

TEXTO DE SISTEMATIZAÇÃO CRÍTICA

Liedi Légi Bariani Bernucci

**Texto de Sistematização Crítica
apresentado ao Departamento de
Engenharia de Transportes
da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para Concurso de
Livre-Docência**

**São Paulo
julho de 2001**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Transportes

Liedi Légi Bariani Bernucci

**Desenvolvimentos e Aprimoramentos de Tecnologia de Utilização
de Solos Tropicais e de Misturas Asfálticas em Pavimentação**

Texto de sistematização crítica de parte da obra da candidata, apresentado ao Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o Concurso de Livre-Docência na Área de Infra-estrutura de Transportes - Projeto e Construção de Pavimentos do Departamento de Engenharia de Transportes

São Paulo
Julho de 2001

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

Ao Nick, ao André e ao Felipe, minha amada família, força do meu dia-a-dia;

À Leila e ao Luiz, meus pais que me ensinaram a ser persistente e a ter grande amor e respeito à vida;

À Lesly, ao Elton e ao Gabriel, irmãos e sobrinho que me dão apoio e tantas alegrias;

Ao Prof. Balduzzi, *in memoriam*, que me mostrou a beleza da pesquisa e a importância da liberdade e da independência para contribuir com o conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à FAPESP pelo financiamento de pesquisas, bolsas e viagens a congressos que tanto contribuíram para o desenvolvimento e o aprimoramento das pesquisas, ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa, pelo financiamento da pesquisa PRONEX (Centros de Excelência) e pelas bolsas de mestrado e de iniciação científica concedidas aos meus orientados; à FINEP pelo financiamento de projetos de pesquisa; à CAPES pelas bolsas de mestrado e doutorado concedidas.

Agradeço às empresas, aos órgãos públicos e às concessionárias que têm colaborado com nosso trabalho e ampliado nossa área de atuação.

Agradeço aos meus amigos, colegas e orientados, que contribuem efetivamente com o meu trabalho, sem os quais não poderia estar nesta etapa da carreira.

Agradeço em especial: à Maria Eugenia Boscov e ao Orlando Strambi, professores da Poli, que são minha companhia diária, amigos inseparáveis, incentivadores do meu trabalho; ao Prof. Kokei Uehara, eterno mestre, cujas palavras tanto contribuíram para finalizar este trabalho; ao Prof. Massola, Diretor da Poli, que sempre me deu um voto de apoio e de confiança; aos meus colegas Edson de Moura e Helder de Godoy, e todas pessoas queridas que estão ou que passaram pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação pelo constante trabalho do dia-a-dia, e pela crença nas nossas metas e na perspectiva do futuro.

PREFÁCIO

PREFÁCIO

Este texto de sistematização focaliza parte importante da minha atuação profissional como pesquisadora e docente, procurando realçar a linha de pesquisa que tem conduzido meu trabalho nestes vinte anos de engenharia civil. A meta da minha atividade profissional, que dá a matiz e que articula seus desdobramentos, tem sido a busca constante da aplicação da pesquisa na prática da engenharia.

A linha mestra de pesquisa tem se pautado em dois grandes temas centrais: solos tropicais e misturas asfálticas. A interligação desses temas evidencia-se no objetivo final: materiais para pavimentos e potencial desdobramento de uso dos resultados em obras civis.

As pesquisas que tenho conduzido abrem-se em duas vertentes: ampliação de conhecimentos e preenchimento de lacunas em áreas já consolidadas na Escola Politécnica - como a geotecnia de solos tropicais para obras viárias -, e abertura de novos caminhos para alargar o campo de atuação - como as misturas asfálticas, reciclagem, novos materiais e novos processos para construção de pavimentos e extensão para outras obras.

Para a viabilização das pesquisas, foram concentrados esforços na formação de recursos humanos dentro da Poli, na participação em trabalhos conjuntos com grupos de pesquisa de outras instituições, com empresas e com órgãos públicos, e na ampliação de infra-estrutura através de auxílios em órgãos de fomento, convênios e prestação de serviço.

Para a sistematização dos conhecimentos produzidos através de trabalhos de pesquisa, orientação e assessorias foram selecionados e são reproduzidos no texto apenas alguns resultados, gráficos, fotos e figuras que foram considerados essenciais. A apresentação desses dados não segue necessariamente uma ordem cronológica, pois nem sempre a evolução das pesquisas se deu em seqüência encadeada, ou por falta de recursos humanos e de infra-estrutura, ou porque as questões e interesses estão em constante dinâmica seja para entender, explicar ou aplicar. A leitura do memorial, que acompanha este texto, esclarece a evolução cronológica da carreira, com a descrição dos fatos e oportunidades que levaram à condução das pesquisas; nele estão anexados artigos, relatórios, cópias de documentos e trabalhos completos, evidenciando cada fase em detalhe.

ÍNDICE

ÍNDICE

	Página
INTRODUÇÃO	1
1. Importância da pavimentação no desenvolvimento nacional	2
2. Tecnologia e análise de materiais de pavimentação e condução das pesquisas no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação	3
SOLOS TROPICAIS	6
1. Introdução	7
2. A importância dos solos tropicais como material de construção rodoviária	8
3. A extensão da Mecânica dos Solos e da Pavimentação para os solos tropicais	9
4. A Engenharia Geotécnica brasileira aplicada aos solos tropicais	10
5. A identificação e a classificação de solos tropicais	10
5.1. Introdução	11
5.2. Problemas relacionados às propriedades índices das classificações tradicionais	13
5.3. Método de identificação de solos lateríticos	17
5.4. Método expedito de identificação de solos tropicais – Guia Identificatório de solos tropicais	25
6. Solos tropicais compactados – contração e expansão	25
6.1. Introdução	26
6.2. Importância da medida da expansão e da contração para projeto de obra viária	26
6.3. A expansão e a contração – efeitos da perda de umidade	29
6.4. Tensões de sucção em solo laterítico e histerese devido ao efeito da perda de umidade	32
6.5. Alguns aspectos físico-químicos importantes dos solos lateríticos	33
7. Dimensionamento de pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego	33
7.1. Introdução	34
7.2. Importâncias das vias de baixo volume de tráfego	34
7.3. Método de dimensionamento de pavimentos exclusivo para rodovias de baixo volume de tráfego – concepções e critérios	36
7.4. Critério de resistência dos materiais da AASHTO-86: módulo de resiliência determinado em laboratório	38
7.5. Critério de resistência da AASHTO-86: módulo de resiliência atuante em campo	42
7.6. Dimensionamento de pavimentos construídos com solos lateríticos com base na AASHTO-86	46
8. Movimentação d'água em camadas de solos lateríticos	46
8.1. Introdução	46
8.2. Fluxos d'água possíveis nas camadas de pavimento de solo laterítico	49
8.3. Os gradientes térmicos em camadas de solos lateríticos	49
8.4. Avanço da frente de umidade para a pista vinda do acostamento	52
9. Estabilização de solos tropicais	52
9.1. Algumas experiências com cal e cimento	53
9.2. Algumas experiências com solo-agregado	55
9.3. Calcinação de solos argilosos caulínicos	57
10. Extensão da aplicação dos solos tropicais em obras e drenagem	59
11. Novos estudos e perspectivas	

MISTURAS ASFÁLTICAS	60
1. Introdução	61
2. A importância das misturas asfálticas como material de construção viária	61
3. A ampliação do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação para pesquisas de misturas asfálticas	62
4. Dosagem de misturas asfálticas	64
5. Produção e compactação de misturas asfálticas	65
6. Deformação permanente de misturas asfálticas	70
6.1. Importância do estudo da deformação permanente e métodos usuais de avaliação em laboratório	70
6.2. Origem das deformações permanentes	73
6.3. Efeito da temperatura	73
6.4. Variação do teor de ligante asfáltico	74
6.5. Variação do tipo de ligante asfáltico: aumento de consistência ou modificação por polímeros e por outros produtos	76
6.6. Variação da graduação e do tipo de agregado	85
7. Resistência à tração e módulo de resiliência de misturas asfálticas	89
7.1. Importância do estudo da resistência à tração e do módulo de resiliência e métodos usuais de avaliação em laboratório	89
7.2. Origem das fissuras em pavimentos	92
7.3. Variação do teor de ligante asfáltico	93
7.4. Efeito da temperatura	95
7.5. Variação do tipo de ligante asfáltico: aumento de consistência ou modificação por polímeros ou por outros produtos	97
7.6. Variação da graduação e do tipo de agregado	99
8. Durabilidade das misturas asfálticas à ação deletéria da água	99
8.1. Importância do estudo da durabilidade à ação deletéria da água e métodos usuais de avaliação em laboratório	99
8.2. Origem do descolamento do asfalto da superfície do agregado	101
8.3. Resistência retida	104
8.4. Perda de massa no ensaio Cântabro	105
9. Novas tecnologias: adequação à disponibilidade de materiais e às condições ambientais brasileiras	108
9.1. Importância do uso de novas tecnologias	108
9.2. Revestimentos asfálticos para aplicações regionais	109
9.3. Revestimentos asfálticos drenantes	111
9.4. Revestimentos asfálticos tipo SMA – <i>Stone Matrix Asphalt</i>	112
9.5. Materiais recicláveis e seu uso de revestimentos asfálticos	118
9.6. Novos desenvolvimentos	121
9.7. Novos estudos e perspectivas	123
CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

1. Importância da pavimentação no desenvolvimento nacional

A pavimentação de rodovias brasileiras é um dos desafios a ser enfrentado nos próximos anos de modo a melhorar o nível de vida da população e reduzir os custos de transporte, tendo como benefício econômico direto a redução dos custos dos produtos e dos serviços, auxiliando inclusive na expansão de mercado mais competitivo internacionalmente.

Calcula-se que cerca de 3/5 do transporte de cargas no Brasil seja realizado por rodovias. Há praticamente cinco décadas, devido à opção de investimento na indústria automobilística, houve a necessidade de expansão rápida da malha rodoviária brasileira pavimentada, que até o início da década de 50 era incipiente, contando com apenas 1300 km.

Nossa rede rodoviária pavimentada conta atualmente com aproximadamente 160.000 km, perfazendo apenas 10% da rede total existente de rodovias. Apesar de malha rodoviária pouco expressiva, estima-se que o patrimônio em rodovias pavimentadas seja de algumas dezenas de bilhões.

Dados os problemas de ordem econômica que afetam o Brasil nos últimos anos, poucas obras novas têm sido executadas, observando-se, assim, um envelhecimento da malha existente e conseqüente aparecimento de problemas relacionados à ausência ou ineficiência de consideração da restauração dos pavimentos. Neste contexto, dois ramos fortes da pavimentação têm-se colocado como desafios: o primeiro concernente à restauração dos pavimentos existentes e duplicações de rodovias, e o segundo, mas não menos importante, a pavimentação de baixo custo, para viabilizar a pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego, as quais compreendem parcela expressiva da malha não pavimentada.

Na primeira vertente, a grande maioria dos revestimentos das rodovias pavimentadas brasileiras é constituída de revestimentos com misturas asfálticas; a tendência comum de projetos novos e de restaurações é a continuidade da adoção dessas misturas em revestimentos em grande parte das obras, devido ao custo, às facilidades executivas, à quantidade apreciável de usinas de asfalto no país, onde grande parte dos empreiteiros possui equipamentos para execução e domina algumas técnicas construtivas. Porém, o Brasil resente-se de não dispor de tecnologia apropriada para cada tipo de obra, acabando por empregar a mesma concepção de mistura asfáltica para uma gama ampla de situações envolvendo diferentes solicitações e condições ambientais. A partir da década

de 90, importantes passos de desenvolvimento tecnológico foram dados, com a introdução de novos tipos de revestimentos asfálticos e novos materiais e, principalmente, com a conscientização da necessidade que o Brasil necessita de novas técnicas e novas alternativas.

No outro ramo da pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego, a construção de pavimentos de baixo custo envolve a necessidade de desenvolvimento de técnicas simples, porém de alta tecnologia, pois as soluções devem ser voltadas às especificidades regionais e aos materiais disponíveis locais. O pavimento tem um peso muito grande no custo total destas obras, e por este motivo, para redução de custos, admite-se em geral um maior risco nos projetos desta natureza, representando um desafio muito interessante aos engenheiros.

2. Tecnologia de análise de materiais de pavimentação e condução das pesquisas no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação

A história da pavimentação brasileira pautou-se inicialmente no emprego de conhecimentos, de métodos e de tecnologia de construção desenvolvidos em países europeus e nos Estados Unidos, dado o avanço da Pavimentação nestas regiões. Devido às nossas especificidades de natureza de materiais e de condições ambientais, distintas dos países desenvolvidos, tecnologias tiveram que ser adaptadas ou desenvolvidas para se adequarem ao nosso uso. Assim, métodos empíricos devem sempre ser analisados criticamente antes de seu emprego. Os métodos teóricos serão sempre válidos, desde que todas as variáveis, ou pelo menos as mais importantes, sejam incluídas na análise.

O problema da engenharia de pavimentos, como em muitas outras áreas, é que os métodos mais usuais e mais realistas são métodos empírico-teóricos, utilizados como ferramentas para analisar comportamento e prever desempenho de materiais e de estruturas de pavimentos. Para esta previsão, necessita-se de um bom conhecimento das solicitações de tráfego, bastante complexa e variável, e das solicitações ambientais, uma vez que os pavimentos são estruturas relativamente delgadas frente às dimensões de sua superfície, estando estas sempre expostas às variações de temperatura, às chuvas, às secas etc.

Para uma análise realista de desempenho, deve-se conhecer os materiais que constituem a estrutura do pavimento, cujo comportamento é extremamente variável dependendo do tipo de material, da produção e preparo, das condições de compactação, das combinações de materiais, de suas posições relativas na estrutura, e de seu comportamento frente às solicitações. A complexidade do comportamento dos materiais e de sua previsão advém da somatória de todas essas variáveis, atuando conjuntamente. Assim, para um projeto de pavimento, os materiais devem ser conhecidos por meio de

ensaios de seleção e de caracterização de suas propriedades. A decisão do tipo de ensaio que se deve fazer está intimamente ligado no tipo de pavimento que se projeta, ou seja, no risco que se pode ou que se deseja assumir.

Dentro deste espírito é que grande parte de meu trabalho de pesquisa se enquadra: estudar os materiais e desenvolver técnicas de seleção e de caracterização, procurando alterar suas propriedades, seja por meio de misturas com outros materiais, estabilizações ou modificação de composição para atenderem às solicitações a que serão submetidos.

Devido à minha formação e às oportunidades profissionais, estudo os solos desde que me formei em engenharia, há vinte anos. Quer dizer, um pouco mais que isso: antes de iniciar meus estudos de engenharia na Escola Politécnica, cursei um ano de Geologia no Instituto de Geociências da USP. Durante toda minha graduação trabalhei com estruturas e modelos estruturais; iniciei pós-graduação nesta área. Porém as oportunidades profissionais me conduziram novamente aos solos. Tive como mestres importantes e que influenciaram minha forma de análise os Profs. Faiçal, Souza Pinto, Nogami e Balduzzi. O Prof. Balduzzi, em especial, influenciou minha forma de conduzir as pesquisas, por ter orientado meu trabalho por tantos anos.

Meu trabalho em misturas asfálticas é mais recente, porém é conduzido exatamente da mesma forma que as pesquisas em solos. Afinal, minha formação geotécnica somente me auxiliou na análise das misturas asfálticas. O Prof. Balduzzi salientava sobre a importância da avaliação da natureza e do estado dos solos. Realçava sempre que devíamos em primeira instância sempre olhar para a graduação, forma e resistência dos grãos para os materiais e frações granulares, e para a natureza e atividade dos finos. Devíamos pensar nos materiais observando a combinação destas frações, estando atentos à resistência ao cisalhamento do conjunto, da interação do ângulo de atrito com a coesão, e da variação da resistência com o estado.

As misturas asfálticas não são diferentes: possuem sua fração granular, sempre muito expressiva, fazendo com que a graduação tome uma dimensão extremamente importante na resistência ao cisalhamento, e parte dos finos (fíler) e o asfalto fazem o papel do material que cimenta, que dá coesão. A complexidade desta "coesão" é que a consistência dos asfaltos não se altera somente com a natureza deste material, mas também com a temperatura; além disso, são materiais viscoelásticos, variando seu comportamento não somente pela intensidade das solicitações de carga, como também pela duração e frequência de carregamento. Porém há uma vantagem inegável nas misturas asfálticas: a natureza destas misturas pode ser modificada e as composições são determinadas pelo engenheiro; em solos, o engenheiro deve saber utilizar as boas propriedades dos solos e conviver ou contornar ou mesmo controlar as más características.

As pesquisas do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação que têm sido realizadas estão sendo conduzidas para o desenvolvimento e a adaptação de novas tecnologias de revestimentos asfálticos, com o objetivo final de obter misturas asfálticas mais duráveis e mais resistentes, oferecendo novas alternativas, incluindo aquelas de interesse regional. Na área de solos, as pesquisas têm focado a análise de solos tropicais e materiais de importância regional, buscando técnicas e aprimoramentos de métodos para seleção e caracterização destes materiais, alterando suas propriedades sempre que necessário e possível.

Os dois capítulos que se seguem trazem parte dos estudos que vimos realizando em solos tropicais e em misturas asfálticas, salientando alguns resultados e a linha de pesquisa definida para o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação.

SOLOS TROPICAIS

SOLOS TROPICAIS

1. Introdução

Este capítulo dedica-se aos solos tropicais como material de construção viária e sua possível extensão para obras de engenharia civil em geral. Abordam-se de forma sucinta a história e o processo de consolidação de conhecimentos, justificando-se a importância do tema dada a sua abrangência no Brasil. Solos tropicais constituem-se em área tradicional de pesquisa e de desenvolvimento tecnológico da Escola Politécnica, com o Prof. Nogami como seu precursor e expoente. O enfoque do capítulo é dado na participação da docente em pesquisas, ora versando sobre a complementação e o aprimoramento de certas atividades, ora buscando o desenvolvimento e o preenchimento de algumas lacunas em determinadas etapas para o uso de solos tropicais.

2. A importância dos solos tropicais como material de construção rodoviária

Os solos tropicais, lateríticos e saprolíticos, definidos segundo designação da ISSMFE (1985), representam uma das grandes fontes de material para as construções rodoviárias brasileiras; a história de sua utilização, seja como material para aterros e para a proteção de taludes, como para constituírem as estruturas de pavimentos, confunde-se com o crescimento rodoviário e expansão das vias urbanas.

No Brasil, a aplicação na construção viária das técnicas disponíveis de escolha de solos e de hierarquização dos materiais, desenvolvidas em países europeus e nos Estados Unidos, implicou em algumas soluções inadequadas, por vezes onerosas, ou mesmo em certos insucessos. Uma das falhas graves consiste em não levar em consideração as peculiaridades dos solos tropicais e as condições ambientais prevalentes no Brasil, desprezando muitos solos de indubitável qualidade para a construção de pavimentos. A experiência de campo de engenheiros e de geólogos levou à opção de uso de certos solos em obras geotécnicas, embora não indicados por tais técnicas e métodos estrangeiros.

A importância de viabilizar o uso de solos tropicais em obras viárias é a economia possibilitada pela utilização de materiais locais, dada a abundância das ocorrências desses solos nas regiões de clima quente e úmido, predominante no território nacional, com horizontes de dezenas de metros de solo sobre a rocha, e escassez de afloramentos rochosos para exploração em forma de pedreiras. O uso de solos locais possibilita reduções

em transporte, na exploração de pedreiras, em uso de estabilizantes sem a real necessidade, entre outros fatores. O uso de material local de forma racional pode ser também considerado um ganho ambiental, diminuindo o consumo de combustível e energético de maneira geral.

3. A extensão da Mecânica dos Solos e da Pavimentação para os solos tropicais

De forma extrema, se fosse possível conhecer com rigor as características essenciais de natureza e de estado dos solos tropicais, e precisamente as solicitações e as condições ambientais, não seria necessário recorrer a procedimentos de reconhecimento expedito, a classificações, ou a correlações de comportamento com propriedades índices. Não seria necessário conhecer sua procedência, localização no perfil ou aplicar qualquer método visual-táctil. No entanto, um conjunto de análises amplas e aprofundadas de um solo, além de ser proibitivamente oneroso, seria inviável para se empregado para um projeto, demandando muito tempo, e execução de repetidos ensaios de várias espécies. Porém, mesmo assim, os solos apresentam uma variabilidade ora importante do ponto de vista da engenharia, ora desprezível. A avaliação rigorosa de todas as variáveis envolvidas no processo é delicada, e não deixaria de haver a interferência da experiência do técnico na análise global e tomada de decisão.

O entendimento das características inerentes dos solos tropicais, advindas de sua formação, e a compreensão das especificidades de estado, tanto do material natural como compactado, juntamente com o efeito da atuação climática e condições ambientais de forma geral, levam à possibilidade de aplicação da Mecânica dos Solos e da Pavimentação com sucesso. Os insucessos podem ser explicados pela aplicação de métodos específicos, válidos para um determinado universo de solos, ou de procedimentos empíricos cujas correlações foram desenvolvidas para um grupo restrito de solos, que não levam em conta as especificidades de natureza e de estado dos solos tropicais.

O desafio de reconhecer e de empregar corretamente os solos tropicais como material de construção foi e tem sido um estímulo para alguns técnicos e pesquisadores de estudarem os problemas e de darem soluções não específicas para uma determinada obra, ou baseadas puramente na experiência empírica, mas de utilização geral na engenharia geotécnica tropical para obras viárias. Para tanto, além de pesquisar os casos de sucessos e entender estes êxitos, foi e tem sido preciso conceber novos métodos e adaptações de técnicas construtivas para ampliar o uso dos solos tropicais.

4. A Engenharia Geotécnica brasileira aplicada aos solos tropicais

No Brasil, principalmente a partir da década de 50, com a necessidade de expansão rápida da malha rodoviária brasileira pavimentada houve uma demanda de desenvolvimento de conhecimento e de técnicas para a aplicação de solos tropicais como material de construção. Apesar dos solos serem plásticos, muitos foram utilizados com surpreendente sucesso, levando ao uso de solos pela experiência.

Na década de 60, vários trechos experimentais foram construídos com solos tropicais lateríticos como material de base de pavimentos, apresentando bom desempenho, comparável aos materiais mais nobres da pavimentação, como a brita graduada. Com isso, as técnicas construtivas foram sendo adaptadas e aprimoradas principalmente na década de 70 e ainda 80.

Paralelamente, foram sendo desenvolvidos métodos para selecionar solos e definições de parâmetros necessários para sua especificação como material de construção. Um convênio entre o DER-SP e a Escola de Engenharia de São Carlos da USP viabilizou uma grande pesquisa, levantando vários aspectos, desde laboratoriais até o desempenho em pista. Pesquisadores e docentes como Douglas Villibor, Manoel Alba Sória, Fernando Correa, Glauco Fabbri, entre outros, participaram ativamente destas pesquisas e desenvolvimentos. Este convênio contava também com a participação do Prof. Nogami, engenheiro do DER-SP e docente da Escola Politécnica da USP. Em 1981, Villibor defendeu sua tese de doutorado, com muitos dados referentes aos solos dos trechos experimentais, resultados de laboratório e conclusões sobre aplicações de solos lateríticos em pavimentos de baixo volume de tráfego. Desta tese e do conhecimento acumulado com os sucessos, o DER-SP especificou os solos arenosos finos lateríticos como material de base de pavimentos (DER-SP, 1991).

O desempenho dos solos lateríticos em pista, os defeitos típicos das rodovias construídas com estes solos e alternativas de reabilitação foram sendo estudados com o passar dos anos e das experiências, tendo-se hoje técnicas conhecidas para a restauração desses pavimentos; destaque a Villibor, 1981; Fortes et al, 1994; Villibor et al, 1992; Villibor et al, 1994.

Nogami e Villibor (1981) publicam também no mesmo ano a classificação MCT, exclusiva para solos tropicais e para aplicações rodoviárias. Estudos e desdobramentos sobre a identificação e a classificação foram feitos a partir da MCT, com destaque aos trabalhos e teses de Sória (1985) e Vertamatti (1988).

A identificação e a classificação para a engenharia são um dos temas mais pesquisados na geotecnia dos solos tropicais devido à importância do assunto e às dificuldades intrínsecas de escolher propriedades índices que reflitam o comportamento geotécnico dos solos tropicais. Vários

pesquisadores publicaram trabalhos sobre o assunto, com destaque a brasileiros como Vargas (1982), Preussler et al. (1981), Nogami e Cozzolino (1985), Fortes e Nogami (1991), Fabbri (1994), Bernucci (1987 - *trabalho completo anexado ao Memorial*), Ignatius (1988), Nogami e Villibor (1994), Godoy (1997).

Um dos desdobramentos do tema tem enfoque na estabilização dos solos tropicais, precisamente com o uso de cimento, cal e cinzas volantes - destaque a alguns trabalhos importantes: Sousa Pinto e Boscov (1991); Boscov (1989); Ceratti (1991); Nóbrega (1995).

Ainda dentro da idéia de tornar estável, algumas alternativas de mistura de solos com agregados (brita, areia, cascalhos etc) têm sido estudadas e utilizadas em pista para atender a pelo menos um dos requisitos de propriedades geotécnicas de interesse, como por exemplo, o aumento de resistência, a redução da expansão ou a redução de contração; alguns trabalhos nesta linha: Moretti (1987); Serra (1987); Serra e Bernucci, 1990 - *trabalho completo anexado ao Memorial*; Bernucci e Serra, 1991 - *trabalho completo anexado ao Memorial*; Bernucci e Serra, 1990 - *trabalho completo anexado ao Memorial*; Villibor et al., 1997 - *trabalho completo anexado ao Memorial*.

Os solos tropicais abrangem também as lateritas, concreções de pouca expressão no Estado de São Paulo, porém de grande importância regional em estados do centro-oeste, norte e nordeste do Brasil. As lateritas têm sido aproveitadas para base de pavimentos, constituindo-se, em algumas áreas, os únicos materiais granulares disponíveis para tal finalidade. Destaque aos trabalhos Santos (1998); e Rezende (1998).

Pode-se observar que a evolução da pesquisa em solos tropicais e o desenvolvimento de técnicas ocorreram não por ordem sistemática de etapas, conforme um projeto ou uma obra viária, mas por oportunidades e interesses específicos.

5. A identificação e a classificação de solos tropicais

5.1. Introdução

Este é um dos assuntos da geotecnia dos solos tropicais que será focado pois constitui-se em um dos temas de maior pesquisa ao qual a docente vem se dedicando desde o início da carreira até atualmente.

A seguir, faz-se um breve preâmbulo das razões dessa pesquisa de modo a justificar a importância do assunto na geotecnia de solos tropicais para obras viárias e apresenta-se sucintamente a oportunidade para o estudo deste tema pela docente.

Nas rodovias, pela particularidade de extensão geográfica dessas obras, há uma expressiva diversidade de ocorrências de solos, que constituirão o subleito da via, os taludes de corte, os materiais de aterros, ou servirão de jazidas para a construção das camadas de estruturas de pavimentos. Coleta-se um grande volume de amostras as quais deverão ser caracterizadas para definição de parâmetros de projeto e para a exploração de jazidas. Uma das primeiras etapas de trabalho consiste na identificação e classificação dos solos, que embora possam parecer simples do ponto de vista geotécnico, é importantíssima para as obras viárias, pois através desta etapa pode-se ter uma primeira idéia da dimensão do problema, de possíveis necessidades de trocas de solo, de exploração de novas jazidas, da disponibilidade de materiais na região, da programação de ensaios de laboratório para as etapas seguintes, orientando assim o projeto e dando uma primeira estimativa de custo. Portanto, se esta fase não for realizada de forma adequada, podem ocorrer erros de projeto, execução de ensaios laboratoriais desnecessários, desprezo de jazidas de solos próximas às obras e de consideração imprópria de lotes homogêneos de ocorrências de solos. Ou seja, embora simples e pouco onerosa, a identificação e a classificação dos solos para obras viárias tomam uma dimensão de grande importância para o sucesso de uma obra, economizando em tempo e no custo da movimentação de terra e pavimentação.

O primeiro contato da docente com os solos tropicais deu-se como estudante de pós-graduação em Engenharia de Solos em 1982, cursando uma disciplina do Prof. Nogami. Coincidentemente naquele ano, a Poli recebeu a visita do Prof. Balduzzi da ETHZ (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich) que convidou alguns alunos para estagiarem na Suíça para estudarem solos tropicais; a instituição suíça estava inserida em uma pesquisa na Costa do Marfim, África, desenvolvendo tecnologia de uso de solos tropicais na construção viária, na proteção de taludes contra a erosão e nas plantações agrícolas. No final de 1983, ao chegar na Suíça, o Prof. Balduzzi incumbiu a estagiária de estudar o assunto: contração e expansão de solos tropicais. A partir de então, cerca de 50 solos, procedentes da Costa do Marfim e do Brasil, foram colocados à disposição para a pesquisa. Paralelamente, um docente da ETHZ, Walter Arnold, pesquisava os solos tropicais para proposição de um método de classificação, auxiliado por uma estagiária brasileira, Maria Eugenia Boscov, hoje docente do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da EPUSP. Várias pesquisas foram realizadas separadamente, porém algumas eram complementares.

5.2. Problemas relacionados às propriedades índices das classificações tradicionais

A identificação e a classificação de solos deve ser simples, rápida e eficiente, sendo necessário, para tanto, um método prático e capaz de subdividir os solos em poucas classes. Os solos que se enquadram em uma dada classe devem ter em comum similares propriedades geotécnicas de interesse às

obras de engenharia, respeitado o princípio que a cada classe corresponde um dado comportamento e vice-versa, obedecendo à necessária relação biunívoca entre classe e comportamento. No entanto, antes de aplicar qualquer método de engenharia, é necessário compreender para que tipos de solos este foi concebido; Casagrande (1947, p.783) alerta que “se a arte de classificar solos está longe de ser satisfatória, a confusão é ainda maior quando seus usuários desconhecem suas limitações, aplicando-a para propósitos diferentes daqueles para os quais foi concebida”.

As propriedades índices tradicionalmente usadas pela engenharia para a classificação de solos são a distribuição granulométrica e os limites de consistência de Atterberg. Embora desnecessário fundamentar, devido ao nível de conhecimento adquirido e publicado, realçam-se as dificuldades de classificar os solos tropicais pela distribuição granulométrica e pelos limites de consistência. O método laboratorial para a determinação da graduação interfere no resultado em tal monta que este passa a não refletir o real comportamento de campo dos solos tropicais, dada a presença marcante de micro-agregados que são em grande parte destruídos devido ao procedimento normatizado. Os limites de consistência variam, dependendo da energia e do tempo de espatulação e desagregação do solo, sendo que o limite de liquidez é marcadamente afetado.

Tradicionalmente, a expansão é uma propriedade indesejada do ponto de vista geotécnico, portanto, a plasticidade, diretamente relacionada à expansão, é uma característica “ruim” dos materiais para uso em pavimentação. Assim, as especificações tradicionais, em especial a classificação rodoviária, “penalizam” os solos plásticos, colocando-os em classes “ruins”, denominados “fracos a pobres”, pois quanto mais plásticos, mais seriam indesejáveis em uma escala hierárquica. Porém, um dos principais motivos pelos quais as classificações baseadas nestas propriedades índices não diferenciam solos tropicais com comportamento geotécnico distinto e não hierarquizam corretamente, é porque a plasticidade não infere a expansão e nem a perda de resistência em presença d’água de solos tropicais.

A complexidade de análise de comportamento dos solos tropicais através de propriedades índices manifesta-se, entre outros aspectos, na ausência de relação entre a plasticidade e a expansão. Portanto, ao ser avaliada a plasticidade, não se pode prever a expansão de um solo tropical - esta resume a inadequação dos métodos tradicionais, não só pela questão do procedimento de ensaio, mas pela errônea inferência dos resultados na previsão do comportamento geotécnico.

Ao mesmo tempo, a plasticidade é uma propriedade interessante pois reflete, por exemplo, a contração por perda de água que um solo pode apresentar, dependendo de seu estado e umidade. O problema retorna na escolha do procedimento para avaliar a plasticidade, seja na técnica de determinação como na definição das propriedades índices. Pelos métodos tradicionais, a

potencial contração de um solo é inferida ao ser avaliada a plasticidade pelos limites de consistência de Atterberg. A contração, no entanto, não é uma propriedade importante por uma questão climática – em climas frios e temperados a perda de umidade não é frequente – e, adicionalmente, é indesejada do ponto de vista de comportamento, e portanto evitada – ver no próximo item 6.

A resistência é uma propriedade imprescindível de ser avaliada do ponto de vista geotécnico. A resistência ao cisalhamento se relaciona com a graduação para as frações granulares e, por isso, a distribuição granulométrica é tradicionalmente uma propriedade índice e forte atributo para hierarquizar materiais. A presença de fração granular é igualmente importante para solos tropicais; os materiais granulares são igualmente nobres em climas tropicais. No entanto, deve-se ater à presença de agregações e de macrocristais na fração areia, que influenciam diretamente no comportamento; outro aspecto relevante é a avaliação da resistência dos agregados, dada a presença de frações granulares pouco resistentes em horizontes de saprolito. No entanto, o princípio mais importante é que na hierarquização de solos para as obras viárias, os solos finos plásticos não são necessariamente problemáticos em países tropicais. Há dois motivos para os solos plásticos serem tradicionalmente preteridos em países de clima frio e temperado: solos plásticos expandem e, caso sofram congelamento no inverno, são desestruturados pelo aumento volumétrico da água congelada; adicionalmente, sendo pouco permeáveis, a saída de água após degelo é prejudicada, provocando a expansão e a perda de resistência, além do desenvolvimento de pressões neutras expressivas frente à solicitação do tráfego.

Resumindo, as propriedades índices são afetadas pelas técnicas de ensaios, não inferem adequadamente o comportamento geotécnico em campo e visam uma hierarquização de solos do ponto de vista viário não necessariamente condizente com nossos materiais e a atuação climática predominante no Brasil.

5.3. Método de identificação de solos lateríticos

Há praticamente 200 anos atrás, em 1807, Buchanan (Schellmann, 1979) – observou mudanças irreversíveis de propriedades de solos lateríticos resultantes da secagem; definiu este solo como sendo um material facilmente trabalhável quando na forma de pasta, sem resistência ao corte por lâminas de ferro; porém, ao ser exposto ao ar, perde umidade e endurece-se, tornando-se tão ou mais resistente que um tijolo (do latim *Later*), sem se desagregar com a ação da água ou do ar.

Os solos sensíveis à secagem, quando desidratados, podem apresentar irreversibilidade, pelo menos em parte, no processo de desidratação; dentre os solos tropicais, aqueles que possuem óxidos de ferro na forma hidratada

retêm as propriedades de auto-cimentação (Grant, 1974). Se a desidratação é pelo menos em parte irreversível, estes solos não devem ser capazes de reabsorverem água na mesma quantidade caso este efeito não ocorresse. Assim, se estes solos reabsorvem menos água, não reexpandem como seria de esperar.

Vários pesquisadores têm usado deste princípio para o reconhecimento dos solos lateríticos. Destaca-se o trabalho do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal) que identifica a tendência de alguns solos tropicais de se “petrificarem” após secagem (Nascimento et al., 1964). As pesquisas portuguesas indicam que algumas pastas de solos moldadas em forma de pastilhas não se desagregaram ao serem submersas em água, tendo sido inicialmente submetidas à perda de umidade. Foi definido um “grau de petrificação”, para identificar solos tropicais passíveis de apresentarem esta peculiaridade de comportamento frente à secagem prévia. Este índice é definido pelo *Limite de Contração LC* dividido pelo *Limite de Absorção LA*; este último foi designado por Nascimento et al (1964) como sendo a umidade atingida pela pastilha de solo moldado, após 24 horas de ensaio de reumidecimento por capilaridade, tendo sido a pastilha previamente seca ao ar. Netterberg (1975) reconhecendo os efeitos benéficos da secagem nos solos lateríticos, designa o processo como “auto-estabilização”, pois não prevê adição de estabilizantes ou o uso de energia de compactação adicional.

Bernucci (1987 – *trabalho completo anexado ao Memorial*), com o objetivo de distinguir os solos lateríticos com o poder de se petrificarem, dos demais solos tropicais, uma vez que estes são solos estáveis, resistentes e pouco expansivos para a construção viária, utiliza o princípio da “petrificação” como propriedade diferenciadora. Utilizando procedimento semelhante ao de Nascimento et al (1964), moldou pastilhas de solo, passado na peneira de abertura de 0,42 mm, com 20 mm de altura e 45 mm de diâmetro, no limite de liquidez, deixando-as secarem ao ar até constância de peso; durante este processo, foi determinado o Limite de Contração (LC). As pastilhas de solos foram então colocadas para reabsorverem água por capilaridade. Foi definido um parâmetro para refletir a capacidade do solo de reabsorver água após perda de umidade, designado por *Grau de Absorção A*, dado em porcentagem:

$$A = \frac{LA - LC}{LL - LC} \quad \text{eq. 5.1}$$

onde:

LA = Limite de Absorção d’água por capilaridade de pastilha de solo moldado no LL e submetida previamente à total perda de umidade ao ar, sem confinamento lateral durante o processo de reabsorção d’água (%).

LC = Limite de Contração de pastilha de solo moldado no LL e submetida à secagem total ao ar (%).

LL = Limite de Liquidez do solo (%)

Teoricamente, um solo seco reabsorveria água sem mudança de volume até que a umidade correspondesse ao limite de contração, ou seja, o volume de água absorvido seria igual ao volume de vazios (Castro, 1974). Isto seria possível se a água pudesse ingressar nos vazios sem mudança na estrutura do solo, sem mobilizar a hidratação das camadas duplas difusas dos argilo-minerais presentes. Prosseguindo a exposição do solo à ação da água, a absorção pode continuar, dependendo dos constituintes mineralógicos do solo. Argilas plásticas, sem confinamento, reabsorvem água até atingirem valores de umidade muito próximos ao limite de liquidez (Ladd, 1960). Solos arenosos puros, reabsorvem água por capilaridade até que todos os seus vazios estejam preenchidos por água, tornando-se saturado, embora não expansivo.

Desta forma, pode-se dizer que um solo seco moldado no Limite de Liquidez, ao reabsorver água atinge umidades que variam entre o Limite de Contração e o Limite de Liquidez. Quando o Limite de Absorção é igual ao limite de absorção, a desidratação do solo é um fenômeno totalmente irreversível (Grau de Absorção A igual a zero); quando o Limite de Absorção é igual ao limite de liquidez ou à umidade de moldagem, o solo tem um processo de desidratação totalmente reversível (Grau de Absorção A igual a 100%).

Após a reabsorção d'água por 24 horas, Bernucci (1987) estabeleceu padrões de fissuração da pastilha de solo como auxiliar na identificação dos solos, uma vez que esses padrões são bastante distintos entre si, dependendo da atividade dos argilo-minerais e da presença marcante de material inerte. Como parâmetro complementar de identificação, determinou a penetração de um cone de 60g de peso e 60° de abertura, colocado junto à superfície da pastilha, e caindo em queda livre de forma a penetrar no solo. O cone penetra no solo até que haja um equilíbrio entre a tensão solicitante com a resistiva do solo. Assim, quanto maior a penetração, menos resistente é o solo, pois com o aumento da profundidade penetrada, a área circular do cone, que passa pelo plano da superfície da pastilha, aumenta, de forma que, como o peso do cone é constante, a tensão solicitante é diminuída.

Os solos lateríticos areno-argilosos com poder de se petrificarem apresentam baixos graus de reabsorção d'água e elevada resistência à penetração do cone. Além disso, seu padrão de fissuração é bastante claro e diferente: ou não fissura, ou apresenta fissuras preferenciais, com linhas retas, interligadas ou não.

Com base em ensaios com cerca de 50 solos, pode-se subdividir os solos em três grandes classes (Bernucci, 1987; Bernucci e Balduzzi, 1994 - - *trabalho completo anexado ao Memorial*): *solos lateríticos coesivos - arenosos e argilosos*, com fração argila suficiente para dar a cimentação e promover certa irreversibilidade de comportamento frente à desidratação; *solos saprolíticos e transicionais*, englobando saprolíticos arenosos, siltosos e argilosos e solos transicionais, principalemnte areno-argilosos com certo

poder de se petrificarem; e *as areias lateríticas* não coesivas, como pouca ou praticamente nenhuma fração argila, em proporção insuficiente para dar coesão. A Figura 1 mostra como foi concebida a separação dos solos tropicais de modo a distinguir os solos lateríticos; a Figura 2 traz os resultados de cerca dos 50 solos ensaiados, subdivididos segundo suas classes; o número que acompanha o marcador refere-se ao padrão de fissuração.

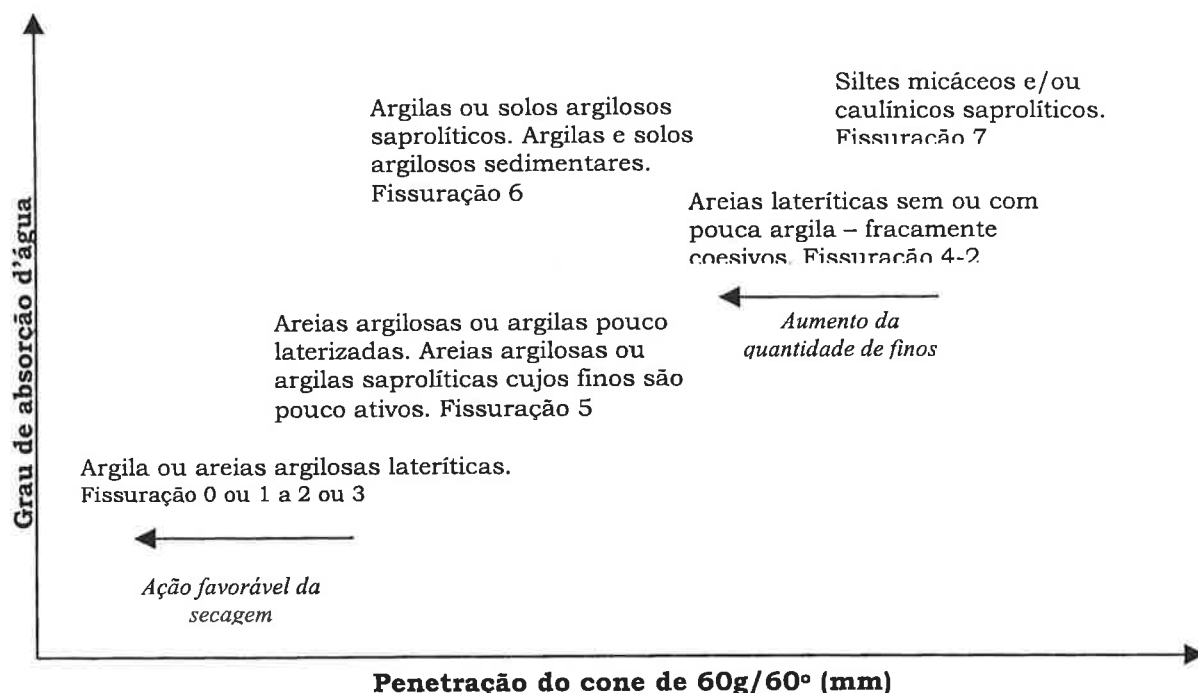


Figura 1: Identificação de solos pela susceptibilidade a mudanças pela secagem prévia ao ar (modificado de Bernucci, 1987 – pg 141).

Estes resultados complementaram o trabalho de Arnold (1985), do ETHZ - vide item 5.1 deste capítulo – que propõe uma classificação de solos tropicais baseada nos seguintes parâmetros: o inverso do peso específico aparente seco de pastilhas de solo moldadas no limite de liquidez e então secas ao ar até constância de peso, e a resistência a seco destas pastilhas determinadas por meio da resistência à tração por compressão diametral. A resistência a seco foi utilizada por Casagrande (1947) como técnica de campo para reconhecimento de solos argilosos, medida indireta da plasticidade. Há uma tendência da resistência à tração por compressão diametral ser maior em solos mais plásticos e, portanto, estes serem mais contráteis. O inverso do peso específico aparente seco diminui com o aumento da estabilidade físico-química do solo e aumento da cimentação laterítica. Os resultados de Bernucci ajudaram a diferenciar solos argilosos lateríticos dos não lateríticos.

designação de Vertamatti, 1988) e de solos bastante arenosos pelo método das pastilhas MCT. Os solos transicionais são abundantes e podem representar em algumas regiões os materiais disponíveis para a engenharia, como em grande parte da Amazônia, em regiões do Cristalino paulista, na bacia do Vale do Parnaíba - SP, dentre outras. O método das pastilhas MCT havia caracterizado bem os solos lateríticos de latossolos roxos e vermelho-escuro, pois estes são tipicamente lateríticos; tal método separa bem solos lateríticos argilosos dos saprolíticos e dos sedimentares de deposições recentes.

Após repetidos testes, aperfeiçoamentos e adaptações, estendeu-se o método de identificação de solos lateríticos de Bernucci (1987) de modo que fosse concebido um novo método para ser realizado em campo ou em laboratório, de fácil e rápida execução e que identificasse em apenas um dia os solos tropicais de forma geral. Mais de 200 amostras de solo foram cuidadosamente coletadas e testadas

Godoy reduziu as dimensões originais das pastilhas de Bernucci para 35 mm de diâmetro e 10 mm de altura de modo que pudessem ser secadas em estufa a 60°C (concebida especialmente para funcionar em campo com um pequeno gerador, secando pastilhas de argila em cerca de 2 horas). Mede-se a contração, referente à porcentagem de redução diametral da pastilha após secagem, com relação ao diâmetro original de moldagem – Figura 3. Godoy observou também que com tais dimensões, as pastilhas não precisavam ficar na absorção d'água por capilaridade por mais de 2 horas. Após este período, procede-se à penetração do cone; as mudanças de dimensão da pastilha acarretaram a necessidade de alteração de peso do cone, reduzindo sua massa para 30g, porém mantendo sua abertura original.

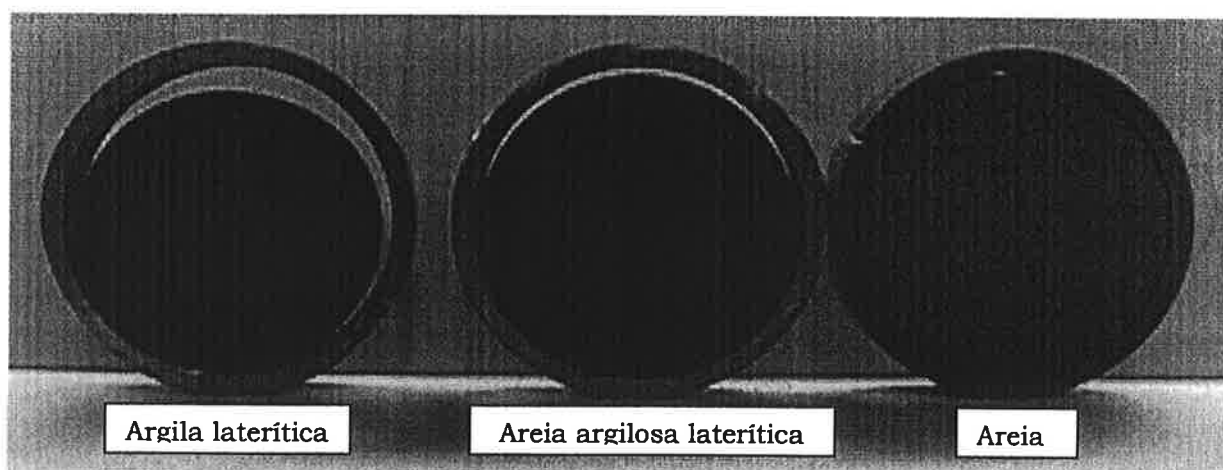


Figura 3: Comparação da contração de pastilhas de diferentes tipos de solos

Foram escolhidos quatro parâmetros básicos para a identificação de solos tropicais pelo método das pastilhas (Godoy e Bernucci, 2000 – *trabalho completo anexado ao Memorial*): contração, expansão (ou “inchamento” nos casos de areias), resistência à penetração de cone após reabsorção d'água, e o índice de reabsorção d'água.

A realização do método integral, começando pelo peneiramento do solo na peneira de abertura 0,42 mm até a identificação propriamente dita leva cerca de 14 horas, podendo ser realizada inteiramente no campo.

O índice de reabsorção d'água *IR* é calculado pela expressão:

$$IR = \frac{W_{reab} - W_{mold}}{W_{mold}} \quad \text{eq. 5.2}$$

onde:

W_{reab} = umidade da pastilha de solo após absorção d'água por capilaridade, submetida previamente à total perda de umidade em estufa a 60°C, sem confinamento lateral durante o processo de reabsorção d'água (%).

W_{mold} = Umidade de moldagem do solo, correspondente a uma penetração de 5mm com o cone de 60g/60°C (%).

O índice de reabsorção d'água foi simplificado para não ser necessária a determinação do Limite de Contração. A moldagem é realizada em umidade inferior ao Limite de Liquidez para acelerar o processo de perda de umidade e refere-se a uma resistência específica, determinada por meio do cone de penetração.

A Tabela 1 relaciona as propriedades básicas dos solos (do ponto de vista da engenharia de construção viária) e as propriedades índices estudadas pelo Método da Pastilha; realça-se também a relação entre estas e os parâmetros utilizados em projeto com solos compactados, no caso específico de obras de pavimentação (Godoy e Bernucci, 2001 - *trabalho completo anexado ao Memorial*).

Tabela 1: Relação entre propriedades geotécnicas de interesse às obras viárias e propriedades avaliadas e determinadas pelo Método das Pastilhas e ensaios para projeto de pavimentos (Godoy e Bernucci, 2001).

<i>Fatores e propriedades de solos do ponto de vista de aplicação em engenharia</i>	<i>Método Expedito das Pastilhas Proposto</i>	<i>Ensaio de julgamento de comportamento e parâmetros ou limites para projeto de pavimentos</i>
Secagem de solos por perda de umidade – importante em ambiente tropical, principalmente em camadas compactadas	Contração diametral	Contração axial
Reação em presença de água – entrada de água de chuva pelo revestimento, pelo acostamento, por capilaridade, etc	Índice de reabsorção de água e expansão/“inchamento”	Expansão axial
Resistência do solo em presença de água	Resistência à penetração do cone após reabsorção de água	Resistência à penetração de pistão - CBR (California Bearing Ratio)

Foi concebido um Guia Identificatório de Solos Tropicais – Tabela 2 (Godoy e Bernucci, 2000), subdividindo os solos em três grandes classes: Lateríticos, Transicionais e Não-Lateríticos. Cada uma das classes é subdividida em grupos. As classes e os grupos são obtidos por comparação de comportamento com um solo padrão – designado por Godoy de solo de caráter laterítico típico, que corresponde a um solo laterítico coesivo, que apresenta contração por perda de umidade e que, ao ser exposto em contato com a água, preserva-se muito resistente e expande-se muito pouco – como o material de Buchanan.

Paralelamente à execução dos ensaios do Método das Pastilhas, moldam-se duas esferas de solo com cerca de 2cm de diâmetro, com a mesma pasta que foi empregada para moldagem da pastilha no anel metálico. Secam-se as esferas juntamente com as pastilhas em estufa a 60°C; após secagem, os seguintes testes são realizados:

A primeira esfera é submetida a um teste de esmagamento, sendo:

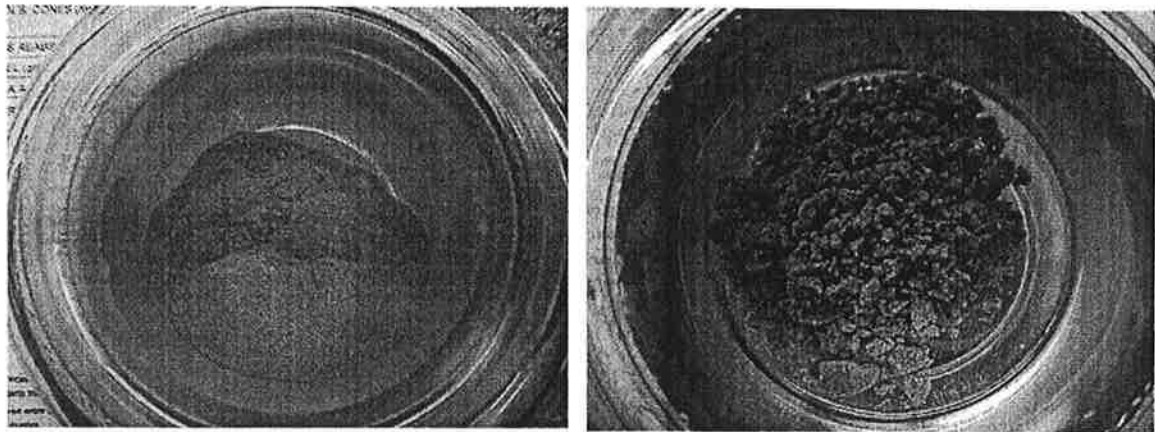
- 1- Esfera pouco resistente - quebra-se com facilidade entre os dedos polegar e indicador;
- 2- Esfera com certa resistência - quebra-se com mais dificuldade, entre o polegar e uma superfície plana dura;
- 3- Esfera resistente – não se quebra.

A segunda esfera é submersa em água suficiente para cobri-la, dentro de um recipiente pequeno de vidro ou de plástico translúcido. Verifica-se após os primeiros cinco minutos – Figura 4:

- 1- Esfera não trinca e não se altera (não se expande);
- 2- Esfera parte-se em blocos bem delimitados de dimensões milimétricas – não suja a água
- 3- Esfera parte-se em pequenas partículas, dimensão de areia, visíveis a olho nu;
- 4- Esfera desmancha-se em pasta de solo

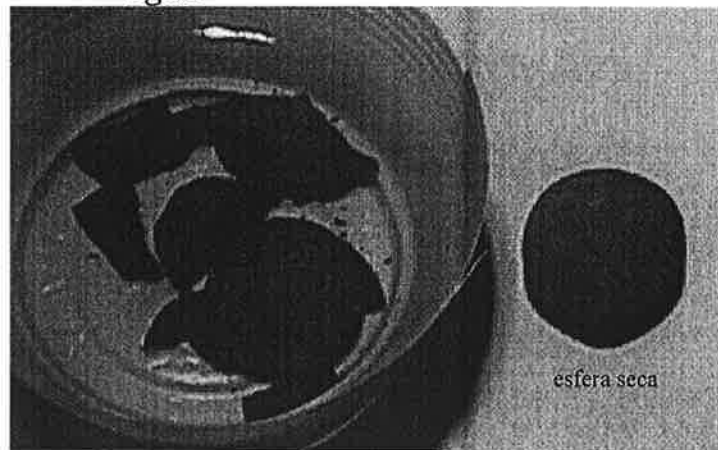
A Tabela 3 mostra alguns exemplos de resultados com o método da pastilha e o comportamento geotécnico previamente estudados por métodos de caracterização e de determinação de propriedades; estes resultados fazem parte de uma série de resultados contidos em Godoy e Bernucci (2001). Os solos selecionados foram escolhidos pela diversidade de classe e de grupo, e ainda pela diversidade de comportamento geotécnico em campo e diferentes características de resposta.

O Método Proposto mostra o caráter laterítico dos solos, especialmente importante para obras; identifica complementarmente o grupo, como os argilosos, prevenindo dos problemas de trincamento destes solos em camadas compactadas por perda de umidade e contração, característica importante para estruturas de pavimentos, camadas de retenção de resíduos, núcleo de barragens, etc.



Silte não-laterítico – reação de esfera na água

Areia – reação de esfera na água



Areia argilosa laterítica – esfera seca e na água

Figura 4: Comparação de comportamento em água de esferas moldadas com diferentes tipos de solos

Os solos de comportamento transicional podem ser identificados pelo Método das Pastilhas. O Método hierarquiza solos pelo comportamento, não caracteriza somente solos de comportamentos extremos, mas também os intermediários. Estes solos quando arenosos têm causado problemas se cuidados especiais não forem tomados na execução das obras. Devem trabalhar confinados lateralmente para evitar problemas de erosão de base. Realça-se, neste aspecto, que vários trechos rodoviários nas Bacias do Aguapeí e do Peixe apresentam proteção da borda da base, no acostamento, com plantio de grama para evitar erosão. Dependendo da expansão e da resistência dos solos transicionais arenosos ou os argilosos, não podem ser destinados a bases de pavimentos, pois não possuem propriedades que permitam esta destinação.

Tabela 2: Guia Identificatório de campo com base em ensaios do Método das Pastilhas (modificado de Godoy e Bernucci, 2000)

Classe	Grupos	Contr Diam (%)	Expansão ou inchamento (%)	Penetração do cone de 30g e 60° (mm)	Índice de reabsorção d'água	Resistência ao esmagamento de esfera	Reação esfera em água nos 5 primeiros minutos
Lateríticos	típicos	>2	Não expande; não trinca	0	negativo	3	1-2
	argilosos	>6	Expansão baixa – pode trincar com fissuras bem definidas (1)	≤6	≤0,5	3	1-2-3
	arenosos	2-6	Expansão baixa – pode trincar com fissuras bem definidas (1)				
	areias	<2	Inchamento típico de areia – aspecto de subdivisão em grãos na superfície			1	3
Transicionais	argilosos	>6	Expansão média a alta	6-8	0,3 a 0,9	3	2-3
	arenosos	2-6	Expansão média a alta				
	areias	<2	Inchamento típico de areia – aspecto de subdivisão em grãos na superfície				
Não-Lateríticos	argilosos	>6	Alta expansão – trincamento pronunciado	>8		3	3-4
	siltosos	<4	Altíssima expansão – micro fissurado	Máxima		1	4
	arenosos	2-6	Alta expansão – trincamento em toda a pastilha	>8	>0,5	2-3	3
	areias	<2	Inchamento típico de areia – aspecto de subdivisão em grãos na superfície	>8		1	3

Tabela 3 a: Relação entre classe e grupo do Método das Pastilhas e comportamento geotécnico em campo e desempenho em obras de engenharia (Godoy e Bernucci, 2001)

AMOSTRA	LOCALIZAÇÃO	CLASSE PEDOLÓGICA NO MAPA	Propriedades índices do Método das Pastilhas	CLASSE E GRUPO Método das Pastilhas	USO RODOVIÁRIO	DESEMPENHO NO PAVIMENTO
Descalvado - Usina Sta Rita	Rodovia Descalvado a Usina Santa Rita, SP	Latossolo Vermelho-amarelo / Areia Quartzosa	CON: 1.14 PEN: 0 EXP: 0 ÍND: 0.13	Areia laterítica	Base de pavimento	Pavimento construído na década de 80, onde a base apresentou problemas construídos por falta de coesão por ser uma areia. Teve que receber uma mistura com pedrisco para possibilitar a execução do revestimento asfáltico delgado. solo resistente, não expansivo, alto módulo de resiliência, extremamente dependente do confinamento, próprio de solos granulares não coesivos (Bernucci, 1995)
Américo Brasileiro	Via perto da ferrovia em Américo Brasileiro, SP	Latossolo Vermelho-amarelo / Latossolo Roxo	CON: 5.14 PEN: 0 EXP: 0.30 ÍND: - 0.32	Arenoso laterítico	Base de pavimento	Pavimento construído com sucesso na década de 80. Base de pavimento de via com revestimento asfáltico delgado, base resistente, não expansiva, alto módulo de resiliência (Bernucci, 1995)
Vetec - Carvalho Pinto	Rodovia Carvalho Pinto, SP - Lote 3	Desconhece-se localização da jazida	CON: 10.57 PEN: 0 EXP: 1.60 ÍND: - 0.42	Argiloso laterítico	Reforço da 2ª camada	Reforço do subleito da Rodovia Carvalho Pinto, lote 3, São José dos Campos, construída em 1992. Material de alta resistência e baixíssima expansão, porém apresentou trincamento excessivo pelo caráter argiloso, recebendo imprimação asfáltica logo após a execução da camada para reduzir perda de umidade e contração.

Legenda:

CON: Contração diametral da pastilha por perda de umidade em porcentagem

PEN: Penetração do cone de 30 g na superfície da pastilha após reabsorção d'água em mm

EXP: Expansão ou Inchamento (no caso de areias) diametral da pastilha após reabsorção d'água em porcentagem

ÍND: índice de reabsorção d'água da pastilha.

Tabela 3 b: Relação entre classe e grupo do Método das Pastilhas e comportamento geotécnico em campo e desempenho em obras de engenharia (Godoy e Bernucci, 2001)

AMOSTRA	LOCALIZAÇÃO	CLASSE PEDOLÓGICA NO MAPA	Propriedades índices do Método das Pastilhas	CLASSE E GRUPO Método das Pastilhas	USO RODOVIÁRIO	DESEMPENHO NO PAVIMENTO
Cat 5	Rua Morro Agudo - Cidade de Catanduva, SP	Solos podzolizados Lins e Marília	CON: 3.57 PEN: 6.5 EXP: 9.04 ÍND: 0.49	Arenoso transicional	Base de pavimento	Camada construída com sucesso graças ao cuidadoso processo construtivo - compactação cuidadosa, módulo de resiliência relativamente alto em campo, quando bem executado, avaliado por retroanálise de bacia de deflexão determinada por FWD. Na mesma via, por falta de execução adequada, há trecho com problemas (Alvarez Neto, 1998).
BAP 182 a	Km 8 - Rodovia Tupã - Quatá, SP	Podzólico Vermelho- amarelo	CON: 1.71 PEN: 9.0 EXP: 12.8 ÍND: 0.95	Areia não-laterítica	Somente aterro	Solo muito arenoso, pouca coesão e expansivo, não apropriado para camada de estrutura de pavimento, somente como aterro.
BAP 177a	Jazida de barro para olaria - Paulicéia, SP	Glei pouco húmico	CON: 9.14 PEN: 4.0 EXP: 21.1 ÍND: 0.36	Argiloso não- laterítico	Não utilizado	Solo muito argiloso, próprio para produção de cerâmica (tijolos, telhas, etc). Não pode ser utilizado em pavimentação. Não recomendado até como subleito.
Rodoanel 2	Cruzamento da Rod. Raposo Tavares com Rodoanel, SP	Latossolo Vermelho- amarelo raso	CON: 2.86 PEN: 12 EXP: 12.1 ÍND: 0.44	Siltoso não- laterítico	subleito	Subleito extremamente problemático, silte muito expansivo embora pouco contrátil, baixíssimo CBR e baixo módulo de resiliência, precisa trabalhar confinado com sobrecarga. Uma das razões de opção de pavimento de concreto de cimento Portland no Rodoanel, pois com revestimento asfáltico seria necessária a execução de reforço do subleito espesso com solo de carácter laterítico, não disponível em quantidade na região.

CON: Contração diametral da pastilha por perda de umidade em porcentagem

PEN: Penetração do cone de 30 g na superfície da pastilha após reabsorção d'água em mm

EXP: Expansão ou Inchamento (nócaso de areias) diametral da pastilha após reabsorção d'água em porcentagem

ÍND: índice de reabsorção d'água da pastilha.

O Método das Pastilhas aponta com simplicidade e rapidez características de solos problemáticos, como por exemplo o solo do Rodoanel. A classe e o grupo do solo estão bem identificados pelo Método Proposto e mostra com eficiência o tipo de problema que o solo apresenta no campo. Observe-se a simplicidade com que identifica as argilas expansivas e a diferem das argilas não expansivas ou pouco expansivas. O Método identifica os solos não-lateríticos, de propriedades bastante diferentes dos lateríticos, e os distingue em grupos de comportamento distintos em campo.

Caracteriza-se por um Método simples, rápido, prático, pouco oneroso e bastante seguro na identificação das classes e grupos. O método fundamenta-se em propriedades índices que avaliam diretamente as propriedades geotécnicas de interesse às obras viárias. O Método das Pastilhas e o Guia Identificatório foram desenvolvidos para serem empregados na fase preliminar de projetos, dedicado exclusivamente ao reconhecimento dos solos tropicais, para auxílio na fase exploratória das obras, servindo de ferramenta para identificar solos e agrupar ocorrências, para melhor planejamento de futuros ensaios laboratoriais, e para a localização de potenciais jazidas.

O Método das Pastilhas foi concebido a partir de dados e comportamento de solos do Estado de São Paulo, embora já tenha sido aplicado para cerca de duas dezenas de solos cearenses. Como todo método de identificação expedito, o método proposto deve apresentar limitações para identificação de todos solos tropicais, pois não é possível classificar em poucas classes e poucos grupos todos os solos com tanta segurança, como bem frisou Casagrande (1947) na apresentação da classificação unificada de solos. Espera-se, no entanto, que parcela expressiva dos solos tropicais possa ser identificado com sucesso pelo Método das Pastilhas. Continuidade desta pesquisa é esperada, com objetivo de estender o estudo para outras áreas, testando amostras de solos de diferentes procedência, inclusive de fora do Estado de São Paulo, para aperfeiçoar o método e alterá-lo, se necessário, para enquadrar um maior número de tipos de ocorrências de solos tropicais.

6. Solos tropicais compactados – contração e expansão

6.1. Introdução

Inicialmente, a pesquisa desenvolvida na Suíça pela docente baseou-se em solos compactados, antes mesmo de todos os ensaios discutidos no item 5 anterior. Na realidade, os resultados obtidos com corpos de prova compactados levaram à pesquisa em pastilhas de solo moldado.

Uma série de experimentos foi realizada medindo-se a expansão após imersão em água dos solos compactados e a contração de solos compactados após perda de umidade, com corpos de prova moldados em diferentes umidades. Foram observadas variações volumétricas e axiais, tempo e

velocidade de expansão e de contração em condições controladas, resistência à penetração de pistão, em diferentes condições de umidade de moldagem em ensaio mini-CBR, e após diferentes etapas de perda de umidade e reabsorção d'água em ensaio com confinamento controlado. A maior parte desses resultados encontra-se na Dissertação de Mestrado (Bernucci, 1987 - *trabalho completo anexado ao Memorial*), na Tese de Doutorado da Docente (Bernucci, 1995 - *trabalho completo anexado ao Memorial*) e em artigo científico (Bernucci, 1998 - *trabalho completo anexado ao Memorial*).

Neste texto, será dado destaque a apenas alguns resultados interessantes, mostrando a linha de pesquisa considerada.

6.2. Importância da medida da expansão e da contração para projeto de obra viária

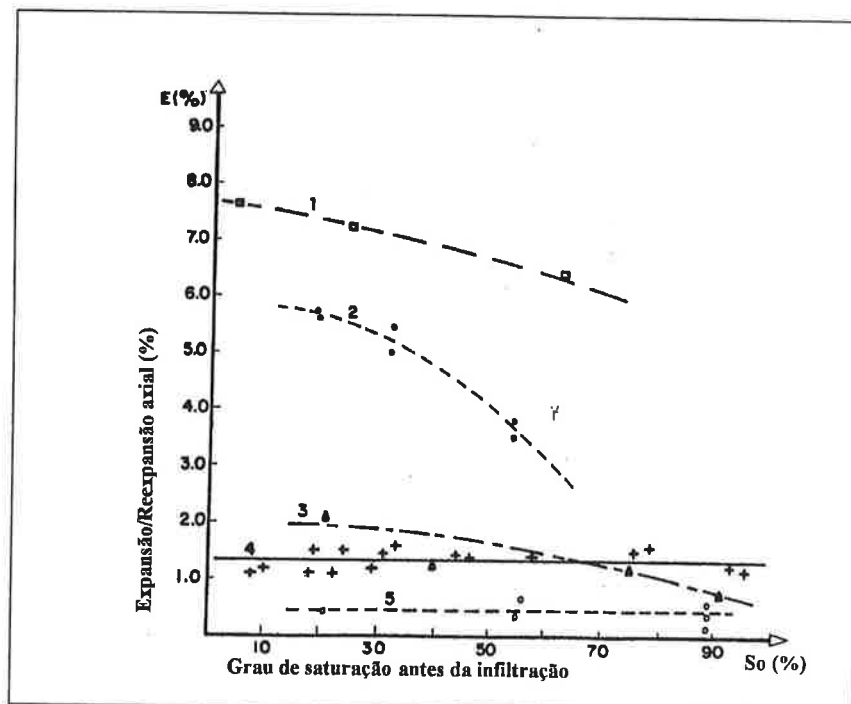
É conhecido dos técnicos que a contração aumenta com o teor de umidade de compactação e a expansão aumenta com a redução do teor de umidade de compactação. Quanto mais argiloso e mais plástico for um solo, mais expressiva é a variação volumétrica. Porém, o que diferencia os solos lateríticos dos demais solos plásticos é que a expansão, quando o solo é compactado na umidade ótima ou acima desta, é muito pequena, mesmo para as ocorrências mais argilosas. Como foi visto no item 5, a expansão dos solos lateríticos não guarda relação com a plasticidade, nem tão pouco com a contração. Assim, sendo importante a avaliação da expansão para uso em obras viárias, deve-se medi-la diretamente e não inferi-la por propriedades índices, mesmo em procedimentos expeditos de seleção de materiais.

Por outro lado, em ambientes tropicais, o clima quente propicia acentuadamente a perda de umidade dos solos. Em solos tropicais, como nos solos não-tropicais, a contração se relaciona diretamente à plasticidade; portanto, solos plásticos são contráteis e quanto mais plásticos, mais contráteis. A contração também é uma propriedade que deve ser avaliada para prever principalmente problemas de fissuração excessiva e prejudicial na camada compactada. O problema volta na forma de inferir a contração; foi discutido no item 5.2 anterior as dificuldades em avaliar a plasticidade pelos Limites de Atterberg. Considera-se mais interessante, portanto, a medida direta da contração.

6.3. A expansão e a contração – efeitos da perda de umidade

A dependência da expansão e da contração com o teor de umidade de compactação e com a classe e o grupo de solo são relações mais conhecidas e exploradas. Alguns resultados observados pela docente podem ser vistos em Bernucci (1987) e Bernucci (1995).

A Figura 5 mostra os resultados obtidos para cinco solos de diferentes características. Os solos foram compactados na umidade ótima correspondente à energia normal, retirados dos cilindros de compactação e recolocados dentro de um cilindro especial, munido lateralmente com membrana de modo a possibilitar a aplicação de tensão de confinamento lateral ao corpo de prova. Aplicada tensão de confinamento de 10KPa, os corpos de prova foram submetidos à infiltração d'água por capilaridade. Alguns corpos de prova foram submetidos à secagem prévia, controlando-se o grau de saturação após perda parcial de umidade, antes de serem submetidos ao contato com a água. Medidas de expansão foram realizadas por meio de leitura de deslocamento axial em um extensômetro.



- Solo1: Silte micáceo com caulinita saprolítico sobre Filito
 Solo2: Areia argilosa saprolítica sobre Sienito
 Solo3: Areia silto-argilosa sedimentar
 Solo4: Argila laterítica
 Solo5: Areia argilosa laterítica

Figura 5: Expansão em corpos de prova compactados e submetidos anteriormente a diferentes perdas de umidade, com diferentes graus de saturação antes da infiltração d'água (Bernucci, 1987).

Os solos não-lateríticos (os dois saprolíticos e o sedimentar) mostram maiores percentuais de expansão com a queda do grau de saturação antes do contato com a água, ou seja, o aumento da perda de umidade sofrido previamente resultou em maiores potenciais de expansão. Por outro lado, os solos lateríticos apresentam mesmos percentuais de expansão, independentemente do grau de saturação inicial. Os resultados mostram que a secagem após compactação é um processo prejudicial para os solos não-lateríticos ensaiados e não lesivo aos lateríticos. Na realidade, o ensaio deveria ser mais preciso para definir o comportamento dos solos lateríticos, com medidas de volume e não axiais, utilizando-se para tanto, por exemplo, uma câmara triaxial convencional.

Dada a simplicidade do arranjo experimental utilizado nesta pesquisa, optou-se por determinar o comportamento à expansão de solos lateríticos compactados no ramo seco da curva de compactação de modo a obter maiores taxas de expansão. A Figura 6 mostra a diferença de comportamento para a mesma areia argilosa laterítica (solo 4) da figura 5 anterior. Os corpos de prova foram compactados 2,3% abaixo da ótima da energia normal. A infiltração d'água foi obtida com confinamento lateral do corpo de prova de 10 kPa. Estes resultados possibilitam visualizar o efeito benéfico da perda de umidade em solos lateríticos compactados, diminuindo sua potencialidade à expansão.

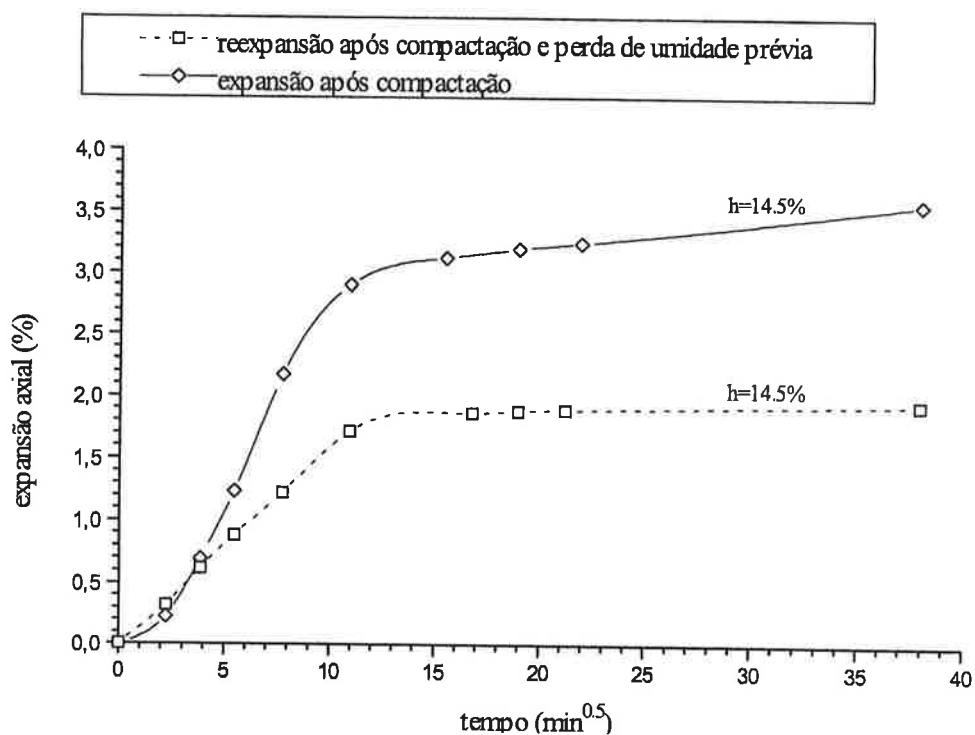


Figura 6: Expansão em corpos de prova compactados no ramo seco de uma areia argilosa laterítica, sendo que um deles foi submetido à secagem prévia ao ar (Bernucci, 1998, modificado a partir de Bernucci, 1995)

Foram realizados complementarmente ensaios de resistência à compressão em corpos de prova com 35 mm de diâmetro e 70 mm de altura na umidade ótima da energia normal (Bernucci, 1987). A areia argilosa laterítica que sofreu perda de umidade prévia antes de reabsorção d'água apresenta uma resistência de pico 20% maior e uma resistência residual cerca de 10% mais alta, que àquela que não passou pela secagem prévia. Na areia argilosa saprolítica observa-se uma queda de resistência devido à perda de umidade prévia.

Com o objetivo de verificar a estabilidade do processo frente aos resultados com a secagem prévia dos solos lateríticos, foram realizados ensaios cíclicos de secagem e infiltração d'água por capilaridade, livre, sem confinamento lateral. Medidas de contração e expansão axiais foram feitas durante todo o

processo. A Figura 7 mostra os resultados obtidos. Observe-se que somente o solo laterítico apresenta estabilidade frente à solicitação por ciclos de secagem/umedecimento. Seu comportamento assemelha-se a um solo-cimento.

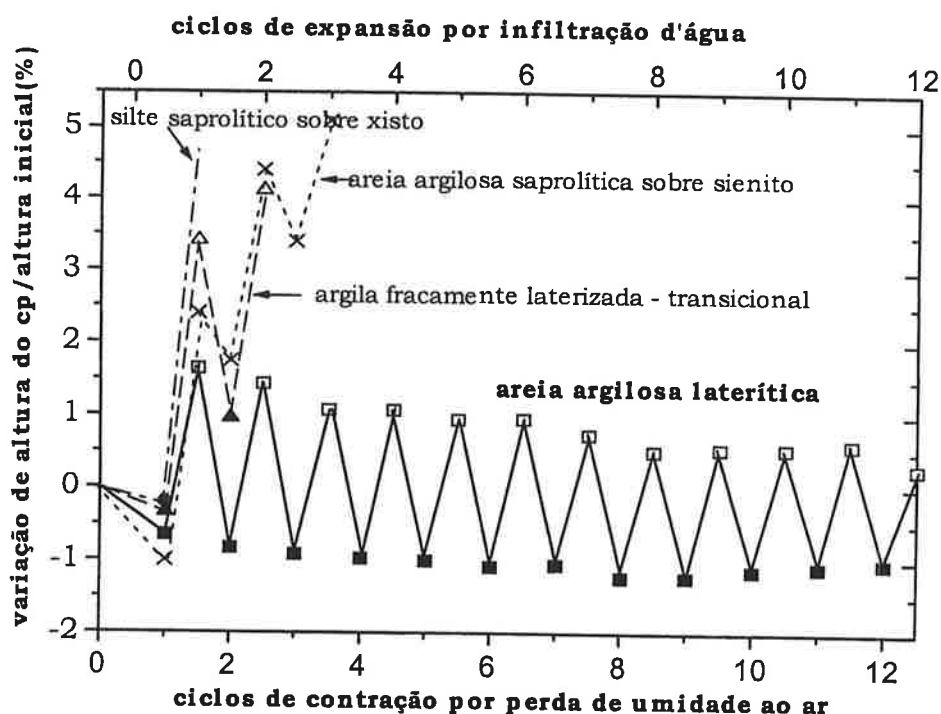


Figura 7: Ciclos de contração e expansão em corpos de prova compactados (Bernucci, 1987)

A secagem prévia funciona nos solos lateríticos coesivos como uma energia de compactação complementar ou como um tratamento de aumento de resistência com aditivos químicos, é como se aumentasse sua tensão de pré-adensamento. Do ponto de vista da engenharia, a secagem pode ser utilizada como um recurso para melhorar o comportamento dos solos lateríticos, já considerados geotecnicamente estáveis.

6.4. Tensões de sucção em solo laterítico e histerese devido ao efeito da perda de umidade

Em 1997, Camacho, docente da UNESP – Ilha Solteira, iniciou seu doutorado sob orientação desta docente e co-orientação do Prof. Marinho, do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da EPUSP. Seu tema refere-se ao estudo de umidades de equilíbrio em camadas de estrutura de pavimento construídas com solos lateríticos compactados. Vem pesquisando o efeito do processo cíclico da secagem e do umedecimento nas variações de sucção que ocorrem normalmente nos pavimentos, em especial nas bordas; paralelamente tem estudado o efeito da temperatura nas camadas de solo e como os gradientes térmicos interferem na movimentação d'água.

Uma das primeiras pesquisas do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação para desenvolver a tese de Camacho foi realizada por um estudante de graduação, Victor Alves Lima, em 1998, orientado pela docente. Ele iniciou estudos de determinação da tensão de sucção em areia argilosa laterítica. Este solo foi compactado na energia normal, apresentando sua umidade ótima em 10,7%; várias determinações de sucção foram realizadas com a técnica do papel filtro (Marinho, 1994), deixando corpos de prova compactados ao longo da curva de compactação perderem umidade de forma controlada - Figura 8. Observou-se que as tensões de sucção eram altas na umidade ótima de compactação (148 kPa) e que uma eventual perda de umidade acarretava um aumento expressivo da sucção, em qualquer das situações iniciais de partida.

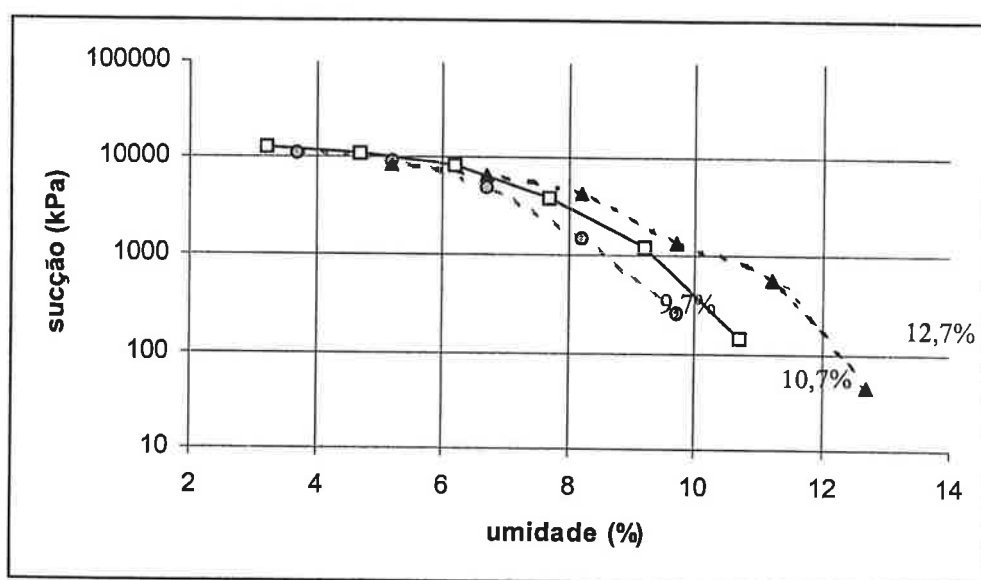


Figura 8: Sucção de uma areia argilosa laterítica compactada na energia normal em três teores de umidade diferentes sujeitas à perda de umidade.

No desenvolvimento da pesquisa de doutorado de Camacho, um dos estudos realizados refere-se à determinação do Limite de Contração de outra areia argilosa laterítica, proveniente de Ilha Solteira, local onde Camacho é docente e executou seus experimentos de campo. O solo foi moldado na forma de pastilha com pasta na umidade próxima ao limite de liquidez. Várias pastilhas similares foram moldadas e deixadas secarem ao ar; durante a perda de umidade, foram determinadas as sucções pela técnica do papel filtro; após constância de peso, foram submetidas ao umedecimento por capilaridade e às medidas de sucção pela mesma técnica. As pastilhas foram deixadas em presença de água até não mudarem mais de peso. A Figura 9 mostra os resultados obtidos por Camacho, com as determinações de umidade da pastilha pelo inverso do peso específico aparente seco (Camacho et al., 2001 - *trabalho completo anexado ao memorial*). Os pontos marcados no gráfico referem-se aos pontos com determinação de umidade, peso, volume e sucção, durante os processos de secagem e de umedecimento. Os resultados obtidos indicam que a capacidade de

reabsorção de água pelo solo ficou limitada a valores abaixo da umidade de moldagem, ficando na realidade próxima ao Limite de Contração.

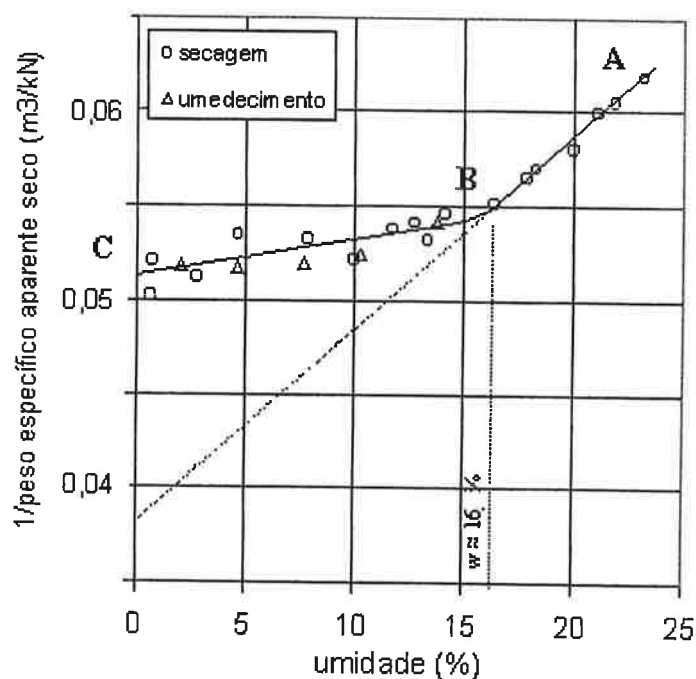


Figura 9: curva de contração por perda de umidade e umedecimento por capilaridade de uma areia argilosa laterítica (Camacho et al, 2001)

A figura 10 mostra os valores obtidos por Camacho de sucção em função da umidade do solo, durante a secagem e durante o umedecimento. Observa-se que, durante a secagem, desenvolveram-se tensões de sucção, mesmo estando o solo teoricamente saturado. As curvas de retenção, referentes aos processos de secagem e de umedecimento, apresentam nitidamente o fenômeno conhecido por histerese. A Figura 11 traz resultados obtidos por Camacho com corpos de prova compactados na energia normal, utilizando a mesma areia argilosa laterítica. Pode-se novamente observar a histerese e o equilíbrio de umidade no umedecimento em ponto diferente daquele de partida, não atingindo umidade elevada.

O fenômeno da histerese é comum em solos argilosos nos processos de secagem seguidos de umedecimento (Marshall e Holmes, 1979), porém as curvas de umedecimento de solos lateríticos não mostram uma tendência de retornarem ao ponto de partida de umidade de moldagem; uma nova secagem determinaria um novo ramo de secagem com origem naquele ponto final do umedecimento e com trajetória muito diferente daquela desenvolvida na primeira secagem, pois o solo não se expande para alcançar a posição original, ou uma próxima a ela (Camacho et al., 2001).

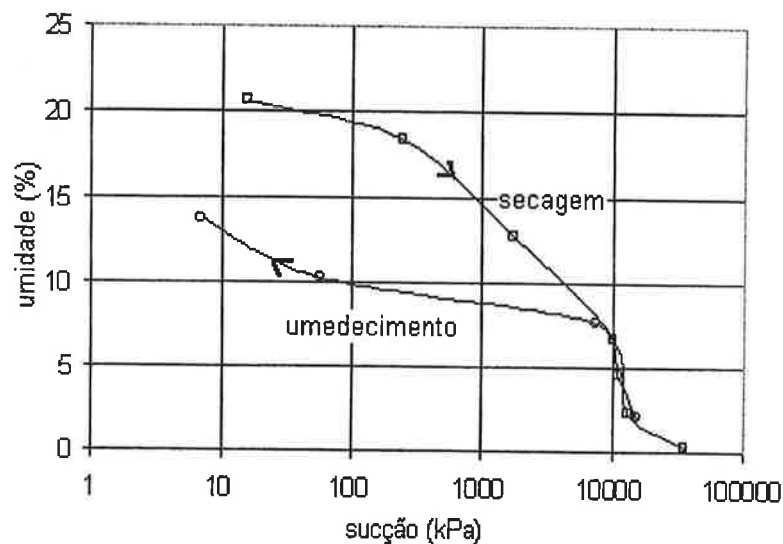


Figura 10: Curvas de retenção por perda de umidade e umedecimento por capilaridade de uma areia argilosa laterítica moldada em pasta (Camacho et al, 2001)

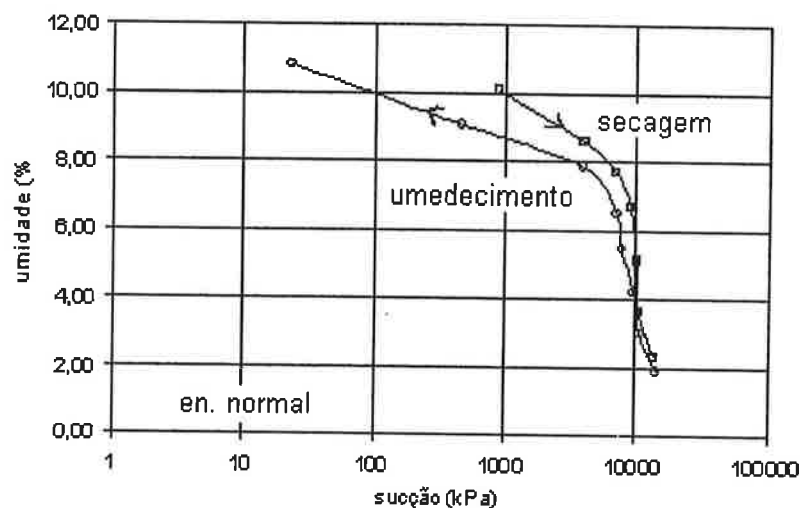


Figura 11: Curvas de retenção por perda de umidade e umedecimento por capilaridade de uma areia argilosa laterítica compactada na energia normal (Camacho et al., 2001)

6.5. Alguns aspectos físico-químicos importantes dos solos lateríticos

Os solos lateríticos têm um comportamento peculiar frente à ação da água, provenientes de sua mineralogia e micro-estrutura. Os solos lateríticos são formados pelo processo físico-químico avançado da laterização. Esse processo caracteriza-se pela decomposição de feldspatos e de minerais ferromagnesianos, pela lixiviação da sílica e de bases e, finalmente, pela concentração de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio

(Mitchell e Sitar, 1982). Devido à laterização, a fração argila dos solos lateríticos é constituída essencialmente de argilo-minerais do grupo das caulinitas e de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio. A combinação desses componentes é responsável pela formação de agregações estáveis em presença d'água, graças ao recobrimento dos argilo-minerais, carregados negativamente, pelos hidróxidos e óxidos hidratados, carregados positivamente, que, além de reduzirem a capacidade de absorção d'água pelos argilo-minerais, atuam como agentes cimentantes naturais entre partículas (Townsend et al., 1971). Na fração areia e silte, são encontrados principalmente quartzo, agregações lateríticas e, em menor escala, minerais pesados.

Há autores que têm concluído que os sesquióxidos não estão associados por recobrimento, mas estão finamente divididos, existindo como micro-agregados compostos por cristalitos com diâmetros efetivos da ordem de 100Å (10^{-7} mm), já apresentando cristalinidade (Casanova, 1986). A superfície específica destes cristalitos, segundo Casanova, variam de 300 a 420 m²/g para os óxidos amorfos e de 100 a 200 m²/g para os óxidos cristalinos. Apesar da magnitude da superfície específica dos sesquióxidos, sua atuação na expansão é bastante diferenciada dos argilo-minerais, devido à sua constituição e cargas elétricas. Arnold (1985) mostra a presença de microporos extremamente finos nos solos lateríticos, marcadamente de poros com raio de 0,01 a 0,03 µm.

A presença do hidróxidos de ferro e alumínio interferem reduzindo a expansão dos solos lateríticos, seja pela neutralização de cargas negativas de argilo-minerais, seja pela ação cimentante; a presença de microporos devem ser responsáveis pelo desenvolvimento de altas tensões de sucção na perda de umidade, aumentando efetivamente a resistência destes solos; no umedecimento, a presença de microporos e macroporos causa uma possível descontinuidade na ascensão capilar, com ar ocluso nos macroporos, não permitindo a saturação do solo. Uma vez que os argilo-minerais não se expandem, ou se expandem muito pouco, a microestrutura formada na secagem não é desmobilizada totalmente, preservando parte desta distribuição. A perda de umidade parece acarretar alterações físico-químicas, em parte irreversíveis.

7. Dimensionamento de Pavimentos de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego

7.1. Introdução

Em 1986, O Prof. Balduzzi fez uma visita ao Brasil e ofereceu uma oportunidade muito interessante à docente: verificar a aplicabilidade aos solos tropicais da recente versão do guia de dimensionamento norte-americano da AASHTO, que acabara de ser lançado naquele ano, com a inclusão de um novo capítulo exclusivo para as rodovias de baixo volume de

tráfego. O Prof. Balduzzi conhecia o sucesso do uso do solo laterítico – solo arenoso fino – na construção de pavimentos paulistas e que o método brasileiro de dimensionamento de pavimentos flexíveis, até então em vigência, continha diversos obstáculos que impediam a disseminação da solução de baixo custo. O objetivo do professor era ter à disposição dos técnicos um método de dimensionamento que pudesse ser aplicado para projetos de pavimentos construídos com solos tropicais e que corroborasse a solução testada no Estado de São Paulo.

Para verificação da aplicabilidade do método e de eventual adaptação, a docente retornou para a Suíça em julho de 1987, após defesa de mestrado em abril de 1987 (e do nascimento de seu primeiro filho André); a permanência na Suíça teve a duração de um ano, com o apoio da FAPESP através de bolsa “sanduíche” de doutorado.

7.2. Importância das vias de baixo volume de tráfego

As rodovias de baixo volume de tráfego vêm desempenhando um papel importante no desenvolvimento socio-econômico dos países em desenvolvimento. Esta categoria de rodovias abrange rodovias vicinais, vias de “tráfego leve”, acessos rodoviários, acostamentos de rodovias troncos, desvios de tráfego temporários, entre outras.

Para a AASHTO – 86, rodovias de baixo volume de tráfego são aquelas que para o período de projeto tem tráfego estimado em até 10^6 repetições do eixo padrão de 82 kN. No Brasil, não há consenso sobre as categorias de vias pelo número de solicitações. Nos países desenvolvidos, as rodovias de baixo volume de tráfego também têm sido alvo de estudos especiais devido à sua grande participação na rede rodoviária desses países, com porcentagens na faixa de 60 a 80% do total (OECD, 1986). Esse trabalho da OECD dá ênfase às características geométricas e de planejamento das rodovias de baixo volume de tráfego.

No Brasil, não se sabe ao certo a porcentagem de rodovias de baixo volume de tráfego no total da rede pavimentada, com 160.000 km. Porém, há ainda mais de 1.300.000 km de rodovias em terra, onde parcela significativa justificaria receber serviços de pavimentação para tráfego de até 10^6 repetições do eixo padrão de 82 kN. Na década de 80, calculava-se que a rede de rodovias municipais não pavimentadas do Estado de São Paulo era de cerca de 180.000 km (Schmidt, 1988).

7.3. Método de dimensionamento de pavimentos exclusivo para rodovias de baixo volume de tráfego – concepções e critérios

Alguns métodos de dimensionamento de pavimentos foram especialmente elaborados para os países tropicais; em grande parte dos casos, esses

métodos foram desenvolvidos principalmente por técnicos de países europeus para suas então colônias de ultra-mar. Os ingleses lançaram um método de dimensionamento de pavimentos em 1962, revisto em 1966, baseado no método original inglês (TRRL, 1977). O ponto interessante deste trabalho é a adoção do índice CBR ensaiado nas condições de provável umidade de equilíbrio de campo. Por outro lado, as especificações de materiais para a base e a sub-base são muito conservadoras e restritivas; não são aproveitados materiais como os solos lateríticos, a não ser estabilizados com cimento. Os franceses desenvolveram um catálogo de estruturas de pavimentos para os países tropicais (CEBTP, 1984). Pela classe do tráfego e do suporte do subleito, o catálogo oferece vários tipos de estrutura, com diversos tipos de materiais de revestimento, base e sub-base. O catálogo possibilita o uso de areias argilosas, que se enquadrariam na classe das areias argilosas lateríticas, porém somente como camada de sub-base de pavimentos; não é admitido seu uso como base, exceto se forem estabilizadas com cimento, com cal ou com betume.

Vários pesquisadores têm-se dedicado a desenvolver métodos de dimensionamento de pavimentos e catálogos de estruturas para atender às especificidades de seus países, de forma a contemplar o uso de materiais locais, condizentes com suas condições climáticas. Apenas como exemplo, citam-se algumas contribuições específicas regionais como as do Kenya: Gichaga et al (1987) e Wambura et al (1990).

A Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP, 1992) lançou um método de dimensionamento de pavimentos de vias urbanas para até 10^6 repetições do eixo padrão de 82 kN, com base no método do Corpo de Engenheiros norte-americano. O método da PMSP traz uma importante contribuição, introduzindo uma verificação do comportamento elástico do pavimento, por meio das tensões verticais no topo do subleito e das deformações de tração nas camadas coesivas da estrutura (Andreatini et al., 1992). O método inclui a adoção de solos lateríticos como camada estrutural.

Na pesquisa de doutorado da docente foi escolhido o método da AASHTO-86 por várias razões: trata-se de um método consagrado e utilizado em vários países; fundamenta-se em observações de desempenho do maior experimento de pavimentos da história - as pistas experimentais da AASHTO, construídas no final da década de 50; incorpora a experiência adquirida em três décadas de pesquisas, projetos, construções e análise de desempenho de rodovias norte-americanas. Para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, o método da AASHTO utiliza como variáveis principais: o tráfego previsto para o período de projeto; o índice de serventia (refletindo a necessidade do pavimento de atender sua função de proporcionar conforto ao usuário); e o módulo de resiliência efetivo dos materiais. Para a determinação do módulo de resiliência efetivo, consideram-se a atuação do clima nas propriedades dos materiais, as condições de permeabilidade dos materiais e a possibilidade de saturação desses. Além disso, a AASHTO-86

inclui o conceito de nível de confiança nas previsões do tráfego e do comportamento dos materiais.

Um dos fatos mais relevantes é a abertura do método para o uso de materiais fora das especificações, contemplando a adoção de soluções baseadas em experiências locais. As especificações de materiais pela AASHTO passam a ser então consideradas como um guia básico de consulta e não uma norma restritiva.

7.4. Critério de resistência dos materiais da AASHTO-86: módulo de resiliência determinado em laboratório

O guia da AASHTO (1986) para o dimensionamento de pavimentos flexíveis recomenda fortemente a substituição do conhecido CBR (California Bearing Ratio) pelo Módulo de Resiliência ¹. Os motivos são claros: o CBR é uma avaliação de resistência, concebida para levar em consideração grandes deslocamentos dos pavimentos frente às solicitações, gerando ruptura principalmente do subleito (Porter, 1950); na maior parte das solicitações, a estrutura sofre pequenos deslocamentos das camadas, mobilizando uma resposta elástica dos materiais solicitados, reproduzidos pelo módulo de resiliência. Já nos anos 30, na Califórnia, Hveem, engenheiro visionário do desenvolvimento da mecânica de pavimentos, destacou a importância das rupturas advindas por repetições de carga levando a estrutura à fadiga.

Há mais de 50 anos, o uso de soluções analíticas considerando a aplicação da teoria da elasticidade para sistemas de camadas utiliza o módulo de elasticidade (ou de resiliência) dos materiais para cálculo das tensões atuantes e deslocamentos gerados nas estruturas de pavimentos (Burmister, 1945; Foster e Ahlvin, 1954; Thenn de Barros, 1965; Thenn de Barros, 1966; Andreatini, 1970). Para a aplicação de métodos mecanísticos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, é fundamental considerar o módulo de resiliência dos materiais. O uso de métodos mecanístico-empíricos é uma tendência mundial, inclusive da própria AASHTO, que planeja lançar sua mais nova versão em 2002, considerando o uso desses métodos. O Guia de 1986, com pequenas revisões e complementações em 1993, foi um preparo para esta nova versão do próximo ano.

Como o objetivo principal da tese foi de verificar se as estruturas de pavimentos construídas com solos lateríticos, normalmente adotadas no Estado de São Paulo, são satisfatórias e estão de acordo com o modelo estabelecido pelo método de dimensionamento da AASHTO-86, alguns solos lateríticos empregados na construção de trechos de vias foram testados.

¹ Resiliência foi um termo utilizado para caracterizar deslocamentos recuperáveis dos materiais como de solos, britas, entre outros, envolvendo movimentos muito mais expressivos em comparação com os materiais sólidos como o ferro, o concreto, o vidro, onde a designação elástica é comumente empregada (Hveem, 1955).

Ensaio de resiliência não eram uma novidade no Brasil. A COPPE-UFRJ iniciou estes ensaios e estas considerações para análise de materiais ainda na década de 70, com o Prof. Medina como seu precursor. Citam-se trabalhos importantes como de Swenson (1980) e de Preussler (1983).

Os ensaios de resiliência conduzidos na Suíça com solos lateríticos brasileiros foram realizados segundo a norma AASHTO T 274-82 (AASHTO, 1982); os testes levaram em consideração características de estado até então não empregadas nas técnicas brasileiras: além da condição compactada em diferentes energias e nas umidades ótimas respectivas, considerou-se também a possibilidade de contato com a água (imersão do solo em água – como é prática no ensaio CBR), e a possibilidade de perda de umidade – tal procedimento visa simular o estado dos solos lateríticos em bases de pavimentos que se encontram em geral com umidade de cerca de 80 a 90% da umidade ótima de compactação, segundo constatação de Villibor (1981), com base em mais de 300 observações em trechos de rodovias paulistas.

As Figuras 12 e 13 trazem exemplos de resultados de resiliência com solos lateríticos, como solos compactados em diferentes energias, alguns submetidos à imersão em água prévia por 4 dias e outros à perda de umidade controlada até atingir 80% da ótima. Podem ser observadas a importância da energia de compactação na elevação do módulo de resiliência, a baixa susceptibilidade dos solos lateríticos frente à ação da água, e os elevadíssimos módulos de resiliência de solos que perdem parcialmente a umidade. Estes últimos valores são facilmente explicados pela elevada tensão de sucção atuante nestas condições, conforme pode ser observado no item 6.4. anterior – valores acima de 1000 kPa são prováveis.

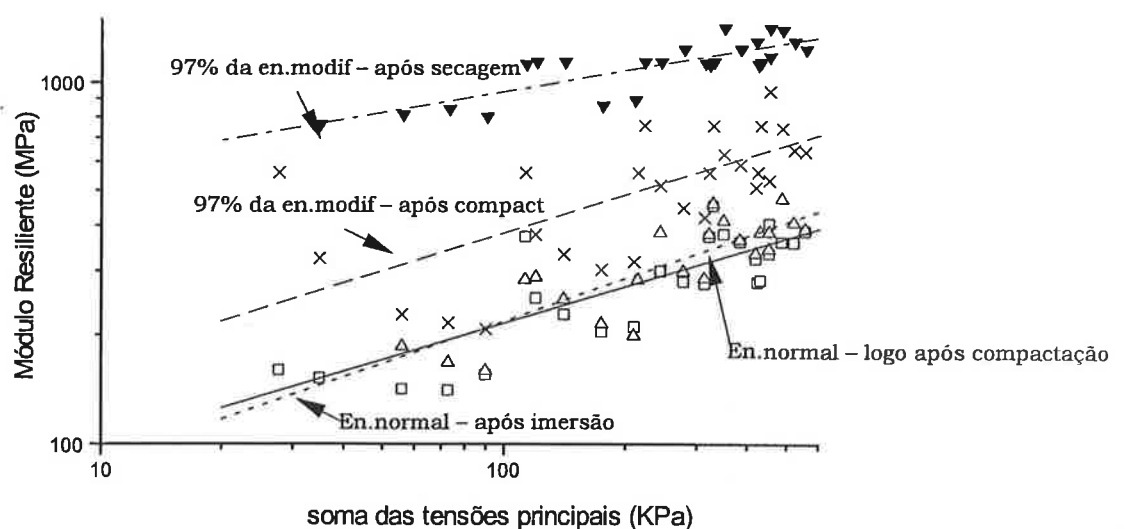


Figura 12: Módulo de resiliência em função da soma das tensões principais de uma areia argilosa laterítica – Náutico (Bernucci, 1995)

A Figura 14 mostra as deformações resilientes, permanentes e totais de uma areia laterítica sem coesão. Estes materiais necessitam trabalhar confinados para serem mais resistentes, como qualquer material granular sem coesão. Sob baixas tensões de confinamento (6,9 kPa), a areia rompe pois excede-se provavelmente a sua resistência ao cisalhamento.

As deformações resilientes são geralmente baixas nos solos lateríticos coesivos e não coesivos, em geral da ordem de 2 a 4×10^{-2} mm/mm, para tensões desvios elevadas, da ordem de 100 kPa; as deformações permanentes são ainda menos significativas – inferiores a 1×10^{-2} mm/mm para as tensões desvio elevadas (Bernucci, 1995). Estes valores confirmam o excelente comportamento dos solos lateríticos em campo.

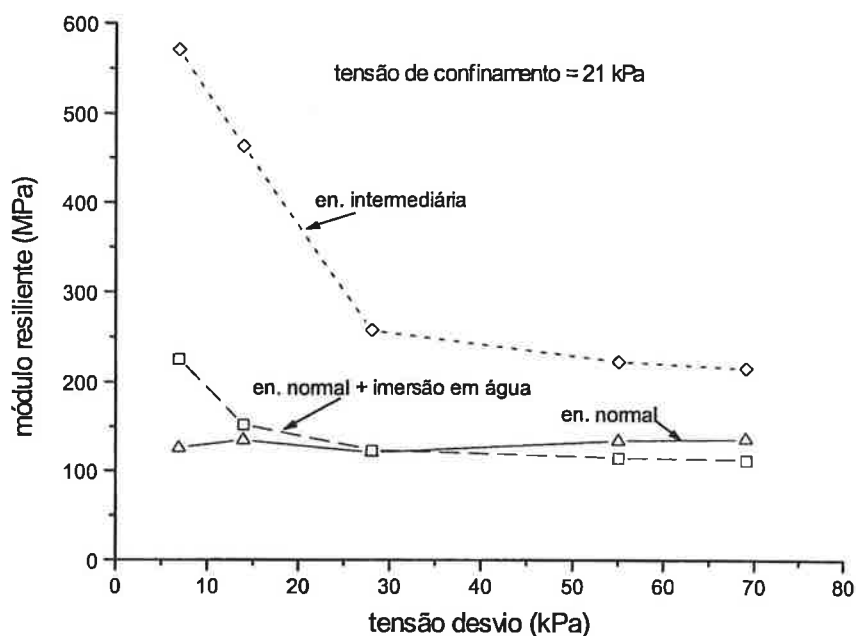


Figura 13: Módulo de resiliência em função da tensão desvio de uma argila laterítica – Santa Gertrudes (Bernucci, 1995)

7.5. Critério de resistência dos materiais da AASHTO-86: módulo de resiliência atuante em campo

Tendo em vista os altos módulos de resiliência dos solos lateríticos obtidos em laboratório, foram estudados dados de bacias de deflexão², obtidas em campo com a viga Benkelman por Aranovich et al (1985), em trechos construídos com solos lateríticos com a finalidade de estudar os módulos de resiliência das camadas constituídas por estes solos. Foram analisados vários trechos representativos, abrangendo uma ampla gama de comportamento (Bernucci, 1995).

² Deflexão é um termo consagrado em pavimentação para designar deslocamentos recuperáveis medidos em pista (Hveem, 1955).

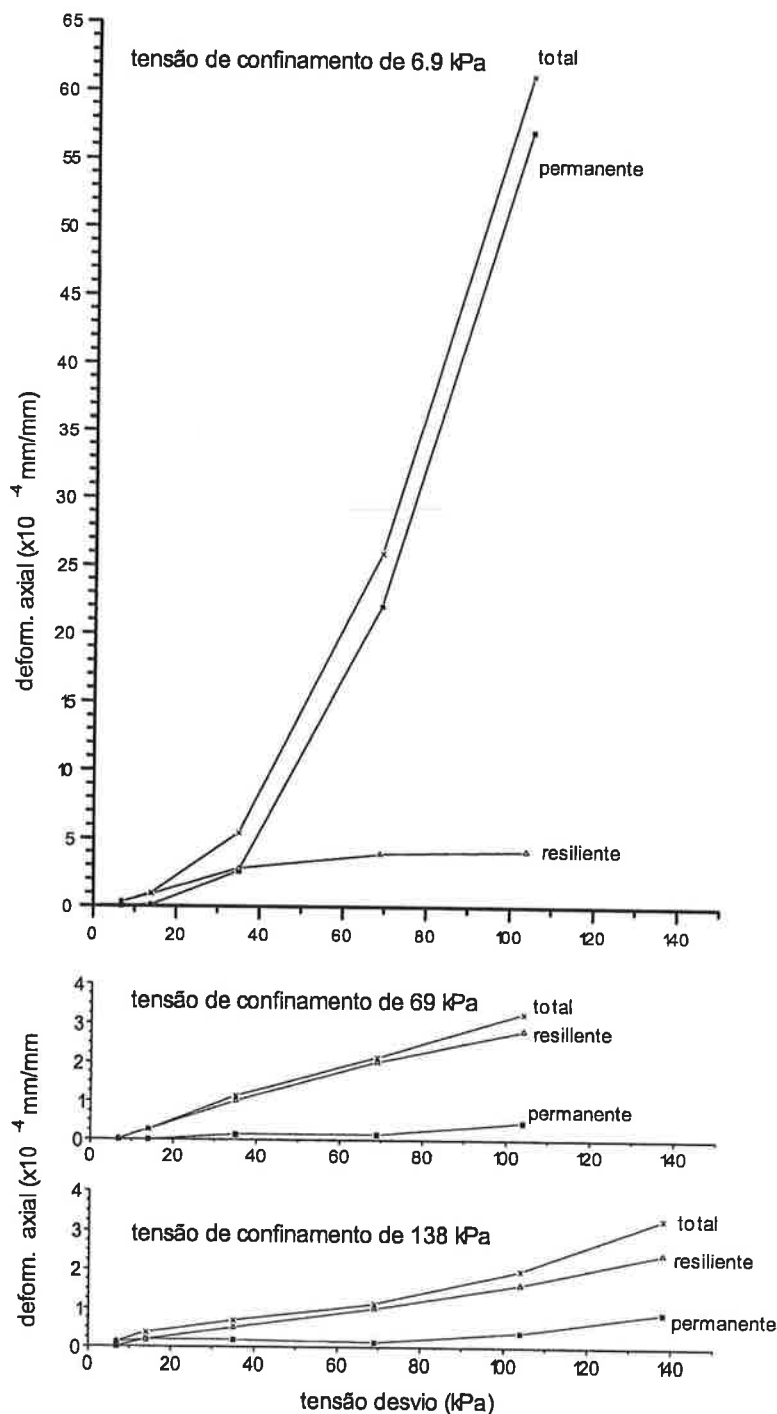


Figura 14: Deformações axiais totais, resilientes e permanentes observadas em areia laterítica sem coesão – Santa Rita-Descalvado (Bernucci, 1995).

Para a determinação do módulo de resiliência das camadas de base, do reforço do subleito e do próprio subleito, foram realizadas retroanálises das medidas de campo pelo programa ELSYM5. As Figuras 15, 16 e 17 mostram os valores mais freqüentes encontrados neste estudo (Bernucci, 1997). Os valores encontrados para o subleito são altos e confirmam a tendência

encontrada em laboratório na energia normal e umidade ótima, normalmente utilizadas para a melhoria do subleito.

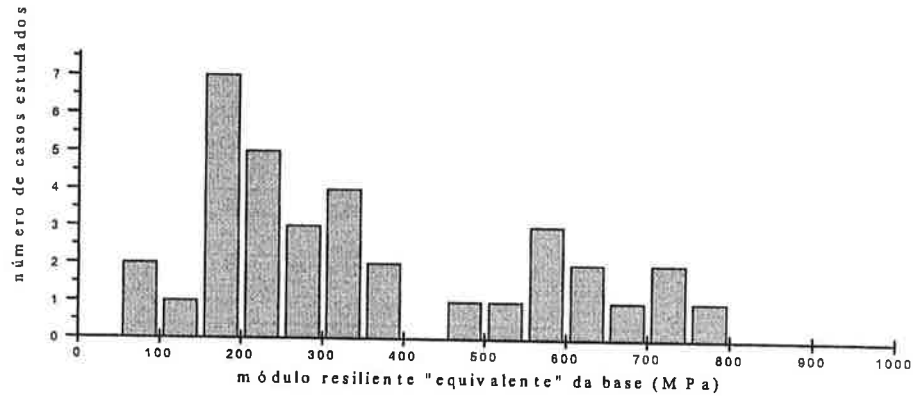


Figura 15: Módulos de resiliência equivalentes de bases de solos lateríticos obtidos a partir de retroanálise de bacias de deflexão de vários trechos de 16 diferentes rodovias (Bernucci, 1997).



Figura 16: Módulos de resiliência equivalentes de reforços do subleito de solos lateríticos obtidos a partir de retroanálise de bacias de deflexão de vários trechos de 7 diferentes rodovias (Bernucci, 1995).

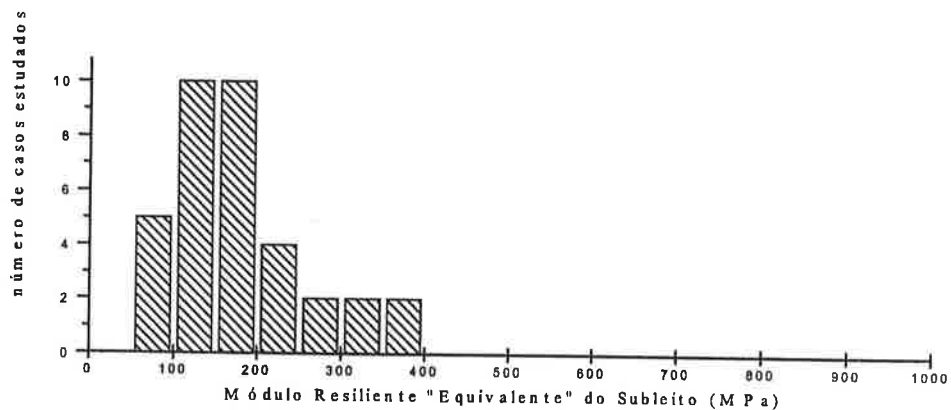


Figura 17: Módulos de resiliência equivalentes de subleitos de solos lateríticos obtidos a partir de retroanálises de bacias de deflexão de vários trechos de 16 diferentes rodovias (Bernucci, 1997).

Apesar de apenas em alguns trechos haver o reforço do subleito, também constituído por solo laterítico, pode-se observar que os valores acompanham aqueles encontrados em laboratório em energia modificada ou intermediária. Estas camadas trabalham normalmente próximas à umidade ótima utilizada na compactação. Os valores encontrados para o subleito, corroboram também os encontrados em laboratório na energia normal.

No caso de bases, os valores dos módulos são altos, porém inferiores aos encontrados no laboratório com umidade de equilíbrio de 80% da ótima de compactação da energia modificada. Na realidade, a retroanálise mostra valores de módulo da camada, que é constituída de blocos de solo laterítico compactado, formados graças à fissuração por perda de umidade – Figura 18. O material de cada bloco tem um módulo de resiliência realmente muito alto, compatível com aquele determinado em laboratório. Porém, a base é constituída por um conjunto de blocos trabalhando por atrito entre eles, devido às fissuras e não como uma camada única, homogênea e isotrópica. Assim, devido às descontinuidades das fissuras, o módulo de resiliência da camada é inferior àquele encontrado em laboratório. Apesar da fissuração, pela figura 15 pode-se observar que os módulos de resiliência atingem valores altos, comparáveis, ou até superiores, aos bons materiais essencialmente granulares, como a brita graduada simples. Em poucos trechos de rodovias, cujo estado era mais deteriorado, os módulos de resiliência apresentam-se mais baixos.

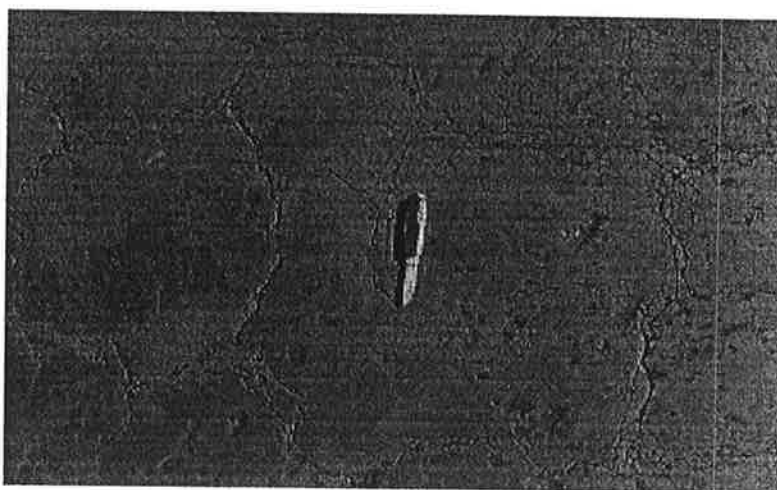


Figura 18: Base de areia argilosa laterítica com fissuras devido à perda de umidade, formando blocos de solo resistentes

Em 1997, a docente tornou-se co-orientadora de doutorado do Eng. Leônidas Alvarez Neto, orientado do Prof. Nogami. A proposta de trabalho era relacionar dados de caracterização MCT com a resposta estrutural de camadas de solos lateríticos, e dar continuidade ao doutorado da docente, desenvolvendo as curvas de dimensionamento de modo facilitado para os técnicos, com base na AASHTO-86 (Alvarez Neto, 1998). Surgiu uma oportunidade ímpar de avaliar estruturalmente mais de 70 km de vias construídas com solos lateríticos por meio do Falling Weight Deflectometer

(FWD). Mais de 1700 bacias de deflexão foram medidas. Foram calculados os módulos de resiliência das camadas de solos lateríticos, tendo obtido valores entre 100 e 350 MPa – Figura 19. Observe-se pelos resultados da figura que quanto mais argiloso o solo, menor o módulo de resiliência da camada. Além dos solos argilosos possuírem módulos de resiliência menores, caso apareçam fissuras por perda de umidade, quanto mais argiloso, menores serão os blocos e maiores as aberturas das fissuras, fazendo com que o módulo de resiliência de campo fique ainda mais reduzido. Os resultados apontam que os solos lateríticos trabalham em campo com módulos de resiliência bastante elevados, apesar de sua plasticidade. Muitos destes valores se comparam aos materiais granulares nobres, como a brita graduada simples.

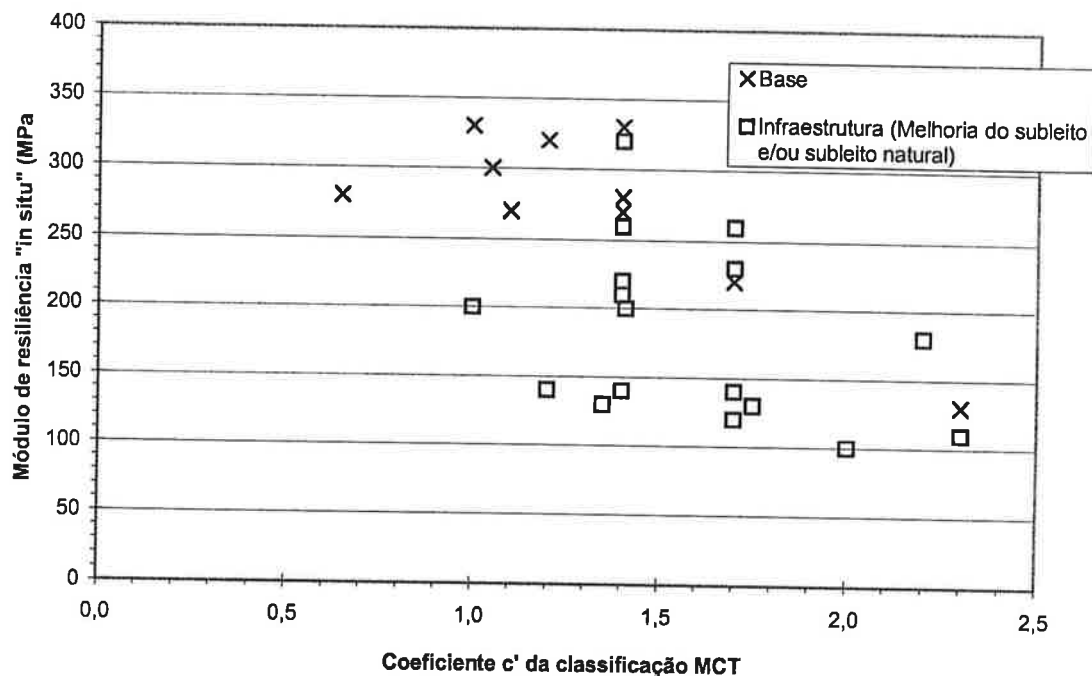


Figura 19: Relação do módulo de resiliência das camadas de solos lateríticos com o valor do c' da Classificação MCT (Alvarez Neto, 1998)

7.6. Dimensionamento de pavimentos construídos com solos lateríticos com base na AASHTO-86

Tem-se utilizado no Estado de São Paulo estruturas de pavimentos esbeltas, com bases de 150 mm de solo laterítico coesivo compactado próximo à energia modificada e finas camadas de revestimento asfáltico, preferencialmente do tipo de tratamento superficial (7 a 30 mm), embora haja trechos com usinados também de pequena espessura. Há possibilidades de uso de revestimentos finos e ultra-finos como a lama asfáltica convencional, micro concreto asfáltico, entre outros. Há rodovias onde foram adotadas duas camadas de solo laterítico, compactadas, uma

como reforço do subleito e outra como base; a espessura das camadas varia geralmente de 100 a 200 mm. Há ainda outra solução, bastante simples e econômica: o subleito é compactado e sobre esta melhoria constrói-se diretamente o revestimento asfáltico. Apesar das experiências de campo mostrarem o bom desempenho dessas estruturas, métodos de dimensionamento de pavimentos convencionais não ratificam estes resultados, como o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER-81.

O atual método de dimensionamento de pavimento flexíveis da AASHTO (1986, reeditado em 1993) baseia-se nos valores de módulo de resiliência dos materiais nas condições de estado que realmente encontram-se em campo. O método indica a necessidade de cálculo de um módulo de resiliência "efetivo", levando em conta as variações sazonais. Tomando por base este procedimento e os resultados encontrados em laboratório e campo, obtém-se o número estrutural SN, dependente do volume de tráfego (10^4 a 10^6 repetições do eixo padrão de 82 kN) e do nível de confiança adotado para o dimensionamento - 50 ou 75% segundo recomendação do guia norte-americano.

Por meio do módulo de resiliência de cada um dos materiais que comporão a estrutura do pavimento, calculam-se ou determinam-se por ábacos os valores dos coeficientes estruturais "a" de cada material. Utilizando-se inequações similares do tipo da eq. 5.3, calcula-se a espessura necessária de cada camada constituinte do pavimento:

$$SN \leq \sum a_i D_i \quad \text{eq.5.3.}$$

Onde:

SN: número estrutural

a_i : coeficiente estrutural da camada i

D_i : espessura da camada em polegadas

Para o cálculo das espessuras D_i das camadas de base e, eventualmente, também a de reforço, é necessário conhecer os coeficientes estruturais da camada a_i . Eles podem ser obtidos, conhecendo-se o módulo de resiliência efetivo da base e do reforço do subleito, pelos ábacos de Van Til (1972), utilizados pela AASHTO-1986, ou pela relação proposta por Rada et al (1989) (eq. 5.4) para este fim, representada pela equação:

$$\frac{E_i D_i^3}{12(1-\mu_i^2)} = \frac{E_s D_s^3}{12(1-\mu_s^2)} \quad \text{eq.5.4}$$

assumindo que uma camada i de pavimento pode ser representada por uma espessura equivalente de um material padrão s , então $(a_i D_i) = (a_s D_s)$, e assim tem-se:

$$a_i = a_s [E_i (1-\mu_s^2) / E_s (1-\mu_i^2)]^{1/3} \quad \text{eq.5.5}$$

onde:

- ai: coeficiente da camada i que se deseja calcular
- as: coeficiente da camada de material padrão (as = 0,14 para a base de brita da AASHTO)
- Ei: módulo resiliente do material da camada i
- Es: módulo resiliente do material padrão (30.000 psi para a base de brita da AASHTO)
- μ_i : coeficiente de Poisson do material i
- μ_s : coeficiente de Poisson do material padrão ($\mu_s = 0,35$ para a brita da base da AASHTO)
- Di: espessura da camada i
- Ds: espessura da camada de material padrão

Substituindo os valores do material padrão e conhecendo-se o módulo de resiliência do material da camada (obtidos por ensaio em laboratório ou por correlação com outras propriedades), pode-se calcular o valor do coeficiente da camada ai. Utilizando os valores de módulo de resiliência de solos lateríticos obtidos neste estudo, obtêm-se coeficientes de camada ai elevados, da ordem da brita da AASHTO (0,14). A determinação do coeficiente de camada realizada pela AASHTO (van Til, 1972) e pela relação proposta por Rada et al (1989) fornecem valores similares para os solos lateríticos.

Observou-se que o modelo da AASHTO-1986 fornece valores de número estrutural SN praticamente independentes da variação de serventia imposta em projeto, quando a estrutura é bastante esbelta, representada por SN baixo, menor que 2,0. Ou seja, o modelo da AASHTO pode ser interpretado como um modelo basicamente estrutural, em casos de baixo volume de tráfego e altos módulos de resiliência do subleito.

Os altos módulos de resiliência dos solos lateríticos propiciam o uso de estruturas de pavimentos esbeltas, construídas somente com solo compactado e fina camada de revestimento asfáltico. Pôde-se verificar pela aplicação do método da AASHTO-1986 (reeditado em 1993) a validade das estruturas esbeltas de pavimentos que vem sendo utilizadas no Estado de São Paulo há mais de três décadas, construídas com solos locais lateríticos (Bernucci, 1995).

Alvarez Neto (1998), utilizando a AASHTO-86 e os resultados obtidos em laboratório e campo, propôs as curvas de dimensionamento constantes da Figura 20, já adaptadas para a espessura total equivalente de pavimento necessária sobre o subleito (equivalente a uma única camada granular com coeficiente estrutural igual à unidade). O uso das curvas assemelha-se ao indicado pelo método do DNER-81. Alvarez Neto manteve os coeficientes estruturais da norma do DNER-81, exceto para os materiais granulares e solos, onde indica a necessidade de variá-los. Para os valores encontrados de módulo de resiliência da camada, verificou que o coeficiente estrutural dos

solos lateríticos variam entre 1,08 e 1,16. A aplicação do método da AASHTO ratifica as experiências da engenharia rodoviária paulista.

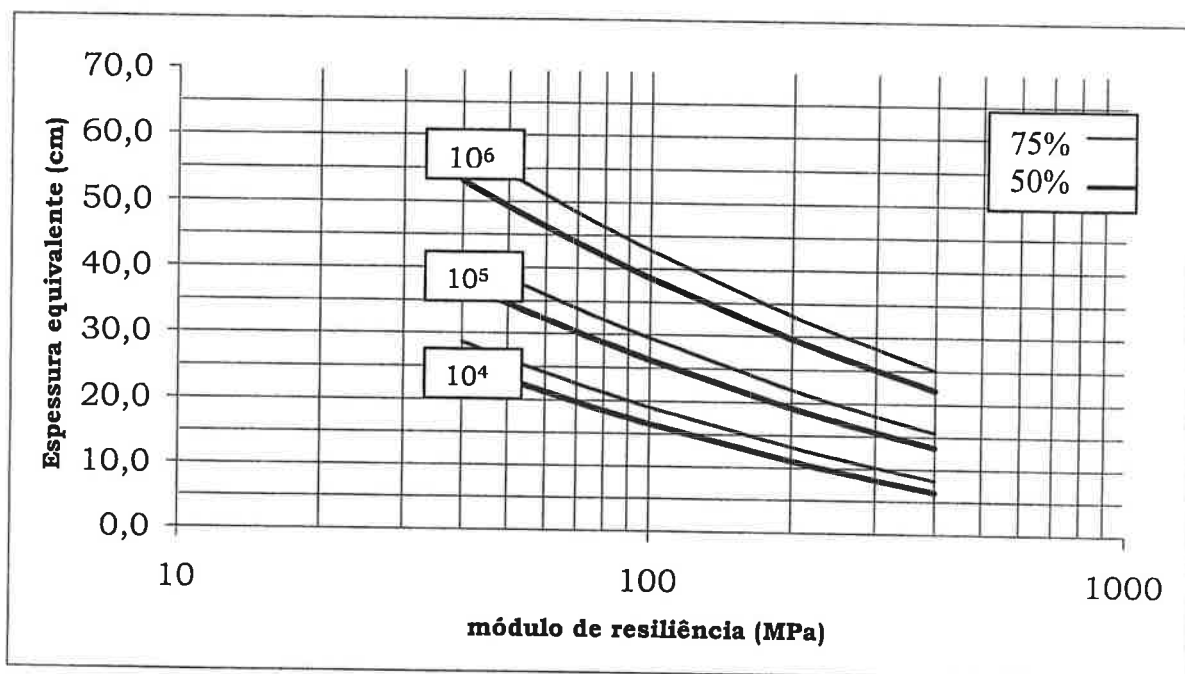


Figura 20: Curvas de dimensionamento de pavimentos com camadas de solos lateríticos, para tráfego de 10^4 , 10^5 e 10^6 repetições do eixo padrão de 82 kN, e nível de confiança de 50% ou 75% (Alvarez Neto, 1998).

O trabalho de pesquisa realizado não procurou aconselhar o uso da AASHTO como método de dimensionamento; esta decisão pertence ao projetista, que deve justificar suas adoções. Realça-se a importância de utilizar um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis que não restrinja o uso dos materiais que não seguem as especificações tradicionais, respeitando as experiências locais e que, a partir de conceitos mais abrangentes, projete estruturas mais esbeltas para finalidades que permitam trabalhar com maiores riscos. Com isso, pode-se fornecer ao projetista um método que dê a liberdade de projetar pavimentos, com especificações indicativas, sem restrições ao uso de materiais e de soluções diferenciadas das tradicionais.

Paralelamente, para o caso de pavimentos para rodovias de baixo volume de tráfego, a experiência européia e norte-americana tem mostrado a grande utilidade de um catálogo de estruturas, que especifique bem o material, mas que respeite as soluções regionais já testadas com sucesso. Um catálogo como este pode auxiliar prefeituras a construir suas rodovias municipais, sem que haja riscos significativos de ruptura ou, por outro lado, gastos desnecessários.

8. Movimentação d'Água em Camadas de Solos Lateríticos

8.1. Introdução

As especificidades de mineralogia, de estado e de comportamento dos solos lateríticos levam a um bom desempenho das estruturas de pavimentos construídas com estes solos. Devido à perda de umidade das bases de pavimentos, desenvolvem-se tensões de sucção elevadas (item 6 anterior), que ocasionam um aumento expressivo dos módulos de resiliência (item 7 anterior), responsáveis, em parte, pelo bom desempenho dessas camadas compactadas para resistirem a esforços de tráfego. Como há variações significativas de sucção, seja dentro de uma camada pouco espessa compactada, como entre a base e o subleito, ocorrem variações importantes na carga hidráulica entre pontos do pavimento não muito distantes entre si, que provocam tendências de fluxo de água.

Na tese de doutorado da docente (Bernucci, 1995 – capítulo 8), iniciou-se uma reflexão sobre os mecanismos que governam o fluxo d'água na estrutura do pavimento e no subleito em soluções típicas de baixo custo, que utilizam solos lateríticos como material de construção. O estudo da movimentação d'água em pavimentos auxilia na compreensão do desempenho desses materiais.

A Figura 21 traz um pavimento cuja base é constituída de solo laterítico, onde a borda da pista encontra-se desprotegida, pois o acostamento não é pavimentado e está sujeito à secagem e ao umedecimento pelas chuvas. As frentes de umidade que alcançaram a base na região da trilha de roda externa causaram danos ao pavimento e este apresenta-se com múltiplas trincas longitudinais, resultantes da queda de resistência, com conseqüente deformação permanente excessiva.

8.2. Fluxos d'água possíveis nas camadas de pavimento de solo laterítico

Para estudar o fluxo de água e o equilíbrio de umidade nas camadas de solo laterítico compactado, foram consideradas as conseqüências da perda de umidade da base e da chuvas nos acostamentos. A Figura ...representa esquematicamente a seção transversal de um pavimento, em situação após a execução do revestimento. A sucção junto à superfície superior da base sofreu um aumento devido à perda de umidade por evaporação. Este acréscimo de sucção é acompanhado de uma tendência a um fluxo ascendente de água, uma vez que a umidade do subleito é maior que da base (Villibor, 1981; Bernucci, 1995). A Figura 23 mostra, por sua vez, as tendências de fluxo de água durante uma chuva.



Figura 21: Trincas longitudinais em pavimento com base construída com solo laterítico, decorrentes de variação de umidade devido à infiltração d'água pelos acostamentos não impermeabilizados (Bernucci et al, 2000).

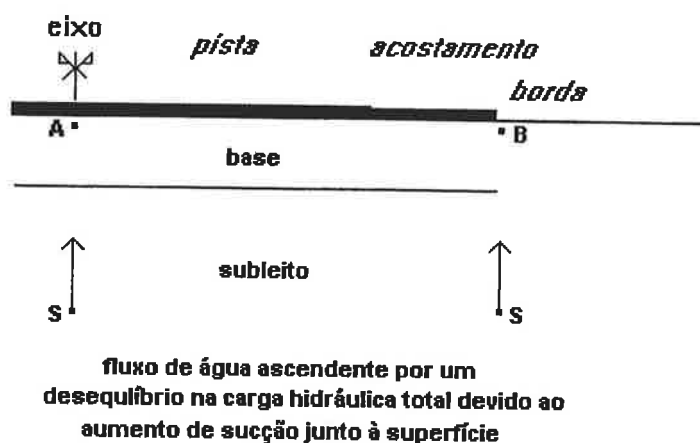


Figura 22: Situação do pavimento logo após a construção, onde foi permitida a secagem da base de solo laterítico após sua compactação. A secagem causa um desequilíbrio entre a carga hidráulica total dos pontos A e B em relação ao subleito S. O ponto A encontra-se no eixo da pista e o ponto B na borda do acostamento.

Supondo-se que a água não penetre na base pelo revestimento, mas somente pelo acostamento descoberto, sem revestimento asfáltico, a infiltração d'água nesta última região causa uma queda de sucção no ponto B. Há, portanto, uma diferença de carga hidráulica total entre A e B, decorrente da diferença de sucção entre estes dois pontos. Como consequência, promove-se um fluxo de água de B para A. O acúmulo de água no solo do acostamento descoberto causa por sua vez um fluxo descendente para o subleito.

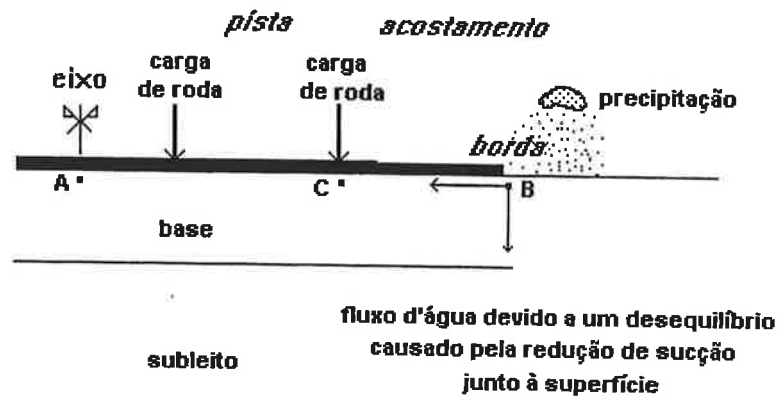


Figura 23: Representação esquemática das tendências de movimentação da frente de umidade presente nos acostamentos não pavimentados, proveniente de uma precipitação (Bernucci, 1995)

Cessada a precipitação, a água no ponto B começa a evaporar – Figura 24; uma parcela da água continua descendo pela gravidade. A perda de umidade é acompanhada por um novo aumento de sucção no ponto B. Toda região entre o ponto C (local hipotético até onde chegou a frente de umidade com a precipitação) e B, está com maior umidade e menor sucção que a região próxima a B, onde está havendo diminuição da umidade por evaporação. Assim, na região próxima a B estabelece-se um fluxo da região "saturada" pela precipitação para a região de evaporação, ou seja, em direção a B.

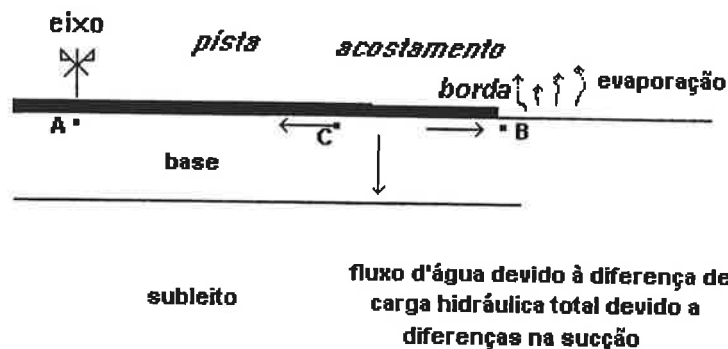


Figura 24: Representação esquemática das tendências de movimentação da frente de umidade, cessada a precipitação e com conseqüente aumento de sucção nos acostamentos não pavimentados decorrente da evaporação (Bernucci, 1995)

O ponto A, que não foi atingido pela frente de umidade, continua com maior sucção que C. Há, portanto, por diferença nas cargas piezométricas entre A e C, uma tendência de haver fluxo de C para A, dando continuidade ao processo iniciado com a precipitação. Porém, na prática observa-se que o fluxo d'água não atinge o ponto A. Deve-se lembrar que o coeficiente de permeabilidade dos solos lateríticos compactados é relativamente baixo, variando da ordem de 10^{-6} até a 10^{-9} m/s. Porém, acredita-se que haja ainda

um fluxo descendente de C para baixo, não somente gravitacional, mas influenciado por um gradiente térmico.

8.3. Os gradientes térmicos em camadas de solos lateríticos

Camacho vem desenvolvendo para sua tese de doutorado sobre a movimentação d'água em camadas de pavimentos com solos lateríticos, orientado pela docente e co-orientado pelo Prof. Marinho, uma série de experimentos para medir a sucção e a variação de temperatura. A Figura 25 mostra uma medida de gradiente térmico durante a tarde e a manhã no inverno, efetuada em campo, em corpo de prova simulando uma base de pavimento com revestimento asfáltico sobre ele (Camacho, 2000). No verão há ainda um pequeno aumento de temperatura no topo da camada de base em relação aos dados de inverno. Estes valores mostram que fluxos de água na forma de vapor podem ocorrer do topo para baixo, em direção ao subleito durante o dia, devido aos gradientes térmicos; à noite, devido à inversão do gradiente, tenderia a sofrer uma inversão de sentido.

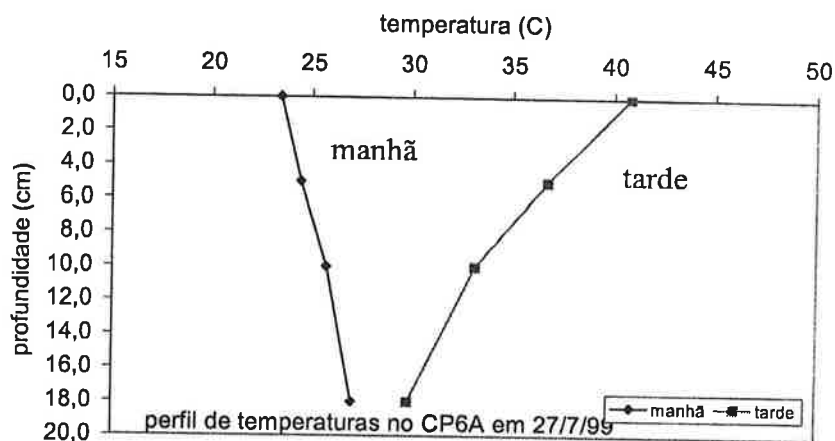


Figura 25: Gradientes térmicos em solo laterítico compactado sob revestimento asfáltico (Camacho, 2000).

Devido ao tipo do solo, normalmente com baixas permeabilidades, o fluxo por vapor d'água é muito lento, dependente extremamente do grau de saturação e da distribuição de vazios. No entanto, as camadas de solos lateríticos compactadas, ao perderem umidade, apresentam trincamento por contração. As trincas, que definem blocos de solo na camada, representam obstáculos ao fluxo d'água proveniente do acostamento. Porém, essas trincas passam a ser meios que facilitam o fluxo de vapor na descendente e na horizontal, direção pista para o acostamento.

8.4. Avanço da frente de umidade para a pista vinda do acostamento

Procurou-se calcular de forma aproximada o tempo que levaria uma frente de umidade vinda da borda do acostamento para atingir o solo não saturado

da região de passagem provável das rodas externas dos veículos comerciais (próximo ao ponto C da Figura 6). Admite-se fluxo somente na horizontal para simplificação do problema. A Lei de Darcy pode ser aplicada para estudo de fluxo d'água em meios não saturados, sem maiores restrições (Fredlund e Rahardjio, 1993). Taylor (1948) deduziu a partir da Lei de Darcy e da continuidade, uma equação simplificada representando o fluxo na horizontal em um solo não saturado:

$$\frac{(X_C^2 - X_B^2)}{\Delta t} = \frac{2 \times K_s \times (H_B - H_C)}{S \times n} \quad \text{eq. 5.6.}$$

onde:

X_B = posição do ponto B (m)

X_C = posição do ponto C (m)

Δt = tempo decorrido para o avanço da frente de umidade de B chegar a C(s)

K_s = coeficiente de permeabilidade do solo no grau de saturação alcançado devido à capilaridade (m/s)

H_B = carga hidráulica total em B (m) – borda do pavimento descoberto

H_C = carga hidráulica total em C (m) – trilha de roda externa dos veículos

S = grau de saturação alcançado entre B e C por capilaridade

n = porosidade

Simulou-se um avanço de umidade com base nos dados de laboratório, supondo que a diferença entre as cargas hidráulicas seja devida tão somente à diferença entre as sucções nos pontos B (na borda descoberta do pavimento) e em C (sob a trilha de roda externa dos veículos). Supõe-se que com uma precipitação pluviométrica suficientemente intensa e prolongada, a infiltração de água pelo acostamento descoberto provoque um aumento considerável do grau de saturação e uma redução da sucção no ponto B para um valor. Em C, foram consideradas sucção de 1000 kPa, 500 kPa e 100 kPa. A distância entre B e C foi computada como sendo de 60 cm, sem acostamento pavimentado.

Pelos resultados de medidas de campo e de laboratório, a porosidade é de aproximadamente 0,30. Como hipótese, o solo entre os pontos B e C, após fluxo de água, fica com um grau de saturação S constante de 80%. Aplicando-se esses dados à equação anterior, pode-se calcular de maneira aproximada o tempo que levaria para a frente de umidade vinda do ponto B atingir o ponto C, supondo-se que o coeficiente de permeabilidade seja da ordem de 10^{-6} a 10^{-9} m/s. Os resultados desta simulação constam da Figura 26.

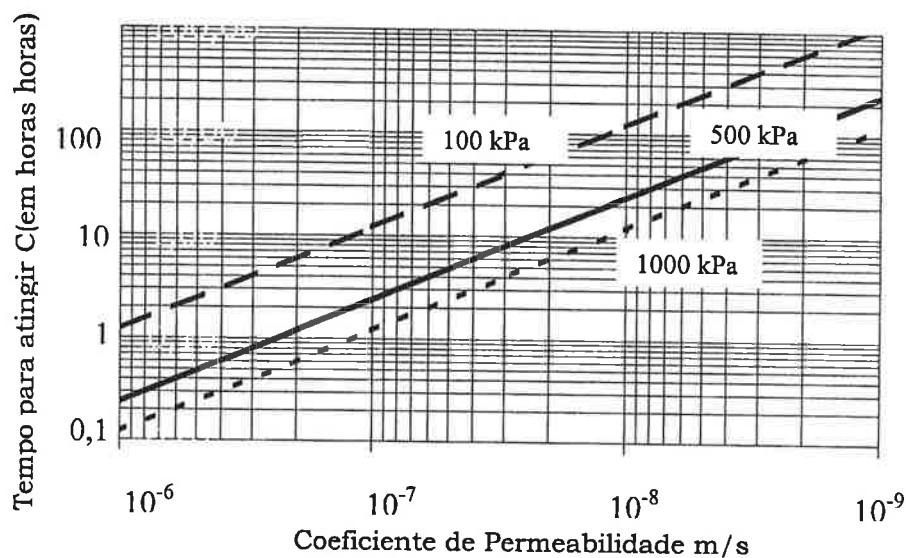


Figura 26: Simulação de avanço da frente de umidade vinda da borda do acostamento sem pavimentação até atingir o ponto da base na trilha de roda externa dos veículos pesados.

Observa-se que se o solo for muito arenoso, a frente de umidade atingirá certamente a trilha de roda externa em pouco tempo, com chuvas de curta duração. Solos muito argilosos, com baixo coeficiente de permeabilidade não permitem que a água atinja este ponto. A presença de trincas altera, sem dúvida, a movimentação de água dentro da camada de base. As tensões de sucção que realmente atuam na pista também é uma outra questão a ser bem avaliada – tensiômetros comuns não possibilitam leituras acima de 100 kPa.

A técnica construtiva dos pavimentos de baixo volume de tráfego com uso de solos lateríticos tem recomendado a pavimentação dos acostamentos, em pelo menos 1 a 1,5 metros para funcionar como barreira para o avanço de umidade. Nogami e Villibor, 1995, denominam esta técnica de “amortecedores de umidade”. Um cálculo aproximado, utilizando a equação 5.6, supondo que o acostamento pavimentado tenha 1,2 metros, que a sucção seja de 100 kPa e que a base tenha um coeficiente de permeabilidade de 10^{-7} m/s, a frente de umidade só alcançaria o ponto C na trilha de roda externa em mais de 4 dias – não existe chuvas intensas com tal duração! Mesmo se coeficiente de permeabilidade fosse alto, como 10^{-6} m/s, necessitaria cerca de 11 horas, duração que também não ocorre normalmente. Os cálculos realizados podem ser considerados conservadores pois o fluxo não se dá somente na horizontal; parte da água segue um fluxo descendente, desde que esteja garantida a presença de camadas mais permeáveis abaixo da base

Por outro lado, considerou-se que a permeabilidade na horizontal e na vertical são iguais, o que na realidade pode não ocorrer. Dependendo da micro estrutura do solo, função da umidade e do método de compactação, o

coeficiente de permeabilidade pode ser cerca de 10 vezes maior na horizontal. Isto acarretaria uma diminuição do tempo de avanço da frente de umidade. Se o solo for compactado no ramo seco, técnica às vezes empregada para evitar o trincamento excessivo de solos coesivos, o coeficiente de permeabilidade pode cair de 10 a 100 vezes. Esse procedimento leva a uma redução no tempo de avanço da frente em 10 a 100 vezes.

Apesar da estimativa ser grosseira, ela dá uma idéia da importância de estudar o fluxo d'água nas camadas de solos compactados em pavimentos de baixo custo. Além disso, ela mostra o papel fundamental dos acostamentos, que proporcionam um aumento significativo na distância entre os pontos B e C, e conseqüentemente, um aumento no tempo necessário para que a água chegue na região das trilhas de rodas.

9. Estabilização de Solos Tropicais

9.1. Algumas experiências com cal e cimento

A estabilização é um processo que resulta na alteração de uma ou de mais características do solo. A estabilização é um termo utilizado normalmente para o processo que envolve o acréscimo de um estabilizante químico, como a cal, o cimento, a cinza volante, entre outros produtos, aos solos.

O uso de estabilização com cimento e/ou cal para os solos saprolíticos tem-se mostrado um processo eficiente (Pinto e Boscov, 1991). Pesquisas feitas recentemente com solo siltoso saprolítico do subleito do Rodoanel mostraram que a inclusão da cal e da cal + cimento reduz pronunciadamente a expansão, melhora a trabalhabilidade e aumenta a resistência (LTP, 1999).

Alguns pesquisadores não apreciam o uso do termo estabilização para o caso dos solos lateríticos pois compreendem que estes solos já são naturalmente estáveis. A estabilização é utilizada normalmente quando o solo é instável e providências de modificar suas propriedades precisam ser tomadas, principalmente com relação à resistência. Porém a adição de cimento ou cal em solos lateríticos altera algumas características que podem ser bem exploradas. O solo-cimento foi muito empregado como material de base de pavimento na década de 60. Em 1993, foi realizada uma pesquisa utilizando pavimento semi-rígido invertido na rodovia Tamoios, próximo a São José dos Campos, em cruzamento com a Rodovia Prof. Carvalho Pinto (Rabaça e Bernucci, 1993). Foi executada estrutura de pavimento semelhante àquela adotada na Carvalho Pinto, substituindo a sub-base de brita graduada tratada com cimento por solo-cimento. O Trecho recebe todo o tráfego da Tamoios e após 8 anos não apresenta nenhum defeito.

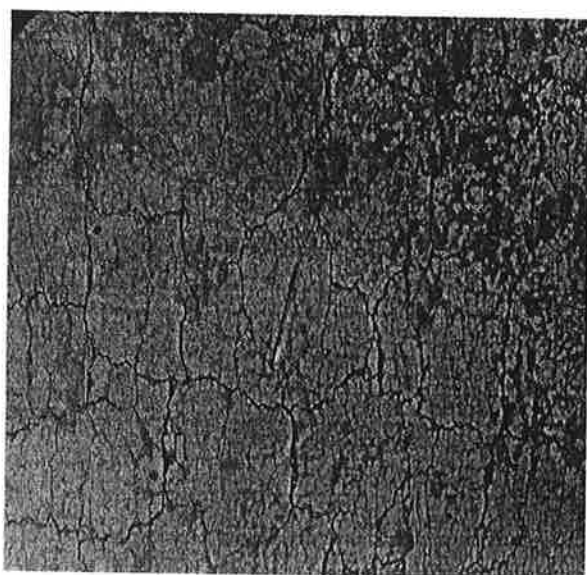
A alternativa de estabilizar os solos com cal e/ou cimento tem sido pouco usada no Estado de São Paulo. Acredita-se, porém, que estudos devam ser

retomados pois esta compreende uma solução para viabilizar o uso de vários materiais e para novas concepções de estruturas de pavimentos, como o caso do pavimento semi-rígido invertido acima citado.

9.2. Algumas experiências com solo-agregado

A estabilização granulométrica compreende a mistura de solos ou de agregados aos solos; o uso do termo estabilização para este tipo de processo tem sido evitado por alguns pesquisadores, que preferem a designação solo-agregado.

Na década de 80, a ampliação da pavimentação de baixo custo em regiões de argila laterítica, mais plásticas que as areias argilosas tipo solo arenoso fino, levou ao desenvolvimento de técnicas de aproveitamento desses solos em pavimentos. A Figura 27 (a) mostra uma foto de uma camada de argila laterítica compactada e trincada em pequenos blocos com aberturas de trinca significativas. As trincas representam regiões de infiltração de água e propensão para reflexão de trincas em revestimentos asfálticos delgados.



(a) argila laterítica após perda de umidade



(b) mistura de argila com areia

Figura 27: aspecto geral superficial de camada de argila laterítica trincada após secagem e mistura de argila com areia para redução de trincamento.

Para reduzir os problemas relacionados ao trincamento, utiliza-se a adição de agregados à argila. Estes agregados podem ser dos mais diversos tipos: areia, pedregulho, seixo, brita, escória, etc. A figura 27 (b) mostra um aspecto construtivo de uma base de solo-agregado, constituída de argila laterítica-areia de rio, na proporção de 70% de solo e apenas 30% de areia. Esta experiência foi realizada em Araras, em 1989, como teste destas misturas de solo-agregado (Serra e Bernucci, 1990). A mistura de areia à

argila fez com que o módulo de resiliência dobrasse de valor passando de 100 MPa para 200 MPa.

A característica mais importante dessas misturas é a natureza do solo utilizado na mistura, pois esta entra em geral em quantidade suficiente para que a mistura trabalhe com matriz formada por este material. Ou seja, a argila ocupa os vazios formados pelos agregados e, dependendo da quantidade em que entra na mistura, separa os agregados uns dos outros. Assim, o comportamento deste material depende em grande parte da natureza dos finos que a compõe. Para misturas deste gênero, somente é possível utilizar argilas ou argilas arenosas lateríticas. Os finos devem ser necessariamente lateríticos. A finalidade da introdução de agregados não é necessariamente o aumento de resistência, mas sim a redução do trincamento.

O tipo de granulometria dos agregados não tem importância, por serem em geral misturas descontínuas, onde os agregados "bóiam" em uma matriz de solo; a forma do agregado é também pouco relevante (Serra, 1987). No entanto, não são aceitos agregados de baixa resistência e contendo minerais expansivos. A quantidade de argila deve ser suficiente para que a mistura continue tendo certa coesão. Inclusive a adição de argila torna o material mais facilmente trabalhável.

Utilizam-se em geral camadas compactadas de cerca de 15 cm de espessura, com revestimento pouco espesso, como tratamentos superficiais ou usinados de 3 a 5 cm de espessura. Recomenda-se o uso de tratamento superficial entre a base e o revestimento propriamente dito, para selar e proteger a base de entrada de água.

A mistura entre os dois materiais é realizada em geral na pista, como pode ser visto na figura 27 (b) e 28 (a). Neste último caso, trata-se de uma mistura com 30% em peso de brita e 70% em peso de argila laterítica. A figura 28 (b) mostra a mistura já compactada. Esta mistura foi utilizada como base em rua de Diadema, município do Estado de São Paulo, no ano de 1989 (Bernucci e Serra, 1991). Foi utilizado tratamento superficial simples sobre a base e revestimento usinado a frio com 3 cm de espessura. As deflexões medidas no trecho assim do término da obra foram de 63×10^{-2} mm, e quatro anos após a abertura ao tráfego foram em média de 40×10^{-2} mm (Serra e Bernucci, 1993).

O uso de solo-agregado constitui-se em mais uma alternativa de baixo custo para a construção de pavimentos. Os agregados podem ser constituídos de materiais disponíveis regionalmente ou resíduos não tóxicos. Atualmente, o Prof. João Fernando Dias da Universidade Federal de Uberlândia, sob orientação do Prof. Vahan do Departamento de Engenharia da Construção Civil, vem realizando pesquisa de doutorado com misturas de solo-resíduo cerâmico para constituírem bases de pavimentos em região mineira de

grande produção da indústria cerâmica; parte dos ensaios laboratoriais está sendo desenvolvida no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação.



(a) processo construtivo de mistura de solo argiloso laterítico com brita.



(b) camada de base com mistura solo laterítico-brita.

Figura 28: Trecho experimental em Diadema, SP, com base de solo-brita.

9.3. Calcinação de solos argilosos caulínicos

Um novo processo de estabilização vem sendo pesquisado desde 1999 no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação: a calcinação de solo que contenha caulinita, por meio de aquecimento controlado entre 600 a 700°C, fazendo com que esta caulinita seja recristalizada, ocasionando um aumento de sua superfície específica e diminuição de densidade, apresentando neste estado excelentes propriedades pozolânicas e insensibilidade à água.

Após calcinação, esta parcela tratada é misturada à cal, formando um “ligante”, que adicionado ao solo local com adição de água, funciona como um estabilizante. Este tipo de estabilização consiste em poder fabricar *in situ* um ligante hidráulico, se possível com o próprio solo de origem.

O objetivo deste projeto de pesquisa, ainda em fase inicial de exploração, é poder oferecer um processo de aumento de resistência e diminuição da contração de solos lateríticos argilosos e, principalmente, de solos transicionais caulínicos, às vezes pouco estáveis, porém correspondendo aos únicos materiais disponíveis em certas regiões, como na Amazônia.

Os franceses da empresa Malet, em conjunto com a Universidade Paul Sabatier, desenvolveram nos últimos anos um processo de calcinação

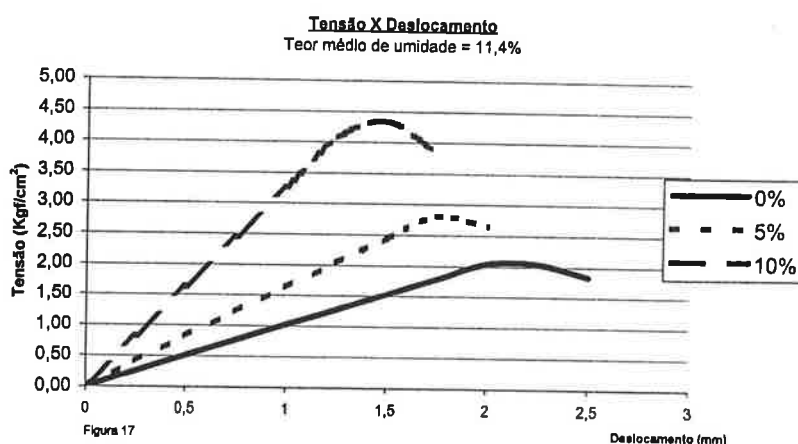
denominado “flash” que pode ser realizado em usina móvel, sobre pneus, que compreende um desagregador de solo, um secador, um pré-aquecedor, um aquecedor de temperatura regulável e elevada que procede à calcinação do solo rapidamente – diferente do processo em usina ou aquecedor estacionários, um resfriador e silos de estocagem, todos em um único veículo que pode ser levado conjuntamente com a frente de obra de uma rodovia. Este veículo-usina produz cerca de 500kg/hora de material calcinado.

Devido ao contato que estabelecemos com os Franceses, surgiu esta perspectiva de estudar uma nova alternativa de uso de solos locais para a pavimentação. Este processo de calcinação, já conhecido no meio técnico, era um dos projetos de pesquisa que o Prof. Balduzzi mantinha na Suíça, com resultados muito interessantes do ponto de vista de propriedades mecânicas do material.

Os estudos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação foram iniciados por um aluno de iniciação científica, Efren Alexey Perrone, com bolsa do CNPq, para o período compreendido de setembro de 1999 até julho de 2000. Os primeiros passos compreenderam tomar contato com a Mecânica dos Solos e com os materiais e interesses da pavimentação usando solos tropicais. No laboratório, a iniciação científica foi iniciada com testes de compactação, produção do solo calcinado, produção do ligante e adição ao solo de origem, em proporções de 0%, 5% e 10% de ligante hidráulico, sendo que o ligante era composto de solo calcinado-cal na relação de 4:1. Na Figura 29 (a) podem ser vistos os materiais utilizados no processo: o solo original, o material calcinado e a cal. Na Figura 29 (b) consta um exemplo dos resultados obtidos por Perrone de resistência à compressão simples, para o teor de umidade de 11,4%, com ligante na proporção 0, 5 e 10% em peso no solo, aos 7 dias de cura úmida. Observe-se a elevação de resistência com a quantidade de ligante no solo.



(a) materiais utilizados



(b) resultados de resistência à compressão simples

Figura 29: Materiais utilizados para a pesquisa de calcinação e alguns resultados obtidos na resistência à compressão simples (Perrone, 2000).

Numa segunda etapa, foram realizados ensaios com calcinação à temperatura de 700oC, praticamente 100oC a menos que o material calcinado anteriormente, na proporção de 10% de ligante hidráulico na mistura. O ligante hidráulico era composto de solo calcinado-cal na relação de 3:1 e de 2:1; a título de comparação, foram moldados corpos de prova com 3,4% de cal, a mesma quantidade de cal que entra no ligante na relação de 3:1, em 10% em peso na mistura. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram realizados após 7 dias, 28 dias e 90 dias de cura úmida. Estes primeiros resultados mostram que o ligante hidráulico constituído de solo calcinado-cal é cerca de 70% mais resistente que o solo somente com cal. No entanto, aos 28 e 90 dias, as resistências à tração são da mesma ordem de grandeza. Novos ensaios estão programados, incluindo análise do solo e do solo calcinado para dar continuidade à pesquisa.

Paralelamente, em abril de 2001, a aluna de graduação Érika Conz, em estágio remunerado pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação através da FUSP, iniciou pesquisa com o mesmo solo, em várias proporções de ligante na mistura, moldando com esta mistura pastilhas, segundo procedimento previstos no Método das Pastilhas de identificação de solos tropicais. O objetivo deste estudo é entender que modificações de propriedades ocorrem, principalmente quanto à contração e à resistência. Serão utilizados complementarmente ensaios de tração por compressão diametral nas pastilhas. Estuda-se a possibilidade de utilizar este método para identificar as eventuais melhorias de comportamento e uma dosagem preliminar de ligante hidráulico na mistura solo-ligante.

10. Extensão da aplicação dos solos tropicais em obras de drenagem

A TIGRE Tubos e Conexões SA. adquiriu a patente do tubo Rib Loc™ para ser o fabricante e fornecedor exclusivo deste produto no Brasil, especialmente indicado para constituir tubos plásticos flexíveis de paredes estruturadas, destinados principalmente para escoar águas pluviais em condutos livres em sistemas de drenagem urbana, rodoviária, portuária, aeroportuária e de pátios em geral. O Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes da EPUSP, propôs uma pesquisa realizada por meio de um convênio entre o LTP e a TIGRE em novembro de 1997, a fim de estudar o comportamento estrutural do sistema solo-tubo. Este trabalho objetivou pesquisar e trazer o estado da arte da tecnologia existente em outros países, estudando de forma crítica as especificações para o projeto, no que tange à rigidez dos tubos, ao tipo e estado dos materiais de berço, de envolvimento e de reaterro, à largura da vala, à profundidade dos tubos em relação à superfície e às solicitações eventuais advindas do tráfego.

Este convênio, findo em junho de 1998, culminou com uma apresentação de trabalho da equipe técnica da USP, composto pela docente como sua

coordenadora, pela Profa. Boscov, por alunos de pós-graduação do PEF par o estudo de simulação por elementos finitos e alunos de graduação da Escola Politécnica. Esta apresentação foi no lançamento nacional dos tubos Rib Loc™, com a presença de vários pesquisadores, docentes e engenheiros brasileiros e estrangeiros.

Nesta palestra, a equipe da USP apresentou a abordagem estrutural envolvida no projeto, as especificações de materiais adotadas no exterior e a perspectiva de uso de solos tropicais, especialmente os lateríticos como material de envolvimento. Esta última proposta surpreendeu os pesquisadores e docentes estrangeiros pois tradicionalmente não são adotados solos plásticos para esta finalidade.

A equipe técnica da USP, baseada na experiência de aplicação com sucesso desses solos em obras de engenharia como: camada nobre de pavimento, camadas compactadas em aterros, em proteções de taludes e de áreas degradadas, em “clay liners”, etc, propôs uma continuidade das pesquisas para viabilizar o aproveitamento dos solos locais tropicais.

Dentro desta nova proposta, parte do trabalho será realizado pela aluna de mestrado Cristiane Salerno Schmitz (Schmitz et al, 2001), com bolsa da FAPESP; parte será executada pela equipe da USP e, ainda, outra parte será conduzida pela UFRGS, que já vem executando no momento valas experimentais em sua Área de Testes de pavimentos. Estas valas serão executadas com quatro diferentes materiais, com duas profundidades diferentes e dois tipos de estado de compactação, perfazendo um total de 16 resultados diferentes.

Objetiva-se estudar o comportamento mecânico dos materiais de envolvimento de tubos, incluindo material padrão granular e outros solos tropicais, por meio de respostas de deslocamentos verticais dos tubos frente à solicitação controlada do simulador de tráfego de pista existente na Área de Testes. A análise destas respostas servirá para embasar o aproveitamento dos solos tropicais locais como material nobre nos sistemas solo-tubo.

A pesquisa propõe também estabelecer um método expedito de seleção de materiais granulares e de solos tropicais para comporem os materiais de envolvimento, além de uma sistemática de controle de compactação e de aceitação dos serviços de obra. Para o primeiro, vem sendo concebido método que avalia e seleciona de forma expedita os materiais granulares, combinado com o Método das Pastilhas para os solos finos. Para o segundo objetivo, vem sendo realizado pela aluna de pós-graduação controle da compactação em pista por meio de ensaios penetrométricos, com o DCP (Cone de Penetração Dinâmico) ou cone Sul-Africano, como é conhecido no Brasil. Paralelamente estão sendo testados o cone de penetração tipo Viçosa, desenvolvido pelo eng. Röhm, que fez mestrado na EESC-USP, e ainda o equipamento de impacto CLEGG, de campo, munido de acelerômetro para

medir o repique elástico frente à queda livre e impacto no material compactado para avaliar o grau de compactação dos materiais granulares.

Este é um estudo pioneiro, pois visa oferecer uma nova alternativa de baixo custo com aproveitamento de solos locais, evitando distâncias apreciáveis de transporte, substituindo, onde for viável, os materiais granulares, tradicionalmente requeridos nas obras de tubos plásticos flexíveis enterrados em países que detêm esta tecnologia, recentemente introduzida no Brasil.

11. Novos estudos e perspectivas

Novos estudos estão sendo propostos para o desenvolvimento desta linha de pesquisa, além dos trabalhos já iniciados e em andamento.

Um dos novos estudos, já iniciado pela aluna de doutorado Simonne Costa Amaral em 2000, sob orientação desta docente, objetiva pesquisar as misturas asfálticas com laterita para constituírem revestimentos asfálticos em regiões pobres em britas e agregados pétreos, como os seixos rolados, os cascalhos, etc (Amaral e Bernucci, 2001). Várias regiões brasileiras no Norte, Nordeste e Centro-oeste possuem extensas ocorrências deste material, em diferentes formas e resistência. Vários estudos serão realizados, desde a análise das lateritas e verificação da resistência desses agregados, como a compatibilidade de uso desses agregados com o asfalto.

Outro trabalho, voltado às necessidades de desenvolvimento das rodovias de baixo volume de tráfego, é uma proposta de pesquisa reunindo o CENPES-Petrobras, a COPPE-UFRJ e a USP, realizada para a FINEP, que se encontra em julgamento, para ser apoiada com fundo da ANP e pela Petrobrás, para estudo de tratamento Anti-pó, constituído de aplicação de emulsão à base de xisto em estradas de terra, como impermeabilizante e protetor. Este estudo une nossos esforços em desenvolver métodos de seleção e de caracterização dos solos tropicais com a pesquisa e desenvolvimento em asfaltos e misturas asfálticas. A compatibilidade dos solos com as emulsões, métodos de seleção de solos, métodos de alteração de características dos solos para receber maior impregnação de emulsão, aspectos construtivos, entre outros objetivos estão contemplados nesta proposta. Este estudo vem na direção de procurar alternativas de pavimentação de baixo custo, tornando as rodovias de baixo volume de tráfego trafegáveis durante todo o ano, aptas para receberem um tratamento à base da mesma emulsão como revestimento, ao invés da prática do cascalhamento, ou revestimento primário, método de alto custo de manutenção, cuja duração e eficiência não ultrapassam em geral um a dois anos.

MISTURAS ASFÁLTICAS

MISTURAS ASFÁLTICAS

1. Introdução

Este capítulo dedica-se às misturas asfálticas empregadas como revestimentos de pavimentos rodoviários, urbanos, de terminais, de pátios industriais, aeroportos, entre outros. Justifica-se a importância do tema dada sua grande utilização no Brasil e a necessidade de construção de novos pavimentos e restauração de outros. As misturas asfálticas constituem-se em área recente de pesquisa e de desenvolvimento tecnológico da Escola Politécnica, tendo sido iniciada a montagem do laboratório em 1989 e seu funcionamento em 1994, sob responsabilidade da docente. O enfoque do capítulo é dado nas razões da abertura desta nova área, na estratégia para tornar a Escola Politécnica um dos centros mais importantes de pesquisa e desenvolvimento nesta área de materiais de construção viária, e nas contribuições à tecnologia brasileira.

2. A importância das misturas asfálticas como material de construção viária

As misturas asfálticas constituem-se no material de uso mais difundido no Brasil, responsáveis por 98 a 99% dos nossos revestimentos de pavimentos. Os revestimentos asfálticos têm sido empregados em diferentes tipos de pavimentos, sob diferentes solicitações: desde em vias de baixo volume de tráfego até naquelas de tráfego intenso e pesado, como nas auto-estradas, corredores de ônibus, entre outros.

Os revestimentos asfálticos são soluções que podem ser aplicadas em qualquer região brasileira, pois existem equipamentos e usinas disponíveis, tanto de órgãos públicos como em empresas privadas. Existem refinarias de petróleo, possibilitando uma boa distribuição de ligante asfáltico; paralelamente, diversas empresas privadas e estatal produzem emulsão asfáltica em diversos locais no Brasil para os tratamentos superficiais, imprimações e para misturas asfálticas a frio.

Em geral, as regiões brasileiras contam com as facilidades para as soluções mais simples, envolvendo tratamentos superficiais de penetração invertida, equipamentos para aplicação de lama-asfáltica, usinas de pré-misturado a frio e de misturas asfálticas a quente, além de equipamentos de distribuição e compactação. A disponibilidade de fresadoras, recicladoras, usinas preparadas para produzirem misturas asfálticas modificadas com polímeros, com adição de fibras, já é mais rara, prevalecendo nas regiões de maior concentração de riqueza.

O problema brasileiro de desenvolvimento nesta área está relacionado em melhorar a produção de agregados por britagem, em aproveitar de forma racional os agregados naturais, como areias, cascalhos e lateritas, em especificar corretamente os ligantes dependendo da região, em difundir o uso de ligantes modificados por polímeros, em empregar as soluções condizentes com a solicitação de tráfego, em usar novas tecnologias de misturas asfálticas, em adequar os procedimentos de dosagem, e em melhorar as técnicas construtivas e de controle, em aplicar corretamente e programar as técnicas de manutenção. Enfim, para alcançar um bom nível dos revestimentos asfálticos, condizentes com o conforto e segurança necessários para os usuários, sejam em pavimentos novos como em restaurações, deve-se promover uma melhoria tecnológica geral no Brasil, em todas as áreas correlatas: projeto, dosagem, construção e controle, e manutenção.

3. A ampliação do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação para pesquisas de misturas asfálticas

O Laboratório de Tecnologia de Pavimentação desenvolve pesquisas em solos tropicais desde sua formação, no início da década de 80, área do conhecimento considerada consolidada na Escola Politécnica. Com relação às misturas asfálticas, havia disponível no laboratório, uma prensa Marshall e alguns equipamentos para caracterização de ligantes, para serem utilizados durante as aulas do prof. Thenn de Barros para alunos de pós-graduação e de extensão. Porém, como não havia técnico na Escola para desempenhar tal papel, não se fazia mais uso de tais equipamentos.

Em visita técnica à Escola Politécnica Federal de Lausanne, Suíça, em 1994, para participar de evento onde foi apresentado o uso do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem e controle de misturas asfálticas, a docente tomou conhecimento dos desenvolvimentos tecnológicos na área de asfaltos e misturas asfálticas e, em visita ao laboratório daquela instituição, observou os modernos equipamentos lá instalados, com tecnologia fortemente influenciada pelos franceses.

A primeira oportunidade surgida para iniciar uma montagem da área de misturas asfálticas no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação foi em 1989, após retorno do estágio de doutorado “sanduíche” na Suíça. Nesta época, o Prof. Novaes, então chefe do Departamento de Engenharia de Transportes, indicou a docente como representante pelo Departamento no convênio entre o BID e a USP para re-equipamento laboratorial. Nesta oportunidade, foram solicitados e adquiridos vários equipamentos para a área de misturas asfálticas. Em 1993, chegando o último equipamento adquirido da França, iniciaram-se a montagem dos mesmos e algumas instalações para o funcionamento desta nova área do laboratório, com verbas do CNPq e de um convênio de pesquisa entre a USP e a PMSP, coordenado naquele ano pela docente.

Em 1994, foram utilizados pela primeira vez os equipamentos franceses para misturas asfálticas pelo Eng. Coelho, docente da UNESP de Bauru e orientado pelo Prof. Soria da EESC-USP, e pelo Eng. Merighi, docente da Universidade Mackenzie e orientado pelo Prof. Suzuki; essas pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação resultaram mais tarde no doutorado desses docentes. A partir de 1995, sendo esta docente nomeada no cargo de coordenadora do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, iniciaram-se novas pesquisas nesta área. Em 1996, graças à concessão pela FAPESP de verba para infra-estrutura, realizaram-se uma reforma e uma ampliação nas instalações, propiciando o pleno funcionamento dos equipamentos adquiridos pelo convênio BID/USP.

Em 1996, foi realizada uma pesquisa em misturas asfálticas no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação para a DERSA, através de um convênio estabelecido entre este órgão rodoviário e o LDTT – Laboratório de Desenvolvimento Tecnológico em Transportes, sob coordenação do Prof. Domingues. A partir de então, vários outros estudos passaram a ser realizados para pesquisas de iniciação científica, de mestrado, de doutorado e para prestações de serviço.

Devido à formação dos docentes e dos pesquisadores envolvidos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, as pesquisas focaram-se no comportamento de misturas asfálticas, deixando a caracterização dos asfaltos somente como recurso didático. Para a realização de pesquisas na área do produto asfalto é necessária boa formação em química e dispor de um laboratório equipado para tal. Como o enfoque central do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação sempre foi a pesquisa tecnológica de aplicação do material para a pavimentação, optou-se pelos ensaios e desenvolvimentos com relação às propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas asfálticas. Os ensaios relativos aos ligantes asfálticos são realizados em parceria com o IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, com o CDT - Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Ipiranga Asfaltos SA ou com o CENPES - Centro de Pesquisas da Petrobrás. Estes três centros possuem recursos humanos capacitados, e estão equipados e tecnicamente preparados para os ensaios na área de asfaltos.

Graças às pesquisas em misturas asfálticas, o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação criou parcerias com outras instituições de ensino e de pesquisa. Destaque à pesquisa PRONEX – Programa de Apoio a Núcleos de Excelência, apoiada pelo CNPq, sob coordenação do Prof. Ceratti da UFRGS, com a participação da USP e do ITA; à pesquisa com o CENPES da Petrobrás, apoiada pela FINEP com recursos de fundo setorial da ANP-Agência Nacional do Petróleo; e ao projeto de pesquisa apresentado ao CNPq para a bolsa de produtividade em pesquisa. Atualmente, dois novos projetos de pesquisa com o CENPES da Petrobrás, envolvendo a COPPE-UFRJ e a UFRGS, estão em análise para serem apoiados pelo FINEP/Petrobrás.

Além desses projetos de pesquisas financiados por órgãos de fomento, o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação tem apoiado pesquisas de alunos de pós-graduação de outras instituições, como da UFSC e da EESC-USP.

As prestações de serviço têm sido utilizadas para implementar desenvolvimentos e para coleta de dados. Destaque à pesquisa para a Nova Dutra, concessionária da Rodovia Presidente Dutra, que visou desenvolver um estudo de avaliação de adesividade ligante asfáltico/agregado, cujo desdobramento resultou em dissertação de mestrado. Outro destaque deve ser feito aos projetos de misturas asfálticas do tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*) para o autódromo de Interlagos e para um trecho experimental na Via Anchieta, cujos resultados estão sendo explorados para uma dissertação de mestrado.

4. Dosagem de misturas asfálticas

A dosagem das misturas asfálticas a quente tem sido realizadas no Brasil através da análise dos resultados pelo Método Marshall, conforme indica o DNER. Este método foi concebido para a rápida execução de revestimentos asfálticos a quente em aeroportos durante a II Guerra. Devido à sua facilidade de execução, envolvendo equipamentos relativamente simples, o método de dosagem Marshall é um dos procedimentos mais difundidos em todo o mundo (Asphalt Institute, 1989).

O método Marshall utiliza corpos de prova compactados por impacto com soquete de seção plena, de mesmo diâmetro que o cilindro metálico. São realizados determinações e cálculos de estabilidade (carga de ruptura a 60oC), fluência (deslocamento plástico total até a ruptura), volume de vazios, volume do agregado mineral, peso específico aparente, relação betume-vazios. Devido ao aumento de carga dos veículos, do número de solicitações e tipos de solicitação, o resultado obtido por meio da dosagem do método Marshall nem sempre tem levado ao sucesso dos revestimentos asfálticos. Uma das causas mais importantes apontadas por Harvey e Monismith (1994) é que os corpos de prova compactados pelo método Marshall não reproduzem o estado de compactação de campo.

Do final de 1987 até início de 1993, um grupo reunindo universitários, associações rodoviárias e de materiais, pesquisadores e consultores obtiveram 50 milhões de dólares do governo americano para desenvolvimento de parte do SHRP (*Strategic Highway Research Program*) relativa à especificação, testes e projeto de dosagem de materiais asfálticos (FHWA, 1995). Neste programa, a caracterização dos ligantes asfálticos foi totalmente modificada; o ligante é classificado por dois números, sendo que o primeiro corresponde à máxima temperatura na qual o ligante ainda apresenta características mínimas de resistência à deformação permanente, o segundo número corresponde à mínima temperatura na qual o ligante ainda mantém propriedades requeridas mínimas de flexibilidade, de modo a

não comprometer o revestimento com fissuras térmicas de baixa temperatura. Um dos pontos mais discutidos neste programa de pesquisa foi o método de dosagem de misturas asfálticas; desse esforço conjunto, foi desenvolvido o Superpave™ (*Superior Performing Asphalt Pavements*) para o projeto das dosagens de misturas asfálticas; o sistema inclui testes, métodos de ensaios e critérios de seleção e de dosagem. O Superpave está em funcionamento pleno em praticamente todos os estados norte-americanos. No Brasil, somente o CENPES da Petrobrás encontra-se em condições de classificar os ligantes asfálticos segundo esta tecnologia.

Os franceses têm usado para dosagem seu próprio procedimento, envolvendo o ensaio Duriez, a prensa de cisalhamento giratória e o simulador de tráfego (para ensaio de deformação permanente). A prensa de cisalhamento giratória é utilizada para verificar o comportamento da mistura asfáltica frente à compactação em campo, ou seja, como aumenta o peso específico aparente e reduz o volume de vazios com o aumento do número de passadas dos equipamentos de compactação (Moutier, 1997). Este ensaio é utilizado para alterar as dosagens e a formulação. Em seguida, a mistura asfáltica é testada no simulador de tráfego para observar se os limites máximos de deformação permanente são respeitados (Brosseau et al, 1993). Caso não sejam, alterações na formulação devem ser realizadas e novos testes serem feitos. Caso a mistura asfáltica atenda aos requisitos dos limites da deformação permanente, são realizados ensaios de avaliação da rigidez (Módulo complexo), da resistência à tração e à fadiga para obtenção de valores de projeto de dimensionamento estrutural e para a previsão de desempenho (Linder et al, 1983).

No Brasil, alguns órgãos rodoviários, como a DERSA, têm modificado seu procedimento de dosagem, utilizando o tradicional ensaio Marshall, porém encontrando o teor de asfalto para o qual o volume de vazios corresponda a 4%; para tal teor de asfalto, são verificados se os demais parâmetros são atendidos. Este procedimento tem sido normalmente empregado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação para os concretos asfálticos densos usinados a quente.

5. Produção e Compactação de misturas asfálticas

Para a produção das misturas asfálticas em laboratório deve-se proceder a uma série de etapas de preparo, de modo que as misturas sejam fiéis àquelas produzidas em usina, seguindo os critérios estabelecidos no projeto. Os agregados devem ser rigorosamente os mesmos a serem utilizados em revestimentos, coletados diretamente na usina ou na pedreira produtora e distribuidora.

A variação dos agregados é uma realidade, não só pela alteração das características da rocha de uma dada jazida, mas pela técnica de britagem e de estocagem empregadas. Os agregados no Brasil são raramente lavados e,

dependendo da produção e das condições de estocagem, podem conter muitos finos aderidos à superfície dos agregados graúdos. Recomenda-se a determinação da distribuição granulométrica seca e lavada, para a avaliação de eventuais divergências significativas.

Outra variável importante no processo é a temperatura de usinagem. O ligante asfáltico muda de características de viscosidade com a temperatura. Devem ser utilizadas a temperatura e a faixa de variação admissível recomendadas pelo produtor/distribuidor do ligante asfáltico.

Para a produção das misturas asfálticas em grande quantidade no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (cerca de 15 kg), o Prof. João Merighi concebeu a adaptação de uma misturadora de cozinha industrial para a produção de suas misturas asfálticas para sua tese de doutorado (Merighi et al, 1995). A Figura 30 traz uma foto do equipamento.

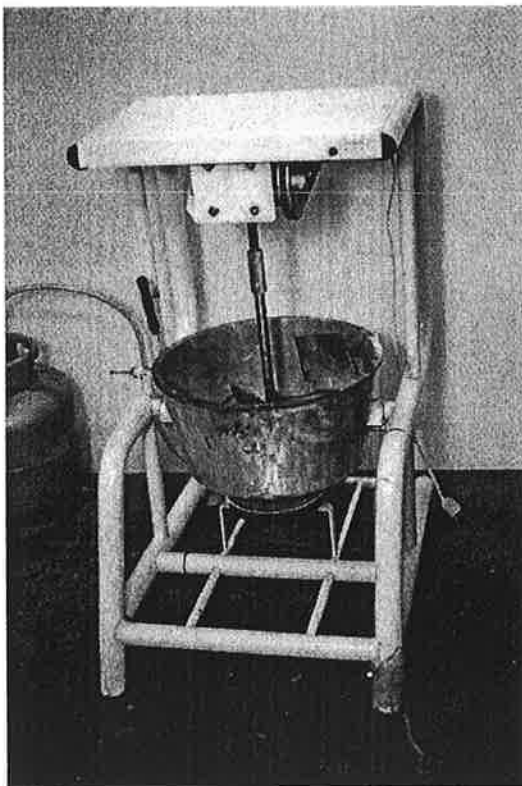


Figura 30: Equipamento para produção de misturas asfálticas a quente.

A técnica de compactação de misturas asfálticas em laboratório deve ser avaliada para poder dar sustentação aos resultados de laboratório de forma a serem extrapolados para o campo de forma segura. Os pesquisadores da Universidade da Califórnia em Berkeley, responsáveis pelo Projeto SHRP A-003A, recomendam a compactação dos corpos de prova em laboratório pela técnica de compactação com rolo, pois é o procedimento que melhor reproduz as condições de campo para prever deformação permanente (Sousa et al, 1993; Harvey e Monismith, 1994).

O Laboratório de Tecnologia de Pavimentação realizou um estudo da variação de alguns parâmetros de estado com uma dada mistura asfáltica utilizando dois métodos de compactação: por impacto Marshall em equipamento automatizado (Figura 31), produzindo corpos de prova com diâmetro de 4" (101,6 mm) e altura de 63,5 mm; e por rolagem de pneus de borracha através da mesa compactadora LPC – *Laboratoire des Ponts et Chaussées* (Figura 32), produzindo placas com 180mm de largura, 50mm de espessura e 500mm de comprimento, com posterior extração de 4 corpos de prova com 4" de diâmetro (Figura 33). A Figura 34 mostra o aspecto final dos corpos de prova produzidos pelos dois diferentes sistemas de compactação.

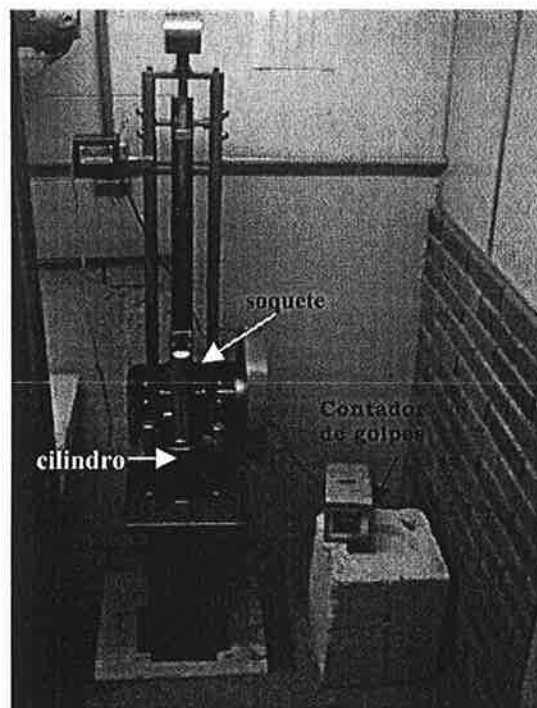


Figura 31: Equipamento de compactação automático de misturas asfálticas por impacto tipo Marshall do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação.

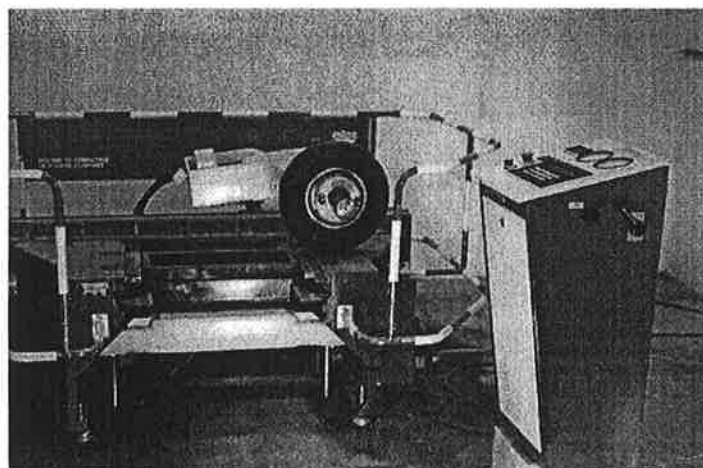


Figura 32: Mesa de compactação de misturas asfálticas por rolagem de pneus tipo LPC (*Laboratoire des Ponts et Chaussées*) francês instalada no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação.

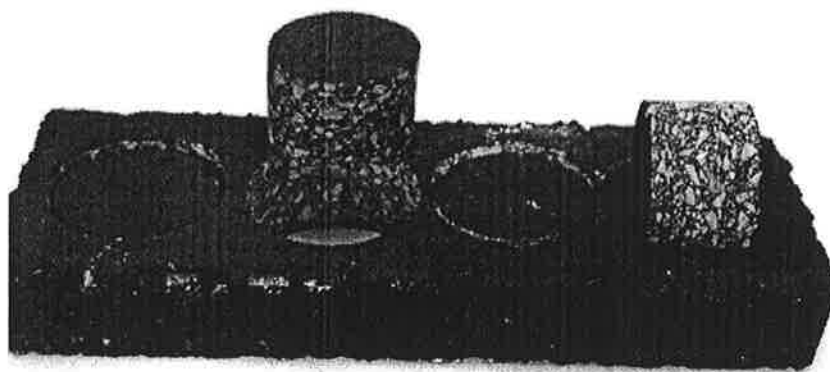


Figura 33: Corpos de prova de misturas asfálticas extraídos por broqueamento de placas compactadas na mesa de compactação tipo LPC.

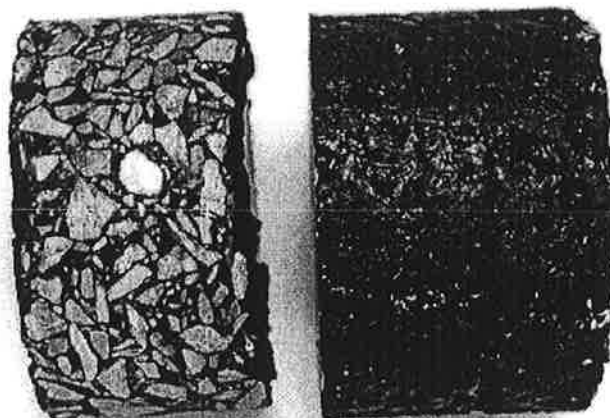


Figura 34: Exemplos de corpos de prova de misturas asfálticas – à esquerda extraído por broqueamento de placa moldada na mesa compactadora tipo LPC e à direita compactado por impacto Marshall.

A Figura 35 traz os resultados obtidos de volume de vazios em função do método de compactação empregado na produção dos corpos de prova. Para este concreto asfáltico denso usinado a quente, considerou-se o teor de projeto de 5,6%. Pelo método Marshall adaptado, o teor de asfalto correspondente a 4% de vazios é de 5,9%.

Observe-se que para baixos teores de asfalto, por exemplo, 5,1%, o volume de vazios pelo método de compactação Marshall é de 6,2%, enquanto que pela compactação por rolagem, tem-se praticamente 7% de vazios. Para baixos consumos de ligante asfáltico, consegue-se por impacto forçar o esqueleto sólido a densificar, enquanto que por rolagem, falta “lubrificação” suficiente entre os grãos para vencer a resistência ao cisalhamento da mistura e densificá-la. Deve-se realçar a dificuldade em várias obras de se alcançar a densidade Marshall de projeto dos revestimentos asfálticos.

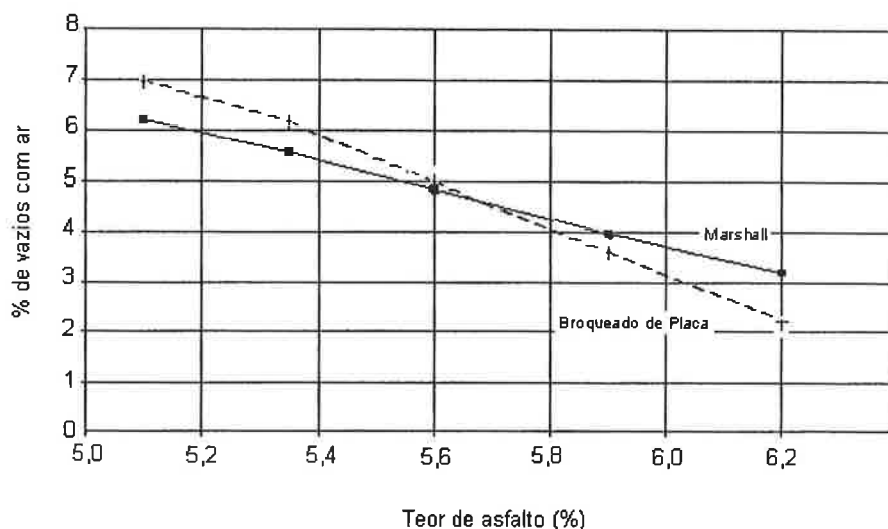


Figura 35: Volume de vazios com ar em função do tipo de compactação de corpos de prova de concreto asfáltico denso (Bernucci et al, 1997).

Observe-se que o volume de vazios é um parâmetro extremamente importante de ser controlado de modo que a mistura asfáltica exerça seu papel de camada impermeável; dependendo do volume de vazios, a mistura asfáltica pode permitir a entrada de água no revestimento, mas ter coeficiente de permeabilidade ainda baixo, dificultando sua saída. A presença de água nos vazios pode propiciar o desenvolvimento de pressão neutra pela solicitação do tráfego, prejudicando a resistência do material e podendo provocar o fenômeno do descolamento (*stripping*) do asfalto aderido ao agregado. Fato como este levou à ocorrência de vários defeitos em alguns trechos na rodovia Presidente Dutra (Ceratti e Bernucci, 1998).

Por outro lado, o excesso de ligante asfáltico mostra um comportamento inverso; por exemplo, para 6,2% de asfalto, pelo método Marshall tem-se 3,2% de volume de vazios (dentro da faixa considerada aceitável pelo método Marshall – 3 a 5% de volume de vazios para concretos asfálticos); pela compactação por rolagem, obteve-se para o mesmo teor de asfalto 2,2% de volume de vazios. Devido ao excesso de ligante, a compactação por impacto com soquete de área igual ao cilindro provoca uma pressão “neutra” no ligante de forma a prejudicar a densificação da mistura; já por rolagem, o excesso de lubrificação provoca uma maior facilidade de densificação por vencer o cisalhamento com menor esforço. Baixos volumes de vazios podem levar a mistura asfáltica à deformação permanente excessiva. Em vários pontos da Rodovia Presidente Dutra com exsudação e deformação permanente precoce em trilhas de roda, a extração de corpos de prova do revestimento mostrou que nestes trechos o grau de compactação passava de 100% com relação ao projeto e que o volume de vazios era da ordem de 2%, às vezes até inferior (Ceratti e Bernucci, 1998).

Como se pôde observar neste exemplo da Figura 35, deve-se ter claro o efeito do método de compactação no estado da mistura asfáltica a ser testada em laboratório para posteriormente ser executada em pista. Os laboratórios

brasileiros certamente em curto ou médio prazo continuarão a compactação do tipo Marshall e a dosagem pelo método Marshall pelas impossibilidades econômicas do país de forma geral. No entanto, a análise de resultados deve levar em conta as variações de estado e prevenir certas distorções de dosagem pela experiência comparativa com outros projetos semelhantes e os resultados de pista. Além da dosagem Marshall, tradicional ou adaptada, deve-se necessariamente proceder a outros testes de avaliação de propriedades mecânicas, como a resistência à tração por compressão diametral, facilmente realizável, pois os resultados de dosagem Marshall não fornecem dados de projeto de dimensionamento estrutural. Os resultados da estabilidade Marshall não se correlacionam com a resistência à deformação permanente (Pigois e Huschek, 1984; Aldigueri, 2001), nem tão pouco com a resistência à tração (Dumont et al, 1991).

6. Deformação permanente de misturas asfálticas

6.1. Importância do estudo da deformação permanente e métodos usuais de avaliação em laboratório

O SHRP considera três modos de ruptura para os projetos de revestimentos asfálticos: a deformação permanente, a fissuração por fadiga e a fissuração devido às baixas temperaturas.

A deformação permanente em trilhas de roda é um defeito que leva à formação de desníveis na superfície do pavimento, levando ao aumento da irregularidade e do desconforto ao rolamento, além de poder ocasionar perda de dirigibilidade. Em dias de chuva, o acúmulo de água nas depressões e trilhas de roda pode levar à hidroplanagem dos veículos; nos países de clima frio, esta água pode congelar e causar perda de aderência pneu/pavimento. A Figura 36 mostra exemplos de deformação permanente em pavimentos paulistas.

O ensaio de dosagem Marshall estabelece parâmetros que procuram limitar a deformação permanente, requerendo um mínimo para a estabilidade Marshall, um máximo de fluência e um intervalo de volume de vazios de maneira a não permitir que seja inferior a 3%. Porém, como já citado anteriormente, os parâmetros Marshall não asseguram o controle da deformação permanente, e não se correlacionam diretamente com os valores constatados em campo.

Os ensaios de creep estático e de creep com cargas repetidas realizados com corpos de prova cilíndricos têm sido os mais difundidos, pois podem ser realizados com corpos de prova Marshall ou extraídos por broqueamento de pista. Os ensaios estáticos são mais fáceis de serem conduzidos e envolvem equipamentos mais simples; os de carga repetida podem ser realizados em laboratórios que dispõem de prensa para ensaios de resiliência. Vários pesquisadores têm desenvolvido critérios utilizando os resultados do creep

para avaliar o potencial de deformação permanente de um revestimento asfáltico, como o trabalho de Little et al. (1994). Outros centros de pesquisa preferem utilizar ensaios triaxiais de cargas repetidas para a avaliação da deformação permanente, como é o caso da Bélgica (CRR, 1995).



(a) “escorregamento” do revestimento asfáltico em pavimento urbano paulistano



(b) Trilhas de roda em rodovia paulista na faixa de tráfego de veículos pesados

Figura 36: Exemplos de deformação permanente no revestimento asfáltico

Na França, nos anos 60, a deformação permanente nas trilhas de roda dos revestimentos asfálticos teve um aumento considerável devido ao aumento do volume de tráfego e das cargas de rodas dos veículos comerciais (Brosseau et al, 1993), levando o LPC a uma pesquisa expressiva para estudo da compreensão deste fenômeno, suas variáveis, formas de redução dos afundamentos, além de estabelecimento de testes para a previsão de desempenho em pista. Esta pesquisa levou os franceses à concepção de equipamento de laboratório destinado à solicitação de carga de misturas asfálticas para medida da evolução das deformações permanentes; em 1973, como resultado deste esforço de pesquisa surgiu o simulador de tráfego (*Orniéreur* para os franceses, *simulateur de trafic* para os suíços franceses e *Wheel Tracking Test* para os ingleses e americanos) – Figura 37.

O equipamento trabalha com a solicitação de pneus em movimentos de ida e volta completo em 1 Hz, com o pneu sempre em contato pleno com a placa de revestimento asfáltico, com temperatura controlada por câmara de aquecimento e sensores, de forma que o ensaio pode ser realizado na temperatura ambiente até cerca de 70°C, carga de roda e pressão de inflação controladas; são testadas sempre placas similares aos pares de cada vez.



Figura 37: Simulador de tráfego tipo LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées) para determinação de deformação permanente em trilha de roda instalado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação - EPUSP.

Os franceses estabeleceram critérios de aceitação das misturas asfálticas dependendo do tipo de mistura, espessura e do tráfego, além da posição relativa dentro da estrutura do pavimento. Esses critérios são empíricos e são baseados na observação e estudo dos resultados coletados em praticamente 30 anos de pesquisas laboratoriais, na pista experimental do LPC em Nantes e nas rodovias francesas. Estudos de repetibilidade e reprodutibilidade contando com 12 laboratórios, incluindo dois do exterior, foram realizados, comprovando que seus resultados estão de acordo com os limites de aceitabilidade da norma ISO (Hiernaux, 1996). Ensaios de repetibilidade no simulador de tráfego foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, tendo sido satisfatório seu resultado (Merighi et al, 1996a).

Os franceses não observaram afundamentos significativos em trilhas de roda em revestimentos asfálticos cujos limites de aceitabilidade à deformação permanente pelo simulador de tráfego foram respeitados; em algumas ocasiões onde houve afundamento excessivo, foram constatadas alterações no projeto de pista com relação à mistura asfáltica dosada e testada no laboratório (Brosseaud et al, 1993).

Recentemente, com o início do projeto de pesquisa PRONEX, um estudo interessante começa a ser realizado, que fornecerá dados comparativos entre a deformação permanente encontrada em laboratório no simulador de tráfego e os afundamentos em trilha de roda nas pistas experimentais da área de testes de pavimentos da UFRGS/DAER-RS. Estes dados serão de grande valia para uma avaliação da segurança na resposta do Simulador de Tráfego na previsão da formação de trilhas de roda.

6.2. Origem das deformações permanentes

A deformação permanente tem origem em três fatores distintos (PIARC, 1994):

- sub-dimensionamento da estrutura do pavimento, ocasionando uma estrutura não capaz de resistir aos esforços solicitantes do tráfego, podendo ser resultante de escolha equivocada de um dado material da estrutura de pavimento, construção deficiente, ocasionada por má compactação ou método construtivo inadequado ou saturação do subleito e perda de resistências dos materiais constituintes; este tipo é chamado de deformação permanente estrutural;
- fluência da(s) camada(s) constituintes do revestimento asfáltico, devido a problemas de dosagem e escolha do ligante asfáltico, ao tipo dos agregados e à graduação, ou ao método construtivo inadequado;
- desgaste causado em países de clima frio, onde há utilização de pneus com pinos durante o inverno.

O estudo da deformação permanente neste trabalho limita-se àquela ocorrida na camada de revestimento asfáltico devido à fluência e à consolidação.

6.3. Efeito da Temperatura

Nas condições ambientais prevalentes no Brasil, com altas temperaturas e expressiva presença de veículos pesados nas vias, muitas vezes com excesso de carga, a deformação permanente é um fenômeno presente em nossos pavimentos asfálticos. Motta (1979) mostrou a ocorrência de elevadas temperaturas, de até 74°C na superfície de revestimentos asfálticos, em estudo realizado em painel experimental no Rio de Janeiro durante um ano. Os novos conceitos envolvendo o projeto de dosagem de misturas asfálticas para revestimentos submetidos a altas temperaturas devem incorporar necessariamente: a compactação em laboratório que deve simular a máxima de campo, usando equipamento convencional e procedimentos de rolagem; testes de estabilidade em corpos de prova compactados com diferentes teores de ligante asfáltico para determinar a resistência ao afundamento por consolidação e por deformação plástica; e testes de simulação de densificação pelo tráfego para avaliação a longo prazo dos efeitos da consolidação e da deformação plástica (Ruth et al, 1989).

Foi estudado o efeito da temperatura no desenvolvimento de deformações permanentes com o objetivo de mostrar a importância desta variável no comportamento das misturas asfálticas. A Figura 38 mostra resultados de deformação permanente em placas de misturas realizadas com CAP-20, obtidos com o simulador de tráfego com temperaturas de 25°C e 60°C (Bernucci et al, 1997). Os afundamentos em trilha de roda aumentam

exponencialmente com o aumento de temperatura devido ao fato da queda de viscosidade do ligante asfáltico com o aumento de temperatura ser também exponencial; dados experimentais obtidos no simulador de tráfego comprovam este fato (Merighi et al, 1996; Merighi, 1999). Os resultados obtidos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação são compatíveis com os resultados encontrados pelos franceses em laboratório e em pista experimental (Grimaux e Hiernaux, 1977; Corté et al., 1998). Estas constatações, bem conhecidas pelo meio técnico, mostram a importância do estudo e da limitação da deformação permanente nos revestimentos asfálticos em países de clima quente, como o Brasil.

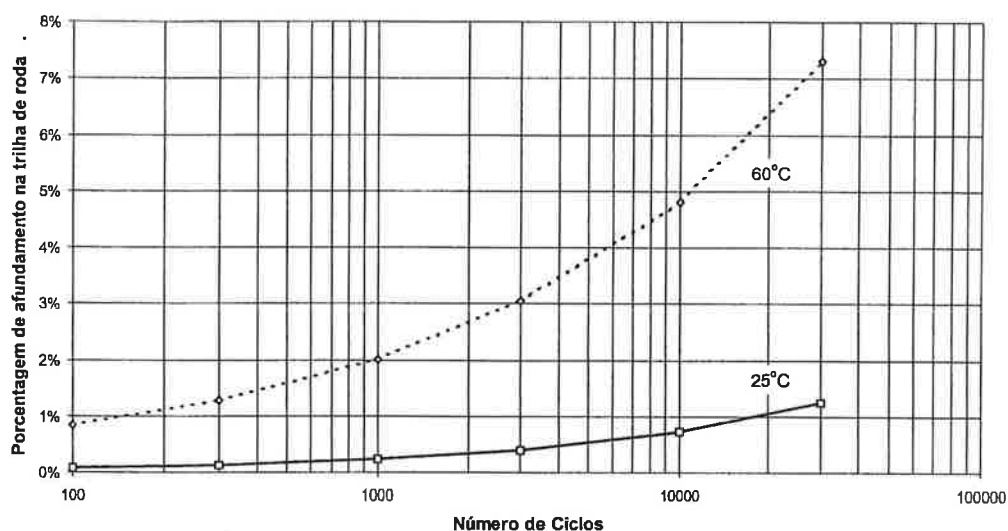


Figura 38: Variação da deformação permanente obtida no simulador de tráfego LPC com a temperatura de ensaio (Bernucci et al, 1997).

O ensaio no simulador é realizado à 60°C para ser severo e acelerar o processo de afundamento. À 25°C, além do ensaio ser lento para o desenvolvimento do afundamento, o erro na determinação das deformações permanentes é maior pois qualquer movimentação de agregados na superfície da placa gera erros de leitura da mesma ordem de grandeza dos afundamentos.

6.4. Variação do teor de ligante asfáltico

Ensaio no simulador de tráfego foram conduzidos para estudo da sensibilidade à variação do teor de ligante asfáltico de concretos asfálticos densos, tipo de mistura asfáltica mais difundida no Brasil. Foi estudado um concreto asfáltico com agregados de granito, com graduação compreendida na faixa C da DERSA (similar à faixa C do DNER) – Figura 39, e com cimento

asfáltico convencional CAP 20, o tipo de ligante mais usual no Brasil. A Figura 40 mostra os resultados encontrados.

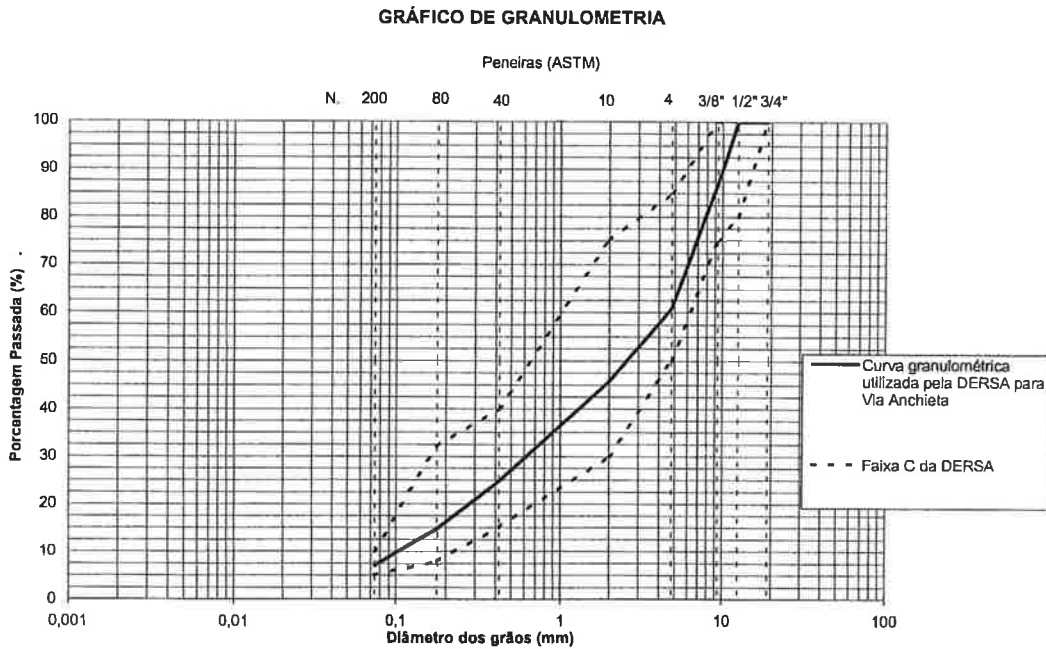


Figura 39: Distribuição granulométrica empregada na pesquisa enquadrada na faixa C da DERSA (Bernucci et al, 1997).

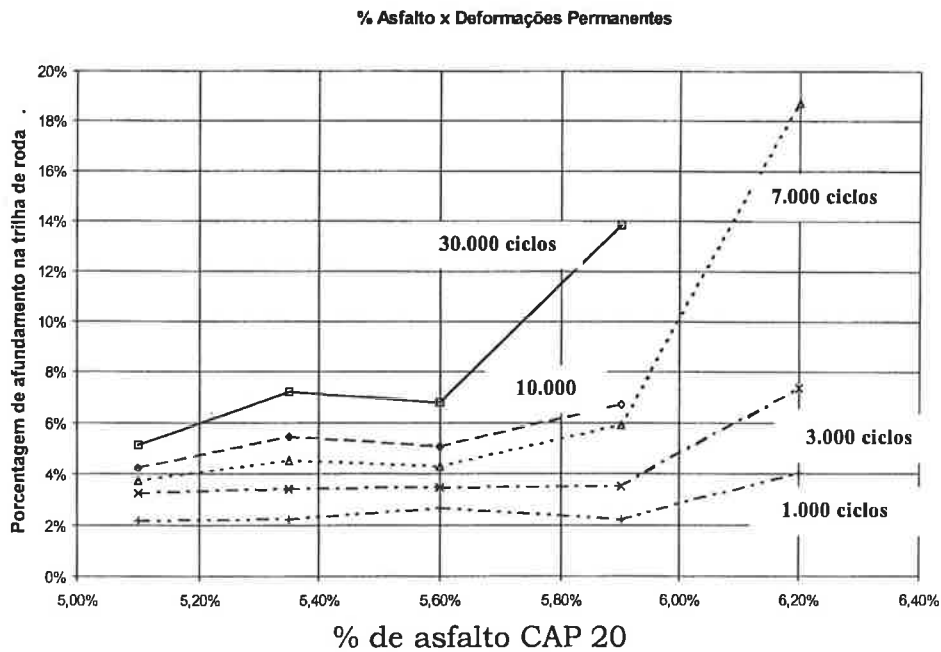


Figura 40: Variação do afundamento na trilha de roda com o teor de asfalto CAP 20 obtidos em placas de misturas asfálticas testadas no simulador de tráfego LPC (Bernucci et al, 1997).

Para um número baixo de solicitações, as deformações permanentes são praticamente independentes de pequenas variações no teor de asfalto ($\pm 0,5\%$). Ou seja, para os primeiros meses, um excesso de ligante na mistura asfáltica desta natureza, mantendo a mistura asfáltica dentro da faixa de vazios aceita pelo método Marshall, não levaria a deformações permanentes excessivas.

O aumento do número de solicitações, com o passar dos meses/anos, levaria a acentuar as diferenças de comportamento da mistura, dependentes do teor de ligante. Para uma diferença positiva de $+ 0,3\%$ de asfalto (5,9% em peso de CAP 20), variação aceita na Usina, e no caso do experimento aquela que se refere a 4% de vazios no ensaios Marshall, as deformações permanentes acentuam-se com os números de ciclos, sendo inaceitáveis para um elevado número de solicitações, mostrando restrições na adoção desses limites de aceitabilidade em Usina para misturas como essas.

Aumentos de 0,6% no teor de asfalto (6,2% em peso de CAP 20) passam a ser inadmissíveis sob o ponto de vista das deformações permanentes. O enriquecimento no teor de asfalto em concretos asfálticos densos, com a finalidade de aumentar sua durabilidade, mas sem detrimento de sua resistência à formação de trilhas de rodas, só pode ser obtido com mudanças no tipo de asfalto ou na granulometria.

6.5. Variação do tipo de ligante asfáltico: aumento de consistência ou modificação por polímeros e por outros produtos

Um recurso que tem sido utilizado para limitar as deformações permanentes é o emprego de asfaltos convencionais com maior viscosidade em elevadas temperaturas de trabalho, asfaltos de maior consistência, como os asfaltos CAP 40 – denominação nas regiões sul, sudeste e centro-oeste, ou os asfaltos CAP 30/45 – denominação no norte e nordeste brasileiros. Outro recurso mais recente é a utilização de asfaltos modificados por polímeros ou por outros produtos para obtenção do mesmo efeito, seja aumentando a consistência (diminuindo a penetração) ou aumentando o ponto de amolecimento, seja alterando suas características reológicas, principalmente acentuando a capacidade de retorno elástico rápido frente à solicitação (diminuindo o ângulo de fase do ligante asfáltico).

Emprego de ligante asfáltico convencional de maior consistência

Com o objetivo de estudar o comportamento à deformação permanente em misturas asfálticas com asfalto mais consistente, foram utilizados os mesmos agregados e a mesma graduação do estudo relatado no item 6.4 anterior. Foi substituído o CAP-20 pelo CAP-40; as características dos asfaltos constam da Tabela 4.

Tabela 4: Características dos cimentos asfálticos de petróleo utilizados na pesquisa DERSA/USP (Bernucci et al, 1997).

Características	CAP 20	CAP 40
solubilidade de tri-cloroetileno	99,95	99,98
densidade	1,020	1,015
penetração	63	32
ponto de fulgor	236	>302
viscosidade absoluta à 60o C	2880	4410
índice de susceptibilidade térmica	-0,2	-0,8
efeito do calor e do ar:		
ductilidade	116	>100
variação de peso		0,01
relação de viscosidade	3,2	2,3

A introdução de um ligante mais consistente, de menor penetração e maior viscosidade, resultou em uma diminuição das deformações permanentes com relação àquelas obtidas com CAP 20 – Figura 41.

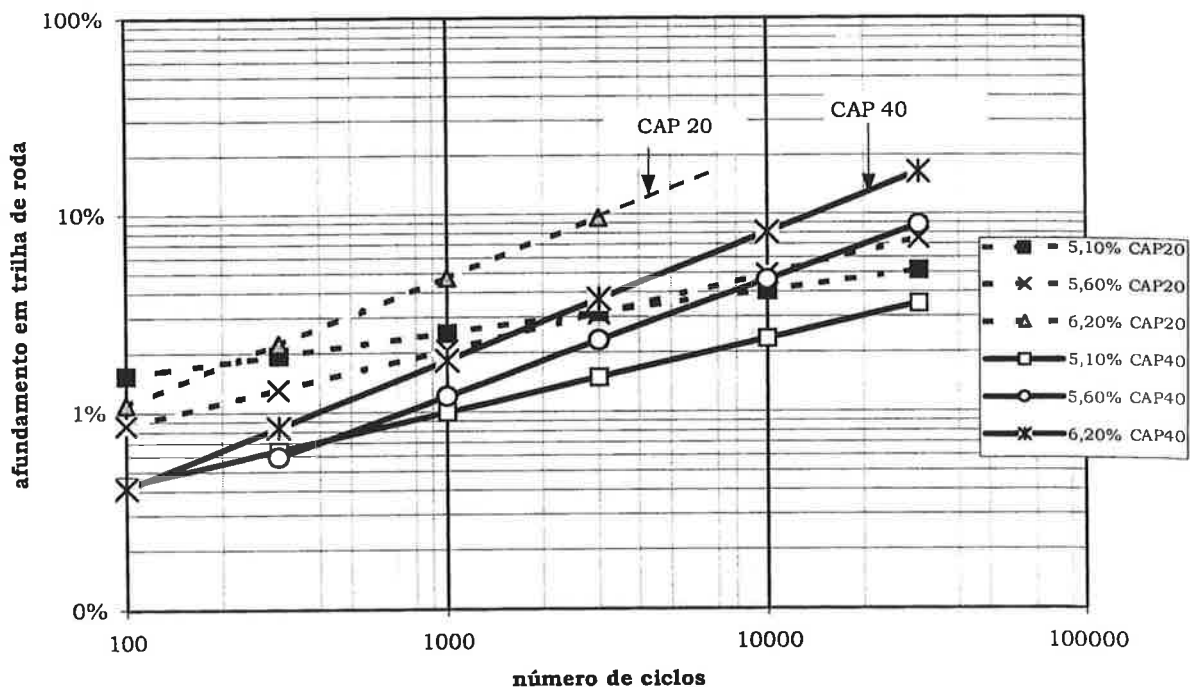


Figura 41: Variação do afundamento na trilha de roda com o teor de asfalto CAP 20 e CAP 40 obtidos em placas de misturas asfálticas testadas no simulador de tráfego LPC

É interessante observar que a mistura asfáltica com CAP 40 não é tão susceptível quanto o CAP 20 ao aumento da deformação permanente com o acréscimo de teor de ligante asfáltico. Observe-se que a deformação

permanente aos 7.000 ciclos com o CAP 20 é da mesma ordem de grandeza que aquela verificada com 6,2% de CAP 40 com 30.000 ciclos de solicitação.

Carvalho (1999) testou uma mistura asfáltica cujos agregados são constituídos somente de seixos rolados, prática comum no Estado do Pará por falta de pedreiras na região. Obteve com CAP 50/60 afundamento em trilha de roda no simulador de tráfego de 7,4% aos 1.000 ciclos de solicitação e 11,0% aos 10.000 ciclos; com o CAP 40, mais viscoso, obteve com a mesma graduação 5,7% para 1.000 ciclos e 8,4% para 10.000 ciclos, mostrando uma redução de mais de 20% de afundamento.

Um fator relevante de se destacar é a grande faixa de variação da viscosidade permitida pela especificação brasileira para uma dada classe de CAP (DNC nº 01/92 – Rev. 02). A Figura 42 mostra a variação de afundamento em trilha de roda medida no simulador de tráfego para uma areia-asfalto bem graduada testada com dois diferentes ligantes de mesma classe CAP 50/60, fornecidos ambos pela LUBNOR – Ceará (Aldigueri, 2001). Observe-se a variação expressiva da viscosidade absoluta a 60°C dos dois ligantes de mesma classe. Evidentemente, o CAP mais viscoso a 60°C auxilia mais a mistura na resistência à deformação permanente.

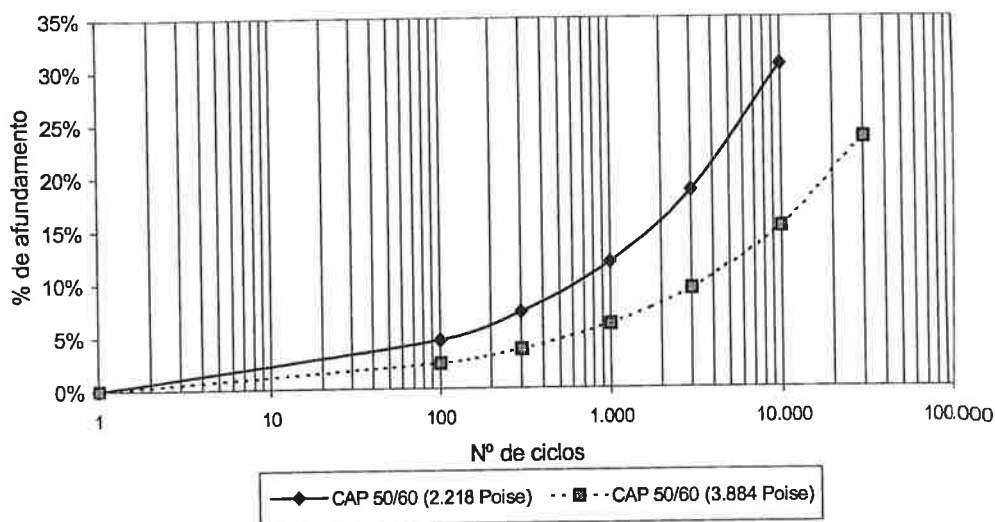


Figura 42: Afundamento em trilha de roda no simulador de tráfego LPC de duas areias-asfalto de mesma graduação e agregados usinadas com dois CAP 50/60 de diferentes viscosidades absolutas a 60°C (Aldigueri, 2001).

A utilização de asfaltos mais consistentes leva a uma maior dificuldade na produção da mistura, devido à elevada temperatura de usinagem requerida pelo CAP 40. Pequenas variações de temperatura levam a uma dificuldade adicional devido à queda na trabalhabilidade do ligante. O CAP 40 é pouco empregado no Brasil, com uso limitado em certos locais como no Rio de Janeiro. No nordeste, apesar das elevadas temperaturas, não são empregados os cimentos asfálticos mais consistentes; há estudo de aplicação do CAP 30/45, porém não há ainda produção contínua deste asfalto. Há

uma grande potencialidade de serem adotados em vias propensas à solicitação expressiva de tráfego, como em vias de tráfego canalizado, corredores de ônibus, rampas, etc, e em locais de alta temperatura de trabalho.

Emprego de ligante asfáltico modificado por polímero e por outros produtos

O uso de asfalto modificado vem sendo intensificado no Brasil, principalmente a partir dos anos 90. Algumas raras experiências anteriores foram realizadas, porém pouco expressivas. O polímero mais empregado no Brasil na atualidade é o SBS (estireno-butadieno-estireno), comercializado a partir de 1997, seguido do SBR (borracha estireno-butadieno), no mercado brasileiro a partir de 1998 (Leite, 1999). Estudos têm sido realizados para implementar o uso do copolímero EVA (etileno-acetato de vinila), do PE (polietileno) e ainda da Borracha de Pneu Moído (BPM). Outros produtos têm sido experimentados para a modificação dos asfaltos, como uma resina natural denominada asfaltita, proveniente da Argentina.

O Laboratório de Tecnologia de Pavimentação vem desenvolvendo desde 1998 pesquisas com asfaltos modificados. Em 1999, o LTP iniciou uma pesquisa realizada em conjunto com o CENPES-Petrobras, apoiada pelo CTPetro - FINEP através do fundo da Agência Nacional de Petróleo (ANP), para estudo da influência do asfalto modificado na deformação permanente. Para tanto, selecionou-se uma mistura asfáltica densa, com agregados e graduação idem àquela utilizada na pesquisa discutida no item 6.4. A tabela 5 traz alguns dados sobre os ligantes que vem sendo testados.

Tabela 5: Caracterização dos asfaltos e propriedades reológicas

	Asfalto modif por 4% de EVA	Asfalto modif por 3% de SBR	Asfalto modif por 4% de SBS	Asfalto modif por 20% de BPM	CAP 20
Viscosidade absoluta @ 60°C	-				2880
Penetração @ 25°C, 100g, 5 s, dmm	38	45	58	38	63
Viscosidade Brookfield @ 135°C, cP	925	1700	954	2800	400
Cisalhamento dinâmico: G*/sen δ, °C APÓS RTFOT	82	76	70	88	64
Recuperação elástica @ 25°C, % - ASTM D 6114	47	78	90	85	< 15
PERFORMANCE GRADE (SRHP)	82-22	76-22	70-22	82-28	64-22

A Figura 43 mostra resultados de afundamentos na trilha de roda no simulador de tráfego para 10000 ciclos de alguns ligantes testados, dois convencionais e dois modificados. O valor de 6,2% para o CAP 20 foi extrapolado da curva de regressão dos afundamentos. Pode-se observar um ótimo desempenho do asfalto modificado por EVA, sendo o ligante mais resistente para os afundamentos até o momento testado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (Bernucci et al, 2000). O ligante modificado por BPM (borracha de pneu moída) também é um produto muito interessante no que concerne à limitação da deformação permanente (Leite et al., 2000). Este produto foi produzido por “via úmida”, ou seja, misturando os dois componentes com adição de diluentes em reator de alto cisalhamento, a 190°C.

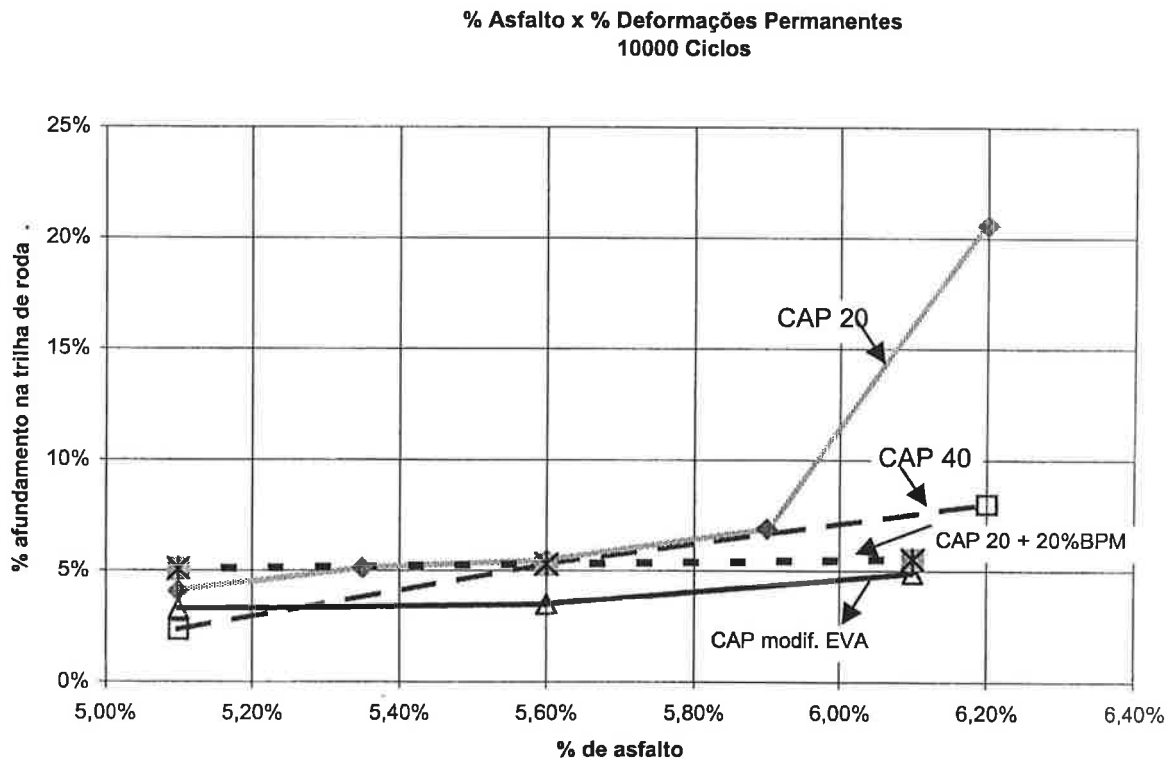


Figura 43 : Variação do afundamento na trilha de roda para 10.000 ciclos de solicitação no simulador de tráfego LPC dependendo do tipo de ligante asfáltico para a mesma graduação (modificado a partir de dados de Bernucci, 2000 e Leite et al, 2000)

A Figura 44 mostra resultados obtidos para o asfalto modificado por SBR, com a mesma graduação utilizada no item 6.4, com os asfaltos modificados por EVA e por BPM. Os resultados demonstram que o asfalto modificado por SBR é responsável pela redução de afundamento, se comparado ao CAP 20. Observe-se também que o asfalto modificado por BPM apresenta um dado afundamento inicialmente, porém pouco evolui com o número de ciclos. Este comportamento foi observado para outros teores também. Há uma acomodação inicial mais importante, porém a alta recuperação elástica do ligante modificado por BPM auxilia na recuperação dos deslocamentos frente

à solicitação repetida do simulador de tráfego. Os resultados de deformação permanente são compatíveis e correlacionam-se com os resultados de caracterização dos ligantes asfálticos pelo SHRP, como com a relação $G^*/\text{sen}\delta$, obtida no ensaio de cisalhamento dinâmico (Stuart e Izzo, 1994); os dados de $G^*/\text{sen}\delta$ (módulo complexo/seno do ângulo de fase) são definidos para a temperatura na qual a relação corresponde a 1 kPa.

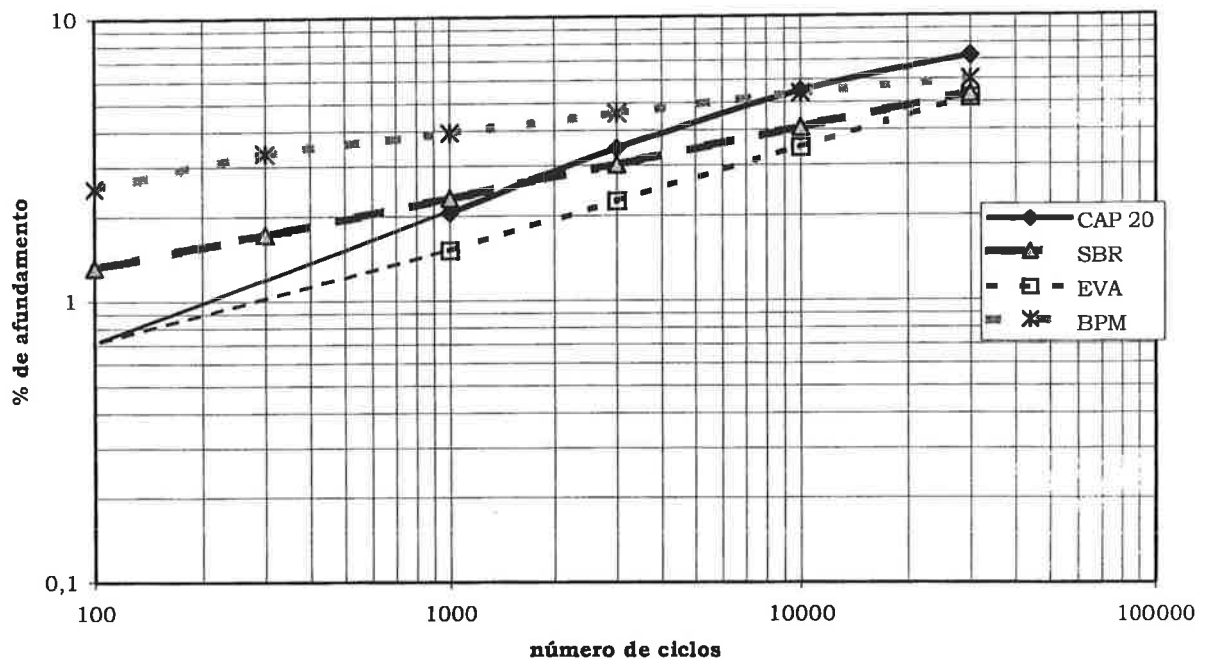


Figura 44: Afundamento na trilha de roda no simulador de tráfego LPC para o teor de 5,6% de ligante asfáltico para todas as misturas testadas.

A Figura 45 mostra a graduação estudada para uma pesquisa de adesividade ligante asfáltico/agregado realizado para a Nova Dutra, concessionária da Rodovia Presidente Dutra; os agregados são constituídos de gnaiss (Bernucci et al, 1999). Tais estudos serviram de base para a Dissertação de Mestrado de Moura (2001), e serão discutidos em outro item deste trabalho de sistematização crítica. Foram pesquisadas diversas propriedades das misturas asfálticas, com diferentes tipos de ligantes asfálticos. A Figura 46 mostra os resultados de deformação permanente no simulador de tráfego para CAP-20, CAP modificado por EVA, por SBR e por SBS; a todos foi adicionado 1% de cal cálcica CH-1. Observe-se que a graduação da mistura leva a resultados muito bons quanto à resistência à deformação permanente – valores abaixo de 5% para 30.000 ciclos são recomendados pelos franceses para as misturas asfálticas sujeitas a tráfego pesado e para os revestimentos de módulo elevado (BBME – Bétons Bitumineux à module élevé) – SETRA-LCPC, 1993; Brosseau et al., 1993.

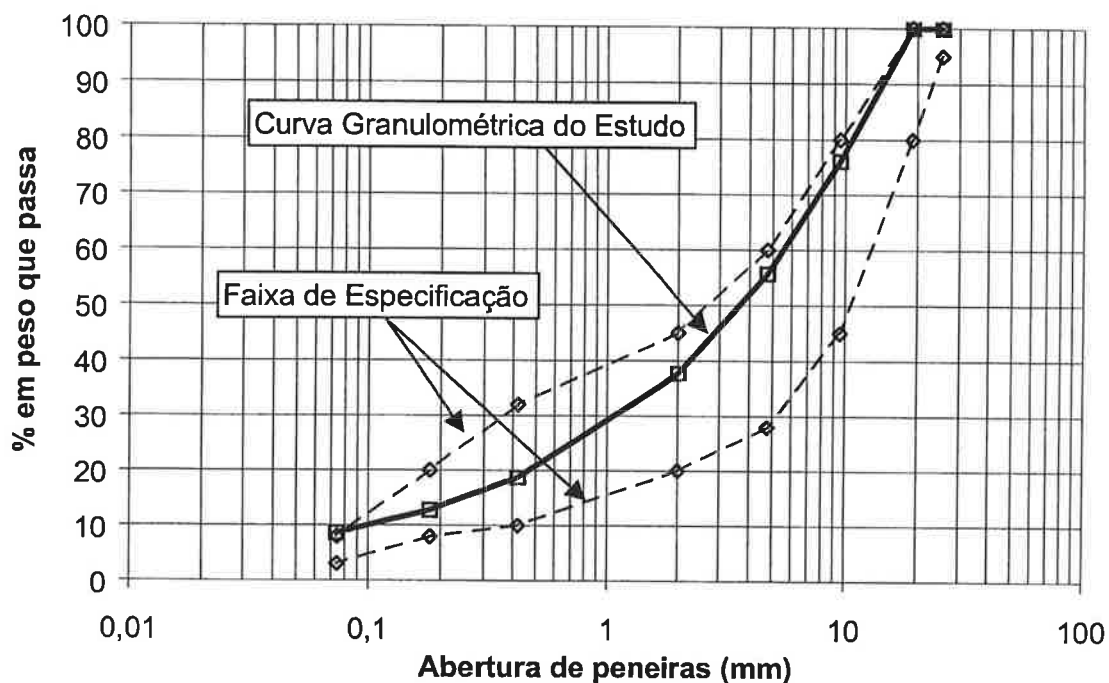


Figura 45: Graduação empregada em pesquisa realizada para a Nova Dutra (Bernucci et al. 1999; Moura, 2001).

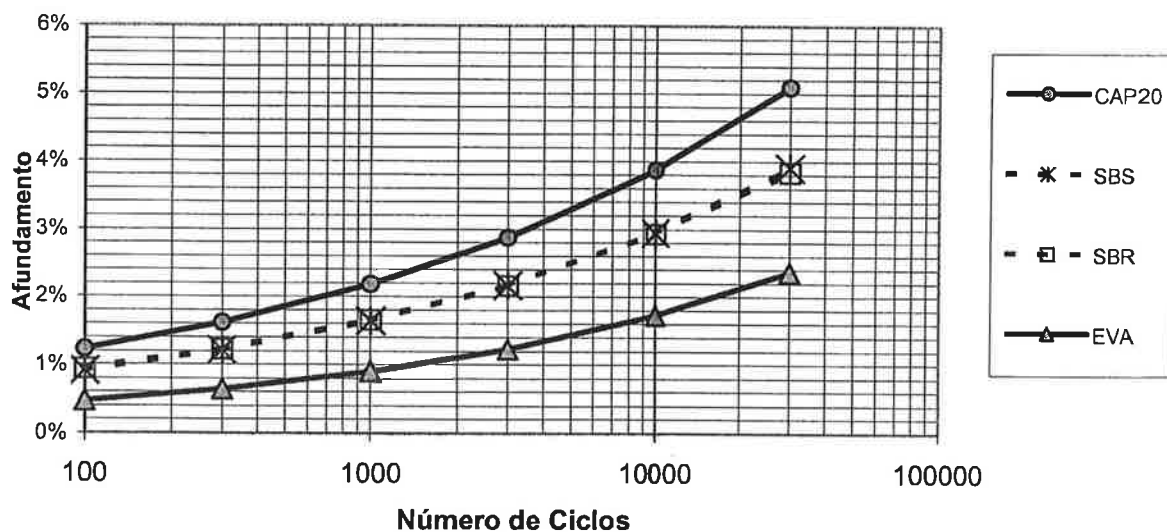


Figura 46: Afundamento na trilha de roda no simulador de tráfego LPC para o teor de 5,6% de ligante asfáltico para todas as misturas testadas (modificado a partir de dados de Moura, 2001).

A modificação dos asfaltos por asfaltitas tem sido um dos recursos utilizados para aumentar a consistência dos ligantes e torná-los mais resistentes à deformação permanente. Resultados obtidos com asfalto modificado por

asfaltita, denominado CAP-PLUS pela Petrobrás, constam da Figura 47, em comparação com o afundamento obtido para placas com CAP 40, o asfalto convencional de maior consistência pela classificação brasileira.

Resultados obtidos com dois tipos de asfalto modificado por asfaltita, denominado por IP-PEN pela Ipiranga Asfaltos SA, constam da Figura 48, em comparação com CAP 20. Os números ao lado do nome do produto significam respectivamente o ponto de amolecimento e a penetração, sendo que o aumento do ponto de amolecimento de 50 para 60 e a queda da penetração de 35 para 25 é obtida pelo aumento de quantidade de asfaltita na modificação do asfalto. É interessante salientar que o material testado não mostrava graduação adequada para a deformação permanente, resultando em afundamentos acentuados; a solução no caso desta obra foi de modificar o ligante asfáltico de forma a reduzir drasticamente as deformações permanentes.

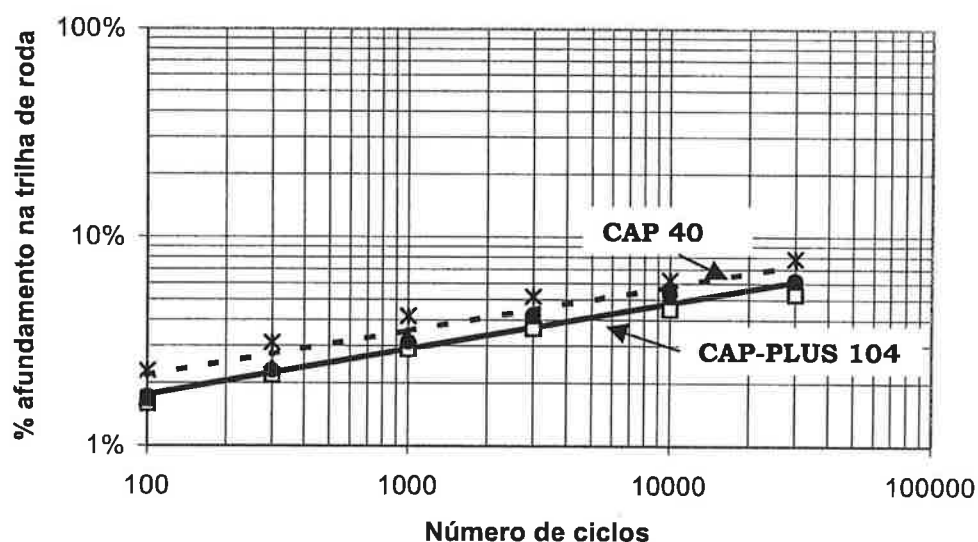


Figura 47: Comparação de afundamentos em simulador de tráfego de misturas asfálticas com a mesma graduação e diferentes ligantes asfálticos, convencional e modificado por asfaltita.

Outro recurso da indústria do asfalto é o uso de asfalto soprado, processo empregado durante a produção do ligante na refinaria. A Figura 49 traz um exemplo de um asfalto soprado, denominado *Alto Índice* na Argentina. Os resultados demonstram a queda expressiva da deformação permanente em comparação com o CAP 20. O uso do asfalto soprado, tipo “Multigrade”, tem tido uma boa aceitação na Europa e seus resultados de redução dos afundamentos em trilha de roda são reconhecidos (Corté et al. 1998).

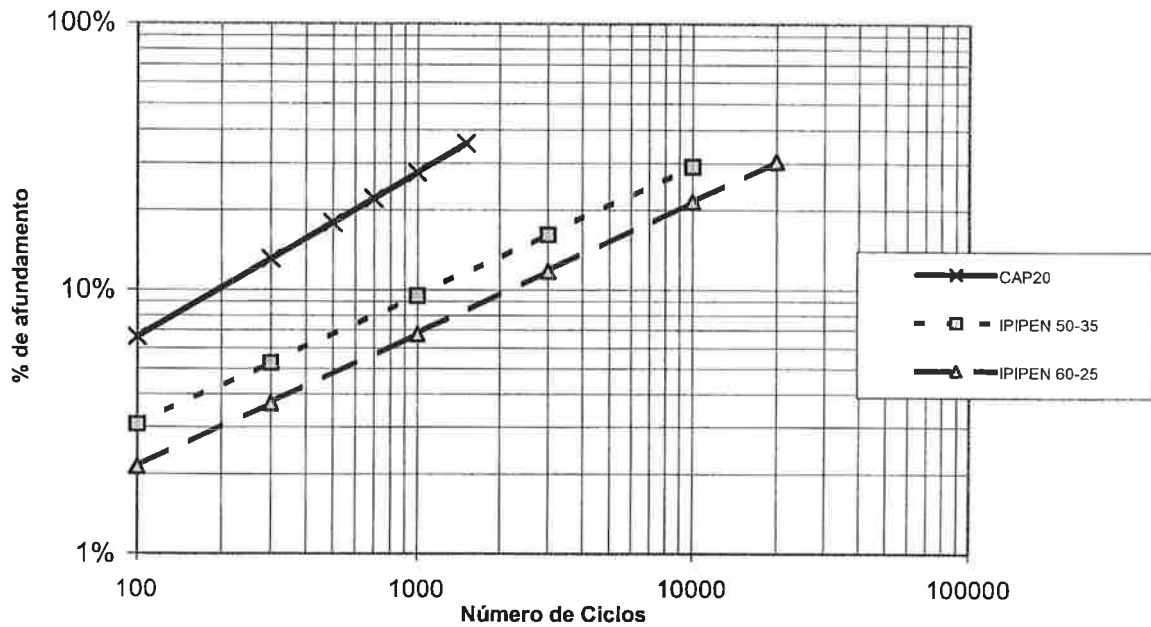


Figura 48: Comparação de afundamentos em simulador de tráfego de misturas asfálticas com a mesma graduação e diferentes ligantes asfálticos convencional e modificado por asfaltita.

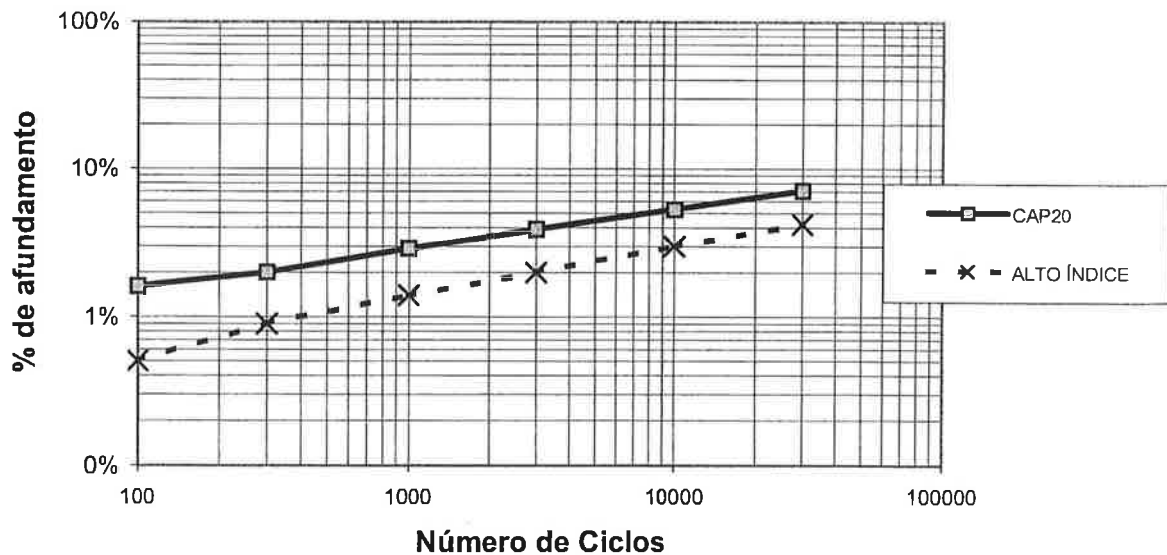


Figura 49: Comparação de afundamentos em simulador de tráfego de misturas asfálticas com a mesma graduação e diferentes ligantes asfálticos convencional e soprado.

6.6. Variação da graduação e do tipo de agregado

Os agregados desempenham um papel essencial na resistência ao cisalhamento e, portanto, na resistência ao afundamento em trilha de roda de misturas asfálticas. A graduação, um dos fatores mais importantes na resistência ao cisalhamento, pode ser responsável por um bom intertravamento do esqueleto sólido; outros fatores são também fundamentais na resistência como: forma do agregado, resistência do grão, rugosidade superficial, natureza e tamanho do filer. Momm (1998) pesquisou a deformação permanente de concretos asfálticos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, variando a distribuição granulométrica e o diâmetro máximo dos grãos, mostrando que quanto mais densa a mistura - resultante de distribuição granulométrica bem graduada, com menor índice de vazios e maior diâmetro máximo - mais resistente à deformação permanente.

Carvalho (1999) estudou misturas asfálticas empregadas no estado do Pará em revestimentos asfálticos. A Figura 50 mostra as fotos dos agregados pesquisados e a Figura 51 as graduações utilizadas no trabalho.

Carvalho observou que a alteração da graduação da brita empregada no projeto original, mantendo o agregado original, poderia reduzir consideravelmente a deformação permanente - Figura 52.

Na mesma figura pode-se verificar que a alteração da composição, adicionando 18% em peso de agregado natural constituído por seixo rolado, de forma a reduzir o preço da mistura asfáltica, apesar de praticamente ser mantida a graduação, torna a mistura asfáltica um pouco mais susceptível à deformação permanente devido à introdução de agregados arredondados, não britados, à composição.

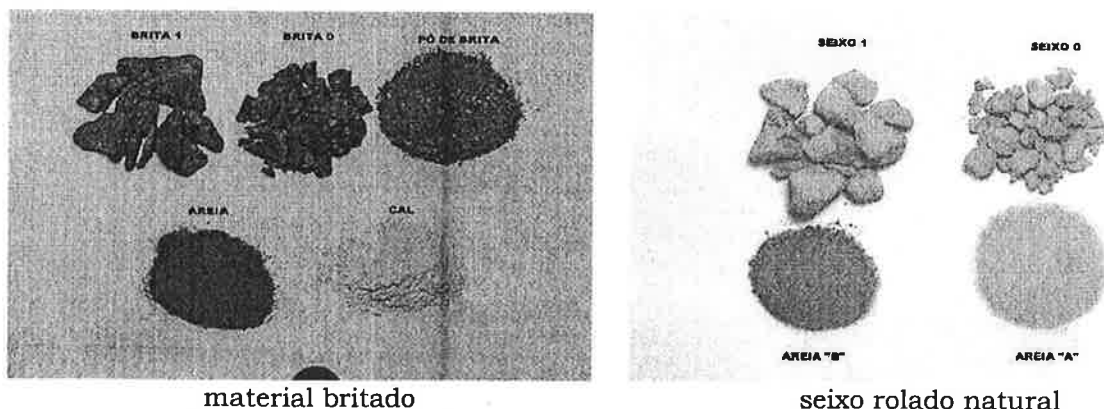


Figura 50: materiais utilizados para compor misturas asfálticas utilizadas no estado do Pará (Carvalho, 1999).

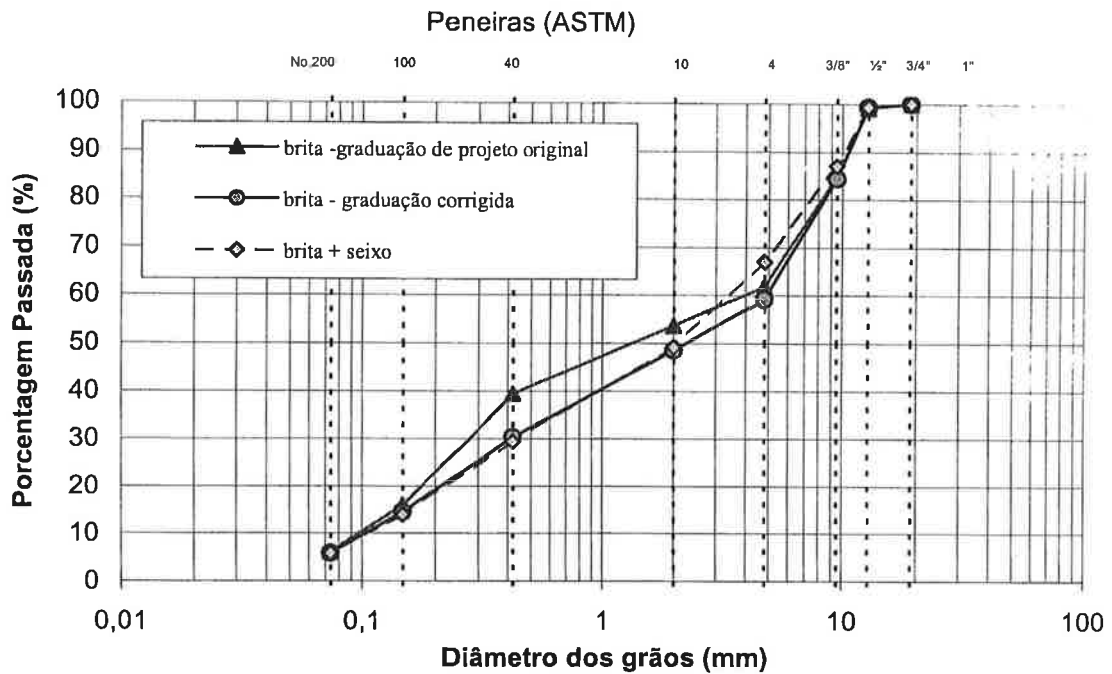


Figura 51: Graduação das misturas asfálticas utilizadas em pesquisa de concretos asfálticos do estado do Pará (Carvalho, 1999; Carvalho et al, 2000)

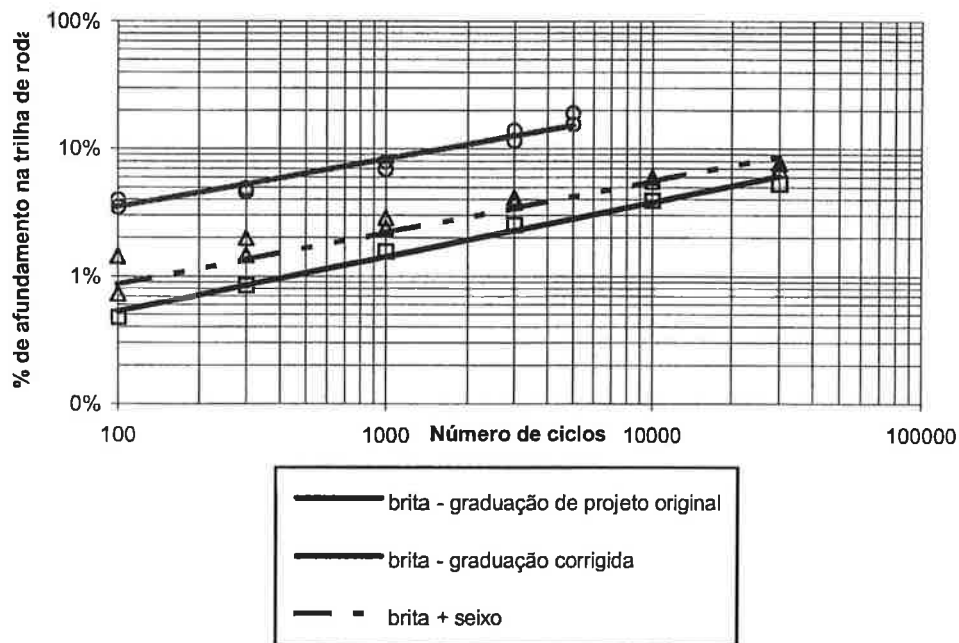
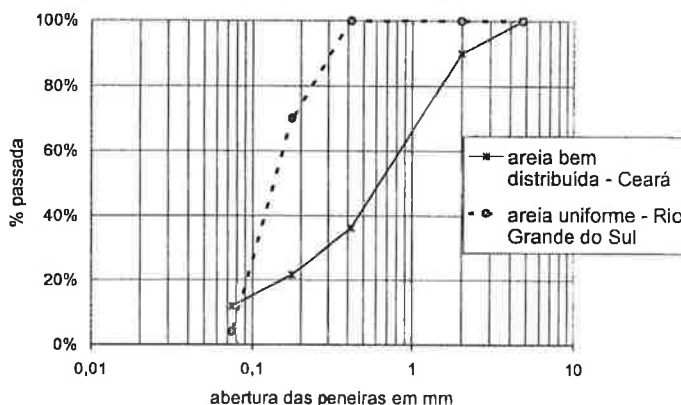


Figura 52: afundamentos em trilha de roda resultantes da alteração de graduação e de composição de agregados (Carvalho, 1999; Carvalho et al, 2000).

A Figura 53 (b) mostra a distribuição granulométrica de duas areias pesquisadas para constituírem revestimentos asfálticos, sendo a primeira uma areia uniforme de grãos arredondados proveniente do Rio Grande do

Sul, da região de Mostardas, e a segunda uma areia bem graduada de grãos cúbicos, do Ceará, da região de Campos Belos (Figura 53-a).



(a) areia cúbica do Ceará (b) graduação de duas areias utilizadas em areias-asfalto

Figura 53: Distribuição granulométrica de duas areias utilizadas em misturas asfálticas tipo areia-asfalto (Modificado a partir de dados de Lomonaco,1999; e de Aldigueri, 2001).

A primeira areia-asfalto foi ensaiada por Lomonaco (1999), com CAP 20, com teor de 7%, com adição de cinzas volantes na proporção de 3% em peso para auxiliar na rigidez e na resistência ao cisalhamento, tendo sido ensaiada no simulador de tráfego a 50°C. A segunda areia-asfalto foi ensaiada por Aldigueri (2001), com CAP 50/60 – que corresponderia aproximadamente em penetração ao CAP 20 – na porcentagem de 7%, com adição de cal na proporção de 2% em peso para auxiliar na adesividade, tendo sido ensaiada no simulador de tráfego a 60°C. Ambas areias-asfalto pertencem a obras de rodovias que foram executadas. A Figura 54 mostra os resultados de afundamentos no simulador de Tráfego.

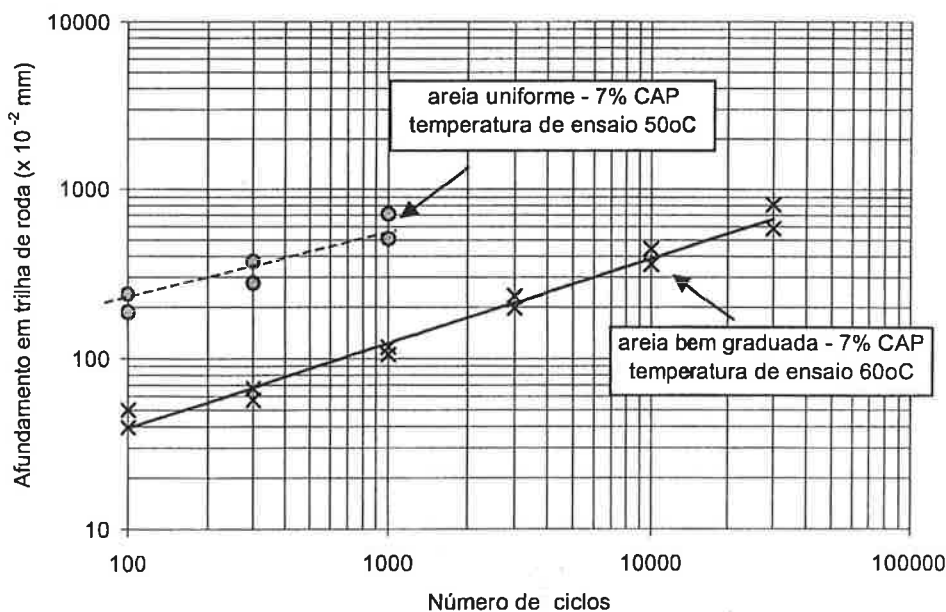


Figura 54: Afundamento em trilha de roda no simulador de tráfego LPC de duas areias-asfalto (Modificado a partir de dados de Lomonaco,1999; e de Aldigueri, 2001).

Grandes diferenças de comportamento podem ser observadas, embora as porcentagens de asfalto utilizadas sejam as mesmas e as penetrações de ambos serem similares. Deve-se realçar que apesar dos cimentos asfálticos possuírem aproximadamente a mesma penetração, as viscosidades eram distintas, sendo o CAP 50/60 mais viscoso que o CAP 20, e a procedência e natureza dos asfaltos eram distintas. Porém a diferença marcante as areias que deve na realidade interferir mais pronunciadamente no comportamento à deformação permanente é a distribuição granulométrica e a forma dos grãos. Segundo o SHRP (1994), a influência da graduação e dos grãos supera o efeito do asfalto no desenvolvimento das deformações permanentes.

A Figura 55 mostra resultados de afundamentos em trilha de roda das mesmas areias-asfalto, porém no teor de projeto da obra. Apesar da areia asfalto do Ceará possuir 2% a mais de ligante asfáltico que a areia uniforme do Rio Grande do Sul, a deformação permanente ainda é inferior na mistura cearense devido à sua graduação e forma de grãos.

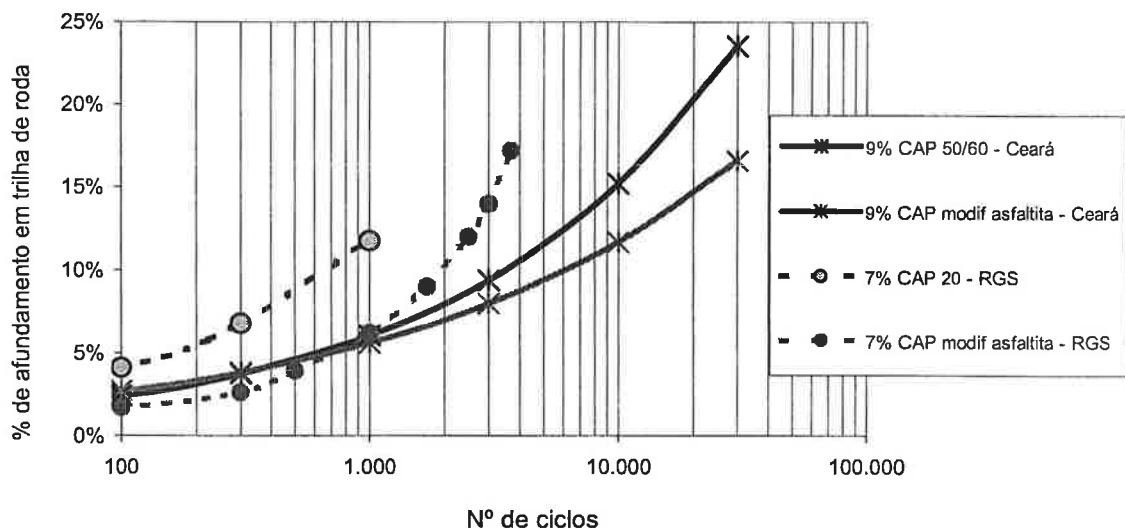


Figura 55: Influência do tipo de asfalto e da graduação no afundamento no simulador de tráfego de areia-asfalto bem graduada do Ceará e de areia uniforme do Rio Grande do Sul (modificado a partir de dados de Lomonaco, 1999; e de Aldigueri, 2001).

Em situações onde a graduação não pode ser alterada, pode-se recorrer à substituição do ligante por um asfalto de maior consistência ou modificado. Pode-se verificar pela figura citada a importância de alteração do tipo de asfalto por asfaltita (CAP modificado por asfaltita 60/25) para ambas misturas, sendo mais interessante na areia uniforme do Rio Grande do Sul, cujos resultados foram alterados significativamente.

Lomonaco (1999) ainda testou um asfalto mais rico em asfaltita (CAP modificado por asfaltita 65/20), com ponto de amolecimento superior e menor penetração, obtendo 4% de afundamento para 1.000 ciclos e 12,8% para 10.000 ciclos de solicitação, valores próximos aos obtidos para a areia

bem graduada do Ceará. Esta constatação demonstra o grande potencial de uso de asfaltos modificados com asfaltita para misturas do tipo areia-asfalto, ou com seixos rolados, ou ainda com laterita, nos locais onde a troca ou britagem de agregados naturais for inviável ou onerosa.

7. Resistência à tração e módulo de resiliência de misturas asfálticas

7.1. Importância do estudo da resistência à tração e do módulo de resiliência e métodos usuais de avaliação em laboratório

Como citado no item 6 anterior, o SHRP considera três modos de ruptura para os projetos de revestimentos asfálticos: a deformação permanente, a fissuração por fadiga e a fissuração devido às baixas temperaturas.

A fissuração por baixas temperaturas não é considerada em projeto pois no Brasil as regiões frias no inverno são raras. Além disso, dentre os cimentos asfálticos produzidos a partir de petróleos brasileiros, árabes, venezuelanos e argentinos testados por Leite (1999), a maioria possui temperatura mínima na classe PG pelo SHRP de 22°C negativos ou de 16°C negativos; um único caso com asfalto brasileiro misturado a óleo de xisto modificado por EVA mostrou 10°C negativos. Ou seja, mesmo nas regiões frias brasileiras, não há problemas de fissuração por baixas temperaturas dos asfaltos.

A fissuração por fadiga é um defeito freqüente no Brasil e provoca a queda de resistência do revestimento asfáltico, permite a entrada de água nas demais camadas da estrutura e facilita a formação de buracos. A Figura 56 mostra um exemplo de um pavimento trincado devido à fadiga no revestimento asfáltico.

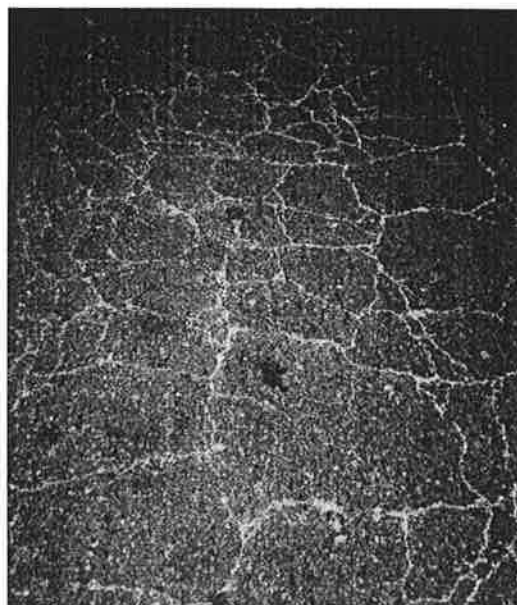
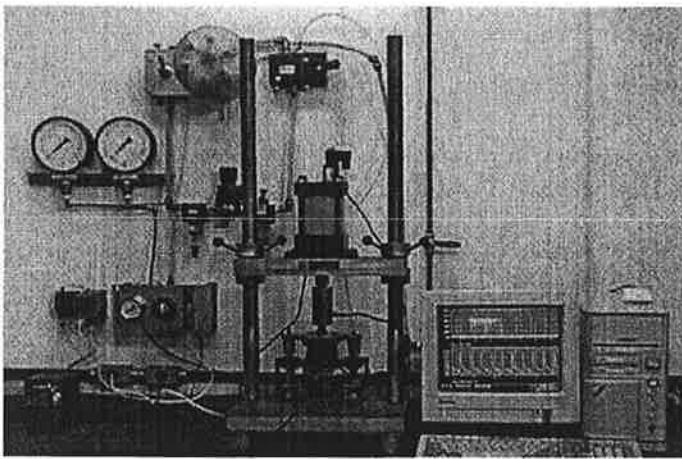
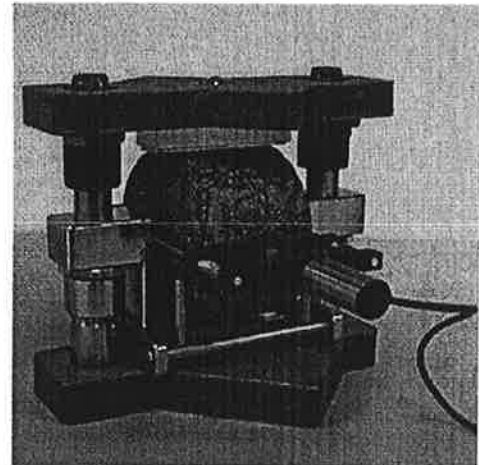


Figura 56: Exemplo de revestimento asfáltico fissurado por fadiga

Os ensaios de módulo de resiliência são conduzidos em equipamentos de carregamento cíclico, com corpos de prova cilíndricos moldados em equipamento Marshall, ou extraídos de placas compactadas na mesa compactadora LPC ou ainda extraídos de pista. As cargas são aplicadas senoidalmente com a duração total de 0,1 segundo e repouso de 0,9 segundos, diametralmente aos corpos de prova, em intensidade de cerca de 10 a 20% de sua resistência à tração. Durante o ensaio são medidos por meio de LVDT os deslocamentos diametrais horizontais dos corpos de prova. As figuras 57 (a) e (b) mostram respectivamente uma foto do equipamento atualmente montado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação e uma foto do dispositivo de suporte do corpo de prova e de leitura. A Figura 58 mostra a tela do programa de aquisição de dados com a carga aplicada (a), forma de carregamento (b) e respectivos deslocamentos medidos (c).



(a) equipamento de ensaio de resiliência de misturas asfálticas

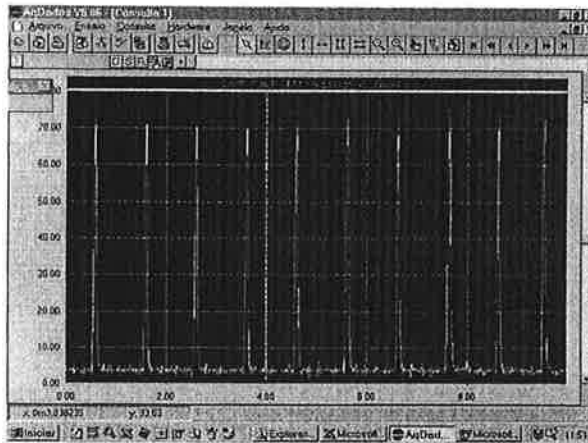


(b) dispositivo centralizador de corpo de prova e de leitura de deslocamentos

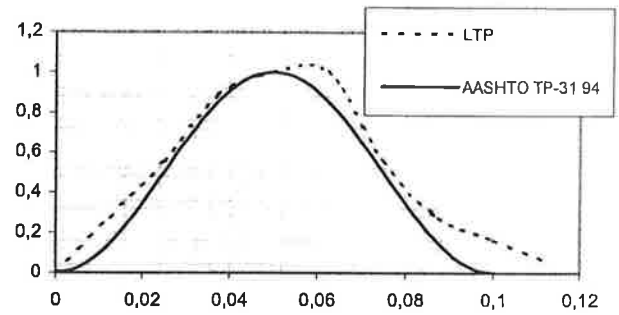
Figura 57: Equipamento para a determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas instalado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação.

Existem diversas técnicas e equipamentos para determinação da rigidez das misturas asfálticas. Citam-se o módulo dinâmico calculado a partir de leitura de deslocamentos recuperáveis axiais em corpos de prova cilíndricos colocados em câmara triaxial, sujeitos a carregamentos axiais cíclicos senoidais, e a confinamento constante ou pulsante senoidalmente. Outra técnica muito utilizada na França, na Bélgica e na Suíça é a determinação do Módulo Complexo em corpos de prova trapezoidais, sujeitos a deslocamentos cíclicos que levam o corpo de prova ora a sofrer compressão ora tração, alternadamente, nos lados não paralelos dos corpos de prova.

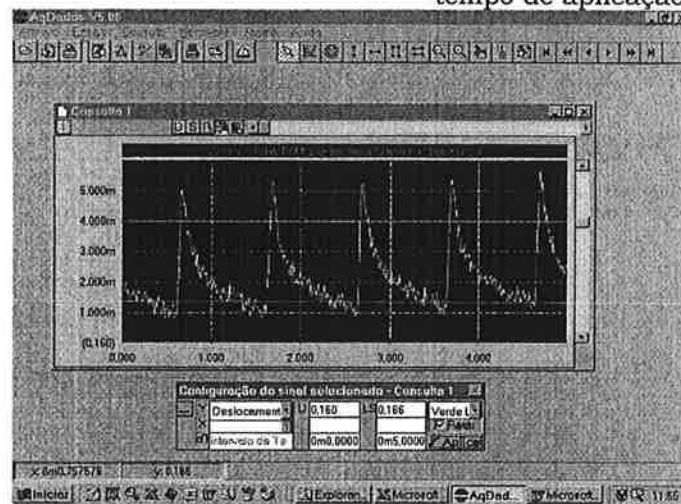
A resistência à tração tem sido determinada por compressão diametral em prensa Marshall, com velocidade do ensaio de estabilidade Marshall, a 25°C. A figura 59 mostra uma foto do equipamento utilizado para esta finalidade.



(a) tela de apresentação do carregamento



(b) forma de carregamento do equipamento e tempo de aplicação de carga



(c) forma dos deslocamentos observados durante o ensaio de carregamento cíclico.

Figura 58: Tela de apresentação dos dados de carregamento aplicado e das respostas de deslocamento pelo programa de aquisição de dados instalado para gerenciamento do equipamento de resiliência.

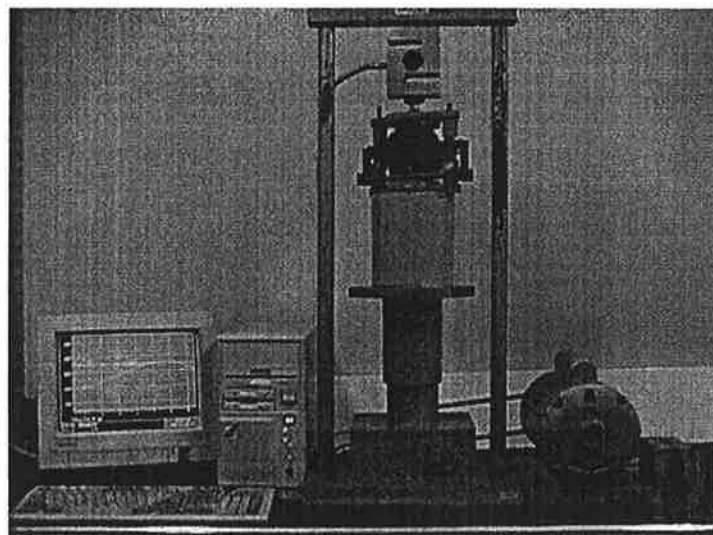


Figura 59: Montagem laboratorial do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação com prensa Marshall e aquisição de dados automática para a determinação da resistência à tração por compressão diametral.

Dois passos importantes serão dados no próximo ano: o uso de câmara de resfriamento e de aquecimento que está sendo desenvolvida e montada no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação para execução de ensaios de resiliência e de fadiga com temperaturas baixas (5°C) e altas (40°C), conforme recomenda a ASTM - atualmente todos os ensaios são realizados a 25°C em sala climatizada; e o segundo passo é iniciar os ensaios de fadiga, tanto em corpos de prova cilíndricos por compressão diametral como em vigas bi-apoiadas, com carregamentos em dois pontos; esta última técnica permitirá a realização de ensaios de tração por flexão. Devido a grande facilidade de execução de placas de misturas asfálticas na mesa compactadora LPC, os ensaios em vigas representarão um incremento importante na avaliação das misturas asfálticas pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação.

Os ensaios de fadiga são criticados por alguns pesquisadores devido à técnica de ensaio e à diferença dos resultados da realidade de pista. Na nossa opinião, os resultados laboratoriais podem ser calibrados com a realidade, através de acompanhamento de desempenho de pista, sendo este um dos objetivos do projeto de pesquisa PRONEX. Além disso, é inegável a importância do ensaio na comparação de comportamento entre misturas asfálticas para assegurar o projetista de uma melhor escolha de material. Justificar a não execução de ensaios laboratoriais pois o que realmente importa é o comportamento de pista, resultante principalmente da técnica construtiva e do controle, significa andar novamente para trás na tecnologia brasileira, voltar ao início do século, tornando assim até o projeto desnecessário – basta copiar projetos que deram certo. Deve-se avaliar, antes de relegar a um segundo grau de importância o projeto e os ensaios laboratoriais, o risco que esta atitude representa.

7.2. Origem das fissuras em pavimentos

A fissuração pode ocorrer por vários motivos: fadiga do revestimento, reflexão de trincas de camada inferior, por afundamento na trilha de roda, por expansão do subleito, por raízes de árvores plantadas junto à borda do pavimento, entre outros. A fissuração por fadiga é um dos defeitos mais freqüentes nas rodovias brasileiras.

Razões para esta ocorrência são várias:

- falta de compactação do subleito e/ou das camadas constituintes do pavimento, provocando um enfraquecimento da estrutura como um todo e fissuração precoce do revestimento;
- drenagem imprópria permitindo queda de resistência nas camadas afetadas pelo aumento de umidade;
- incompatibilidade no projeto quanto à natureza e à espessura das camadas, principalmente da camada de revestimento asfáltico com as demais, sendo esta última construída com pequena espessura e alta rigidez frente aos deslocamentos que ocorrem nas demais camadas

decorrentes das solicitações do tráfego, provocando elevados deslocamentos no revestimento asfáltico e, conseqüentemente, levando-o à ruptura;

- revestimentos asfálticos executados com porcentagem de ligante asfáltico abaixo do teor de projeto;
- projeto inadequado de dosagem levando à porcentagem de vazios que permite a entrada de água, mas não suficientemente permeável para facilitar sua saída, provocando um aumento da pressão neutra na água presa dentro dos vazios, diminuindo a resistência do material;
- temperatura de usinagem ou de execução do revestimento asfáltico impróprias, entre outros fatores.

Nosso estudo concentra-se principalmente na dosagem das misturas asfálticas, no estado do material devido à técnica de compactação e na compatibilidade de projeto, enfocando a rigidez e a espessura frente ao comportamento das demais camadas da estrutura de pavimento. Para tanto, são estudados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação os módulos de resiliência das misturas asfálticas para compatibilizar rigidez e deslocamento no projeto de pavimento, e a resistência à tração por compressão diametral para estudar o quanto as tensões de tração atuantes no revestimento asfáltico estão abaixo da sua resistência à ruptura.

7.3. Variação do teor de ligante asfáltico

O problema da definição do teor de projeto de misturas asfálticas é que a falta de asfalto leva a um enfraquecimento das ligações entre os agregados, reduzindo sua coesão e durabilidade, porém a redução da quantidade de ligante favorece a resistência à deformação permanente, como foi verificado no item 6.4 anterior. Para melhorar a durabilidade e a resistência à fadiga, o aumento na dosagem de ligante é requerida, porém esta leva à instabilidade da mistura asfáltica quanto à deformação permanente, provocando uma lubrificação excessiva entre os grãos e facilidade de mobilidade. A Figura 60, concebida por Monismith et al (1989), expressa este antagonismo na resposta das misturas asfálticas com a variação do teor de asfalto, dificultando a escolha do teor de projeto.

A Figura 61 mostra um exemplo de variação do módulo de resiliência com a variação do teor de asfalto para um concreto asfáltico com asfalto modificado com EVA, determinados pelo LAPAV-UFRGS para uma pesquisa da USP para a Petrobras. Observe-se a diferença de resposta devido ao processo de compactação ser diferente - o Marshall envolve impacto e a placa advém de compactação por rolagem - além da perturbação ocasionada pela extração por broca adiamantada que corta agregados e produz vibrações no corpo de prova durante a extração que podem ocasionar microfissuras nas ligações mais tênues entre agregados. Realça-se que os corpos de prova extraídos de pista apresentam os mesmos inconvenientes.

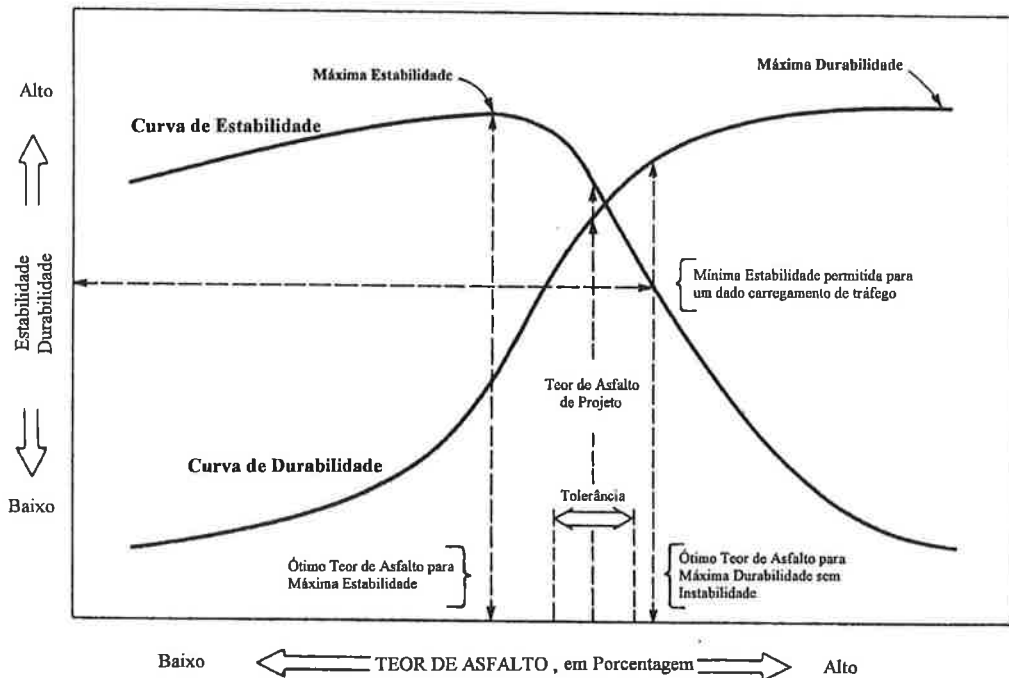


Figura 60: Relação entre durabilidade/estabilidade de concreto asfáltico, dependendo do teor de asfalto (Monismith et al, 1989).

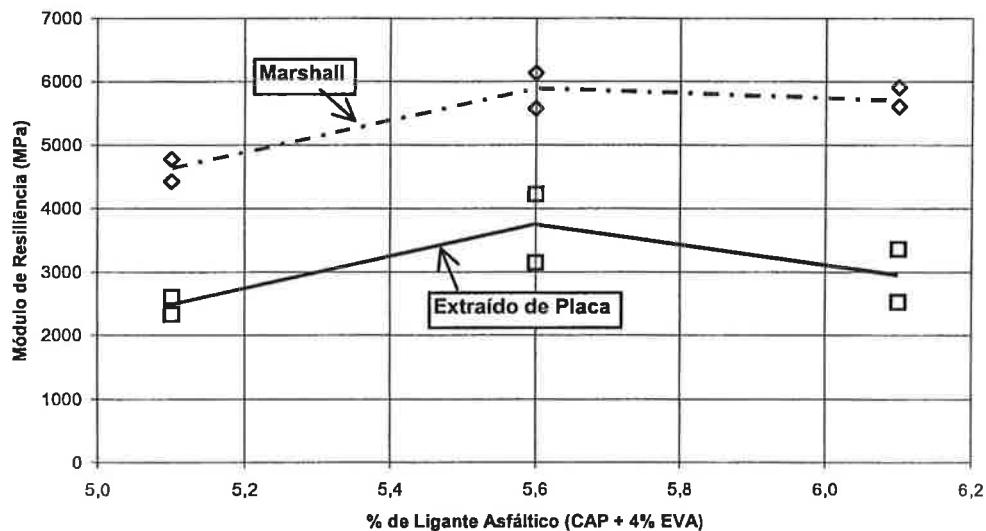


Figura 61: Variação do módulo de resiliência com o teor de asfalto para corpos de prova extraídos de placas compactadas e de corpos de prova Marshall com asfalto modificado por EVA (Bernucci et al, 2000).

A Figura 62 mostra resultados de resistência à tração em função da variação do teor de ligante asfáltico CAP 20 de um concreto asfáltico. A mesma tendência anterior pode ser verificada quanto à influência do processo de compactação e da extração por broquemento.

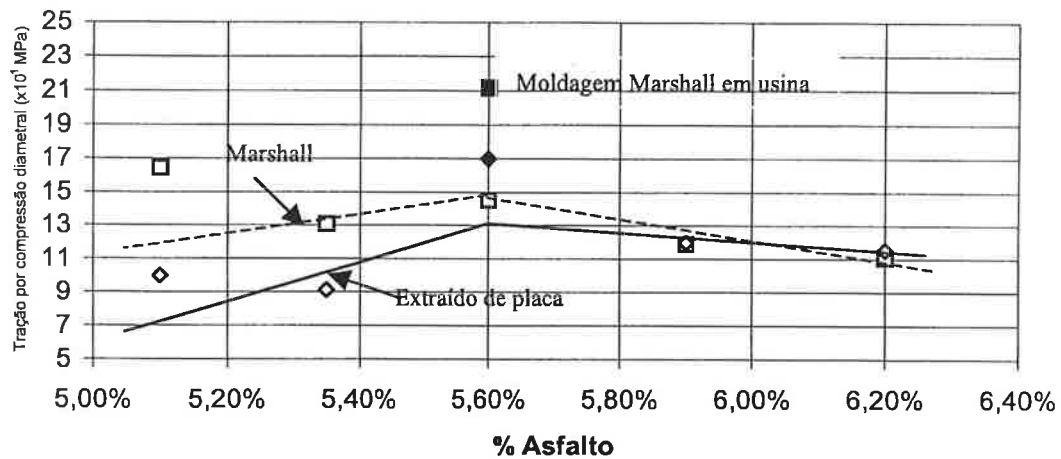


Figura 62: Variação da resistência à tração por compressão diametral com o teor de asfalto para corpos de prova Marshall e extraídos de placas (Bernucci et al, 1996).

7.4. Efeito da Temperatura

A temperatura é um importante fator na variação das propriedades dos ligantes asfálticos e, por conseqüência, das misturas asfálticas. O efeito da temperatura no módulo de resiliência pode ser visto em um exemplo com asfalto modificado por EVA – Figura 63 (Bernucci et al, 2000). Estes ensaios foram executados no LAPAV-UFRGS. A variação com a temperatura deve ser levada em conta em projetos, principalmente no caso de vias com alto volume de tráfego. Observe-se, em especial, que para os corpos de prova Marshall a 40°C, os valores de módulo de resiliência encontram-se entre 1300 a 1500 MPa, valores altos para tal temperatura, demonstrando que o asfalto com EVA mantém uma rigidez expressiva mesmo a altas temperaturas de trabalho, fator importantíssimo para as condições climáticas brasileiras.

De outro lado, deve-se ater aos elevados valores alcançados em baixas temperaturas, com módulos superiores a 10.000 MPa para corpos de prova Marshall. Para trabalharem sem riscos de ruptura precoce nestas condições de baixas temperaturas, as deflexões da estrutura devem ser suficientemente baixas.

Mais uma vez, a comparação entre os resultados da Figura 63 e da Figura 64 demonstra a variação das propriedades mecânicas advinda do método de compactação empregado e do processo de extração dos corpos de prova por broqueamento.

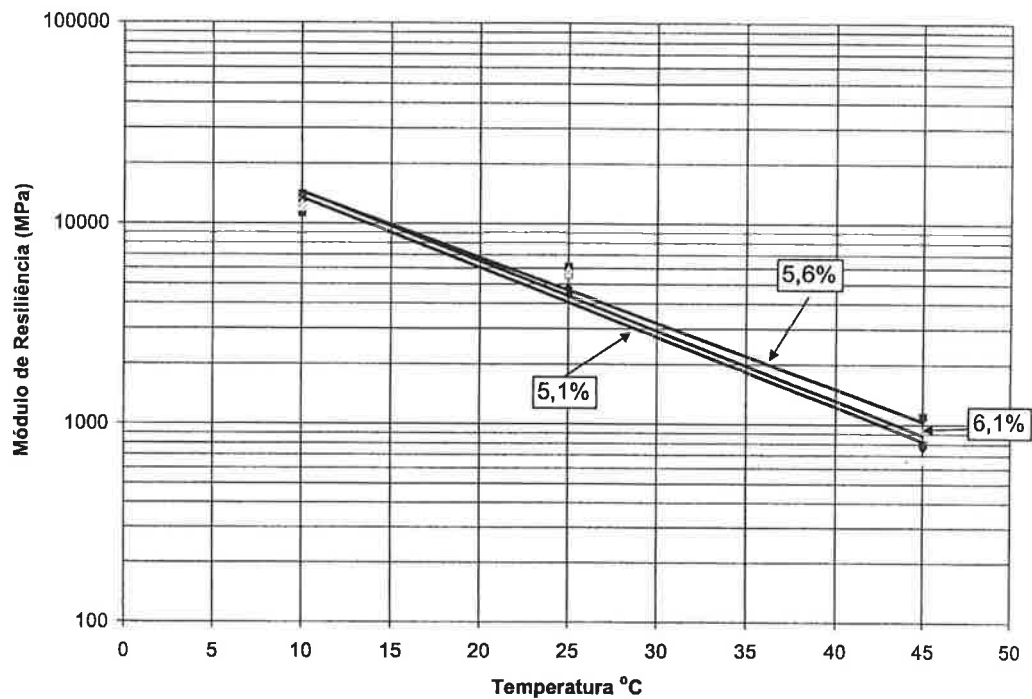


Figura 63: Resultados de módulo de resiliência com a variação de temperatura para diferentes teores de ligante asfáltico modificado por EVA – corpos de prova Marshall (Bernucci et al., 2000).

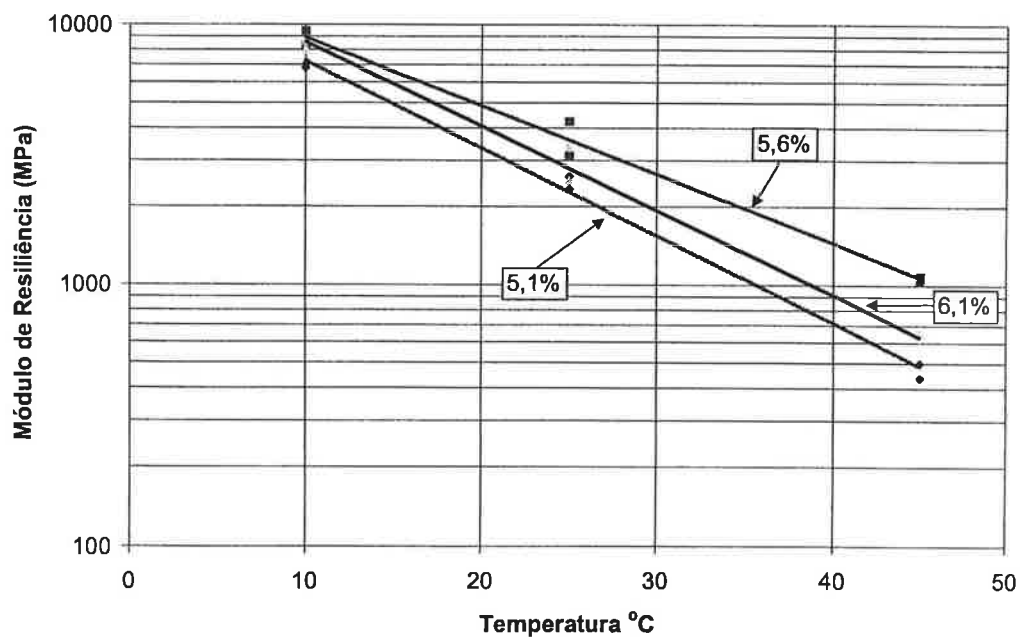


Figura 64: Resultados de módulo de resiliência com a variação de temperatura para diferentes teores de ligante asfáltico modificado por EVA – corpos de prova extraídos de placas compactadas a rolo de pneus (Bernucci et al., 2000).

A Figura 65 mostra a variação da resistência à tração por compressão diametral com a temperatura para uma areia-asfalto moldada com 9% de

teor de ligante – teor de projeto - com três diferentes tipos de asfalto, sendo dois deles convencionais e um modificado por asfaltita 60/25 (Aldigueri, 2001). Estes resultados mostram uma menor susceptibilidade térmica do asfalto modificado por asfaltita, fato bem conhecido no meio técnico rodoviário de países de clima frio e temperado, que empregam os asfaltos modificados pois estes não variam tanto de viscosidade quanto os convencionais com a redução de temperatura.

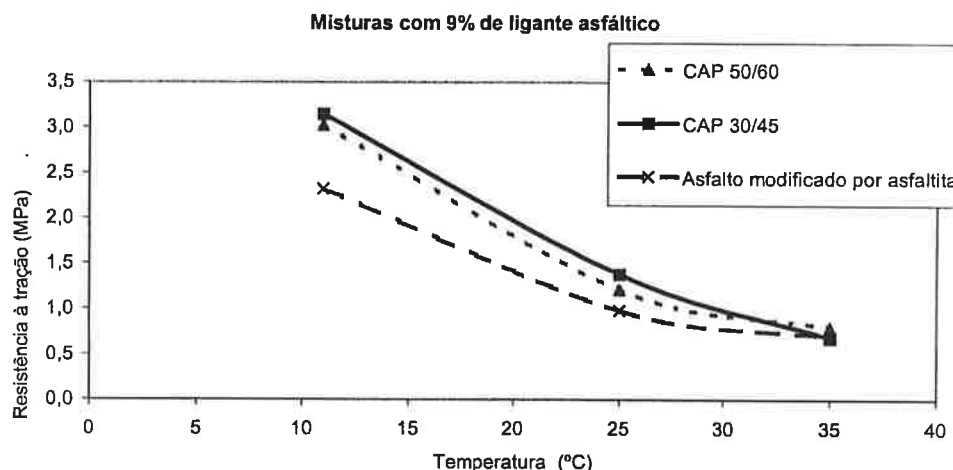


Figura 65: Variação da resistência à tração por compressão diametral de uma areia asfalto moldada no Marshall com diferentes tipos de asfaltos com a temperatura de ensaio (Aldigueri, 2001).

7.5. Variação do tipo de ligante asfáltico: aumento de consistência ou modificação por polímeros ou por outros produtos

A introdução de asfalto convencional mais consistente, de menor penetração ou de maior viscosidade, leva em geral a um aumento no módulo de resiliência e na resistência à tração por compressão diametral. Carvalho(1999) testou misturas asfálticas com seixo rolado, areia, 3% de cal e dois tipos de ligantes asfálticos convencionais: CAP 50/60 e CAP 40. Obteve para a mistura com o asfalto menos consistente (CAP 50/60) módulo de resiliência de 3823 MPa e resistência à tração de 0,85 MPa; e com asfalto mais consistente (CAP 40) módulo de resiliência de 4155 MPa e resistência à tração de 1,20 MPa. Apesar dos valores serem próximos, pode ser constata uma tendência de aumento de resultados com o aumento da viscosidade. Aldigueri (2001) verificou a mesma tendência geral com areia asfalto testada com CAP 50/60 e CAP 30/45 (mais consistente).

Os asfaltos modificados por polímeros, principalmente por SBS e SBR, têm mostrado tendência de redução do módulo de resiliência em relação às misturas com asfaltos convencionais, para a temperatura de 25°C, utilizadas normalmente para os ensaios. Esta redução não significa necessariamente que há uma redução de desempenho das misturas asfálticas, pois a modificação por estes produtos altera a reologia do asfalto tornando-o mais elástico e, em geral, mais resistente à fadiga, embora com menor módulo de

resiliência. A Figura 66 mostra resultados comparativos de módulo de resiliência de um concreto asfáltico moldado com diferentes asfaltos, um CAP 20 e outros modificados por polímeros. A Figura 67 apresenta para as mesmas misturas asfálticas os resultados de resistência à tração, que parecem ser menos afetados pela presença do polímero que o módulo de resiliência, embora para os asfaltos modificados por polímeros SBS e SBR os valores tenham sido levemente inferiores que para EVA e CAP 20. Aldigueri (2001) encontrou tendência similar para areias-asfalto moldadas com asfalto modificado por asfaltita, sendo que esta reduz o módulo e a resistência à tração com relação ao asfalto convencional CAP 50/60.

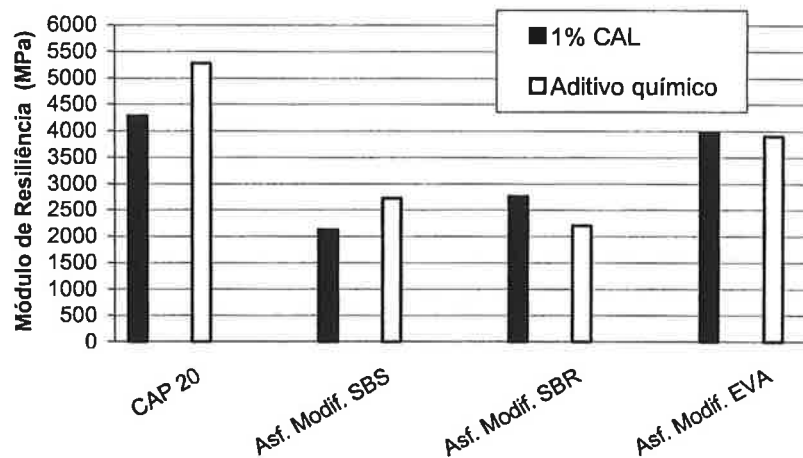


Figura 66: Variação do módulo de resiliência de um concreto asfáltico com diferentes tipos de asfaltos (Bernucci et al, 1999; Moura, 2001).

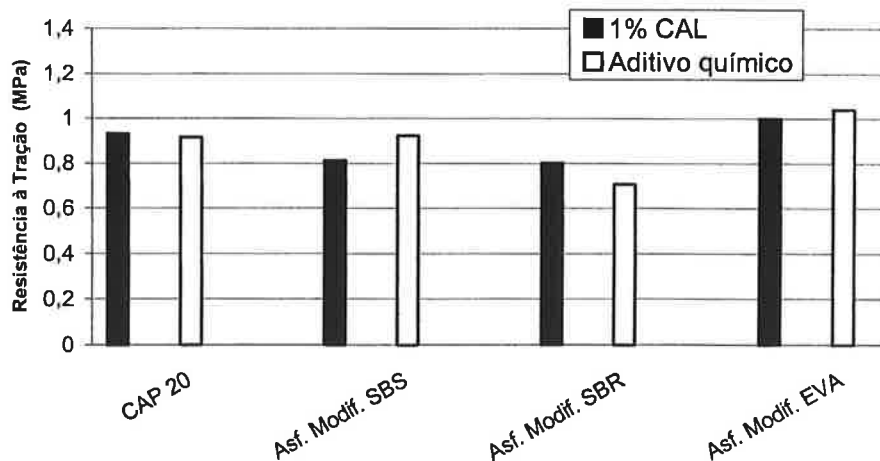


Figura 67: Variação da resistência à tração por compressão diametral de um concreto asfáltico com diferentes tipos de asfaltos (Bernucci et al, 1999; Moura, 2001).

7.6. Variação da graduação e do tipo de agregado

A variação da graduação interfere no comportamento mecânico, embora o ligante asfáltico parece interferir mais pronunciadamente na vida de fadiga (SHRP, 1994). Carvalho (1999) encontrou para um concreto asfáltico constituído por brita e areia como agregados valor médio de módulo de resiliência à 25°C de 3770 MPa; alterando a granulometria, reduzindo a quantidade de areia e aumentando de material britado, obteve 4900 MPa, mostrando a tendência de aumento no módulo pela correção granulométrica. No mesmo trabalho, Carvalho, mantendo muito similar a graduação desta última composição, porém substituindo 18% do material graúdo britado por seixo rolado, verificou uma nova redução de módulo de resiliência para 3830 MPa. A introdução de material mais arredondado interfere reduzindo o módulo de resiliência. A resistência à tração manteve-se em valores similares para as três misturas testadas, com valores médios de aproximadamente 0,9 MPa.

8. Durabilidade das misturas asfálticas à ação deletéria da água

8.1. Importância do estudo da durabilidade à ação deletéria da água e métodos usuais de avaliação em laboratório

A perda ou falha na adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados de misturas asfálticas tem causado danos em revestimentos asfálticos, decorrentes principalmente do desprendimento do ligante nesta interface, cujo processo pode ser acelerado pela ação da umidade em contato com o ligante e com o agregado nos pontos em que estes estiverem descobertos. Como consequência, tem-se perda de resistência da camada do revestimento asfáltico levando à aceleração do processo de trincamento e/ou de deformações permanentes, à desagregação, à abertura de buracos, à falha na atuação dos revestimentos densos como camada impermeável do pavimento, entre outros.

Estes danos devido à ação da umidade causam indiscutivelmente a redução da vida útil e interferem no desempenho originalmente desejado da estrutura do pavimento. Estudo de Kandhal (1992) mostra que parte considerável do território norte-americano apresenta problemas de danos nos revestimentos asfálticos resultantes de ação da umidade; em alguns estados, avalia-se que estes danos podem ser responsáveis em até cerca de 30 a 50% dos problemas de defeitos observados.

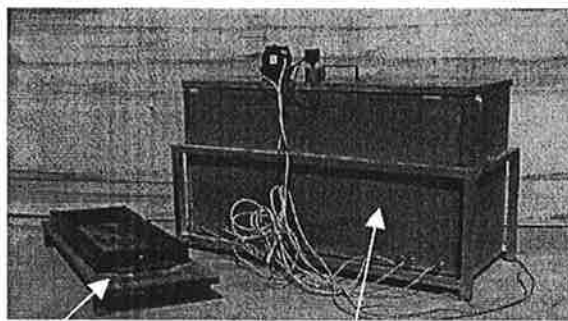
Foram realizados estudos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação para a concessionária Nova Dutra com o objetivo de detectar os melhores métodos de laboratório que podem ser empregados para previsão de problemas de adesividade (Bernucci et al, 1999; Moura, 2001). Vários

ensaios e métodos foram testados, com diferentes tipos de “condicionamento” prévio das amostras compactadas:

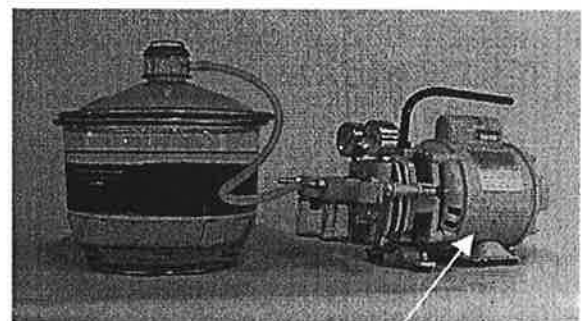
- imersão em água a 60°C por períodos variados;
- saturação forçada, seguida de imersão em água a 60°C;
- saturação forçada, seguida de congelamento, e depois de imersão em água a 60°C;

As amostras que sofreram condicionamento prévio foram avaliadas na seqüência por meio de ensaios de resistência, seja pelo módulo de resiliência, pela resistência à tração, como pelo afundamento em trilha de roda no simulador de tráfego. Para tanto, amostras moldadas em condições similares foram compactadas e não sofreram nenhum condicionamento prévio para servirem como padrão de comparação.

A Figura 68 mostra em (a) equipamento desenvolvido no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação para colocar em imersão prévia em água a 60°C por 96 horas placas compactadas para serem testadas no simulador, e em (b) um arranjo empregado como recurso para obter grau de saturação de água entre 55 e 80% de corpos de prova cilíndricos moldados com 7±1% de volume de vazios com ar para realização dos ensaios previstos na AASHTO 283 (AASHTO, 1989) e na ASTM 4867 (ASTM, 1996).



(a) equipamento utilizado como banho-maria para placas compactadas



(b) arranjo para saturação com água corpos de prova cilíndricos com auxílio de vácuo

Figura 68: Equipamentos e arranjos desenvolvidos para realizar condicionamentos prévios em amostras compactadas de misturas asfálticas.

No método de ensaio da AASHTO T283/89, considerado de alta severidade (NCHRP, 1982), é prevista a moldagem de seis corpos-de-prova, dividindo-os em dois grupos de três corpos-de-prova cada. O primeiro grupo é submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral sem nenhum tipo de condicionamento e o segundo grupo de corpos-de-prova passa por um processo de condicionamento consistindo de saturação em água entre 55% e 80% de seu volume de vazios, acondicionamento em sacos plásticos, resfriamento à temperatura de -18°C por um período de 16 horas, seguido de imersão em banho-maria à temperatura de 60°C por um período de 24 horas e, finalmente, em um último banho à temperatura de 25°C por um período de 2 horas; após esse período são submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A média dos resultados de

resistência à tração após condicionamento é dividida pela média da resistência obtida com os corpos de prova não submetidos ao condicionamento. O resultado desta divisão é denominado *Resistência Retida* (RRT). Tem-se utilizado o limite de 70% como a resistência retida mínima para que não haja problemas de descolamento (stripping) do asfalto da superfície do agregado pela ação da água para períodos de 4 a 12 anos, desde que as outras propriedades e requerimentos de projeto estejam garantidos (NCHRP, 1982).

O método ensaio ASTM D 4867/96 prevê um procedimento de baixa severidade. São moldados 6 corpos-de-prova e são divididos em dois grupos, o primeiro grupo é submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral e o segundo passa por um processo de condicionamento de saturação entre 55% e 80% de seus volume de vazios, seguido de imersão em banho-maria à temperatura de 60°C por um período de 24 horas e, após o período de estabilização da temperatura, são submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Calcula-se, da mesma forma que anteriormente citado, a Resistência Retida (RRT), sendo admitido o valor mínimo de 80% para obtenção de sucesso contra o descolamento para curtos períodos, de 0 a 4 anos.

Outro ensaio indicado pelos espanhóis para misturas asfálticas drenantes (porosas), já em utilização no Brasil (DNER – ES 386/99), é o ensaio de perda de massa Cântabro. O ensaio basicamente consiste em colocar um único corpo-de-prova por vez dentro do tambor do equipamento de abrasão Los Angeles, sem as esferas metálicas, e aplicar 300 revoluções a uma velocidade de 33 rotações por minuto. Ao término das rotações, retira-se o corpo-de-prova e os materiais que eventualmente tenham se despreendido, sendo que a maior parte ainda restante aglomerada é pesada. Calcula-se a relação entre a massa despreendida durante o ensaio e a massa inicial do corpo-de-prova, obtendo-se assim a porcentagem de perda de massa; tem-se indicado como aceitável valor inferior a 25% para as misturas asfálticas drenantes (porosas).

A figura 69 mostra (a) o equipamento Los Angeles e (b) um exemplo de corpo de prova de mistura asfáltica drenante antes e após ensaio de perda de massa Cântabro, apresentando no caso do exemplo, uma perda considerável de massa.

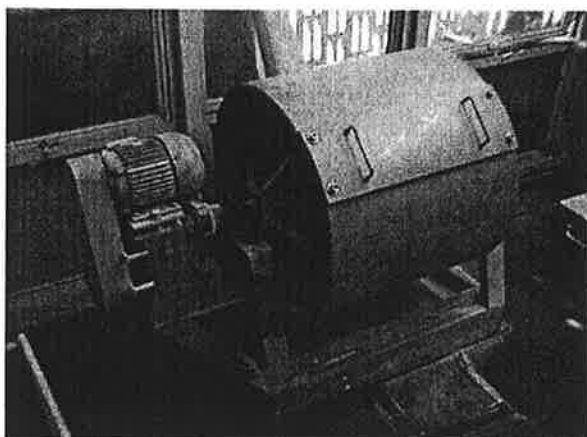
8.2. Origem do descolamento do asfalto da superfície do agregado

A adesividade é a capacidade do ligante asfáltico de aderir à superfície dos agregados, mantendo-os interligados, aderidos uns aos outros por meio deste adesivo. É um fenômeno complexo e dependente de muitas variáveis que se interagem (Majidzadeh e Brovold, 1968):

- quanto ao agregado propriamente dito, apesar de não haver consenso entre os pesquisadores, as variáveis mais citadas são: composição

mineral, aspereza da superfície, forma do agregado e de suas arestas, presença de umidade na superfície, impurezas na superfície e porosidade;

- quanto ao ligante: natureza, aromaticidade, viscosidade e tensão superficial no contato ligante/agregado.



(a) equipamento de abrasão Los Angeles



(b) exemplo de resultado após ensaios de perda de massa Cântabro em mistura asfáltica drenante

Figura: Equipamento para perda de massa no ensaio Cântabro e exemplo de corpo de prova testado.

A resistência das misturas asfálticas advém da capacidade de coesão do ligante asfáltico e do arranjo e intertravamento dos agregados. A coesão dos ligantes asfálticos somente é mobilizada completamente se a união entre o ligante e o agregado for adequada, ou seja, quando há boa adesividade. A coesão do ligante asfáltico depende de suas características físicas e químicas; a manutenção desta capacidade está intimamente relacionada à resposta do ligante asfáltico frente à solicitação do tráfego e à sua resistência ao envelhecimento.

O envelhecimento do ligante altera negativamente o comportamento das misturas asfálticas, seja pela redução na capacidade de coesão deste, como na interferência da adesividade com relação ao agregado. O envelhecimento é causado principalmente pela atuação conjunta do ar e da água, e de altas temperaturas – como na usinagem - tornando o ligante endurecido, perdendo sua flexibilidade e recuperação elástica; o ligante pode se alterar também pelo contato com outros produtos: óleos, combustíveis, ácidos, entre outros, porém estas são situações particulares, enquanto que a atuação do clima por umidade, chuvas, calor, variação de temperatura, são condicionantes a que todos os revestimentos asfálticos estão sujeitos.

Chiu et al (1994) estudaram o envelhecimento de diferentes tipos de ligantes asfálticos e processos de avaliação laboratorial do envelhecimento com a temperatura e exposição ao ar. As respostas são dependentes da natureza do ligante, tipo, viscosidade e inclusive do tipo de ensaio usado para a avaliação.

Alguns autores têm procurado adicionar produtos ao ligante para reduzir os problemas decorrentes do envelhecimento. Segundo Lesueur e Little (1999), a cal tem-se mostrado eficiente pois interage com o asfalto e afeta positivamente seu comportamento reológico a altas temperaturas, reduzindo os efeitos deletérios do endurecimento a longo prazo pelo envelhecimento. Deve haver, no entanto, compatibilidade entre o asfalto e a cal para que esses efeitos possam ser notados. Resultados comentados por Sainton et al (1999) apontam o enrijecimento do ligante frente à adição de cal, porém um ganho com relação ao envelhecimento.

Os agregados devem estar secos e limpos para a garantia inicial da adesividade. Melhoradores de adesividade devem ser adotados nos casos necessários, mas não para corrigir os problemas das impurezas aderidas à superfície dos agregados. Em misturas a frio, a cal tem sido adotada em alguns casos para reduzir o problema da umidade dos agregados.

O desprendimento do filme asfáltico do agregado pela umidade pode se dar por água que venha de dentro do agregado ou pela água que penetra nos vazios com ar das misturas asfálticas na forma de vapor ou líquida. Se os agregados limpos e secos estiverem completamente cobertos por película de ligante asfáltico, seu desprendimento pode ocorrer em arestas, onde a espessura do filme asfáltico é menor ou em misturas cuja película é muito fina devido ao tipo de ligante. A ruptura da ligação na região da interface asfalto/agregado pode ocorrer pela ação do carregamento. Uma vez rompido o filme em algum local junto ao agregado, a ação da água passa a ser até mais intensa, gerando aumentos progressivos no processo de desprendimento.

A água nos poros vazios das misturas pode agir sobre o ligante e no seu desprendimento por poro-pressão positiva. Durante a sollicitação pelo tráfego, a água presente nestes poros sofre a ação da carga e, nos casos em que ela não possa fluir rapidamente, estas tensões não podem ser aliviadas, havendo um aumento de tensão na interface asfalto/agregado, com consequente contribuição ao desprendimento do ligante.

Nas misturas muito abertas, drenantes, apesar do fluxo de água ser garantido pela grande presença de poros interligados, aliviando o problema de poro-pressão, a presença constante de água junto ao ligante gera também seu desprendimento, seja pelo próprio fluxo, seja pelo envelhecimento favorecido pela presença da água. Em vários casos na Europa tem-se utilizado a cal como atenuante do desprendimento do ligante em misturas drenantes; a adição de 1% de cal tem sido opção sistemática nos revestimentos drenantes holandeses (Sainton et al, 1999). Maupin (1999) observa que pavimentos com elevada porcentagem de vazios com ar mostram desprendimento/desagregação mais severa, embora os estudos não revelem relação direta entre a porcentagem de vazios e o grau de severidade da desagregação.

Tradicionalmente são utilizados três tipos de melhoradores de adesividade em misturas asfálticas: cimento Portland; cal hidratada e aditivos químicos líquidos. Os líquidos químicos melhoradores de adesividade agem decrescendo a tensão superficial entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado, promovendo assim maior cobrimento do agregado. Os aditivos químicos podem afetar a consistência/viscosidade do ligante asfáltico, tornando-o mais moles, aumentando seu potencial ao envelhecimento e tornando-o mais susceptível à variação térmica; experiência recente mostrou que os ligantes asfálticos com aditivos químicos utilizados pelo metrô de Toronto apresentaram queda no PG (performance grade), segundo denominação SHRP, de 70-28 para 64-28, confirmando sua redução de resistência à deformação permanente a altas temperaturas (Seddik e Emery, 1997). A cal hidratada tem sido utilizada como recurso em misturas asfálticas desde o início do século nos Estados Unidos; atualmente vem sendo empregada em pelo menos 15 estados dos Estados Unidos como melhorador de adesividade e em algumas aplicações em países europeus como a Holanda, a Dinamarca e a França (Sainton et al., 1999). Pode ser empregada para secagem dos agregados ou como filer ativo que reage com os ácidos carboxílicos dos ligantes asfálticos (Maupin, 1999).

8.3. Resistência retida

Várias experiências foram realizadas para a concessionária Nova Dutra com um concreto asfáltico denso, com agregados de reconhecido problema de adesividade, utilizando diferentes ligantes asfálticos: um convencional CAP 20 e três modificados por polímeros (SBS, SBR e EVA), e dois tipos de melhoradores de adesividade: 0,5% de aditivo químico líquido (dope) e 1% de cal CH1. Moura desenvolveu ainda outros ensaios com as mesmas amostras para sua dissertação de mestrado (Moura, 2001).

Ensaio de deformação permanente em trilhas de roda demonstraram não ser adequado para mostrar diferença de comportamento entre placas condicionadas e não condicionadas previamente ao ensaio. O uso de placas compactadas no volume de vazios que pode ser atingido em campo não produz bons resultados para o estudo de descolamento pois são basicamente impermeáveis, não possibilitando a entrada de água e a ação deletéria da água de forma acelerada (Bernucci et al, 1999; Moura, 2001).

Ensaio de módulo de resiliência foram realizados em corpos de prova Marshall e extraídos de placas. Observou-se que de forma geral os asfaltos modificados por polímeros perdem menos rigidez que o asfalto convencional, porém o uso de corpos de prova com baixa porcentagem de vazios não torna eficiente o condicionamento. Pequenas diferenças de volume de vazios podem ser mais importantes na resposta de resistência retida e dificultar a análise.

O ensaio mais simples para o estudo do descolamento é aquele da AASHTO T-283, que devido à sua severidade, mostra mais pronunciadamente as variações de comportamento frente ao descolamento. A Figura 70 mostra resultados encontrados no estudo para a Nova Dutra. Os resultados mostram que a adição de melhoradores de adesividade diminuem a susceptibilidade das misturas asfálticas à ação deletéria da água, no entanto, parece que ainda não são suficientes para diminuir significativamente as perdas. O aumento da proporção de 0,5% de aditivo químico frente ao ligante pode levar à queda de resistência e alterações indesejadas da viscosidade. Necessitar-se-ia de mais de 1% de cal no caso destes agregados.

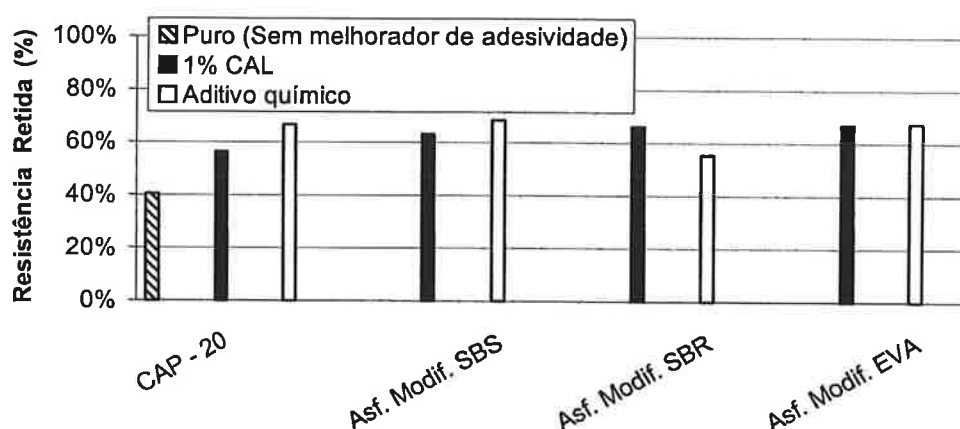


Figura 70 : Relação entre resistência à tração de corpos de prova cilíndricos com 8% de vazios com e sem condicionamento segundo a AASHTO T-283 (Bernucci et al, 1999; Moura, 2001)

A Figura 71 mostra uma extensão da pesquisa, realizada somente com o CAP 20 e os mesmos agregados e graduação do estudo realizado para a Nova Dutra. Neste novo estudo, procurou-se encontrar uma porcentagem de agente melhorador de adesividade que levasse a resultados mais eficientes de redução das perdas de resistência (Moura et al, 2001). A Figura 72 mostra as resistências retidas, evidenciando melhores resultados com adição de pelo menos 1,5% de cal. A adição de 1,5% de cal e 0,5% de aditivo químico aniônico proporcionou uma combinação bastante eficiente. Porcentagens muito elevadas de cal podem levar a um enrijecimento indesejado do ligante devido à natureza e, principalmente, ao tamanho das partículas de cal (Moura, 2001).

8.4. Perda de massa no ensaio Cântabro

O ensaio Cântabro, apesar de indicado para as misturas asfálticas drenantes, foi utilizado em várias oportunidades com misturas asfálticas densas para verificar alterações no comportamento, devido à natureza do ligante, à variação de volume de vazios, dentre outros aspectos e proceder à comparação de resultados entre amostras.

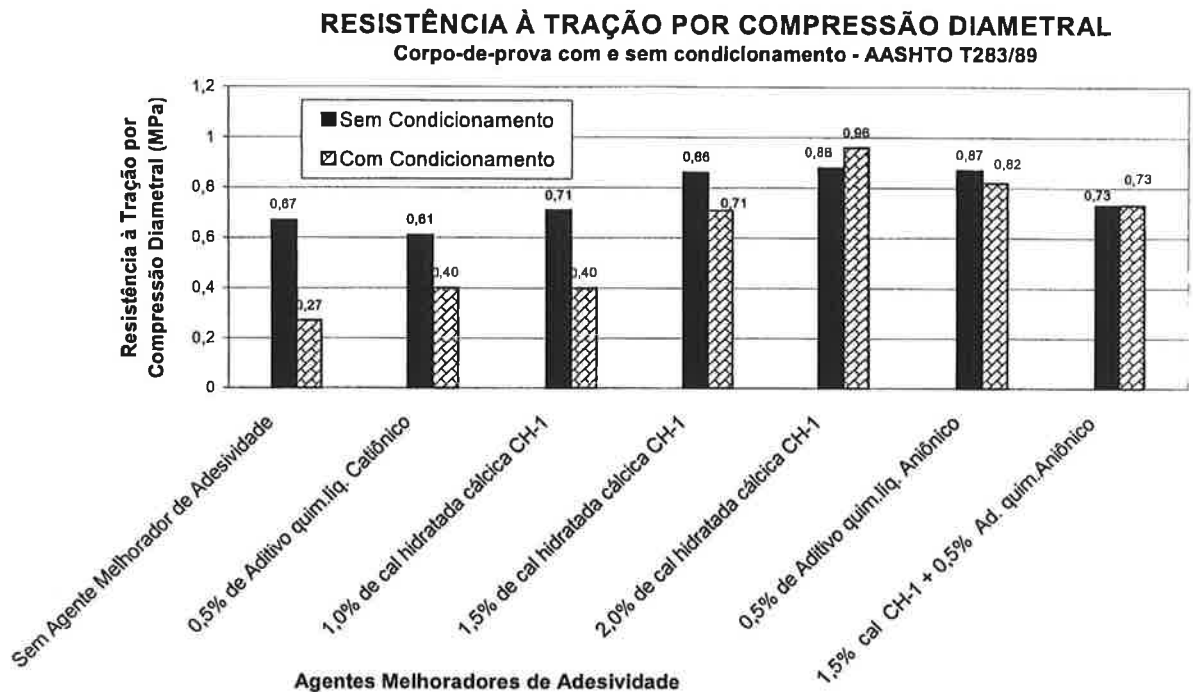


Figura 71: Resistência à tração de corpos de prova cilíndricos Marshall com 7% de vazios com e sem condicionamento segundo a AASHTO T-283 (Moura et al, 2001).

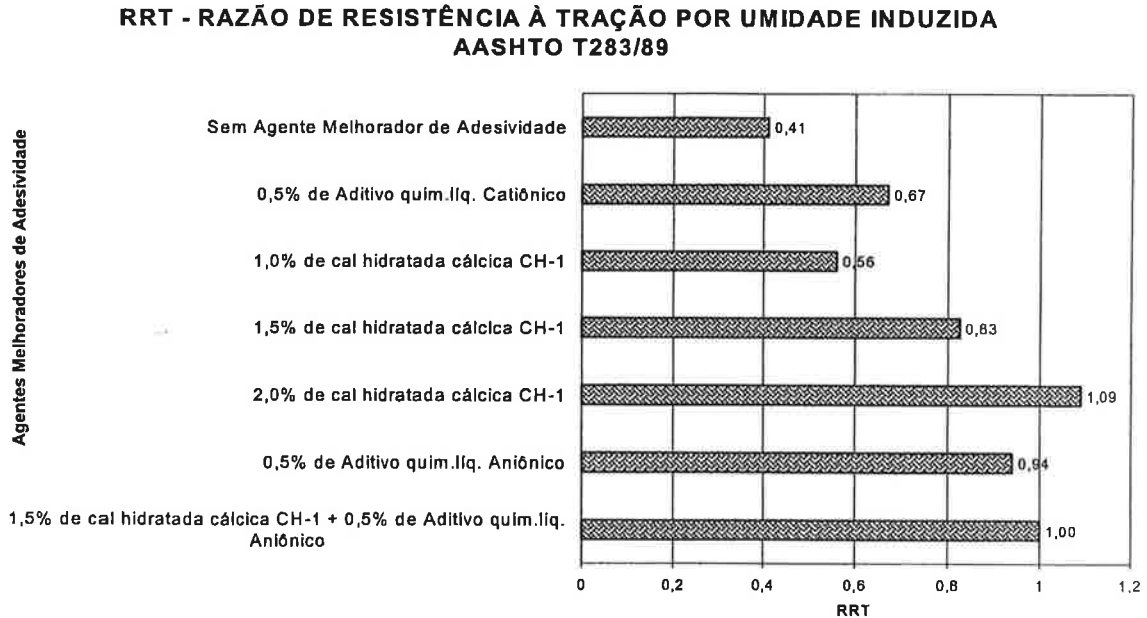


Figura 72: Resistência retida segundo a AASHTO T-283 de misturas asfálticas com diferentes agentes melhoradores de adesividade (Moura et al, 2001).

As Figuras 73 e 74 mostram exemplos de resultados obtidos pelo ensaio Cântabro com misturas asfálticas densas, testando corpos de prova moldados com 8% de vazios com ar, não condicionados e condicionados

segundo a AASHTO 283. Devido à severidade do condicionamento, pode-se perceber as perdas expressivas, frente àqueles corpos de prova não condicionados. Observe-se que as perdas de corpos de prova a seco (sem condicionamento prévio) são bastante baixas, em torno de 3 a 4%. Após condicionamento, podem ser realçadas as perdas de massa, evidenciando um melhor comportamento da cal em comparação com o aditivo químico líquido.

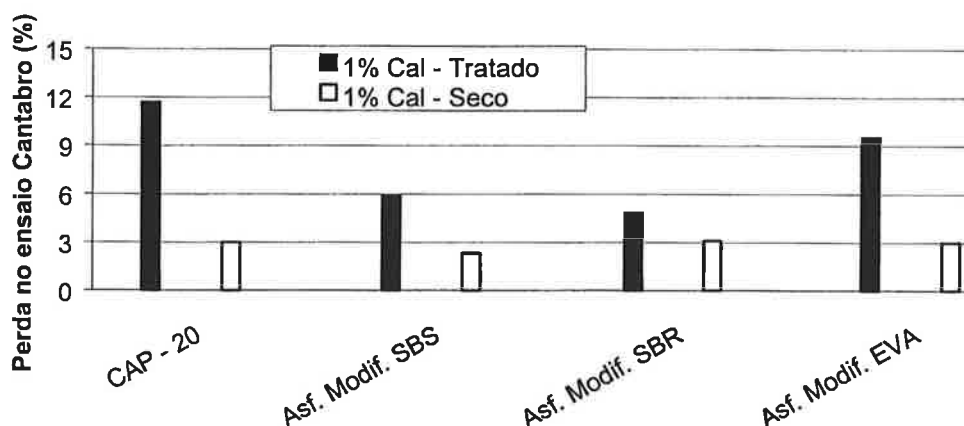


Figura 73: Perda de massa no ensaio Cântabro com corpos de prova a seco e após condicionamento segundo a AASHTO T-283, de concretos asfálticos densos moldados com diferentes asfaltos e 1% de cal (Bernucci et al, 1999; Moura, 2001)

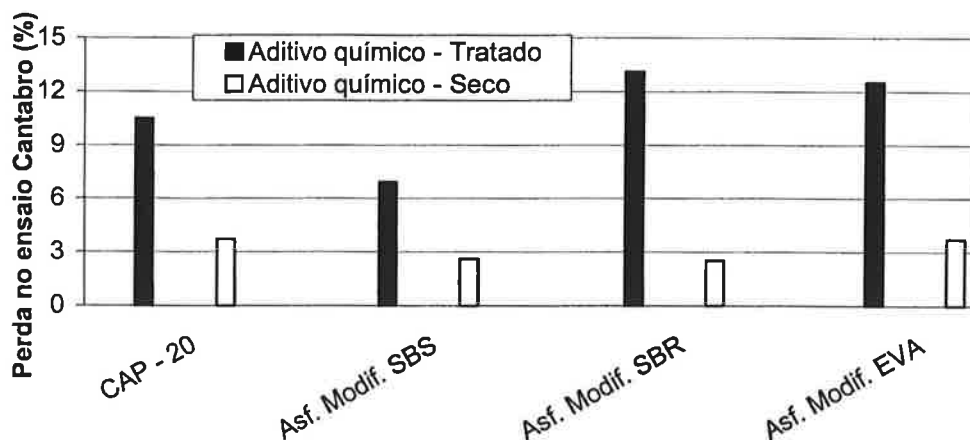


Figura 74: Perda de massa no ensaio Cântabro com corpos de prova a seco e após condicionamento segundo a AASHTO T-283, de concretos asfálticos densos moldados com diferentes asfaltos e 0,5% de aditivo químico líquido (Bernucci et al, 1999; Moura, 2001)

Aldigueri (2001) empregou o ensaio Cântabro para observar o comportamento das areias-asfalto com areia bem graduada, moldadas com diferentes tipos de ligantes. Observou que as misturas usinadas com asfalto modificado por asphaltita dão as menores perdas em comparação com os

asfaltos convencionais CAP 50/60 e CAP 30/45. Comparando seus resultados com os de Bottin (1997) com areias uniformes de grãos arredondados do Rio Grande do Sul, observou a importância no comportamento mecânico da granulometria bem distribuída da areia do Ceará frente às areias gaúchas do Rio Grande do Sul, cujas perdas de massa no ensaio Cântabro ultrapassam facilmente os 20%, frente aos valores de 2 a 5% da areia do Ceará.

Os ensaios utilizados para a verificação da ação deletéria da água testam conjuntamente, sem possibilidade de distinção, o potencial problema de descolamento do asfalto da superfície do agregado e o poder de manutenção da coesão pelo ligante asfáltico, capaz de unir os agregados.

9. Novas tecnologias: adequação à disponibilidade de materiais e às condições ambientais brasileiras

9.1. Importância do uso de novas tecnologias

Ao longo de tantas décadas de construção viária no Brasil, os concretos asfálticos densos usinados a quente têm sido empregados para todos os tipos de pavimentos e todos os tipos de tráfego. O concreto asfáltico denso com asfalto convencional CAP 20 vem perdendo sua credibilidade pelo seu emprego inadequado em revestimentos sujeitos a condições ambientais com temperatura muito elevada ou a solicitação de carga severa, com tráfego canalizado, pesado, de baixa velocidade, em rampas íngremes ou em cruzamentos.

Além disso, os projetos de concreto asfáltico seguem o método de dosagem Marshall, sem qualquer outro teste de resistência ou verificação complementar. Os testes de controle, sejam do agregado, do filer, do asfalto ou da mistura são muitas vezes negligenciados nas usinas, produzindo misturas asfálticas em desacordo com o projeto de dosagem original. Complementarmente ao material propriamente dito, não raramente a execução dos revestimentos asfálticos não é realizada segundo a boa técnica, compactando a mistura asfáltica em temperatura imprópria ou com equipamento e técnica construtiva inadequados. O controle de pista muitas vezes não é realizado ou segue especificações que não possibilitam a detecção de problemas. Por estes motivos, não raro tem-se notícia de insucessos com os concretos asfálticos.

O concreto asfáltico denso sempre terá sua aplicação garantida, desde que seja com projeto adequado à via, seguindo uma técnica de seleção de materiais, de dosagem, de usinagem, de construção e de controle apropriados, além de sofrer periodicamente a manutenção requerida.

A partir da década de 90, novas tecnologias foram sendo testadas no Brasil, evidenciando a necessidade de recorrer a novas alternativas, condizentes

com as condições de cada local. Os micro-concretos asfálticos a frio e a quente passaram a ser mais uma opção para as manutenções de pavimentos, sobre revestimentos nem extremamente trincados nem com afundamentos pronunciados nas trilhas de roda.

Ainda na década de 90, iniciou-se a aplicação do CPA – camada porosa de atrito, que na França foi testada pela primeira vez ainda na década de 60, com grande desenvolvimento durante os anos 70 e 80. Este tipo de revestimento é muito utilizado na Espanha.

Mais recentemente, em fevereiro de 2000, empregou-se pela primeira vez no Brasil o revestimento asfáltico tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt* – matriz pétreo asfáltica) nas obras de recuperação da pista do Autódromo de Interlagos, em São Paulo.

Novas tendências de revestimentos asfálticos utilizados na Europa e na América do Norte, como os revestimentos ultra-delgados, os de módulo elevado, os usinados a frio com emulsão modificada por polímero com graduação descontínua para a aderência, dentre outras técnicas recentes, chegarão certamente ao Brasil, pois novas alternativas se fazem necessárias devido à diversidade de materiais, das condições ambientais e de situações de solicitação nas vias brasileiras.

A disponibilidade de materiais, particularmente diferenciada dos países desenvolvidos em tecnologia de pavimentos, leva os técnicos brasileiros a um novo desafio de desenvolvimento para alternativas regionais. Esta preocupação tem sido seguida por vários centros de pesquisa e universidades brasileiras.

9.2. Revestimentos asfálticos para aplicações regionais

Uma das linhas de pesquisa em materiais do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação tem sido os materiais regionais como seixos rolados, areias e lateritas, para servirem de agregado em misturas asfálticas para pavimentação. Este destaque vem de encontro à necessidade de expansão de várias regiões brasileiras, baseado na nossa crença que a construção de pavimentos vem auxiliar o desenvolvimento social, melhorando o acesso à escola, à saúde, entre outros aspectos, e o desenvolvimento econômico, assegurando trafegabilidade durante o ano todo e menor custo de transporte, possibilitando a comercialização mais eficiente de produtos agrícolas, da pecuária, industriais, etc.

Dentro deste objetivo, Carvalho (1999), orientado pela docente, pesquisou o uso de seixo rolado em misturas asfálticas, utilizando agregados naturais, material pétreo britado, areias e asfaltos, todos provenientes do Pará, para comporem misturas asfálticas para ensaios mecânicos. Estudou misturas asfálticas com brita para servirem de base comparativa, com brita misturada

com seixos, somente com seixos, alterando graduações e composições para mostrar a possibilidade de uso de mais uma alternativa regional, com redução expressiva de custo, atendendo aos requisitos de resistência à deformação permanente, à tração e de resiliência. Observou os problemas de adesividade e a possibilidade de melhoria desta característica pela adição de dope e de cal. Alguns dos resultados obtidos por Carvalho (1999) foram apresentados em itens anteriores neste capítulo.

A areia-asfalto constitui-se em outra opção para revestimentos asfálticos brasileiros em áreas com falta de pedreiras ou ausência de instalações de britagem. No Nordeste brasileiro, o uso de areia-asfalto remonta à década de 50, sendo que 25% das rodovias pavimentadas possuem revestimento asfáltico constituído por areia-asfalto (Santana, 1996). No Maranhão e no Piauí, 80% das rodovias são pavimentadas com areia-asfalto. Em 1998, o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação teve a oportunidade de participar juntamente com a UFRGS e o DAER-RS do estudo de areia-asfalto para pavimentação de 29 km da rodovia Mostardas-Tavares, local distante mais de 200km de fonte de brita. Parte dos ensaios laboratoriais, envolvendo afundamento em trilha de roda em simulador de tráfego tipo LPC foram desenvolvidos por Lomonaco (1999) em seu trabalho de iniciação científica sob orientação desta docente. Alguns resultados obtidos foram apresentados nos itens anteriores, neste capítulo.

Aldigueri (2001) apresentou sua dissertação de mestrado, orientado pela docente, em areia-asfalto usinada a quente com faixa granulométrica, areia e asfaltos procedentes do Ceará. Ensaios de avaliação mecânica e de durabilidade foram realizados, evidenciando a importância da graduação das areias no desempenho mecânico. Comparou três tipos de ligantes, mostrando o papel da consistência no comportamento das misturas. Alguns resultados foram apresentados e discutidos, principalmente comparando com os de Lomonaco (1999) em itens anteriores, neste capítulo.

No Norte, Nordeste e Centro-oeste, a abundância de ocorrências de laterita tem levado à exploração deste material para constituir principalmente bases de pavimentos devido à escassez de pedreiras. A Laterita foi utilizada em algumas experiências no passado em misturas asfálticas para revestimentos. Objetiva-se com o trabalho de Simonne Amaral, que iniciou seu doutorado em 2000 sob orientação desta docente, pesquisar as misturas asfálticas com laterita proveniente do Pará, verificando propriedades mineralógicas e mecânicas das lateritas, e as propriedades mecânicas e de durabilidade das misturas asfálticas.

Em 1999, a docente teve a oportunidade de desenvolver trabalho no Acre, verificando a dificuldade excepcional de obtenção de agregados pétreos para a construção viária – não há uma única pedreira no estado, sendo que a fonte mais próxima de brita está em Rondônia, a mais de 300 km de distância de Rio Branco, quadruplicando o preço por m³ de brita com relação àquele praticado em São Paulo. A areia-asfalto tem sido uma das opções

para revestimentos, com adição de lateritas; visita técnica a vários trechos no estado do Acre levaram à constatação de problemas de adesividade, trincamento precoce, dentre outros nos revestimentos asfálticos.

9.3. Revestimentos asfálticos drenantes

O CPA – camada porosa de atrito ou revestimento asfáltico drenante, constitui-se em mistura asfáltica de graduação aberta, com expressiva quantidade de agregados graúdos de dimensões similares, praticamente sem filer, com baixo consumo de ligante asfáltico e alto volume de vazios com ar. Suas características de projeto garantem a retirada das águas de chuva da superfície do pavimento, por infiltração e por escoamento dentro desta camada até atingir os drenos longitudinais próximos à borda do pavimento. Além disso, reduzem o borrifo de água pelos pneus e a reflexão de faróis à noite com pista molhada. Porém, estas mesmas características tornam os revestimentos asfálticos pouco resistentes mecanicamente e pouco duráveis à ação deletéria da água e do ar. Sua função é praticamente exclusiva para segurança por causa do aumento de aderência em pista molhada e para o conforto acústico.

A primeira experiência brasileira com camada porosa de atrito data da década de 80. Campos (1998) descreve e discute os resultados do trecho experimental construído com revestimento asfáltico drenante na Rodovia dos Bandeirantes no início dos anos 90. Várias outras experiências em pavimentos roviários foram sendo realizadas na década de 90, a partir do sucesso na Bandeirantes: na Rodovia Presidente Dutra, na Rodovia dos Imigrantes, na BR 101, dentre outros locais.

Campos, orientado pelo prof. Domingues, executou parte dos ensaios mecânicos laboratoriais para reproduzir o revestimento asfáltico drenante do trecho experimental no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da USP e no Laboratório de Pavimentos da UFRGS, tais como afundamento em trilha de roda no simulador de tráfego e módulo de resiliência. Encontrou valores pouco expressivos de afundamento em trilha de roda devido ao esqueleto sólido formado pelos agregados graúdos em contato uns com os outros com uma tênue camada de asfalto recobrando-os e interligando-os. Os módulos de resiliência, no entanto, são da ordem de no máximo 1000 MPa, ou valores ainda inferiores, mostrando que esta mistura pouco pode ser utilizada como parte estruturalmente atuante e resistente do revestimento.

Meurer (2001), orientado pelo prof. Momm da UFSC, fez diversos experimentos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação com misturas asfálticas drenantes, mostrando que pequenas diferenças na composição levam à redução drástica do volume de vazios e ocorrência de afundamentos significativos em trilha de roda, seguida de perda da capacidade drenante nestes locais. A Figura 75 mostra corpos de prova de misturas asfálticas drenantes com diferentes diâmetros máximos de seus agregados.

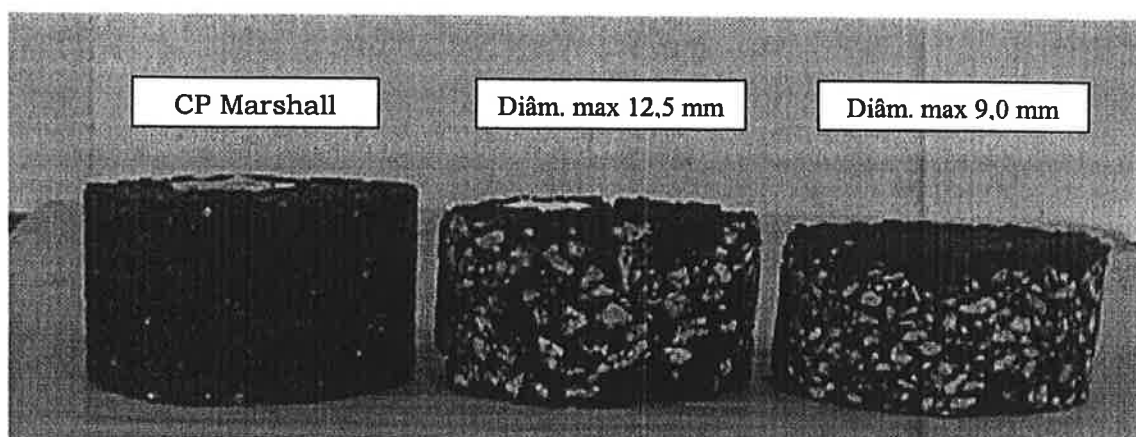


Figura 75: Corpos de prova de misturas asfálticas drenantes moldadas em laboratório

Os revestimentos asfálticos drenantes de terceira geração, como denominados na França, possuem volume de vazios entre 25 e 30%. A obtenção desta porosidade sem detrimento de sua resistência à desagregação não é tarefa simples, devido à deficiência entre as ligações formadas. Asfaltos modificados por polímeros com elevado retorno elástico, como o SBS e SBR, têm sido indicados para tal finalidade. A inserção de cal na mistura para auxiliar na adesividade também tem sido aconselhada.

9.4. Revestimentos asfálticos tipo SMA – *Stone Matrix Asphalt*

No contexto atual das rodovias brasileiras, com o volume crescente de tráfego, das cargas de roda e da baixa durabilidade dos revestimentos asfálticos, faz-se importante ter disponível tecnologia para camadas asfálticas que ao mesmo tempo sejam resistentes mecanicamente - alta resistência à fadiga e à deformação permanente, além de resistência à ação deletéria da água - e que contemplem a questão funcional de garantir conforto acústico, aumento da aderência em dias de chuvas e redução da água borrifada provenientes dos pneus traseiros. Esta soma de aspectos em uma camada de rolamento de pavimento tem sido evidenciada pelo SMA – *Stone Matrix Asphalt* ou matriz pétreo asfáltica.

O SMA foi concebido na Alemanha no final da década de 60, para restauração de pavimentos. Decorrido mais de 30 anos, foram aplicados mais de 200 milhões m² somente na Alemanha (EAPA, 1998). As faixas 0/8 e 0/11 da norma alemã são as mais empregadas neste país. A adoção do SMA vem sendo intensificada em outros países europeus, como na Bélgica, Espanha, Suíça, entre outros, dados os sucessos consagrados ao longo de mais de duas décadas. Atualmente, desde início da década de 90, o SMA é muito popular na América do Norte (Emery et al., 1996). Atualmente, seu emprego se estendeu também para outros países como México, Argentina, China, etc.

Princípio de funcionamento do SMA

O SMA é uma mistura asfáltica constituída de grãos de material pétreo graúdo de dimensões similares, em grande quantidade, de tal sorte que se garante um contato entre grãos mais eficiente, formando um esqueleto sólido altamente resistente na compressão. Devido a esta particular graduação, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos; estes vazios, por sua vez, são preenchidos por um mástique asfáltico constituído pela mistura da fração areia, filer, ligante asfáltico e fibras – Figura 76. As fibras são geralmente orgânicas (de celulose) ou minerais, e são adicionadas durante a usinagem para evitar a segregação da mistura em seu transporte, facilitar a aplicação e evitar o escorrimento do ligante asfáltico. A fração areia é constituída essencialmente de material britado, evitando-se a inclusão de areia de quartzo, como é comum na prática dos concretos asfálticos. Tem-se requerido a totalidade do material granular britado, sendo que em pelo menos 90% haja duas faces britadas (NAPA, 1999). O SMA é uma mistura rica em ligante asfáltico devido à sua constituição granulométrica particular, com um consumo de ligante em geral entre 6 e 7%, com cerca de 4 a 6 % de volume de vazios com ar, sendo portanto impermeável.

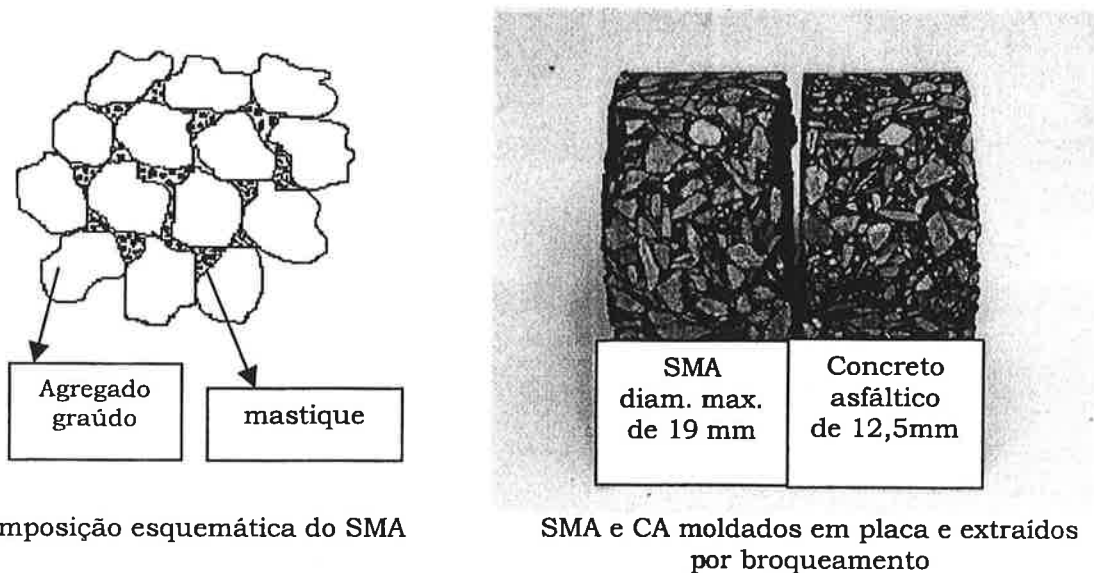


Figura 76: Aspecto da graduação de um SMA em comparação com um concreto asfáltico usinado a quente.

Por ser uma mistura densa, embora sua graduação não seja do tipo “bem graduada”, e com elevados teores de ligante asfáltico, o SMA apresenta-se com módulo de resiliência e resistência à tração comparáveis ou superiores às melhores misturas asfálticas de concreto asfáltico. Além disso, tem-se empregado com frequência os asfaltos modificados por polímeros, que propiciam acentuada recuperação elástica das misturas asfálticas, levando-as a terem elevadas resistências à fadiga, ou seja, alta durabilidade à ação do tráfego. O uso de pó calcário e cal como filer ativo auxilia

consideravelmente a resistência ao descolamento do asfalto da superfície do agregado por falha na adesividade.

Uma vez que a mistura não possui elevado volume de vazios, e os ligantes são geralmente modificados por polímeros, a ação das águas de chuva e do ar não é tão importante como em revestimentos porosos. O SMA proporciona uma boa resistência à desagregação.

Graças principalmente à matriz ou ao esqueleto pétreo formado pelos agregados graúdos, o SMA exhibe boa resistência a deformações permanentes.

Do ponto de vista funcional, com respeito à aderência pneu/pavimento, o SMA, graças à presença marcante de agregados graúdos, apresenta uma macrotextura superficial rugosa, com canais superficiais formados entre os agregados graúdos, propiciando a saída ou drenagem eficiente de água da superfície do pavimento. Devido a esta macrotextura, há um contato eficiente do pneu com as arestas superiores dos agregados, rompendo com mais facilidade os filmes d'água pelos pneus, proporcionando a ação da microtextura do agregado na aderência.

O SMA tem sido recomendado em alguns países para redução do ruído causado pelo tráfego de pneus sobre o revestimento asfáltico. Esta redução, apesar de pequena, é numa faixa auditiva importante do ponto de vista de desconforto à população lindeira às vias.

Ensaio mecânico com SMA

Em 1996, o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação realizou pela primeira vez uma pesquisa comparando o comportamento à deformação permanente de uma mistura tipo SMA com o concreto asfáltico normalmente especificado pela DERSA, dentro de um convênio que este órgão viário mantinha com o LDTT do Departamento de Engenharia de Transportes da EPUSP, coordenado pelo Prof. Domingues. A faixa testada de SMA permitiu o uso de agregados com 19 mm de diâmetro máximo. O resultado de afundamento em trilha de rodas do SMA para o teor de projeto de 6,5% de CAP 20 foi de 3,6%, metade da deformação encontrada para uma mistura de concreto asfáltico que apresentou 7,6% para o teor de 5,6% de CAP 20 – estas misturas correspondem às fotos da Figura 76 anterior.

Em 1999, para a recuperação do autódromo de Interlagos, em São Paulo, a FIA exigiu que se empregasse revestimento asfáltico tipo SMA como camada de rolamento para aumentar a aderência em pista molhada; era a primeira vez que se utilizava no Brasil o SMA. O projeto foi adaptado para a faixa alemã D 0-8, utilizada na recuperação do autódromo de Silverstone. O Laboratório de Tecnologia de Pavimentação participou dos testes das misturas asfálticas executando ensaios para dois fornecedores de asfalto

modificado por polímero - o edital exigia o uso de asfalto modificado por 6,5% de SBS. A graduação de projeto encontra-se na Figura 77.

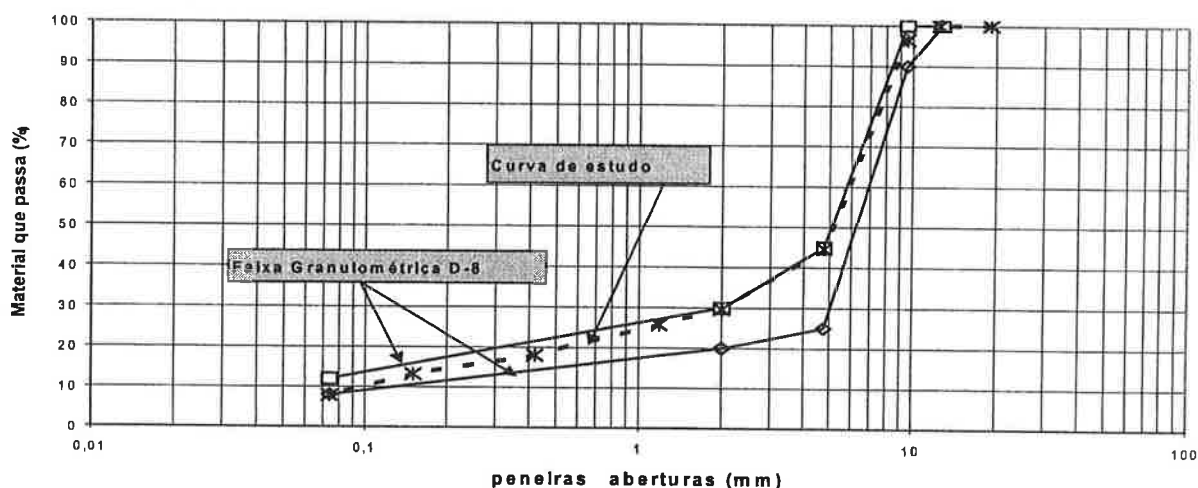


Figura 77: Graduação do SMA – Interlagos, enquadrado na faixa 0-8 da European Standart conforme recomendação da EAPA, 1998.

Houve uma dificuldade de enquadrar o material na graduação da especificação pois a britagem utilizada pela pedreiras na região de São Paulo produz muito pó-de-pedra, que possui grande quantidade de agregados miúdos, os quais entram em pouca quantidade na composição. Além disso, as técnicas de britagem levam à presença de agregados lamelares, indesejáveis para o SMA, pois interferem negativamente na montagem do esqueleto sólido imprescindível para um bom funcionamento do SMA. Os agregados paulistanos possuem elevada abrasão Los Angeles, o que também tem interferido no atendimento das especificações para o SMA. O filer foi pó calcário, sem uso de cal. O uso de filer na proporção mínima permitida, sem introdução de filer ativo de partículas muito finas, como a cal, provocam um consumo mais baixo de ligante asfáltico, resultando em porcentagem mínima de teor de projeto, em comparação com o usual europeu, entre 6 e 7%.

Os resultados dos ensaios de deformação permanente no simulador de tráfego LPC para o teor de projeto de 6,0%, com agregados de tamanho máximo de 9,5 mm, estão apresentados na Figura 78. Observe-se que a modificação por polímero realmente representa uma diminuição importante da deformação permanente; quanto mais polímero, maior a recuperação elástica e menor o afundamento em trilha de roda.

A Figura 79 mostra um aspecto da seção transversal das placas cerradas para efeito de comparação visual do afundamento após 30.000 ciclos de solicitação (Reis et al, 2001). Para este projeto, obtiveram-se módulos de resiliência entre 3600 a 3900 MPa, e resistência à tração por compressão diametral de 1,1 a 1,3 MPa, para compactação Marshall com 50 golpes por face, como recomenda a NAPA (1999). A introdução de polímeros não interferiu nos resultados do módulo de resiliência e na resistência à tração –

os resultados são muito similares. Não foram realizados ensaios de fadiga, que poderiam apontar distinção de comportamento entre o asfalto convencional e os asfaltos modificados. Não foram detectados problemas de descolamento e/ou desagregação nos ensaios segundo a AASHTO T-283.

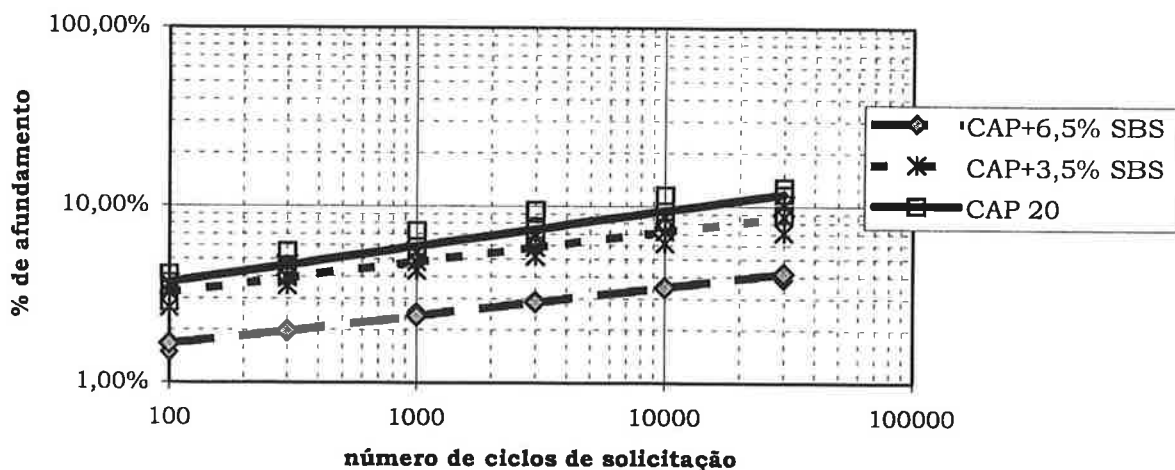


Figura 78: Afundamento em trilha de roda no simulador de tráfego de um SMA com diferentes tipos de asfaltos, no teor de projeto de 6,0% (modificado a partir de Reis et al, 2001).

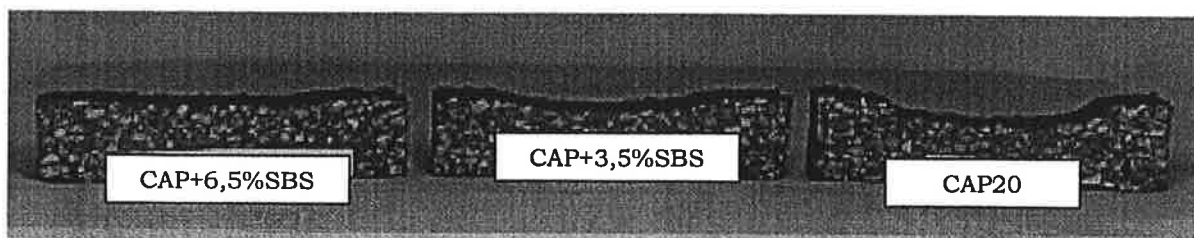
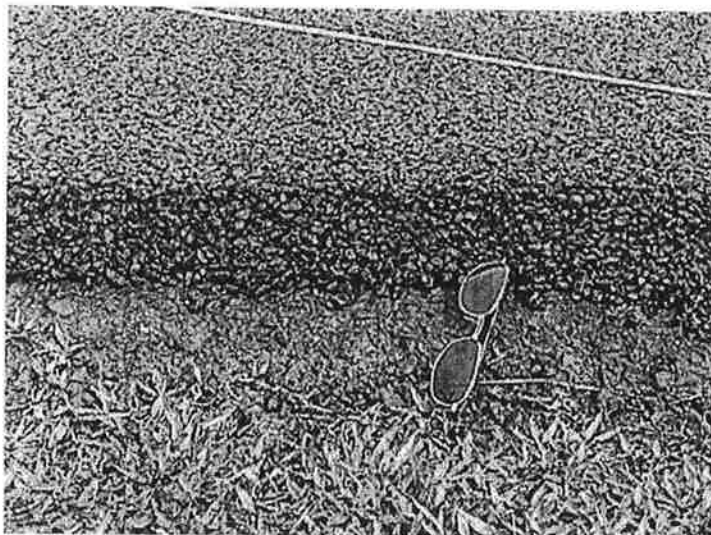


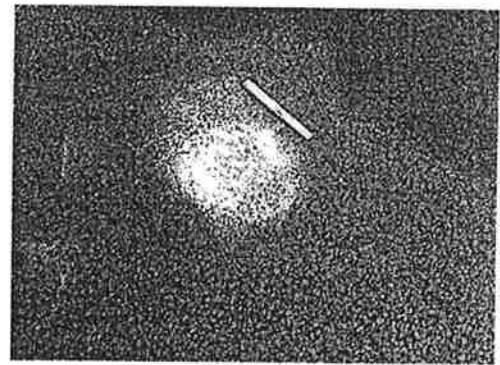
Figura 79: Seção transversal de placas ensaiadas no simulador de tráfego LPC cerradas na seção de maior afundamento (Reis et al, 2001).

A Figura 80 mostra um detalhe do aspecto da camada de SMA em Interlagos, com a avaliação de macrotextura pela altura de mancha de areia, confirmando a característica rugosa desta superfície, com mais de 1mm de altura média.

Reis, orientado por esta docente, vem pesquisando o SMA para sua dissertação de mestrado. Como recurso de estudo, será construído com o apoio da concessionária Ecovias, da Ipiranga Asfaltos e da Ecofibras um trecho experimental na Via Anchieta, com projeto de SMA enquadrado na faixa alemã D 0-8. Ensaios de deformação permanente foram realizados com asfalto modificado por polímero SBS 80/60, com ponto de amolecimento de 85,9 °C e penetração de 59 ($\times 10^{-1}$ mm). A Figura 81 mostra os resultados de afundamento em trilha de roda no simulador de tráfego LPC com diferentes teores de asfalto modificado.



Aspecto da camada do SMA em Interlagos



Teste de mancha de areia para avaliação de macrotexura do SMA

Figura 80: Aspecto superficial de camada de rolamento do tipo SMA

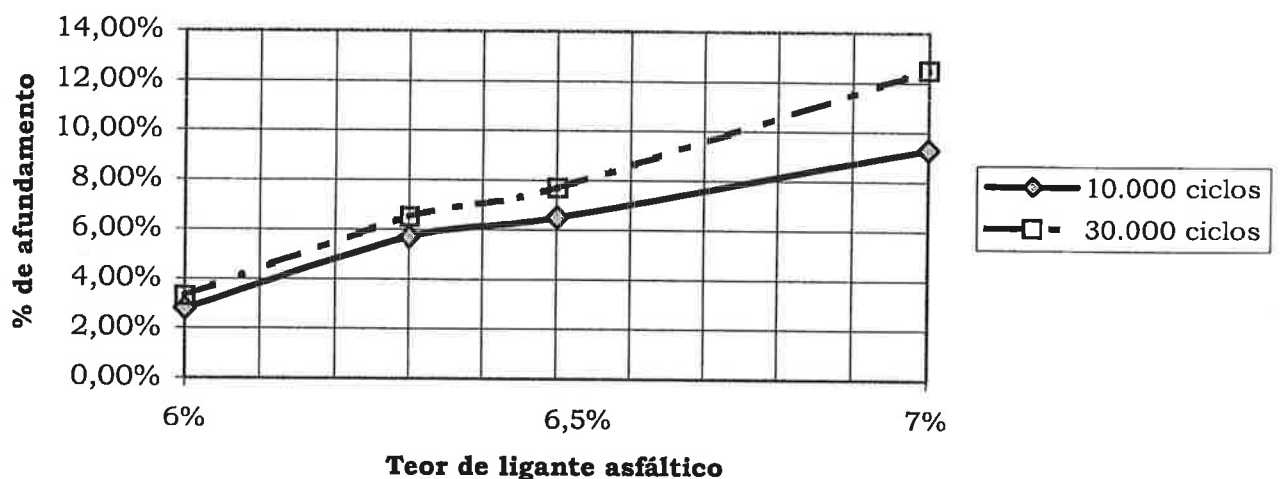


Figura 81: Resultados de afundamento em trilha de roda no simulador de tráfego tipo LPC de um SMA faixa D 0-8 com asfalto modificado por polímero SBS 80/60.

Para as misturas asfálticas de SMA testadas, foram encontrados módulos de resiliência de 4.990 MPa para 6,0% de teor de asfalto e 5.207 MPa para 6,5%, com corpos de prova compactados com 50 golpes em cada face; para o teor de 6,3%, encontrou-se módulo de resiliência de 6.690 MPa para corpos de prova compactados com 75 golpes por face. A resistência à tração por compressão diametral está em torno de 0,9 a 1,1 MPa.

Os resultados têm mostrado o bom comportamento mecânico e funcional que esta nova concepção de mistura asfáltica tipo SMA pode apresentar em pavimentos de vias mais solicitadas pelo tráfego, com grande durabilidade, permitindo maior segurança em pista molhada.

9.5. Materiais recicláveis e seu uso em revestimentos asfálticos

A necessidade de proteção ambiental é hoje uma preocupação em praticamente todas as áreas do conhecimento. A pavimentação, por envolver uma quantidade elevada de materiais é uma área que pode ocasionar, bem como resolver, certos problemas ambientais.

Por causa da crescente necessidade de exploração de novas jazidas, a pavimentação pode resultar em degradação de certas áreas e ambientes. O uso racional de materiais deve ser pensado em todas as etapas das obras de engenharia civil. O emprego de materiais locais, como solos, cascalhos, lateritas, areias, etc, desde que não degrade áreas importantes do ponto de vista ambiental, pode ser visto como uma das soluções para minimizar custos, gerando economia energética pela redução do transporte de material a grandes distâncias.

Reciclagem de concretos asfálticos a quente

Os pavimentos deteriorados representam um problema, pois há muitas vezes a necessidade estrutural de remover a camada do revestimento asfáltico, criando um problema de deposição dos resíduos gerados. Porém, este é um resíduo nobre e recuperável. A reciclagem a quente e a frio dos revestimentos asfálticos é uma técnica explorada há mais de 30 anos.

No Brasil, esta técnica iniciou-se na segunda metade da década de 80. Atualmente, dispõe-se de outras técnicas de reciclagem, como a de espuma de asfalto com adição de cimento, reciclagem de grande profundidade, etc.

A reciclagem a quente tem se mostrado uma opção de alta qualidade para pavimentos. Castro Neto (2000), orientado de mestrado desta docente, apresentou uma interessante contribuição para o projeto de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente, tomando como base sua experiência em obras de reciclagem a quente as quais ocorreram na rede pavimentada da DERSA, no Estado de São Paulo. Propõe a dosagem Marshall para o volume de vazios de 4% para os concretos asfálticos reciclados a quente, envolvendo, como tradicionalmente, o estudo da granulometria, sua correção e alteração necessárias com agregados novos, e uso de asfalto novo e agente regenerador.

Após esta etapa, Castro Neto propõe o uso dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência para definir a porcentagem de agente regenerador (conhecido por alguns técnicos por agente rejuvenescedor) do asfalto envelhecido/oxidado na mistura.

Castro Neto verificou que o aumento da porcentagem de agente regenerador na mistura asfáltica leva à queda de módulo de resiliência e da resistência à tração pois propicia uma redução de viscosidade do ligante, graças à adição de maltenos. Os resultados obtidos para corpos de prova moldados com 50%

de material fresado de pista e 50% de material novo, com porcentagens variadas de agente regenerador encontram-se nas Figuras 82 e 83. A grande vantagem deste método de dosagem é que o projetista estrutural pode definir a faixa de valores das propriedades mecânicas com as quais deseja trabalhar e definir a porcentagem de agente regenerador.

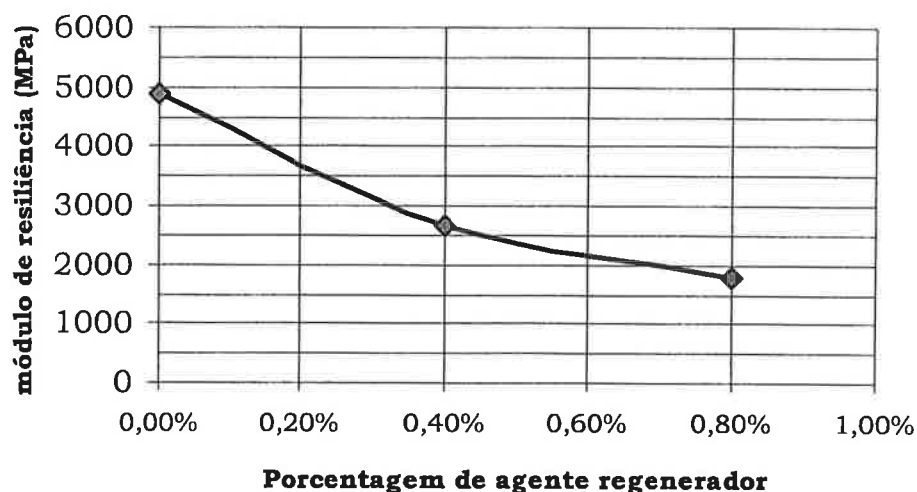


Figura 82: Variação de módulo de resiliência com a porcentagem de agente regenerador para misturas asfálticas recicladas a quente (Castro Neto, 2000; Castro Neto e Bernucci, 2000).

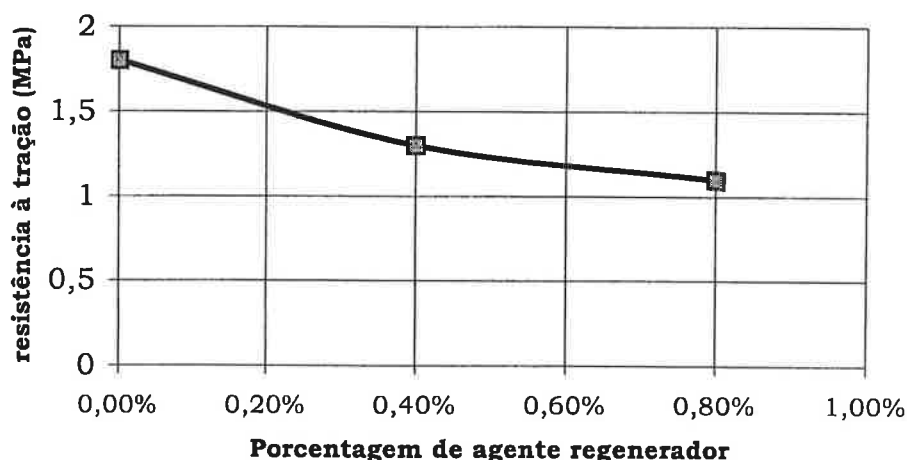


Figura 83: Variação da resistência à tração por compressão diametral com a porcentagem de agente regenerador para misturas asfálticas recicladas a quente (Castro Neto, 2000; Castro Neto e Bernucci, 2000).

Devido ao envelhecimento do ligante asfáltico que havia na mistura original deteriorada, a adesividade fica prejudicada. A adição de novo asfalto e agente tendem a ajudar a melhorar a adesividade ligante/agregado. Para esta verificação, Castro Neto utilizou o ensaio Cântabro como indicador comparativo, mostrando que quanto maior a porcentagem de agente regenerador, menor a perda de massa, decaindo de 11% para mistura sem

agente, para 8% com 0,4% de agente, e ainda 6% para 0,8% de agente regenerador.

Utilização de borracha de pneu moída em concretos asfálticos a quente

Estudos com o uso de resíduos de pneus de veículos inservíveis têm sido desenvolvidos como uma das linhas de pesquisa do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação. Um primeiro estudo foi realizado dentro do convênio de pesquisas com o CENPES-Petrobras, apoiado pelo FINEP-CTPetro com suporte de recursos dos fundos da ANP – Agência Nacional de Petróleo, com asfalto modificado por 20% de borracha de pneu moído. Alguns resultados já foram comentados nos itens anteriores.

Esta técnica, incorporando a borracha ao ligante é conhecida como uso do resíduo por “via úmida”. Os resultados mostram que as misturas asfálticas com asfalto modificado por BPM apresentam baixos afundamentos em trilha de roda no simulador de tráfego, comparável às misturas asfálticas com SBS e SBR. No entanto, o módulo de resiliência destas misturas asfálticas cai para valores entre 1500 e 2000MPa, como verificados por Motta na COPPE-UFRJ e confirmados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação – EPUSP (Leite et al, 2000).

A flexibilidade destas misturas asfálticas, aliada à sua resistência à deformação permanente permitem utilizá-las em reduzidas espessuras, principalmente como camada de retardamento de reflexão de trincas ou para restaurações de pequenas espessuras, em pavimentos com altas deflexões.

Recentemente o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação apoiou a pesquisa de doutorado de Bertollo, orientada do Prof. Fernandes Júnior da EESC-USP, para o uso de seus equipamentos e instalações de forma a desenvolver parte de sua pesquisa laboratorial para sua tese. O Trabalho de Bertollo compreende o uso de BPM incorporada à mistura asfáltica por “via seca”, ou seja, acrescentando-a diretamente na mistura, em proporções próximas a 2%, como agregado miúdo ou filer. Resultados muito interessantes têm sido encontrados, mostrando as particularidades de procedimentos que devem ser tomados para misturas asfálticas desta natureza, como bem realça Harvey e Monismith (1994). Para estas misturas asfálticas, a fixação de volume de vazios de 4%, como designado pelo SHRP para os concretos densos, leva a uma deformação permanente excepcional (Bertollo et al, 2001). Estes resultados indicam que o procedimento de dosagem deve seguir outros critérios, independentes do Marshall. Bertollo obteve também redução de módulo de resiliência pela introdução de borracha de pneu moído por “via seca”, assim como Leite et al (2000) para a técnica por “via úmida”.

9.6. Novos desenvolvimentos

A necessidade crescente de alternativas de alta resistência e alta durabilidade em todo o mundo tem resultado em avanços importantes da pavimentação na última década. No final dos anos 90, surgiu uma nova experiência no aeroporto de Copenhagem, na Dinamarca, com a execução de mistura asfáltica drenante seguida de preenchimento de seus vazios por pasta à base de cimento Portland (Collop e Elliott, 1999). Esta técnica inspirou uma pesquisa iniciada em 2000 por um grupo de docentes e pesquisadores da Escola Politécnica da USP: Vanderley John, Maria Alba Cincotto, Wellington Reppette e esta docente. A idéia era desenvolver uma mistura asfáltica drenante muito porosa, com cerca de 25 a 30% de vazios com ar, e preencher com pasta à base de pó de escória de alto forno. A alternativa de uso de escória é para viabilizar o uso de um material considerado resíduo, porém de excelentes características pozolânicas, com graves problemas de estocagem na atualidade, pois somente parte da escória é utilizada pela indústria do cimento, outra parte está proibida de ser utilizada na forma como é produzida por problemas ambientais.

Docha (2001), orientado pela docente em seu trabalho de iniciação científica, obteve após vários estudos uma mistura asfáltica bastante porosa, com coeficiente de permeabilidade superior a 5×10^{-2} cm/s. As pesquisas já em andamento e bem adiantadas de desenvolvimento de pasta à base de escória de alto forno pela equipe do Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP representaram uma grande facilidade para a combinação de objetivos. A Figura 84 (a) mostra um detalhe no processo de preenchimento das placas de mistura asfáltica porosa com a pasta à base de pó de escória de alto forno.

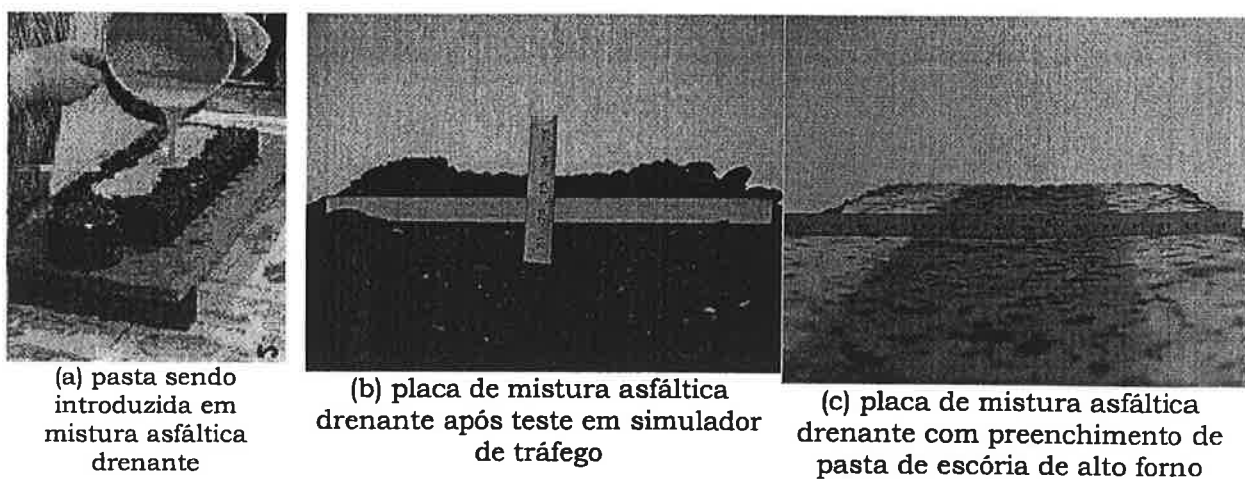


Figura 84 Técnica de preenchimento de vazios com pasta à base de pó de escória de alto forno, e aspecto geral das placas após ensaio no simulador de tráfego (Docha, 2001).

Ensaio no simulador de tráfego demonstram a baixíssima deformação permanente em trilhas de roda do material com preenchimento de pasta em comparação à mistura asfáltica porosa – Figura 84 (b) e (c). Resultados dos

ensaios de afundamento em trilha de roda no simulador de tráfego constam da Figura 85.

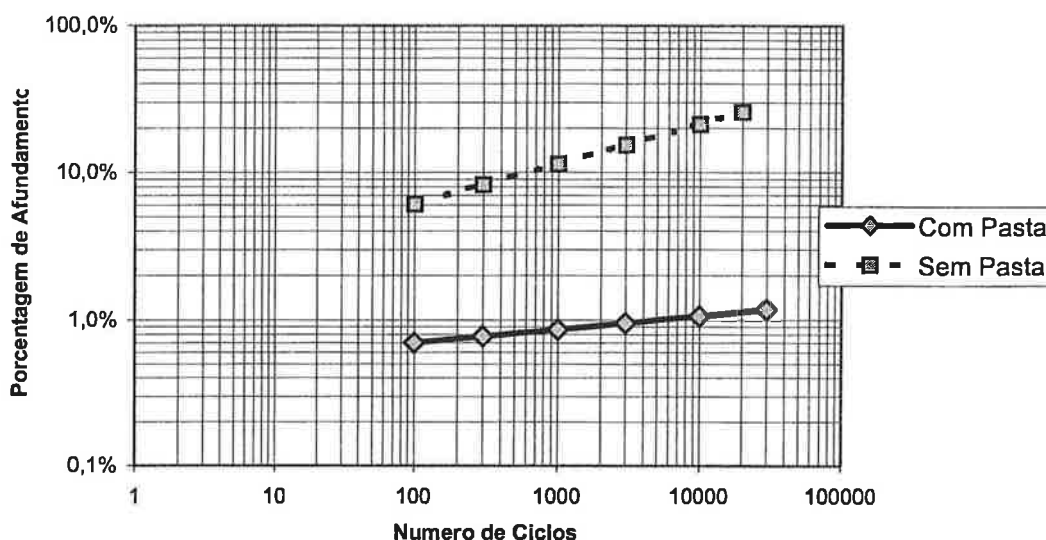


Figura 85 : Resultados de deformação permanente em simulador de tráfego de mistura asfáltica drenante e mistura asfáltica drenante preenchida por pasta à base de pó de escória de alto forno (Docha, 2001).

Ensaio de módulo de resiliência foram realizados em amostras extraídas das placas, obtendo-se valores para esta composição experimentada de 10.000 a 12.000 MPa. A resistência à tração por compressão diametral obtida apresentou valores entre 1,6 a 2,0 MPa. A ruptura se deu sempre na pasta; em raríssimas vezes foi observada a ruptura do agregado. A Figura 86 mostra um aspecto geral de corpo de prova extraído de placa e da face rompida.

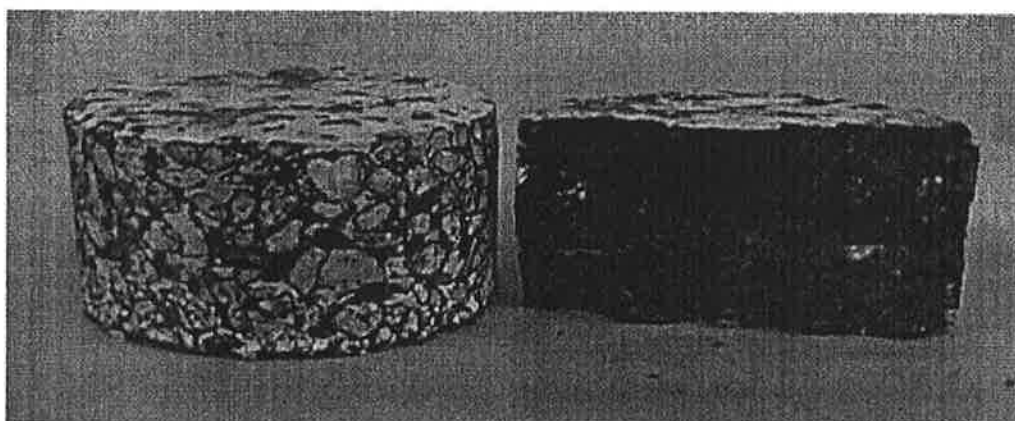


Figura 86: Aspecto de corpo de prova extraído de placa de mistura asfáltica drenante preenchida por pasta à base de pó de escória de alto forno e face após ruptura no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Os primeiros resultados desta nova tecnologia, para cujo processo objetiva-se obter patente, foram muito promissores, e vislumbra-se que este novo revestimento possa ser utilizado em locais de altíssima solicitação de tráfego, como em em pista de taxiamento de aeroportos ou estacinação de aeronaves, em pátios industriais e retroportos com tráfego de empilhadeiras, em vias de tráfego pesado, em vias de tráfego canalizado, como nos corredores de ônibus, em pátios de estocagem de combustíveis provenientes da destilação de petróleo, entre outras aplicações. Esta solução precisa ser utilizada em estruturas de baixos deslocamentos resilientes pois a rigidez é mais elevada que os revestimentos asfálticos usuais, para que se possa viabilizar seu uso em pequenas espessuras 5 a 6 cm. Sua praticidade construtiva está em não necessitar de equipamentos de custo elevado, não devendo ser executada também nenhum tipo de junta. A praticidade e a eficiência construtiva serão pesquisadas pelo grupo de desenvolvimento deste material.

9.7. Novos estudos e perspectivas

Novos estudos estão sendo propostos para o desenvolvimento desta linha de pesquisa, além dos trabalhos já iniciados e em andamento.

Dentro do contexto de pesquisar misturas asfálticas de alta resistência e alta durabilidade, foi realizada recentemente proposta de estudo de misturas asfálticas de módulo elevado (*Module Élevé* – segundo denominação francesa) e de SMA, por um grupo de pesquisa reunindo o CENPES-Petrobras, a COPPE-UFRJ, a UFRGS e a USP. Esta pesquisa está sendo proposta e está atualmente em julgamento pela FINEP, apoiada pela ANP e pela própria Petrobrás. Esta nova perspectiva de trabalho dá continuidade às pesquisas de oferecer mais alternativas de revestimentos asfálticos, ampliando a gama de soluções, sendo estas para tráfego pesado e intenso.

De outro lado, voltando às necessidades de desenvolvimento das rodovias de baixo volume de tráfego, proposta de pesquisa reunindo o CENPES-Petrobras, a COPPE-UFRJ e a USP foi realizada para a FINEP, e encontra-se em julgamento, para ser apoiada com fundo da ANP e pela Petrobrás, para estudo de tratamento Anti-pó, constituído de aplicação de emulsão à base de xisto em estradas de terra, como impermeabilizante e protetor. Esta técnica possibilita a execução de camada ultra-delgada sobre este tratamento, oferecendo uma alternativa de pavimentação de baixo custo. Este estudo une nossos esforços em desenvolver métodos de seleção e caracterização dos solos tropicais com a pesquisa e desenvolvimento em asfaltos e misturas asfálticas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho é uma sistematização crítica dos conhecimentos produzidos em pesquisas e em trabalhos técnicos pela docente, por seus orientados ou por grupos de pesquisadores com sua participação. Privilegiou-se o tema de materiais e de suas aplicações em pavimentos, área de maior dedicação da docente. Foram enfocados os trabalhos e contribuições em solos tropicais e em misturas asfálticas, destacando os aspectos mais importantes desenvolvidos nestes vinte anos de pesquisa em materiais de obras viárias.

O estudo dos materiais de ocorrência regional tem sido uma das linhas mais importantes do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação de modo a buscar a viabilização de seu uso em pavimentos. O emprego de materiais locais, como solos tropicais, cascalhos, lateritas, areias, etc, desde que sua extração não degrade áreas importantes do ponto de vista ambiental, pode ser visto como uma das soluções para minimizar custos, gerando economia energética pela redução do transporte de material a grandes distâncias. Este destaque vem de encontro à necessidade de expansão de várias regiões brasileiras, baseado na nossa crença que a construção de pavimentos vem auxiliar o desenvolvimento social, melhorando o acesso à escola, à saúde, entre outros aspectos, e o desenvolvimento econômico, assegurando trafegabilidade durante o ano todo e menor custo de transporte, possibilitando a comercialização mais eficiente de produtos agrícolas, da pecuária, industriais, etc.

Outro enfoque muito importante da nossa linha de pesquisa é melhorar a resistência e a durabilidade dos materiais, principalmente dos revestimentos asfálticos; para tanto, novas alternativas se fazem necessárias devido à diversidade de materiais, das condições ambientais e de situações de solicitação nas vias brasileiras. Alguns desenvolvimentos vêm sendo realizados neste sentido, incluindo a introdução de novas tecnologias no Brasil e mesmo concepção de soluções inovadoras.

O Laboratório de Tecnologia de Pavimentação vem buscando em suas pesquisas privilegiar o uso racional de ocorrências naturais, a reciclagem e a reutilização de materiais e de resíduos, uma vez que na pavimentação estão envolvidos sempre grandes volumes de materiais.

O objetivo central do trabalho é o desenvolvimento tecnológico, visando o estabelecimento de métodos de seleção, de caracterização, de projeto e de controle destes materiais. Acredita-se que as pesquisas desenvolvidas até o momento, as perspectivas de continuidade e nosso envolvimento com as novas tecnologias sejam contribuições para o desenvolvimento nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1986). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- AASHTO (1989) Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage, AASHTO T-283. American Association of State Highway Transportation Officials.
- AASHTO (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- AFNOR (1991) Préparation des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 2: Compactage des plaques. NF P 98-250-2. Association Française de Normalisation, Paris, França.
- AFNOR (1991) Deformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 1: Essai d'orniérage. NF P 98-253-1. Association Française de Normalisation, Paris, França., 11p. Juillet.
- ALDIGUERI, D.R. (2001). Estudo de misturas de areia asfalto usinadas a quente com asfaltos de diferentes consistências para revestimento de pavimentos no Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 116 páginas.
- AMARAL, C.A. e BERNUCCI, L.B. Resumo de Tese: Estudo das propriedades mecânicas de misturas laterita-betume para revestimentos de pavimentos procedentes da região metropolitana de Belém-Pará. XIV Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Campinas, SP – artigo submetido para avaliação
- ANDREATINI, L.P.V. (1970) Um método para a Análise e Interpretação das Deflexões em Pavimentos Flexíveis. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 439. 38 pp. Rio de Janeiro, R.J.
- ANDREATINI, L.P.V.; SERRA, P.R.M.; GODOY FILHO, A. e BODI, J. (1992). Procedimento para a Escolha de Alternativas de Estruturas de Pavimentos Flexíveis para Vias de Tráfego Muito Leve e Leve. 26a. Reunião Anual de Pavimentação, Aracaju, SE. Vol II, pp 1157 - 1181. Associação Brasileira de Pavimentação.
- ARANOVICH, L.A.S.; NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F.; STANGE, J.R.; CERATTI, J.A. e MOTTA, L.M.G. (1985). Relatório da Pesquisa do BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, em conjunto com os DER-PR, DER-SP, DER-MT, DER-MS e DER-GO.
- ALVAREZ NETO, L. (1998). Proposta de um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis para vias de baixo volume de tráfego com a utilização de solos lateríticos. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes, EPUSP. São Paulo, SP.
- ARNOLD, W. (1985). Tropische Residualboeden: Charakterisierung aufgrund von Porosimetriekriterien und Klassifizierung mit Hilfe von Schrumpfvolumen und Trockenfestigkeit. Dissertation, IGB, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Suíça.
- ASPHALT INSTITUTE (1987) Cause and Prevention of Stripping in Asphalt Pavements. Asphalt Institute Building - Educational Series ES-10, USA.
- ASPHALT INSTITUTE (1989). The asphalt handbook. Manual Series No. 4 (MS-4).

- ASTM (1996) Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures, D-4867. American Society for Testing and Materials.
- BERNUCCI, L.L.B. (1987). Expansão e Contração de Solos Tropicais Compactados e sua Aplicação às Obras Viárias. Classificação de Solos com base na Expansão e na Contração. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- BERNUCCI, L.L.B. (1995). Considerações sobre o Dimensionamento de Pavimentos utilizando Solos Lateríticos para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- BERNUCCI, L.B. (1997) Módulo Resiliente de Solos Lateríticos e sua Aplicação ao Dimensionamento de Pavimentos de Vias de Baixo Volume de Tráfego. I Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. 5 a 10 de outubro. Rio de Janeiro, R.J., ABPv, Vol II, pp 490-508.
- BERNUCCI, L.B. (1998) Consequências da Perda de Umidade de Solos Lateríticos Compactados. In: Anais do XII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Vol. I - Artigos Científicos, pg 290-299, 23 a 27 de novembro, Fortaleza, CE. ANPET.
- BERNUCCI, L.L.B. e BALDUZZI, F.(1994). Características de Comportamento à Expansão e à Contração de Solos Tropicais. VIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Recife, PE. Vol I, pp 287 - 298. ANPET - Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes.
- BERNUCCI, L.B.; CAMACHO, J.; MARINHO, F.A.M. e NOGAMI, J.S. (2000). Efeito da sucção e da temperatura na movimentação d'água em pavimentos construídos com solos lateríticos. XIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Gramado, nov. ANPET.
- BERNUCCI, L.B.; CAMPOS O.S.; DOMINGUES, F.A.A. CASTRO NETO, A.M.; RABAÇA, S.R. e FELTRIM,C. (1996) Estudos para a Formulação de CBUQ considerando a Deformação Permanente para as Rodovias da Rede DERSA. 30a. Reunião Anual de Pavimentação. ABPv, 25 a 29 de Novembro, pg 18 a 34, vol.1, Salvador, BA.
- BERNUCCI, L.B.; CAMPOS O.S.; DOMINGUES, F.A.A.; CASTRO NETO, A.M. e RABAÇA, S.R. (1997). Influência do Tipo de Asfalto no Comportamento à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas. 9º Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Asuncion, Paraguay, 2-7 nov.
- BERNUCCI, L.B.; CERATTI, JAP.; CHAVES, J.M.; MOURA, E. E CARVALHO, AD. (1999). Estudo da Adesividade no Comportamento de Misturas Asfálticas. In: Anais do 10º Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto, Vol. I, Sesión B - Mezclas, pg 383-396, 01 a 06 de noviembre, Sevilla, Espanha, Asociación Española de la Carretera.
- BERNUCCI, LB; LEITE, LFM; CERATTI, JAP e MOURA, E (2000). Asfalto modificado com EVA: uma solução para revestimentos asfálticos de alto módulo e alta resistência à deformação permanente. 32ª Reunião anual de pavimentação. ABPv, vol 1, pp 184-196. Brasília, DF.
- BERNUCCI, L.L.B. e SERRA, P.R.M. (1990). Mistura Argila Laterítica - Brita como Base de Pavimentos Econômicos Urbanos - Segmento Experimental de Diadema, SP. 24a. Reunião Anual de Pavimentação, julho, Belém, PA. Vol 2, pg 335 a 345. ABPv.
- BERNUCCI, L.L.B. e SERRA, P.R.M. (1991). Lateritic Soil-Aggregate on Low Cost Pavements. IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 26-30 August, Viña del Mar, Chile. Vol I, pg 29 - 35. ISSMFE.

- BERTOLLO, S.A.M.; FERNADES JÚNIOR, J.L.; BERNUCCI, L.B. e MOURA, E. (2001). Avaliação laboratorial de mistura asfáltica densa modificada com adição de borracha. XIV Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Campinas, SP – artigo submetido para avaliação.
- BOSCOV, M.E.G. (1987). Estudo comparativo do comportamento de um solo saprolítico e de um solo laterítico estabilizados com cal. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, EPUSP, São Paulo.
- Bottin Filho, I. A. (1997) – Estudos de Misturas de Areia-Asfalto Pré-Misturadas a Quente. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – CPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- BROSSEAUD, Y. DELORME, J-L e HIERNAUX,R. (1993). Use of LPC Wheel-Tracking Rutting Tester to select asphalt pavements resistant to rutting. Transportation Research Board, 1384, pp 59-68.
- BURMISTER, D.M. (1945a). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems I. Journal of Applied Physics, Vol.16, February, pp 89 - 94.
- BURMISTER, D.M. (1945b). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems II. Journal of Applied Physics, Vol.16, February, pp 126 - 127.
- BURMISTER, D.M. (1945c). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems III. Journal of Applied Physics, Vol.16, February, pp 296 - 302.
- CAMACHO, J. (2000). Fluxos e retenção da água nos pavimentos de baixo custo de solo arenoso fino laterítico nas regiões tropicais. Exame de Qualificação de Doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes da EPUSP, São Paulo, SP.
- CAMACHO, J. BERNUCCI, L.B. e MARINHO, F.A.M. (2001). Estudo das umidades de equilíbrio em camadas de base de um solo laterítico a partir das sucções matriciais. XIV Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Campinas, novembro. ANPET – Artigo submetido para avaliação.
- CAMPOS, O S. (1998). Análise do Comportamento de Trecho Piloto de Revestimento Poroso com Asfalto Modificado por Polímero. Tese de Doutorado. PTR-EPUSP
- CARVALHO, A.D. (1999). Propriedades das Misturas Asfálticas Densas com Brita e com Seixo Rolado Utilizadas como Revestimento de Pavimentos no Pará. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- CARVALHO, A.D.; BERNUCCI, L.B. e MOURA, E. (2000). Avaliação em laboratório do potencial de desagregação em misturas de concreto asfáltico usuais no estado do Pará. Simpósio Internacional de manutenção e restauração de pavimentos e controle tecnológico. Universidade Presbiteriana Mackenzie. Em CD Rom, 18 páginas. São Paulo, SP.
- CASAGRANDE, A. (1947). "Classification and Identification of Soils". Papers; American Society of Civil Engineers, pg 783-810. June.
- CASANOVA, F.J. (1986). O ensaio do azul de metileno na caracterização de solos lateríticos. 21ª. Reunião Anual de Pavimentação. ABPv, Salvador. V.II, pp 277-286.
- CASTRO NETO, A M e BERNUCCI, LB (2000). Proposta de método de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente. 15º Encontro do Asfalto. Artigo IBP62200, PP 170-180. Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro, RJ.
- CASTRO NETO, A.M. (2000). Proposta de Projeto de Dosagem de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes da EPUSP. São Paulo, SP.

- CERATTI, J.A.P. (1991). Estudo do comportamento à fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- CERATTI, J.A.P. e BERNUCCI, L.B. (1998). Relatório de Avaliação da Restauração dos Revestimentos com Betuflex dos Trechos do Km 0 a 19 e Km 47+500 a 63+500 da Rodovia Presidente Dutra. UFRGS/USP para Ipiranga Asfaltos SA.
- Chiu, C-T.; M. Tia; B.E. Ruth and G.C. Page (1994). Investigation of laboratory Aging Processes of Asphalt Binders used in Florida. In Transportation Research Record 1436, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 60-70.
- COLLOP, A. C. & ELLIOTT, R.C. (1999) Assessing the Mechanical Performance of Densiphalt, 3rd European Symposium - Performance and Durability of Bituminous Materials and Hydraulic Stabilised Composites, Leeds, pp 343-357
- CORTÉ, J-F; BROSSEAUD, Y.; KERZREHO, J-P e SPERNOL, A.(1998). Étude de l'orniérage des couches de roulement au manège d'essai du LCPC. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 217. pp 13-30. França.
- CRR (1995). L'orniérage des chaussées hydrocarbonées ou de la nécessité de rappeler des notions élémentaires. Bulletin CRR. No. 25. - 4e trimestre. Centre de Recherches Routières. Bélgica.
- DER-SP (1991). "Manual de Normas. Pavimentação". Seção 3.09. Base de Solo Arenoso Fino Laterítico. pg 112-124. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. São Paulo, SP.
- DNC (1992). Regulamento Técnico DNC N° 01/92 Departamento Nacional de Combustíveis - Rev. Ministério dos Transportes, Brasil.
- DNER (1981). Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ.
- DNER (1994) - Métodos de Ensaio - Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Betuminosas. DNER-ME 133/94. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Ministério dos Transportes, Brasil.
- DOCHA, F.A (2001). Comportamento mecânico de misturas asfálticas porosas preenchidas com pasta de pós de escória de alto-forno para revestimentos de pavimentos. Relatório Final de Iniciação Científica PIBIC PIBIC-USP/CNPq. Escola Politécnica da USP.
- DUMONT, A.G.; HUET, M. e ROHR, C. (1993). Caractérisation mécanique des bétons bitumineux suisses de compression duamétrale - valeurs limites. Département fédéral des transports, des communication et de l'énergie. Office federal de routes. No. 282. Suíça.
- EAPA (1998). Heavy Duty Surfaces: The Arguments for SMA. European Asphalt Pavement Association, Holanda.
- Emery, J. J.; W. Schenk, J. J. Carrick, J. K. Davidson, W. K. MacInnis e G. J. A. Kennepohl (1996) Stone Mastic Asphalt Trials in Ontario. 77th Transportation Research Record, USA.
- FABBRI, G.T.P.(1994). Caracterização da Fração Fina de Solos Tropicais através da Adsorção de Azul de Metileno. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- FHWA (1995). Background of Superpave asphalt mixtures design and analysis. National Asphalt Training Center Demonstration Project 101. Federal Highway Administration. Publication No. FHWA-SA- 95-003.
- FORTES, R.M. E NOGAMI, J.S. (1991). Método Expedido de Identificação do Grupo MCT de Solos Tropicais Utilizando-se Anéis de PVC Rígido. 25a Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, SP. Vol I, pg 591 a 604. ABPv - Associação Brasileira de Pavimentação.

- FORTES, F.Q. SÓRIA, M.A. e VILLIBOR, D.F. (1994) Comparação dos resultados de dois métodos de avaliação da irregularidade longitudinal. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, V2, pp 1048-1064, Belo Horizonte. APBv.
- FOSTER, C.R. and AHLVIN, R.G. (1954). "Stresses and Deflections Induced by a Uniform Circular Load". Proceedings of Thirty-Third Annual Meeting, Highway Research Board, pp 467 - 470. Washington.
- GICHAGA, F.J.; MURUNGA, P.A. and ATIBU, F.S. (1987). "Design and Performance os Flexible Road Pavements under Tropical". 9th- Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Lagos, September - ISSMFE. pp 559 - 564. Ed. A.A. Balkema.
- GODOY, H. (1997). Identificação e Classificação geotécnica de latossolos do Estado e São Paulo pelo Método das Pastilhas MCT. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, USP. São Paulo, SP.
- GODOY, H. e BERNUCCI, L.B. (2000). Desenvolvimento de Procedimento Visual-táctil para o Reconhecimento Geotécnico de Campo dos Solos das Bacias Hidrográficas do Aguapeí e Peixe no Estado de São Paulo. Relatório Final de Auxílio à Pesquisa para FAPESP, EPUSP. São Paulo, SP.
- GODOY, H. e BERNUCCI, L.B. (2001). Desenvolvimento de Procedimento Visual-táctil para o Reconhecimento Geotécnico de Campo dos Solos das Bacias Hidrográficas do Aguapeí e Peixe no Estado de São Paulo. Relatório Final de Auxílio à Pesquisa para FAPESP – Resposta à Assessoria Científica, EPUSP. São Paulo, SP.
- GRANT, K. (1974). Laterites, ferricretes, bauxites and silcretes. Proc. 2nd Intern. Congress of the International Association of Engineering Geology. IAEG, Vol I, paper IV-31. São Paulo, SP.
- GRIMAU, J.-P e HIERNAX, R. (1977). Bulletin des Liaison de Lab. des Ponts et Chaussées, spécial V, décembre.
- HARVEY, J. e MONISMITH, C.L. (1994). Effects of laboratory asphalt concrete specimen preparation variables on fatigue and permanent deformation tests results using strategic highway research program A-003A proposed testing equipment. Transportation Research Record 1417, pp38-48. Transportation Research Board.
- HIERNAX, R. (1996). L'expérience d'exactitude de l'essai d'orniérage et de répétabilité du compactage de plaques. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées no. 202. Mars-Avril, pp3-9. França.
- HVEEM, F.N. (1955). Pavement Deflections and Fatigue Failures. 34th Annual Meeting, Highway Research Board, Bulletin 114, pp 43 - 73.
- IGNATIUS, S.G. (1988). Uso dos Limites de Atterberg e da Análise Granulométrica na Identificação e Classificação de Solos Tropicais para Fins de Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Kandhal, P.S. (1992) Moisture Susceptibility of HMA Mixes: Identification of Problem and Recommended Solutions. In NCAT Report 92-1, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, May, pp 1-57.
- LEITE, L.F.M. (1999). Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero. Tese de doutorado. Instituto de Macromoléculas da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.
- LEITE, LFM; MOTTA, LMG; BERNUCCI, LB e SOARES, JB. (2000) Mechanical behavior os asphalt rubber mixes prepared in laboartory. In Proceedings of Asphalt Rubber 2000 Conference; pp309 – 118; November; Portugal.
- Lesueur, D. and D. N. Little. Effect of Hydrated Lime on the Reology, Fracture and Aging of Bitumen. In 1999 Annual Meeting of the Transportation Research Board, TRB, Washington, D.C., 1999, pp 1-24.

- LINDER, R. et al.(1983). Essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôle des enrobés bitumineux – Rapport National Français. RILEM – Essais Sur Liants et matériaux Hydrocarbonés. Belgrado, Sept.
- LITTLE, D.N.; BUTTON, J.W. e YOUSSEF, H. (1994). Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential. Transportation Research Record 1417, pp 49-57. Transportation Research Board.
- LOMONACO, M.M. (1999). Comportamento quanto à deformação permanente de misturas areia-asfalto para revestimentos e bases de pavimentos. Relatório Final – Bolsa de Iniciação Científica PIBIC-USP/CNPq. Escola Politécnica da USP.
- LTP (1999). Caracterização MCT, mini-Proctor e estudo de estabilização solo-cal. RT-LTP-PTR-EPUSP037/071099. EPUSP, São Paulo, SP.
- Majidzadeh, K. and F.N. Brovold. (1968). State of the Art: Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures. In Highway Research Board – Special Report 98, HRB, Publication 1456, pp 1-77. National Research Council, Washington, D.C.
- MARINHO, F.A.M. (1994). Medição de sucção com o método do papel de filtro. In: 10º.Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Foz de Iguaçu, Anais ABMS.
- MARSHALL, T.J. e HOLMES, J.W. (1979). Soil Physics. Cambridge University Press.
- MERIGHI, J.V. (1999). Estudo da Deformação Permanente e Misturas Asfálticas em Ensaio de Laboratório. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- Maupin, Jr. G.W. Na Evaluation of Stripping in Virginia's Pavements. In 1999 Annual Meeting of the Transportation Research Board, TRB, Washington, D.C., 1999, pp 1-23.
- MERIGHI, J.V.; BERNUCCI, L.B. E SUZUKI, C.Y. (1995). Utilização de Simulador de Tráfego para Análise de Comportamento de Misturas Asfálticas”. 29a. Reunião Anual de Pavimentação. Cuiabá, MT. Vol. 3 pg 303 - 316. Associação Brasileira de Pavimentação.
- MERIGHI, J.V.; SUZUKI,C.Y.; BERNUCCI, L.B. e KIRITA, P. Y.(1996) Repetibilidade em Ensaio de Afundamento de Trilha de Roda realizados no Simulador de Tráfego. 30a. Reunião Anual de Pavimentação. ABPv, 25 a 29 de Novembro, pg 2126 a 2141, vol.4, Salvador, BA.
- MERIGHI, J.V.; BERNUCCI, L.B e SUZUKI,C.Y (1996). A Importância da Avaliação da Deformação Permanente no Comportamento das Misturas Asfálticas. X Congresso Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes. ANPET 18 a 22 de Novembro, Brasília, D.F.
- MEURER, E. F. (2001). Estudo da Granulometria para Concretos Asfálticos Drenantes, Tese de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.
- MITCHELL, J.K. e SITAR, N. (1982). Engineering Properties of Tropical Residual Soils. Geotechnical Specialty Conf. on Eng. and Const. in Tropical and Residual Soils. Honolulu, Hawaii. pp 30- 57. ASCE.
- MOMM, L. (1998). Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrot textura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico. Tese de doutoramento. PTR-EPUSP.
- MONISMITH, C.L. FINN, F.N. e VALLERGA, B.A. (1989) A comprehensive Asphalt concrete mixture design system. Asphalt Concrete Mix Design: Development of a more Ratioanl Approaches, ASTM STP 1041, W. Gartner Jr. Editor. ASTM.

- MORETTI, R.S. (1987). Tratamento Primário. Efeito da Adição de Brita no Comportamento de um Solo Argiloso. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da USP. São Paulo, SP.
- MOTTA, L.M.G. (1979). Um ano de medições de temperatura no painel experimental da COPPE. Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projeto de Reforço. Rio de Janeiro, R.J. Associação Brasileira de Pavimentação.
- MOURA, E. (2001) Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes da EPUSP, São Paulo, SP.
- MOURA, E.; BERNUCCI, L.B.; ALDIGUERI, D.R. e LEAL FILHO, L.S. Effect of lime and chemical additives on the antistripping characteristics of asphalt mixes. Desempenho da cal e de aditivos químicos líquidos face à adesividade ligante/agregado. Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Auburn, Alabama. Julho-Agosto de 2001.
- MOUTIER, F. (1997). Gyrotory Compactor (CG or PCG) – Justification of its use in the French mix Design. Palestra no Asphalt Institute, Sept, 19. Notas de apresentação.
- NAPA (1999). Designing and Constructing SMA Mixtures – State-of-the-Practice. National Asphalt Pavement Association, Quality Improvement Series 122. USA.
- NASCIMENTO, U.; CASTRO, E. and RODRIGUES, M. (1964). Swelling and Petrification of Lateritic Soils. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Technical Paper No 215, Lisboa, Portugal.
- NETTERBERG, F. (1975). Self-Stabilization of Roads: Fact ou Fiction ? 6 th Reg. Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Eng. Durban, Africa.
- NÓBREGA, M.T. (1995). Características e mecanismos de estabilização de solos tropicais com cal e cimento em pista experimental. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, USP, São Paulo, SP.
- NOGAMI, J.S. e COZZOLINO, V.M.N. (1985). A Identificação de Solos Tropicais: Dificuldades e Proposta de um Método Preliminar. 20a. Reunião Anual de Pavimentação. Novembro, Fortaleza, pp 115 - 134. ABPv.
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1981). "Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias". Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. COPPE/UFRJ - CNPq - ABMS; pg 30 - 41. Setembro, Rio de Janeiro, RJ.
- NOGAMI, J.S. and VILLIBOR, D.F. (1994). A New Simple Method for Classification of Lateritic and Saprolitic Soils. 7th International IAEG Congress, Portugal. pg 3391-3400. A.A.Balkema.
- OECD (1986). Economic Design of Low-Traffic Roads. Road Transport Research, Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris.
- PERRONE, A.E.A.R.G. (2000). Valorização dos solos finos caulínicos para a utilização como material de construção de pavimentos e edifícios. Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica CNPq. Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP.
- PIARC. (1994). Enrobés bitumineux a haute resistance a l'orniérage par fluage. Comité Technique AIPCR des Routes Souples. CT 8. Rédaction: J. Verstraeten. Permanent Intern. Assoc. of Road Cong.
- PIGOIS, M.L. e HUSCHEK, S. (1984). Orniérage, étude comparative de différents dispositifs d'essais. Département fédéral des transports, des communication et de l'énergie. Office federal de routes. No. 88. Suíça.

- PMSP (1992). Normas Técnicas da PMSP-92: Estudo de Adequação das Normas e Especificações e Métodos de Dimensionamento de Pavimento- GT-92. Secretaria de Vias Públicas da Prefeitura do Município de São Paulo. D.O.M., São Paulo, 37 (207), quarta-feira, 4 nov., pag. 26.
- PORTER, O.J. (1950). Development of the Original Method for Highway Design. Development of CBR Flexible Pavement Design Method for Airfields. Transactions of American Society of Civil Engineers. Vol. 115. pp 461 - 467. New York.
- PREUSSLER, E.S.(1983). Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camada de Reforço. Tese de Doutorado. COPPE - URFJ.
- PREUSSLER, E.S.; MEDINA, J. e PINTO, S. (1981). Resiliência de Solos Tropicais e sua Aplicação à Mecânica dos Pavimentos. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. pp 591 - 614. COPPE/UFRJ - CNPq - ABMS.
- RABAÇA, S.R. E BERNUCCI, L.B. (1993). O Aproveitamento de Desvios de Tráfego para a Pesquisa na Área de Pavimentos. Documentos em Síntese, no. 8, ano 2, pg 43-44. DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S.A.
- RADA, G.R.; WITCZAK, M.W. and RABINOW, S.D. (1989). Comparison of AASHTO Structural Evaluation Techniques Using Nondrestrutive Deflection Testing. Transportation Research Record no. 1207, pp 134-144. Transportation Research Board.
- REIS, R.M.M.; BERNUCCI, L.B. e ZANON, A.L. (2001). Revestimento asfáltico tipo SMA para alto desempenho em vias de tráfego pesado. XIV Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Campinas, SP – artigo submetido para avaliação.
- REZENDE, A.A. (1998) O ensaio MCV-ITA como suporte à extensão da metodologia MCT aos solos lateríticos concrecionados. Dissertação de mestrado. ITA, CTA, São José dos Campos, SP.
- RUTH, B.E., TIA, M.and Badu-Tweneboah, K. (1989).The role of asphalt in rational mix design and pavement performance. Asphalt Concrete Mix Design: Development of a more Ratioanl Approaches, ASTM STP 1041, W. Gartner Jr. Editor. ASTM.
- Sainton, A ; Puiatti, D. e Walter, D. (1999). Modification du Betume et des Enrobés Bitumineux par ajout de Chaux Hydratée. In Revue Générale des Routes 770, Février.
- Santana, H. (1996) – Conferência: Experiência no Nordeste Brasileiro em Revestimentos de Tratamentos Superficiais e Areias Asfalto. 30º Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Salvador, BA.
- SANTOS, J.D.G. (1998) Contribuição ao estudo dos solos lateríticos granulares como camada de pavimentos. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- SCHELLMANN, W. (1979). Considerations on the definition and classification of laterites. Proc. of International Seminar on Laterisation Process. Trivandrum, India.
- SCHMIDT, B.R. (1988). Vicinais - Tentativa de Análise da Situação e Proposta de Formulação de uma Política. I SENAVI - Seminário Nacional de Vicinais. Junho, São Paulo, SP. Pg. 022 a 033. DER/SP - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo.
- SCHMITZ, C.S.; BERNUCCI, L.B. e BOSCOV, M.E. (2001). Resumo de Tese: Avaliação e asnálise do comportamento de solos tropicais utilizados como material de envolvimento de tubos plásticos flexíveis para sistemas de drenagem viária. XIV Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Campinas, SP – artigo submetido para avaliação.

- SEDDIK, H. e EMERY, J. (1997). Moisture Damage of Asphalt Pavements. In XIIIth IRF World Meeting, session 8, International Road Federation. Toronto, Ontario, Canada, June.
- SERRA, P.R.M. e BERNUCCI, L.L.B. (1990). Utilização de Solos Argilosos Lateríticos em Pavimentos Econômicos Urbanos - Segmento Experimental de Araras, SP. 6o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia/IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Fundações. Salvador, BA. Vol.2, pg 235 a 242. ABGE/ABMS.
- SERRA, P.R.M. e BERNUCCI, L.L.B. (1993). Misturas de solo argiloso laterítico-agregado como base de pavimentos urbanos de baixo custo: exemplos de utilização. 27^a. Reunião Anual de Pavimentação. Teresina, PI, ABPv.
- SETRA-LCPC (1993). Observatoire des techniques de chaussées. Dossier thématique. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes-Laboratoires des Ponts et Chaussées. França.
- SHRP (1994). Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE): the product of the SHRP asphalt research program. SHRP-A-410. Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- SORIA, M.H.A.(1985) Reflexões lógicas sobre classificação de solos. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da USP, São Carlos, SP.
- SOUSA, J. B.; TAYEBALIA,.; HARVEY, J. HENDRICKS, P. E MONISMITH, C. L. (1993). Sensitivity of Strategic Highway Research Program A-003A testing equipment to mix design parameters for permanent deformation and fatigue. Transportation Research Record 1384, pp 69-79. Transportation Research Board.
- SOUSA PINTO, C. e BOSCOV, M.E.G. (1991) Estudo comparativo de estabilização com cal de um solo saprolítico e de um solo laterítico IX COBRAMSEF, 6º. CBGE. Vol. 2, pg 227 - 234. Salvador, ABMS/ABGE.
- STUART, K.D. e IZZO, R.P. (1994). Correlation of Superpave G*/sin δ with rutting susceptibility from laboratory mixtures tests. Transportation Research Record, 1492, pp 176-183. Transportation Research Board.
- SVENSON, M. (1980). Ensaios Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos. Tese de Mestrado - COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, R.J.
- THENN DE BARROS, S. (1965). Gráfico para o Cálculo das Deflexões dos Sistemas de Duas Camadas. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 15 pp, 48 - GTPv - 64 - 06. Rio de Janeiro, R.J.
- THENN DE BARROS, S. (1966). O Cálculo da Deflexão dos Sistemas Elásticos de Duas e Três Camadas. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 18 pp, 146 - SPv - 66 - 02. Rio de Janeiro, R.J.
- TOWNSEND, F.C.; MANKE, P.G. and PARCHER, J.V. (1971). The Influence of Sesquioxides on Lateritic Soil Properties. Highway Research Record no. 374. pg 80 - 92.
- TRRL (1977). Road Note 31 - Aguide to the Structural Design of Bitumen -Surfaced Roads in Tropical and Sub-tropical Countries. Transportation and Road Research Laboratory. Her Majesty's Stationery Office. London.
- VAN TIL, C.J.; McCULLOUGH, B.F.; VALLERGA, B.A. and HICKS, R.G. (1972). "Evaluation of AASHO Interim Guides for Design of Pavement Structures". National Cooperative Highway Research Program, Report 128, 111 pp. Highway Research Board.
- VARGAS, M. (1982). O Uso dos Limites de Atterberg na Classificação dos Solos Tropicais. VII Cong. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. de Fundações. Vol V, pp 262 - 278. Olinda/Recife, PE. ABMS.

- VERTAMATTI, E.(1988). Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na Investigação de Aeroportos e Metodologias MCT e Resiliente. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP.
- VILLIBOR, D.F. (1981). Pavimentos Econômicos. Novas Considerações. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- VILLIBOR, D.F.; FORTES, F.Q. e NOGAMI, J.S. (1992). Conservação de Rodovias de Baixo Custo. 26ª Reunião Anual de Pavimentação, Aracajú, SE. ABPv. pp. 1110 - 1156.
- VILLIBOR, D.F.; FORTES, F.Q. e NOGAMI, J.S. (1994). Defeitos de pavimentos de baixo custo e sua conservação. In 28ª Reunião Anual de Pavimentação, V2, pp 1098-1126, Belo Horizonte. ABPv.
- VILLIBOR, D.F.; BERNUCCI, L.B. , SERRA, P.R.M. and NOGAMI, J.S (1997). Low cost pavements in Brazil using lateritic clay bases and thin surface courses. In Thin Pavements, Surface Treatments, Unbound Roads. Part Two: Laterite, marginal Materials, Recycled Materials, item 2.3. pg 49-56. University of New Brunswick. Fredericton, Canada.
- WAMBURA, J.H.G.; ODERA, M.S. and IKINDU, D.R. (1990). Pavement Design and Construction Specifications Developed for Low-Cost, Low-Volume Roads in Kenya. Transportation Research Record no. 1291, pp 58-65. Transportation Research Board.