, cinzas volantes e areias de fundição, entre outros.

No caso de reutilização de componentes do próprio pavimento, o material reciclado composto unicamente por revestimento betuminoso é denominado material asfáltico recuperado (RAP), do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*, sendo esta a alternativa mais conhecida. Entretanto, há processos que reciclam materiais além do revestimento, como por exemplo, a reciclagem profunda, onde os materiais do revestimento betuminoso e da infraestrutura do pavimento, sendo granular, cimentada ou asfáltica, são incorporados na nova mistura.

Denomina-se reciclagem profunda o processo de fresagem em que o material retirado compreende o revestimento, parte ou a totalidade da camada de base e até mesmo da sub-base (BONFIM, 2010), na bibliografia é usualmente designada pela sigla FDR (*Full-Depth Reclamation*).

A reciclagem profunda tem como grande vantagem à correção de falhas estruturais nas camadas subjacentes ao revestimento, inclusive o revestimento. Esta solução atende ainda a alguns casos específicos, como pistas com mais de uma faixa de tráfego em um sentido, em que uma destas sofre maior desgaste devido às diferenças acentuadas de tráfego de veículos pesados.

O conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais reciclados é essencial para realizar o seu dimensionamento, portanto, para determinar as espessuras necessárias da camada reciclada e da camada de revestimento sobrejacente. No entanto, são necessários estudos para a estimativa das propriedades mecânicas do material reciclado.

De forma conveniente, o projetista determina uma composição da mistura reciclada, baseada em estudos das propriedades mecânicas dos materiais coletados no local. Para critérios de dimensionamento, as misturas adotadas apresentam características de rigidez semelhantes às misturas em solo-cimento, adotando-se um teor de cimento igual ou superior a 3% em peso na

mistura. No Brasil, segundo Oliveira (2011), as taxas de cimento utilizadas em obras de reciclagem variam de 3% a 4% em peso na mistura; baixos teores são empregados para mitigar os efeitos nocivos da retração do cimento e da rigidez exacerbada.

Segundo Minguela (2011), quanto maior o teor de asfalto na mistura reciclada, menor é o módulo de resiliência (MR), isso quando comparado a uma mistura de brita graduada tratada com cimento de mesma resistência a compressão simples (RCS). Isto é justificado no estudo de Dellabianca (2004), onde a película do ligante que envolve os grãos do material fresado tem influência nas propriedades da mistura, facilitando o deslizamento de uma partícula sobre a outra, diminuindo assim o atrito interno e conferindo ao fresado um componente de deformação viscosa na mistura.

Em diversos estudos realizados com dosagens de mistura reciclada com cimento, entre eles Fedrigo (2015), relata-se que a predominância de material asfáltico na mistura influencia negativamente suas propriedades. Entretanto, segundo o método do TRL386 proposto por Milton e Earland (1999), a porcentagem de agregado recuperado utilizado na mistura reciclada com cimento pode ser de até 100% do revestimento asfáltico, limitando-se apenas à parcela fina da mistura. Já a PCA (2005) e o DNIT (2013) indicam que a dosagem da mistura reciclada deva conter no máximo 50%, em massa, de material fresado.

Além dos ganhos ambientais, as misturas recicladas têm demonstrado desempenho similar e, em alguns casos, superior ao de misturas convencionais, quando se comparam as propriedades mecânicas (LIMA, 2003).

Em resumo, a reciclagem com cimento é uma solução técnica eficiente, com bom desempenho frente às solicitações do tráfego e variações de umidade, também eficiente no que diz respeito ao emprego de recursos naturais e de energia, o que contribui para a preservação do meio ambiente, e ao mesmo tempo econômica, com reutilização de materiais e diminuição de custos com deslocamentos de obra.

3. EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS REICLADOS COM CIMENTO

3.1 Inglaterra

3.1.1 TRL386

Milton e Earland (1999), da área de pavimentação, elaboraram um guia de dimensionamento e especificações para a reciclagem profunda *in situ* para pavimentação, o TRL386, publicado pelo *Transport Research Laboratory*, considerando-se tanto o tratamento com cimento como também a espuma de asfalto. Este guia foi baseado em um programa de pesquisa que durou três anos, envolvendo estudos de rodovias com tráfego médio e pesado e o monitoramento de um trecho experimental.

Por meio da avaliação do pavimento deverão ser averiguadas diversas questões para validar a reciclagem, como: condições da infraestrutura existente para recebimento da nova camada reciclada, subleito, granulometria, se é economicamente viável, possibilidade de alterar o greide e se a mistura apresenta resistência adequada. A Figura 1 a seguir, apresenta o fluxograma para o dimensionamento estrutural da camada de reciclagem com cimento.

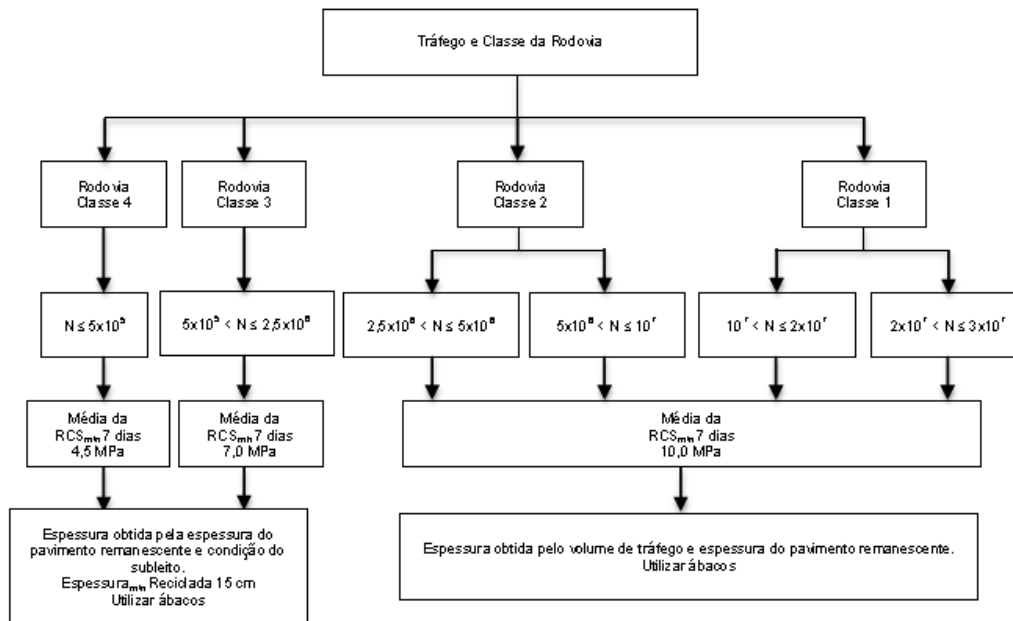


Figura 1: Roteiro para dimensionamento de pavimentos com bases recicladas com cimento (adaptado de Milton e Earland, 1999)

Para a determinação da espessura de base reciclada nas rodovias de classe 3 e 4, os parâmetros condicionantes são a espessura do revestimento adotado e o suporte do subleito, através do ensaio de Índice de Suporte Califórnia. Observa-se que para suporte do subleito com CBR inferior a 2%, a reciclagem *in situ* não é recomendada para qualquer classificação de tráfego.

Para a determinação da espessura de base reciclada nas rodovias de classe 3 e 4, os parâmetros condicionantes são a espessura do revestimento adotado e o suporte do subleito, através do ensaio de Índice de Suporte Califórnia. Observa-se que para suporte do subleito com CBR inferior a 2%, a reciclagem *in situ* não é recomendada para qualquer classificação de tráfego.

Os ábacos permitem dimensionar as espessuras do revestimento e da camada reciclada quando são atendidas às condições de suporte mínimas da estrutura remanescente. A espessura mínima praticada para a camada reciclada com cimento é de 150 mm, podendo atingir até 300 mm. Acima disto, torna-se inviável a execução das camadas pela dificuldade de uma compactação adequada.

3.1.2 TRL611

Uma atualização do método do TRL386 foi realizada com o novo trabalho elaborado por Merrill et al. (2004), para atender ao aumento de agentes estabilizadores, para rodovias de tráfego mais intenso e dar maior viabilidade aos serviços de reciclagem profunda, sendo denominado TRL611.

No guia, basicamente a espessura da camada reciclada e do revestimento são definidas em função do tráfego previsto, da capacidade de suporte da fundação remanescente e do módulo dinâmico do material reciclado. Os dois primeiros passos para o dimensionamento são classificar a rodovia em função do tráfego previsto para o período de projeto e a capacidade de suporte da infraestrutura remanescente. Além das investigações com poços no pavimento, os métodos não destrutivos também são utilizados para avaliar a fundação do pavimento existente, prioritariamente, usando-se equipamento tipo FWD.

O método visa caracterizar a fundação existente, a fim de dimensionar a estrutura do pavimento sobrejacente, assume-se que a fundação existente é capaz de suportar a ação do tráfego para a construção das camadas de pavimento novo.

Para o dimensionamento das estruturas com material reciclado a frio, Merrill et al. (2004) produziram ábacos de dimensionamento, onde se cobre uma ampla variedade de materiais de pavimentação e técnicas de construção *in situ* e *ex situ*, conforme nomenclatura utilizada pela norma para situação em usina.

A mistura reciclada é classificada em nove tipos distintos, nomeadas de H1 a H9. Nesta etapa é verificada a relação entre o módulo dinâmico e a resistência à flexão da mistura reciclada adotada, onde a combinação da rigidez e resistência da camada é imprescindível para a concepção do projeto. Definido o tipo da mistura reciclada, através de ábacos em função do tipo de tráfego, classificação da mistura reciclada e o tipo de fundação, é verificada a espessura mínima da camada reciclada e do revestimento asfáltico.

3.2 Estados Unidos da América

3.2.1 AASHTO

O método da AASHTO de 1993, descrito no *AASHTO Guide for Design of Pavements Structures* (1993) é fundamentado na análise estatística dos resultados obtidos da pista experimental da AASHTO e monitorado sob o tráfego entre 1958 e 1960. Dentre os resultados obtidos, destacou-se um modo de quantificar a condição da ruptura do pavimento, baseado na opinião subjetiva dos usuários e na medição objetiva dos defeitos superficiais, consistindo na condição de serventia do pavimento, variando entre 0 e 5, sendo 5 a melhor condição possível.

A capacidade de suporte do pavimento é mensurada por meio do número estrutural (SN), sendo um valor abstrato que expressa a capacidade estrutural do pavimento necessária em função da combinação de suporte do subleito, do número de solicitações de um eixo padrão 80 kN, da serventia desejada para o final da vida útil de projeto e das condições ambientais. O número estrutural projetado é calculado pela seguinte expressão (1):

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3 \quad (1)$$

Onde:

a_1, a_2, a_3 = coeficientes estruturais das camadas;

D_1, D_2, D_3 = espessuras das camadas (pol); e

m_2, m_3 = coeficientes de drenagem das camadas.

A equação que relaciona o tráfego, a serventia e a capacidade de suporte do subleito e os parâmetros adotados das camadas é expressa a seguir (2):

$$\log_{10} N = z_R \times s_0 + 9,36 \times \log_{10}(SN + 1) + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log_{10}(MR) - 8,27 \quad (2)$$

Onde:

N = número de repetições do eixo-padrão de 8,2 t;

z_R = coeficiente de distribuição normal;

s_0 = desvio padrão combinado das variáveis do projeto;

SN = número estrutural;

ΔPSI = variação de serventia admissível; e

MR = módulo de resiliência do subleito (psi).

Para os projetos de restauração com aplicação de reforço em concreto asfáltico, uma vez determinada à capacidade estrutural do pavimento existente, o incremento estrutural necessário é a

diferença entre o SN de projeto e o efetivo do pavimento existente, conforme a expressão (3) a seguir:

$$SN_{ref} = SN - SN_{ef} \quad (3)$$

Onde:

SN_{ref} = incremento estrutural necessário;

SN = número estrutural para o período de projeto; e

SN_{ef} = número estrutural do pavimento existente.

No caso de projetos de reciclagem profunda com cimento, o método da AASHTO (1993) não apresenta conteúdo específico, e desta forma, é feita uma adaptação da metodologia. A estimativa da infraestrutura remanescente após a fresagem profunda e a determinação do número estrutural, pode ser obtida numa abordagem semelhante ao dimensionamento de pavimentos novos. Combinando as equações (1) e (3) é possível se determinar a espessura necessária para a camada reciclada com cimento:

$$D_2 = \frac{SN_{ref} - a_1 \times D_1 - a_3 \times D_3 \times m_3}{a_2 \times m_2} \quad (4)$$

Onde:

a_1 , a_2 e a_3 como coeficiente estrutural do revestimento, base reciclada e infraestrutura remanescente, respectivamente;

D_1 , D_2 e D_3 = espessura do revestimento, base reciclada e infraestrutura remanescente, respectivamente (pol);

m_2 , m_3 = coeficiente de drenagem da base reciclada e infraestrutura remanescente, respectivamente.

Para as camadas provenientes da reciclagem profunda com cimento, os coeficientes estruturais indicados pela AASHTO (1993) variam de acordo com a RCS para bases tratadas com cimento. Também há estudos específicos, como por exemplo o trabalho realizado por Diefenderfer e Apeagyei (2011), através da retroanálise de deflexões em seções testes com 8 a 10 cm de revestimento em concreto asfáltico, 20 a 27 cm de camada reciclada com 5% de cimento na mistura e infraestrutura remanescente, avaliando-se no decorrer do tempo, resultando coeficientes entre 0,26 a 0,30.

3.2.2 CALTRANS

O CALTRANS apresenta o método de dimensionamento de reciclagem com cimento *in situ*, descrito como *Full Depth Reclamation Using Cement* (2013). O departamento de pavimentação do órgão apresenta conteúdo específico para o projeto, construção e controle de obras para a reciclagem profunda com cimento, disponibilizando também métodos para a reciclagem profunda com emulsão asfáltica e espuma de asfalto.

Para o início das atividades de dimensionamento, a metodologia prevê uma avaliação abrangente do local do projeto, para uma melhor compreensão das condições existentes do pavimento, materiais e questões climáticas. Esta avaliação é dividida em três etapas: estudos de escritório, preliminares de campo e investigação detalhada do local.

Para o dimensionamento da reciclagem profunda com cimento, adota-se o mesmo procedimento utilizado para pavimentos novos, com o cálculo da espessura total de material granular necessária para a proteção do subleito, em função do tráfego solicitante e da capacidade de suporte do subleito, ou no caso, infraestrutura remanescente, com a utilização de coeficientes de equivalência estrutural para transformar a espessura total em termos de material granular, ou seja, é um método semi-empírico.

Determina-se a espessura da camada reciclada e adota-se a RCS da mistura aos 7 dias, que deverá encontrar-se entre 2,0 a 4,1 MPa. A metodologia recomenda a utilização RCS inferior para camadas recicladas mais espessas. As espessuras típicas adotadas para as camadas recicladas com cimento são de 20 a 30 cm.

A espessura total de material granular requerida é calculada através da equação (5) a seguir.

$$GE = 0,09744 \times TI \times (100 - R) \quad (5)$$

Onde:

GE = espessura total em termos de material granular (cm);

TI = índice de tráfego californiano; e

R = R-Value.

A espessura de cada camada é obtida com a divisão da espessura, em termos de material granular, pelo coeficiente estrutural do material:

$$h_i = \frac{GE_i}{G_{f_i}} \quad (6)$$

Onde:

h_i = espessura da camada i (mm);

GE_i = espessura em termos de material granular da camada i (mm); e

G_{f_i} = fator de equivalência estrutural da camada i .

O coeficiente estrutural da camada reciclada é calculado através da equação (7) a seguir.

$$G_{f_{rec}} = 0,90 + \frac{RCS}{1000} \quad (7)$$

Onde:

$G_{f_{rec}}$ = coeficiente estrutural da camada reciclada com cimento; e

RCS = Resistência à compressão simples a 7 dias (psi).

3.3 Espanha

3.3.1 Andalucía

A região de *Andalucía* na Espanha, com capital em Sevilha, apresenta método de dimensionamento de pavimentos rodoviários com capítulo específico para soluções em reciclagem. O manual é descrito como *Instruccion para el Diseno de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía* (2007).

No capítulo 7 do manual são apresentadas soluções de reciclagem *in situ*, tanto com tratamento em cimento, como também em emulsão betuminosa. A reciclagem é uma técnica alternativa à reconstrução, no qual o seu custo deve ser comparado para validar se a solução em reciclagem é viável.

Observa-se que o método de *Andalucía* (2007), para a determinação das espessuras da camada reciclada com cimento, considera que o material reciclado é estruturalmente análogo a uma solução em solo-cimento e devem ser obtidas através do procedimento de cálculo analítico para estruturas convencionais de pavimento, formadas por uma base de solo-cimento e revestimento em concreto asfáltico.

O dimensionamento consistirá na definição dos materiais e espessuras das diferentes camadas implantadas sobre a infraestrutura considerada, para que a vida útil teórica coincida ou exceda o tráfego equivalente estimado do projeto, de acordo com os modelos mecanicistas indicados pelo método. O primeiro passo para o dimensionamento é classificar a rodovia em função do tráfego previsto para o período de projeto e o tipo de estrutura de pavimento recomendada. Posteriormente é verificada a espessura mínima para o conjunto de camadas em concreto asfáltico, em função do tráfego e a zona climática prevista na região de *Andalucía*.

A RCS da mistura reciclada com cimento não poderá ser inferior a 2,5 MPa aos 7 dias. Os materiais estabilizados com cimentos devem apresentar características mecânicas conforme a classificação do tipo de mistura, pré-estabelecida para a reciclagem com cimento.

O dimensionamento é realizado através do *software* computacional ICAFIR, que utiliza o modelo de resposta elástica multicamadas proposto por Burmister em 1943, considerando que as camadas estão totalmente aderidas. Este programa pode ter os resultados reproduzidos pelo *software* computacional Elsym-5, que contempla a mesma teoria empregada.

Os modelos mecanicistas adotados pelo método de *Andalucía* (2007) visam comparar a máxima deformação específica vertical de compressão atuante no topo da camada de fundação do pavimento, com o valor admissível correspondente, expresso conforme a expressão (8), como também, na camada reciclada avaliando a tensão de tração na flexão máxima para dois tipos de mistura previstas, conforme as expressões (9) e (10).

$$\varepsilon_v = 2,16 \times 10^{-2} \times N^{-0,28} \quad (8)$$

$$\sigma_r = 0,43 \times (1 - 0,065 \times \log N) - \text{Tipo SC-3} \quad (9)$$

$$\sigma_r = 0,72 \times (1 - 0,065 \times \log N) - \text{Tipo SC-4} \quad (10)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão;

σ_r = tensão atuante máxima na camada cimentada (MPa); e

ε_v = Deformação vertical específica de compressão (cm/cm).

3.3.2 *Castilla y León*

A região de *Castilla y León*, na Espanha, com sede em Salamanca, apresenta método de dimensionamento de pavimentos rodoviários com capítulo específico para soluções em reciclagem. O manual é descrito como *Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos* (2004).

No item 6.21 do manual é definido o material reciclado com cimento, sendo detalhado o comportamento estrutural, requisitos técnicos e recomendações construtivas. No capítulo 8 é abordado o dimensionamento estrutural para soluções em reciclagem e reforço em concreto asfáltico, com soluções catalogadas a serem adotadas, em função do tráfego previsto.

O manual recomenda que a mistura reciclada não apresente agregados com tamanho superior a 60 mm e o material passante a peneira de 4 mm deverá ser superior a 30%, caso contrário, será obtida uma curva granulométrica descontínua e terá a necessidade de ser corrigida, para isso é indicado a adição de areia ou cascalho natural. O teor de cimento mínimo da mistura reciclada deverá ser de 3% em massa seca, com RCS mínima aos 7 dias de 2,5 MPa limitada a 4,5 MPa. Para o desempenho

adequado de misturas cimentadas é recomendado espessuras entre 20 cm e 35 cm, sob uma ou mais camadas de concreto asfáltico.

O dimensionamento consiste num catálogo de soluções de reabilitação, prevendo soluções de reciclagem com cimento em função do tráfego previsto. Todas as soluções propostas são para um período de projeto mínimo de 20 anos. Em todos os casos, as espessuras indicadas devem ser consideradas como mínimas, portanto, não pode ser reduzido, entretanto, o projetista pode sugerir um incremento nas espessuras, sendo devidamente justificada.

Os modelos mecanicistas adotados para obtenção do catálogo de soluções de reciclagem com cimento de *Castilla y León*, (2004), são apresentados nas expressões (11) e (12) a seguir.

$$\varepsilon_v = 2,1 \times 10^{-2} \times N^{-0,24} \quad (11)$$

$$\sigma_r = RTF \times (1 - 1/12 \times \log N) \quad (12)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão;

σ_r = tensão atuante máxima na camada cimentada (MPa);

RTF = resistência à tração na flexão da camada cimentada (MPa); e

ε_v = Deformação vertical específica de compressão (cm/cm).

3.4 Aspectos relevantes

A pesquisa bibliográfica mostrou que os países estudados desenvolveram metodologias próprias para o dimensionamento estrutural de camadas cimentadas. Dos métodos analisados, podem-se destacar para cada um deles os principais aspectos observados:

TRL386: O método utiliza uma série de simplificações, as variáveis de entrada de capacidade de suporte e tráfego são classificadas em categorias, com limitante para adoção de soluções com reciclagem para um tráfego de $3,0 \times 10^7$. As espessuras de revestimento asfáltico e base cimentada são obtidas através de ábacos de dimensionamento. Consideram-se valores altos para a RCS de até 10 MPa aos 7 dias.

TRL611: É uma revisão do método TRL386, sendo que ambos os métodos ingleses utilizam uma série de simplificações, e as variáveis de entrada de capacidade de suporte e tráfego são classificadas em categorias, com limitante para adoção de soluções com reciclagem para um tráfego de $8,0 \times 10^7$. Consideram-se valores altos para o módulo dinâmico das bases recicladas com cimento, a partir de 5.000 MPa. Uma particularidade é o método de classificação da mistura, onde são relacionados o módulo dinâmico e a resistência à flexão, classificando o material por zona quanto à sua rigidez.

AASHTO: É um método clássico de dimensionamento empírico. Não é específico para o dimensionamento da reciclagem profunda, porém pode ser adaptado. Os valores de coeficiente da camada reciclada com cimento podem ser estimados pela RCS da mistura ou por estudos específicos, com valores que apresentam grande variação, entre 0,13 a 0,30, dificultando a precisão no dimensionamento.

CALTRANS: Apresenta guia próprio para a reciclagem profunda, baseado na equivalência estrutural de camadas e utilização de fatores de equivalência em termos de material granular. O fator adotado para camada reciclada com cimento é obtido através de uma equação, em função da RCS, onde seu valor oscila entre 1,20 e 1,70. É o único que considera diferença volumétrica entre o material fresado e o material tratado.

Andalucía: Apresenta adaptação do dimensionamento convencional de estrutura em solo-cimento para a reciclagem com cimento, como também, recomendações específicas no dimensionamento e execução da reciclagem. A definição da estrutura final é obtida através da avaliação mecanicista, conforme os modelos indicados, sem um modelo específico para camada reciclada. São considerados valores fixos de resistência e rigidez para as misturas cimentadas.

Castilla y León: O método apresenta soluções típicas por meio de um catálogo, em função do tipo de tráfego, considerando fixa a condição de suporte da fundação que receberá a camada reciclada, podendo dessa forma, acarretar em estruturas superdimensionadas. Considera-se que a camada de reciclagem com cimento apresenta desempenho semelhante à camada de solo-cimento e não apresenta modelo mecanicista específico para a camada reciclada.

São descritas sucintamente na Tabela 1 a seguir as principais características observadas nas metodologias avaliadas, ressaltando-se as particularidades dos métodos para reciclagem com cimento, exceto o método da AASHTO (1993), pois não trata especificamente de bases reciclada.

Tabela 1: Resumo das características observadas nas metodologias para o dimensionamento de estruturas com reciclagem com cimento

Item	TRL386	TRL611	CALTRANS	Andalucía	Castilla y León
País	Reino Unido	Reino Unido	EUA	Espanha	Espanha
Ano	1999	2004	2012	2007	2004
Espessura mínima (cm)	15	15	20	20	20
Espessura máxima (cm)	30	30	30	35	35
Revestimento Asfáltico (cm)	TS a 10 (tabela)	TS a 18 (ábaco)	-	TS a 15 (tabela)	5 a 12 (tabela)
CBR do subleito mínimo (%)	2,0	2,0	4,5	6,0	5,0
Tráfego máximo	$3,0 \times 10^7$ 20 anos	$8,0 \times 10^7$ 20 anos	Não há limite 20 anos	Não há limite 20 anos	VDM 2000 20 anos
RCS (MPa)	4,5 a 10,0 7 dias	-	2,0 a 4,1 7 dias	Mínimo 2,5 7 dias	2,5 a 4,5 7 dias
RTF (MPa)	-	0,35 a 5,0	-	0,43 e 0,72	-
MR (MPa)	-	5.000 a 60.000 (*)	-	2.000 e 8.000	4.000 a 8.000
Metodologia	Mecanicista	Mecanicista	Semi-empírico	Mecanicista	Mecanicista

(*) Método considera o módulo dinâmico.

4. ESTUDO PARAMÉTRICO DE PAVIMENTOS REICLADOS COM CAMADA CIMENTADA

O objetivo deste item é apresentar os resultados do estudo paramétrico desenvolvido com a finalidade de analisar os principais fatores estruturais que afetam o comportamento dos pavimentos reciclados com camadas cimentadas.

O primeiro estudo, caso 1, considera a camada cimentada funcionando como camada de base subjacente a um revestimento asfáltico, e o segundo, caso 2, admitindo que a sub-base seja

cimentada e sobre a qual é colocada uma camada de base granular, antes da execução do revestimento final em concreto asfáltico.

Os estudos constaram basicamente da análise das deflexões, tensões e deformações em diversos pontos críticos do pavimento, admitindo-se como carga do eixo simples roda dupla padrão rodoviário nacional de 8,2 tf, com diferentes espessuras e módulos de resiliência dos materiais constituintes da estrutura.

Em função dos resultados obtidos, pretende-se desenvolver critérios de projeto e de verificação estrutural para cada alternativa analisada, contemplando a reciclagem com cimento na camada de base ou sub-base, identificando as vantagens e desvantagens de cada situação.

4.1 Aspectos Metodológicos

Neste trabalho, para determinação dos principais esforços atuantes na estrutura sob efeito da carga de tráfego, empregou-se o *software* computacional Elsym-5, que admite que a estrutura seja um sistema elástico, constituído de até 5 camadas, onde os materiais utilizados são homogêneos, uniformes, isotrópicos e com elasticidade linear.

O programa apresenta as vantagens de ser prático e de fácil aplicação, com baixo tempo de processamento, está consolidado no meio técnico e é aceito pelos principais órgãos rodoviários do país. A carga de tráfego considerada é o semieixo padrão de 8,2 tf, simulada pelo carregamento tipo FWD, com carga (Q) de 4.100 kgf, representado por uma roda simples com raio (r) de 15 cm, correspondendo a uma pressão de contato (P) de 5,80 kgf/cm².

São apresentados na Tabela 2 a seguir, os valores adotados neste estudo para cada variável analisada em relação às características geométricas e elásticas de cada camada, envolvendo tipos de estruturas, materiais utilizados, espessuras, módulos de resiliência e coeficientes de Poisson.

Tabela 2: Valores adotados para estudo paramétrico

Estrutura	Camada	Material	Módulo de Resiliência (kgf/cm ²)	Coefficiente de Poisson	Espessuras (cm)
Semirrígida Caso 1	Revestimento	Concreto Asfáltico	22.500 - 30.000 - 37.500	0,35	5 - 10 - 15 - 20
	Base	Reciclada com Cimento	25.000 - 50.000 75.000 - 100.000	0,20	15 - 20 - 25 - 30
	Sub-base	Infraestrutura Remanescente	1.500 - 2.250 3.000	0,40	10 - 15 - 20 - 25 - 30
	Subleito	Solo Local	500 - 1.000 - 1.500 - 2.000	0,45	-
Semirrígida Invertida Caso 2	Revestimento	Concreto Asfáltico	22.500 - 30.000 - 37.500	0,35	5 - 10 - 15 - 20
	Base	Brita Graduada Simples	1.500 - 2.000 - 4.000	0,40	10 - 15 - 20
	Sub-Base	Reciclada com Cimento	25.000 - 50.000 75.000 - 100.000	0,20	15 - 20 - 25 - 30
	Subleito	Solo Local	500 - 1.000 - 1.500 - 2.000	0,45	-

4.2 Indicadores estruturais analisados

Neste trabalho procurou-se analisar os valores máximos dos indicadores estruturais a seguir relacionados, nos respectivos pontos de interesse.

- D_0 = Deslocamento vertical ou deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento ($\times 10^{-2}$ mm);
- σ_t = Tensão horizontal máxima de tração na fibra inferior da camada reciclada com cimento (kgf/cm^2);
- ϵ_t = Deformação horizontal específica máxima de tração na fibra inferior da camada asfáltica ($\times 10^{-4}$ cm/cm); e
- ϵ_v = Deformação vertical específica máxima de compressão no topo do subleito ($\times 10^{-4}$ cm/cm).

Além da deflexão máxima, também procurou-se avaliar outros parâmetros relacionados com a bacia deflectométrica da estrutura, SCI, BDI, BCI e R, conforme estudado por LOPES (2012), sendo os principais destes abordados nesta pesquisa. Foram considerados, ainda, D_0 , D_{25} , D_{30} , D_{60} , D_{90} e D_{120} (10^{-2} mm), deflexões recuperáveis com afastamento do ponto e aplicação da carga de zero, 25 cm, 30 cm, 60 cm, 90 cm e 120 cm, respectivamente.

No total das estruturas simuladas foram utilizadas 9.240 estruturas para o caso 1 e 6.824 para o caso 2, destes foram excluídos 2368 casos, por serem obtidos resultados inconsistentes.

4.3 Apresentação dos resultados

Os resultados das simulações realizadas foram processados através do *software* Microsoft Excel®, sendo encontradas equações de correlação entre os indicadores estruturais e os demais parâmetros da bacia deflectométrica que caracterizam as condições do pavimento reciclado.

A Tabela 3 apresenta resumidamente os coeficientes dos modelos de regressão e os parâmetros de confiabilidade estatística para os dois casos analisados, de base e sub-base recicladas com cimento. Também procurou-se analisar o valor do coeficiente de determinação r^2 , que qualifica a equação obtida. Os modelos obtidos podem ser representados pelas expressões a seguir (13) e (14), com os respectivos parâmetros e coeficientes indicados.

$$P_{CAS01} = 10^k \times h_R^a \times E_R^b \times h_{BC}^c \times E_{BC}^d \times h_{IR}^e \times E_{IR}^f \times E_{SL}^g \quad (13)$$

$$P_{CAS02} = 10^k \times h_R^a \times E_R^b \times h_{BG}^c \times E_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times E_{SBC}^f \times E_{SL}^g \quad (14)$$

Tabela 3: Parâmetros e coeficientes do estudo paramétrico

Estrutura	Parâmetro	k	a	b	c	d	e	f	g	r ²
Semirrígida Caso 1	D ₀	5,830	-0,164	-0,174	-0,493	-0,189	-0,031	-0,050	-0,593	0,985
	σ _t	2,005	-0,453	-0,151	-1,140	0,463	-0,054	-0,145	-0,135	0,981
	ε _v	6,294	-0,444	-0,206	-1,155	-0,380	-0,284	0,063	-0,448	0,980
	SCI	5,368	0,044	-0,405	-0,357	-0,371	0,009	0,004	-0,244	0,735
	BDI	6,898	-0,533	-0,245	-1,323	-0,419	-0,065	-0,126	-0,187	0,968
	BCI	5,996	-0,413	-0,207	-1,015	-0,255	-0,070	-0,120	-0,398	0,970
	D120	4,229	-0,041	-0,030	-0,101	-0,011	-0,018	-0,031	-0,921	0,994
	D60	5,096	-0,151	-0,079	-0,367	-0,080	-0,035	-0,058	-0,775	0,994
	R	-1,621	-0,101	0,424	0,252	0,351	-0,014	-0,015	0,260	0,725
Semirrígida Invertida Caso 2	D ₀	5,738	-0,421	-0,209	0,136	-0,302	-0,274	-0,085	-0,410	0,971
	ε _t	1,950	-0,476	-0,138	-0,385	-0,062	-0,903	0,477	-0,256	0,965
	σ _t	6,240	-0,437	-0,132	-0,342	-0,098	-0,999	-0,459	-0,296	0,970
	ε _v	5,670	-0,829	-0,451	0,269	-0,401	-0,080	-0,038	-0,119	0,952
	SCI	4,803	0,029	-0,037	0,327	-0,538	-0,725	-0,237	-0,165	0,798
	BDI	5,442	-0,131	-0,035	-0,140	-0,266	-0,928	-0,257	-0,414	0,917
	BCI	4,285	-0,066	-0,040	-0,055	-0,016	-0,093	-0,020	-0,915	0,996
	D120	4,985	-0,103	-0,045	-0,086	-0,083	-0,330	-0,084	-0,776	0,993
	D60	-2,205	0,873	0,488	-0,243	0,373	0,060	0,031	0,119	0,956
R	5,738	-0,421	-0,209	0,136	-0,302	-0,274	-0,085	-0,410	0,971	

5. CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTO PARA PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO

5.1 Considerações iniciais

Admitindo-se que a reciclagem profunda com cimento de um pavimento existente seja uma alternativa técnica, econômica e sustentável de reabilitação, é necessário que a estrutura final proposta atenda aos critérios de dimensionamento preconizados pelo órgão para pavimentos novos.

No caso do DER/SP e DNIT, o método de dimensionamento estrutural de pavimentos asfálticos se baseia em curvas que fornecem as espessuras totais da estrutura, em função da condição de suporte do subleito existente, através do parâmetro de CBR e das características do tráfego a que o pavimento estará submetido. No decorrer dos anos tem sido verificado que esses métodos adotados visam exclusivamente a proteção do subleito e demais camadas contra excessivos esforços e cisalhamento surgidos mediante a passagem do tráfego, sendo o CBR uma tentativa de quantificação da resistência ao cisalhamento do material.

Constatando que os métodos não levam em conta de maneira explícita às características de resiliência ou de deformabilidade elástica das camadas do pavimento, o presente trabalho apresenta um procedimento de avaliação estrutural que considere complementarmente a questão da resistência a fadiga dos materiais, quanto a esse tipo de comportamento.

5.2 Esforços atuantes

Os cálculos das tensões, deformações e deslocamentos atuantes foram feitos pelo *software* computacional Elsym-5, conforme abordado no estudo paramétrico. Os resultados da simulação computacional, que permitem analisar as diversas estruturas de pavimentos estudados, variando-se

as espessuras das camadas, o MR dos materiais envolvidos e diferentes tipos de fundação, estão apresentados no item 4.3.

5.3 Esforços resistentes

Considerando-se que existem grandes variações entre as diversas expressões que traduzem as relações de fadiga entre o número de solicitações do eixo padrão (N) e os diferentes indicadores estruturais, foram selecionados modelos de amplo uso nacional para estimar a vida de fadiga dos materiais envolvidos na avaliação estrutural, exceção à fadiga da camada cimentada, pela carência de modelos nacionais para misturas recicladas com cimento, adota-se o modelo proposto por Minguela (2011).

DNER PRO-11 (1979) preconizado pelo DER/SP IP-DE-P00/001 (2006) – Equação (15).

$$N_{USACE} = 1,263 \times 10^{17} \times D_0^{-5,682} \quad (15)$$

FHWA (1976) preconizado pelo DER/SP IP-DE-P00/001 (2006) – Equação (16).

$$N_{AASHTO} = 1,092^{-6} \times \varepsilon_t^{-3,512} \quad (16)$$

Minguela (2011) – Equações (17) e (18);

$$\log N_{USACE} = 17,241 - (17,241 \times SR) \quad (17)$$

$$SR = \frac{\sigma_r}{\sigma_{adm}} \quad (18)$$

Dormon e Metcalf (1965) preconizado pelo DER/SP IP-DE-P00/001 (2006) – Equação (19).

$$N_{AASHTO} = 6,069^{-10} \times \varepsilon_v^{-4,762} \quad (19)$$

Onde:

N = Número de solicitações do eixo padrão;

ε_t = Deformação horizontal específica de tração (cm/cm);

ε_v = Deformação vertical específica de compressão (cm/cm).

D_0 = Deslocamento vertical ou deflexão recuperável máxima ($\times 10^{-2}$ mm);

σ_r = Tensão atuante máxima na camada cimentada (kgf/cm²);

σ_{adm} = Resistência à tração na flexão admissível (kgf/cm²); e

SR = Relação de tensões atuantes e resistência à tração na flexão do material.

5.4 Dimensionamento

O critério de projeto proposto consiste em determinar a estrutura reciclada como se fosse um pavimento novo, considerando o tráfego futuro atuante e o subleito constituído pela infraestrutura remanescente, cujo CBR deve ser estimado a partir dos dados deflectométricos previamente ao serviço de reciclagem. De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a espessura total necessária do pavimento, expressa em termos de material granular para a proteção do subleito quanto às tensões de cisalhamento excessivas, é dada pela seguinte expressão (20):

$$H_t = 77,67 \times N_{USACE}^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (20)$$

Onde:

H_t = Espessura total em termos de material granular (cm);

CBR = CBR do subleito (%); e

N_{USACE} = Número de solicitações do eixo padrão.

Uma vez definida a estrutura constituída de revestimento asfáltico denso e base da camada reciclada com cimento, recomenda-se a verificação quanto à fadiga dos materiais através da análise mecanicista. Os pontos e parâmetros críticos de análise dos esforços atuantes são: D_0 , ε_t , σ_t e ε_v e os esforços resistentes são caracterizados pelos modelos de fadiga apresentados no item 5.3.

Do confronto entre os modelos de esforços atuantes e resistentes, obtêm-se os seguintes modelos de avaliação estrutural para determinação da espessura mínima da camada reciclada com cimento.

Estrutura Semirrígida:

- D_0 - Igualando a equação (13) adotando os coeficientes referentes ao D_0 e a equação (15), obtém-se (23):

$$h_{rec} = 5,287 \times 10^5 \times h_R^{-0,332} \times E_R^{-0,352} \times E_{rec}^{-0,384} \times h_{IR}^{-0,063} \times E_{IR}^{-0,101} \times E_{SL}^{-1,204} \times N^{0,353} \quad (23)$$

- σ_t - Igualando a equação (13) adotando os coeficientes referentes ao σ_t e a equação (17), obtém-se (24):

$$h_{rec} = 5,730 \times 10^1 \times h_R^{-0,397} \times E_R^{-0,132} \times E_{rec}^{-0,405} \times h_{IR}^{-0,047} \times E_{IR}^{-0,127} \times E_{SL}^{-0,118} \times \left\{ - \left[\left(\frac{\log N - 17,241}{17,241} \right) \times \sigma_{adm} \right]^{-0,877} \right\} \quad (24)$$

- ε_v - Igualando a equação (13) adotando os coeficientes referentes à ε_v e a equação (19), obtém-se (25):

$$h_{rec} = 4,583 \times 10^3 \times h_R^{-0,384} \times E_R^{-0,178} \times E_{rec}^{-0,328} \times h_{IR}^{-0,245} \times E_{IR}^{0,054} \times E_{SL}^{-0,388} \times N^{0,1818} \quad (25)$$

Estrutura Invertida:

- D_0 - Igualando a equação (14) adotando os coeficientes referentes ao D_0 e a equação (15), obtém-se (26):

$$h_{rec} = 9,0 \times 10^9 \times h_R^{-1,535} \times E_R^{-0,763} \times E_{rec}^{-0,309} \times h_{BG}^{0,496} \times E_{BG}^{-1,102} \times E_{SL}^{-1,497} \times N^{0,635} \quad (26)$$

- ε_t - Igualando a equação (14) adotando os coeficientes referentes à ε_t e a equação (16), obtém-se (27):

$$h_{rec} = 1,711 \times 10^{53} \times h_R^{-12,179} \times E_R^{-10,725} \times E_{rec}^{-0,539} \times h_{BG}^{6,334} \times E_{BG}^{-14,538} \times E_{SL}^{0,423} \times N^{7,216} \quad (27)$$

- σ_t - Igualando a equação (14) adotando os coeficientes referentes ao σ_t e a equação (17), obtém-se (28):

$$h_{rec} = 1,446 \times 10^2 \times h_R^{-0,527} \times E_R^{-0,152} \times E_{rec}^{0,528} \times h_{BG}^{-0,426} \times E_{BG}^{-0,068} \times E_{SL}^{-0,284} \times \left\{ - \left[\left(\frac{\log N - 17,241}{17,241} \right) \times \sigma_{adm} \right]^{-1,107} \right\} \quad (28)$$

- ε_v - Igualando a equação (14) adotando os coeficientes referentes à ε_v e a equação (19), obtém-se (29):

$$h_{rec} = 1,517 \times 10^4 \times h_R^{-0,438} \times E_R^{-0,132} \times E_{rec}^{-0,459} \times h_{BG}^{-0,342} \times E_{BG}^{-0,098} \times E_{SL}^{-0,296} \times N^{0,210} \quad (29)$$

5.4.1 Fluxograma proposto

A partir do conhecimento obtido, por meio da experiência internacional e pelo estudo paramétrico, é proposto na Figura 2 fluxograma com as considerações referentes às etapas do dimensionamento estrutural de pavimento com reciclagem profunda e adição de cimento, fornecendo um resumo, a fim de definir se a solução de reciclagem é viável e adequada ou se é recomendado considerar alternativas como estratégia de reabilitação ou a reconstrução total do pavimento.

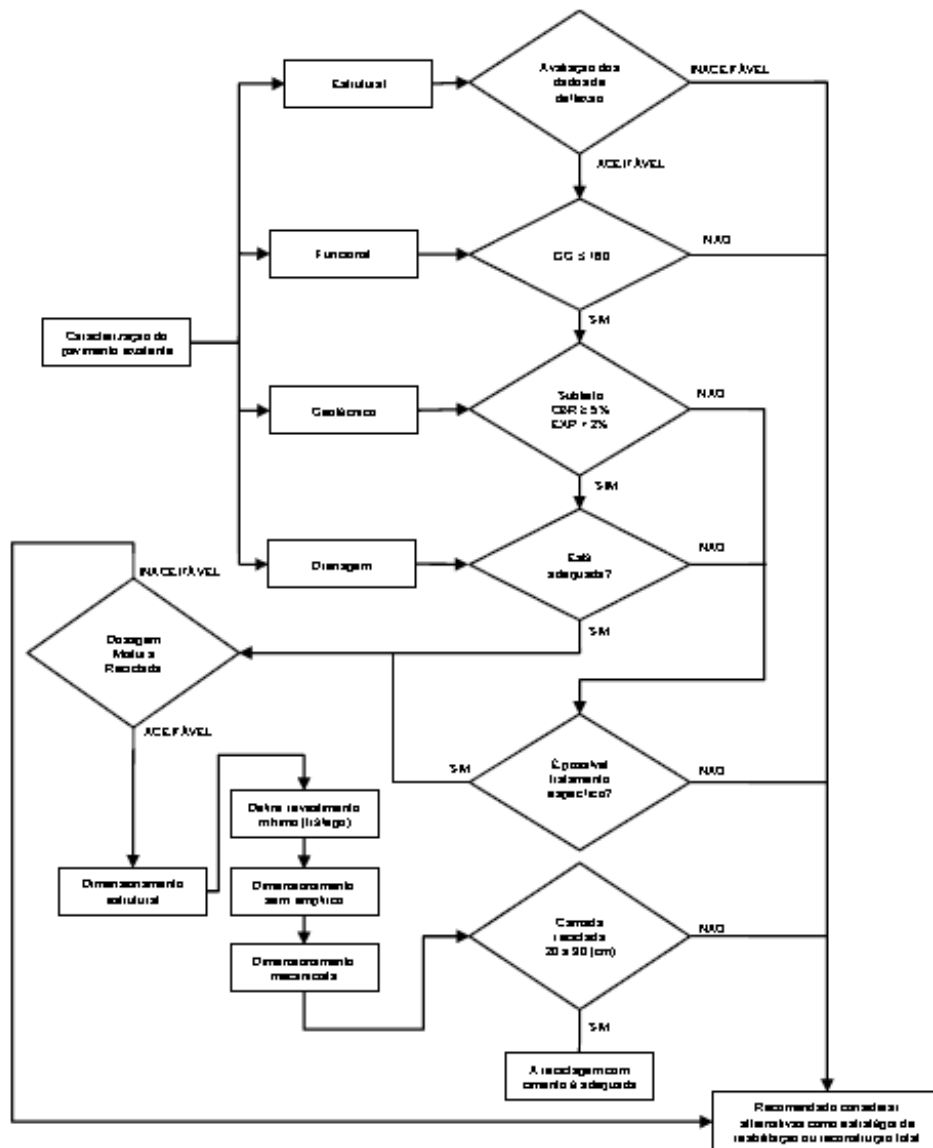


Figura 2: Fluxograma para dimensionamento de pavimento com reciclagem profunda e adição de cimento

6. AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS ESTUDADAS

A fim de aferir de maneira prática os métodos apresentados e se obter uma análise de sensibilidade é proposto o estudo do dimensionamento estrutural da reciclagem profunda, através das diferentes metodologias estudadas, para a reabilitação de um pavimento asfáltico.

A seguir são apresentadas as premissas adotadas para o dimensionamento:

- $N_{USACE} = 2,0 \times 10^7$;
- $N_{AASHTO} = 5,0 \times 10^6$;
- CBR Subleito = 6%;
- MR infraestrutura remanescente = 1.300 (kgf/cm²); e
- Rigidez e resistência da camada reciclada:
 RCS 7 dias = 35,0 (kgf/cm²);
 RTF 7 dias = 6,0 (kgf/cm²);
 $MR = 50.000$ (kgf/cm²);
 $K_{B_{Rec}} = 1,40$.

Apresenta-se na Tabela 4 o resumo das estruturas dimensionadas conforme as metodologias investigadas.

Tabela 4: Resumo do dimensionamento estrutural das metodologias investigadas

Metodologia	Espessura (cm)			
	Revestimento asfáltico	Base granular	Reciclagem com cimento	Infraestrutura remanescente
TRL386	15,0	-	24,0	26,0
TRL611	15,0	-	42,0	8,0
AASHTO	7,5	-	20,0	37,5
CALTRANS	15,0	-	24,0	26,0
<i>Andalucía</i>	15,0	-	25,0	25,0
<i>Castilla y León</i>	18,0	-	35,0	12,0
Método Semirrígido	10,0	-	25,0	30,0
proposto Invertido	10,0	12,0	20,0	23,0

Conforme observado, as espessuras para a camada de revestimento asfáltico variam entre 7,5 cm e 18,0 cm, respeitando a espessura mínima prevista para cada metodologia, exceção para o método de *Castilla y León* (2004), onde foi necessário o incremento no revestimento asfáltico para atendimento dos modelos previstos pelo método. Ressalta-se que o catálogo de soluções proposto na metodologia é baseado sobre uma fundação classificada como tipo E2 com $MR \geq 120$ MPa, deste modo, justifica-se a necessidade do incremento no revestimento asfáltico devido o CBR de projeto adotado igual a 6%.

As metodologias da AASHTO e do DNIT preconizam as menores espessuras de revestimento asfáltico obtidas, 7,5 cm e 10,0 cm, respectivamente, quando comparadas as outras metodologias investigadas que apresentam soluções de revestimento asfáltico partindo de 15,0 cm para o tráfego previsto.

Quanto às espessuras obtidas para a camada reciclada, há grande variação nos valores obtidos, oscilando entre 20,0 cm e 42,0 cm. O dimensionamento da camada mais espessa é obtido pelo método inglês TRL611, podendo ser justificado pelo conceito no dimensionamento estrutural

baseado na correlação entre o módulo dinâmico e a RTF, limitado a valores aproximados de 600.000 kgf/cm² e 50,0 kgf/cm², respectivamente.

A metodologia adaptada da AASHTO e o método proposto para estrutura semirrígida invertida apresentam as menores espessuras para a camada reciclada, com resultado igual ao mínimo recomendado de 20,0 cm, entretanto, a estrutura semirrígida invertida obtida apresenta espessura total resultante das novas camadas implantadas de 42,0 cm, superior ao obtido pela AASHTO de 27,5 cm.

As metodologias do TRL386, CALTRANS, *Andalucía* e o método proposto para estrutura semirrígida apresentam espessuras semelhantes e plenamente exequíveis variando entre 24,0 cm e 25,0 cm.

7. CONCLUSÕES

Pela análise bibliográfica desenvolvida verificou-se que outros países desenvolveram metodologias de dimensionamento estrutural específicas para as soluções de reabilitação em reciclagem profunda com cimento *Portland*. Embora esta tecnologia esteja relativamente consolidada no país, o dimensionamento estrutural deste tipo de solução tem sido efetuado de maneira empírica, à luz de informações e experiências divulgadas principalmente pelas empresas que comercializam o equipamento, ou por outras que executam especificamente este tipo de serviço.

Uma vez definida a utilização da técnica de reciclagem, o procedimento proposto consiste em dimensionar o pavimento como se fosse uma nova estrutura apoiada sobre o remanescente resultante da fresagem profunda, atendendo à metodologia do DNIT para pavimentos asfálticos semirrígidos e invertidos, complementada pela avaliação mecanicista, levando em consideração a teoria elástica linear e a resistência à fadiga dos materiais constituintes das diversas camadas envolvidas, fundamentada pelo estudo paramétrico de equações para correlação entre as deformações críticas esperadas na estrutura reciclada, resultando em modelos de dimensionamento para a camada reciclada com cimento.

A análise paramétrica permitiu observar que o parâmetro de tensão de tração (σ) é crítico no dimensionamento da camada reciclada com cimento para a estrutura semirrígida. Nos casos de estrutura semirrígida invertida, o parâmetro de tensão de tração (σ) também apresenta grande influência, porém, em determinados casos a deformação horizontal de tração (ϵ_x) se mostra como parâmetro crítico, com grande influência exercida pela camada de revestimento asfáltico e base granular, requerendo critério rigoroso do projetista na definição das espessuras adotadas.

Como se observou na avaliação das metodologias, após aplicação dos critérios recomendados neste trabalho, as espessuras obtidas no dimensionamento estrutural da camada reciclada apresentou-se coerente com as metodologias estudadas, exceção para o método inglês do TRL611 e o espanhol de Castilla y León.

O emprego do modelo de fadiga para camada reciclada com cimento proposto por Minguela (2011), adotado neste estudo pela carência de modelos nacionais específicos, apresentou resultados satisfatórios quando comparado aos modelos nacionais existentes para outros tipos de misturas tratadas com cimento, atuando em uma faixa de desempenho consistente, resultando em espessuras coerentes para a camada reciclada entre 20 cm e 30 cm.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guide for design of pavements structures**. Washington D.C., 1993.
- BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3ª edição. ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2010.
- CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Full depth reclamation using cement**. California, 2013.
- DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. Brasília: Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2004.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Projeto de pavimentação: IP-DE-P00/001**. São Paulo, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis - Procedimento B: DNER-PRO 011/79**. Rio de Janeiro, 1979.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação: Publicação IPR-719**. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço: DNIT 167/2013-ES**. Rio de Janeiro, 2013.
- DIEFENDERFER, B. K.; APEAGYEI, A. K. **Analysis of full-depth reclamation trial sections in Virginia**. Charlottesville: Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2011.
- FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento portland: definição das bases para um método de dosagem**. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES. **Reciclados de firmes in situ con cemento: guías técnicas**. Madri, 2013.
- JUNTA DE ANDALUCÍA. CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES. **Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía**. Sevilla, 2007.
- JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN. CONSEJERÍA DE FORMENTO. **Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos**. Salamanca, 2004.
- LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente**. Fortaleza: (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, 2003.
- LOPES, F. M. **Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico: avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação**. Campinas: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- MERRIL, D.; NUNN, M.; CARSWELL, I. **A guide to the use and specification of cold recycled materials for the maintenance of road pavements**. Transportation Research Laboratory Report 611. Crowthorne. 2004.
- MILTON, L. J.; EARLAND, M. **Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling**. Crowthorne: Transportation Research Laboratory Report 386, 1999.
- MINGUELA, J. D. **El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ con cemento**. Burgos: Tese (Doutorado) - Universidad de Burgos, 2011.
- OLIVEIRA, P. C. A. D. **Diretrizes para projetos de reciclagem com adição de brita e cimento**. Campinas: Tecnopav Engenharia, 2011.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Guide to Full Depth Reclamation (FDR) with Cement**. Illinois, 2005.

ANEXO: 2

Comparativo de custo médio por quilometro da solução convencional, com dormentes, e a solução sem dormentes e lastro.

ITEM	UNID.	Unitário	CONVENCIONAL		LONGITUDINAL	
			Consumo	Total	Consumo	Total
Substituição de brita por laterita						
Fornecim. Brita/km	m³	19,38	542,3	10.509,77	-	-
Fornecim. Laterita/km	m³	6,29	-	-	326,2	2.051,80
Transporte Brita/km	t.km	0,64	27.145,9	17.373,39	-	-
Transporte . Laterita/km	t.km	0,58	-	-	5.389,5	3.125,91
Lastramento	km	15.582,97	1,0	15.582,97	-	-
Socaria	km	29.017,62	1,0	29.017,62	-	-
Execução de sublastro	m³	6,29	-	-	326,2	2.051,80
TOTAL / KM				72.483,75		7.229,51

Obs.:

- Preços em dólar americano
- Consumos médios por km dos lotes 1 a 5EF da FIOL (698km). Incluindo desvios e pátios de cruzamento;
- Preços de 03/2010, cotação do dólar 1,80R\$/USD;
- Bitola larga (1,60m);
- Cada lote > 110km.

Submissão de Trabalhos Técnicos para a Revista Pavimentação

- 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:
 - O trabalho é aceito para publicação;
 - O trabalho não é aceito para publicação e será então devolvido aos autores;
 - 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, editadas 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. Associe-se e acesse todas as edições da revista na íntegra. Colabore para a manutenção da Revista Pavimentação enviando seu artigo para abpv@abpv.org.br, sugestões e se associando à ABPv.



www.abpv.org.br

[INSCREVA-SE EM EAD](#)

[ENSINO A DISTÂNCIA](#)

[DRENAGEM URBANA](#)

[CLICANDO AQUI!](#)

[CLIQUE AQUI!](#)

[ANUIDADE DE 2018](#)

Sócio individual - pessoa física

ATENÇÃO: Se estiver inadimplente com outros anos, entre em contato com a Secretaria

RESPONDA A PESQUISA E ESCOLHA EM QUAL CIDADE DESEJA A REALIZAÇÃO DE SEU(S) CURSO(S) .

CLIQUE NO(S) DE SEU INTERESSE , PREENCHA AS INFORMAÇÕES PARA QUE RECEBA A PROGRAMAÇÃO AO TÉRMINO DESTE LEVANTAMENTO!

- ◆ [AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E PROJETO DE REFORÇO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E MEIO AMBIENTE - PRESENCIAL](#)
- ◆ [BÁSICO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA - PRESENCIAL](#)
- ◆ [CONTROLE DA QUALIDADE EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA - PRESENCIAL](#)
- ◆ [CUSTOS E ORÇAMENTOS RODOVIÁRIOS - PRESENCIAL](#)
- ◆ [DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS - PRESENCIAL](#)
- ◆ [DRENAGEM – URBANA - PRESENCIAL](#)
- ◆ [DRENAGEM DE ESTRADAS - PRESENCIAL](#)
- ◆ [ENGENHARIA FERROVIÁRIA - PRESENCIAL](#)
- ◆ [HDM 4 - PRESENCIAL](#)
- ◆ [MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS - PRESENCIAL](#)
- ◆ [MATERIAIS E MISTURAS ASFÁLTICAS - PRESENCIAL](#)
- ◆ [MECÂNICA DOS PAVIMENTOS - PRESENCIAL](#)
- ◆ [MÉTODO BAILEY DE DOSAGEM - PRESENCIAL](#)
- ◆ [PRÁTICO DE MATERIAIS ASFÁLTICOS - PRESENCIAL](#)
- ◆ [PRÁTICO DE SOLOS - PRESENCIAL](#)
- ◆ [PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DE OBRAS RODOVIÁRIAS - PRESENCIAL](#)
- ◆ [QUALIDADE DE MATERIAIS E SERVIÇOS DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA - PRESENCIAL](#)
- ◆ [TECNOLOGIA DE PAVIMENTOS - CONSTRUÇÃO, QUALIDADE E CASOS DE OBRAS - PRESENCIAL](#)

RESPONDA A PESQUISA E ESCOLHA EM QUAL MÊS DESEJA A REALIZAÇÃO DE SEU (S) CURSO(S)!

CLIQUE NO(S) DE SEU INTERESSE , PREENCHA AS INFORMAÇÕES PARA QUE RECEBA A PROGRAMAÇÃO AO TÉRMINO DESTE LEVANTAMENTO!

- ⇒ [AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E PROJETO DE REFORÇO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E MEIO AMBIENTE - EAD](#)
- ⇒ [BÁSICO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA - EAD](#)
- ⇒ [CONTROLE DA QUALIDADE EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA - EAD](#)
- ⇒ [CUSTOS E ORÇAMENTOS RODOVIÁRIOS - EAD](#)
- ⇒ [DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS - EAD](#)
- ⇒ [DRENAGEM DE ESTRADAS - EAD](#)
- ⇒ [DRENAGEM URBANA - EAD](#)
- ⇒ [ENGENHARIA FERROVIÁRIA - EAD](#)
- ⇒ [HDM 4 - EAD](#)
- ⇒ [MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS - EAD](#)
- ⇒ [MATERIAIS E MISTURAS ASFÁLTICAS - EAD](#)
- ⇒ [MECÂNICA DOS PAVIMENTOS - EAD](#)
- ⇒ [MÉTODO BAILEY DE DOSAGEM - EAD](#)
- ⇒ [PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DE OBRAS RODOVIÁRIAS - EAD](#)
- ⇒ [QUALIDADE DE MATERIAIS E SERVIÇOS DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA - EAD](#)
- ⇒ [TECNOLOGIA DE PAVIMENTOS - CONSTRUÇÃO, QUALIDADE E CASOS DE OBRAS - EAD](#)