

# CRITÉRIOS PARA DETERMINAR O TEOR EM CIMENTO NO SOLO PARA USO COMO CAMADA DE PAVIMENTO

Criteria for determining the cement content in soil-cement pavement layers

Saul Barbosa Guedes\*

Roberto Quental Coutinho\*\*

António Viana da Fonseca\*\*\*

**RESUMO** – Em locais onde há falta de agregados e os solos não atendem os critérios técnicos, ou quando se pretende fazer, com solos, uma camada resistente, recorre-se à estabilização dos solos. Dentre os materiais utilizados neste tipo de processo o cimento é o mais utilizado por proporcionar uma maior viabilidade técnica e econômica. Neste trabalho será feita uma abordagem sobre os critérios técnicos que devem ser aplicados e analisados para determinar o teor ótimo de cimento a ser incorporado ao solo para uso da mistura como material para camada de pavimento, uma vez que os critérios atualmente utilizados baseiam-se apenas em valores obtidos a partir de ensaios de resistência à compressão simples e durabilidade por molhagem e secagem, os quais não são por si suficientes para analisar o comportamento do material estabilizado diante a presença do intemperismo local.

**SYNOPSIS** – In sites with lack of aggregates and with soils that do not meet the technical criteria, or for building with soil a resistant layer, soil stabilization techniques can be applied. Among the materials employed in this type of process, cement is the most used since it provides greater technical and economic feasibility. This work will discuss the technical criteria to be applied and analysed to determine the optimum cement content to be incorporated into the soil for use of the mixture as pavement layer material. The criteria currently used are based only on values obtained from tests of compressive strength and durability by wetting and drying, which are not sufficient to analyse the behaviour of the stabilized material under the effect of local weathering.

**PALAVRAS CHAVE** – Critérios técnicos, teor de cimento, pavimento.

## 1 – INTRODUÇÃO

De acordo com Ingles e Metcalf (1972) a estabilização de solos é uma técnica por meio da qual se busca uma melhoria das características do comportamento do solo, principalmente em termos de resistência, deformabilidade, durabilidade e permeabilidade.

A estabilização dos solos constitui uma área específica da engenharia geotécnica, mais particularmente estudada pela engenharia rodoviária, cuja aplicação em outras áreas vem se expandindo nas últimas décadas.

---

\* Professor Assistente 1, Universidade Federal de Campina Grande. E-mail: saulbguedes@yahoo.com.br

\*\* Professor Associado 4, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: rqc@ufpe.br

\*\*\* Professor Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. E-mail: viana@fe.up.pt

De acordo com Alcântara (1995), a gama de aditivos químicos utilizados na estabilização de solos é vasta, indo desde os produtos tradicionais como cal, cimento e betume, passando por produtos comerciais nacionais e internacionais e incluindo até materiais alternativos como os obtidos de materiais regionais ou de subprodutos de processamentos industriais.

Dentre os aditivos químicos citados, o cimento é o produto mais utilizado no processo de estabilização por apresentar vantagens tais como maior disponibilidade no mercado, menor custo de aquisição, maior praticidade no processo de homogeneização e forte influência na ligação dos grãos de solo diante o intemperismo.

Entretanto, os critérios atualmente utilizados para determinar o teor eficaz em cimento num agregado ou solo, para utilização da mistura como camadas de pavimento, baseiam-se apenas nos ensaios de resistência à compressão simples e durabilidade. Porém, existem outros tipos de ensaios os quais proporcionam melhores análises por serem mais realísticos.

Neste trabalho são abordadas as técnicas que devem ser adotadas atualmente, para obter uma maior precisão na dosagem do teor de cimento em solos ou agregados.

Os autores do presente trabalho acreditam que as descrições a seguir são de grande interesse para a comunidade acadêmica, uma vez que existem inúmeros trabalhos sendo desenvolvidos incorporando o cimento em sua matriz como produto de estabilização, principalmente se o destino da mistura for para uso em camada de pavimento.

## **2 – REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 – Técnicas de estabilização dos solos por meio do processo químico**

A estabilização química dos solos se insere como uma notória técnica de melhoria das propriedades de engenharia dos solos, mostrando-se como uma solução promissora dentro da realidade nacional, induzindo à necessidade de estudos sobre as propriedades geotécnicas dos solos naturais e misturas estabilizadas.

Pereira (2005) classifica os aditivos químicos em três grupos, a saber:

- a) Comerciais Tradicionais – são os aditivos mais utilizados nas construções, objeto de inúmeras observações de laboratório e de campo para uma vasta gama de solos; são eles a cal, o cimento Portland e os materiais betuminosos;
- b) Comerciais Não Tradicionais Patenteados – são exemplos: Con-Aid, ISS 2500 (Ionic Soil Stabilizer), Perma-Zyme, Consolid, DS 328 (produto brasileiro), Dynacal (produto brasileiro), Enzymatic, Terra Fix, EMC<sup>2</sup>, RBI Grade 81, etc.;
- c) Produtos Alternativos – são produtos já testados na estabilização de solos, mas que não são específicos para esse fim, por exemplo: hidróxido de sódio (soda cáustica), cloreto de cálcio, cloreto de sódio, resorcinol formaldeído, acrilato de cálcio, ácido fosfórico, etc.

### **2.2 – Estabilização de solos com o uso do cimento**

Na literatura consta que a mistura solo-cimento foi utilizada pela primeira vez em 1800, no Sul da Inglaterra, como tratamento de leito de estradas e caminhos para veículos tracionados por cavalo, sendo precursor dessa mistura o engenheiro inglês H. E. Brook-Bradley (Portland Cement Association – PCA, 1960).

O emprego de solo-cimento no Brasil iniciou-se na década de 1940, em São Paulo, devido ao acelerado crescimento do interior do estado e conseqüente necessidade de ampliação da malha rodoviária (Senço, 2001).

De maneira geral, a adição do cimento ao solo produz modificações substanciais em suas propriedades. A maior ou menor influência desta adição no comportamento mecânico da mistura resultante depende de características específicas do próprio solo, do teor em cimento incorporado, quantidade de água adicionada, forma e grau de compactação aplicado, período de cura estabelecido, temperatura atuante, entre outros (Feuerharmel, 2000).

Lima *et al.* (1993) relatam da seguinte maneira o efeito do cimento nos solos:

- nos solos granulares destina-se principalmente a desenvolver ligações nos contatos intergranulares, aumentando a coesão da mistura;
- nos solos finos os grãos de cimento comportam-se como núcleos, aos quais aderem as partículas que os rodeiam, formando regiões de material floculado que apresentam ligações oriundas dos fenômenos de cimentação.

Ainda segundo Lima *et al.* (1993) todo e qualquer solo pode ser estabilizado com cimento, no entanto, é regra básica que o teor em cimento empregado aumenta com o teor de argila, o que torna os solos arenosos mais favoráveis economicamente a este tipo de estabilização.

O cimento tem a função de desenvolver uma estrutura capaz de minimizar os efeitos das variações de umidade do solo, que desenvolvem grandes forças de tração e compressão no interior de massas porosas.

De acordo com Branco *et al.* (2008) existem duas maneiras para a utilização deste tipo de estabilização. Uma com pequena quantidade de cimento, 3,0 ou 4,0 %, em que se visa essencialmente diminuir a suscetibilidade do solo à água, e aumentar a resistência, embora ligeiramente; trata-se, portanto da técnica chamada de “solo melhorado com cimento”. Outra, com dosagens de cimento maiores conduzindo a um material de resistência elevada, denomina-se “solo-cimento”.

A mistura solo-cimento é o fruto da conjugação do solo, do cimento e da água, em proporções determinadas em ensaios de laboratório, e de um processo construtivo que leva estes elementos misturados a uma massa específica também fixada em laboratório (Lima *et al.*, 1993).

O estabelecimento do teor em cimento é em geral efetuado por meio de um estudo experimental, com os seguintes passos principais contidos nas normas ABNT NBR 12023 (2012) e ABNT NBR 12253 (2012):

- 1) Identificação do solo para prever o teor em cimento adequado;
- 2) Preparação de misturas com vários teores em cimento;
- 3) Ensaios de compactação para determinar o teor em água ótimo e a massa específica seca máxima de cada mistura;
- 4) Preparação dos corpos de prova, compactados, de cada mistura, para submeter ao ensaio de resistência à compressão simples após cura (pelo menos aos 7 e aos 28 dias).

Tendo como objetivo de estudo quantificar a influência do teor em cimento, da porosidade da mistura compactada e do teor em umidade de moldagem sobre a resistência de misturas solo-cimento e, também, verificar a validade do uso das relações água/cimento na estimativa da resistência à compressão simples, Foppa (2005) realizou ensaios de compressão simples onde incorporou cimento Portland de alta resistência inicial ao solo residual de arenito Botucatu classificado como areia fina. O autor concluiu que:

- a) A adição de cimento, mesmo em pequenas quantidades, promove ganhos significativos de resistência no material;
- b) A redução na porosidade do material compactado promove ganhos significativos de resistência à compressão, pois a porosidade afeta diretamente a resistência por alterar o

número de pontos de contatos entre as partículas e, por consequência, a magnitude da cimentação e a distribuição de tensões na amostra;

- c) A variação do teor de umidade de moldagem, mantendo-se constante o peso específico aparente seco da mistura, afeta a resistência à compressão simples do solo-cimento. De maneira geral, ocorre um aumento de resistência com o teor de umidade até um valor ótimo, a partir do qual a resistência passa a diminuir.

De acordo com Ingles e Metcalf (1972), a água necessária para a hidratação do cimento é de apenas cerca de 50 % do peso de cimento incorporado à mistura e:

- a) Não existe uma relação facilmente equacionável entre a resistência à compressão simples e a relação água/cimento para o material estudado;
- b) A relação vazios/cimento, definida pela razão entre a porosidade ( $n$ ) da mistura compactada e o teor volumétrico ( $C_{iv}$ ) de cimento, ajustado por um expoente  $[n/(C_{iv})^x]$ , mostrou-se adequada para a avaliação da resistência à compressão simples.

Os autores citados acreditam que este expoente é uma função do tipo de material utilizado (solo + cimento). Ainda segundo os autores, a relação vazios/cimento tem grande utilidade no projeto e controle da execução de camadas de solos tratadas com cimento.

Com base nos estudos desenvolvidos por vários pesquisadores relacionados à incorporação do cimento ao solo, sabe-se que o mesmo tem influência nos seguintes parâmetros: resistência à compressão simples e à tração diametral, rigidez inicial, módulos de deformabilidade, plastificação, deformação volumétrica, módulo de tensão/deformação, condutividade hidráulica e resistência ao ataque químico.

Segundo a ATIC (Associação Técnica da Indústria de Cimento) (1993) acrescentar quantidades de cimento ao solo é a maneira mais econômica de aumentar a capacidade de carga em camadas de pavimento sem que seja necessário aumentar a sua espessura evitando, portanto, a utilização de material natural de melhor qualidade.

O aumento da espessura ou a obtenção de material de melhor qualidade implicam em custos extras com transporte e custos devidos a movimentos de terra, além do aumento da duração da obra.

No tópico a seguir detalham-se os critérios desenvolvidos para determinar o teor eficaz de cimento a ser incorporado ao solo para uso da mistura resultante como material para camada de pavimento.

### 3 – DETERMINAÇÃO DO TEOR EFICAZ DE CIMENTO

No Brasil, de maneira geral, quando se deseja melhorar o comportamento mecânico de um determinado tipo de solo incorporando cimento ao mesmo, objetivando sua aplicação para camadas de pavimento, seja flexível ou rígido, principalmente se for camada de base, o engenheiro responsável analisa apenas o valor da resistência à compressão não confinada após sete dias de cura, que segundo a ABNT NBR 12253 (2012) deve ser de 2,10 MPa. Porém, estudos comprovam que apenas o respectivo parâmetro não garante desempenho satisfatório das camadas em longo prazo.

Para obter uma dosagem ótima de cimento num determinado tipo de solo, a ser utilizado como camada de pavimento, Scullion *et al.* (2005) recomendam o confronto entre os resultados dos teores obtidos com base no equilíbrio entre os critérios de quatro ensaios de desempenho relacionados com os ensaios de:

- Resistência à compressão não confinada;
- Retração;
- Resistência à abrasão;
- Suscetibilidade à umidade pelo TST (*Tube Suction Test*).

### 3.1 – Critério da resistência à compressão não confinada

Em 1935 a PCA começou um amplo estudo objetivando desenvolver um controle científico para obtenção de misturas de solo-cimento uniformes e mais duráveis com vários tipos de solos.

Observou-se que apenas o ensaio de compressão simples não era satisfatório para obter o melhor desempenho das misturas ao longo do tempo. Sendo assim, desenvolveu-se o ensaio de durabilidade para auxiliar os resultados do ensaio de compressão simples, embora o ensaio de durabilidade não fosse originalmente desenvolvido para determinar a quantidade de cimento nas misturas.

Posteriormente a PCA em conjunto com o Departamento de Transportes do Estado da Carolina do Sul desenvolveram correlações entre a resistência a compressão simples (RCS) e a durabilidade.

Contudo, os departamentos de transportes dos estados americanos preferiram adotar uma RCS mínima para um determinado tipo de solo ao invés de realizar o ensaio de durabilidade, uma vez que este último necessitava de mais equipamento e exigia um tempo de aproximadamente um mês para a sua realização.

Em resposta à necessidade de ensaios mais rápidos, a PCA desenvolveu para solos arenosos o chamado “*Ensaio de Atalho*”, que correlaciona a RCS *versus* durabilidade, dentro de uma faixa específica da fração granulométrica que passa na peneira N° 200 (abertura de 0,075 mm). O gráfico desta correlação encontra-se ilustrado na Fig. 1.

No respectivo gráfico observa-se que aproximadamente 95% de todas as amostras dos variados tipos de solos utilizados, com até 50% passando na peneira N° 200, satisfazem o critério da durabilidade ao adquirirem a RCS de 5,17 MPa. Porém, isto também significa dizer que, se se fixar o valor de 5,17 MPa como RCS de projeto para todas as obras, o mínimo teor de cimento incorporado será muito superior ao real teor necessário para que 95% das amostras satisfaçam o ensaio de durabilidade, ou seja, 95% dos materiais obtidos encontram-se “muito estabilizados” (Scullion *et al.*, 2005).

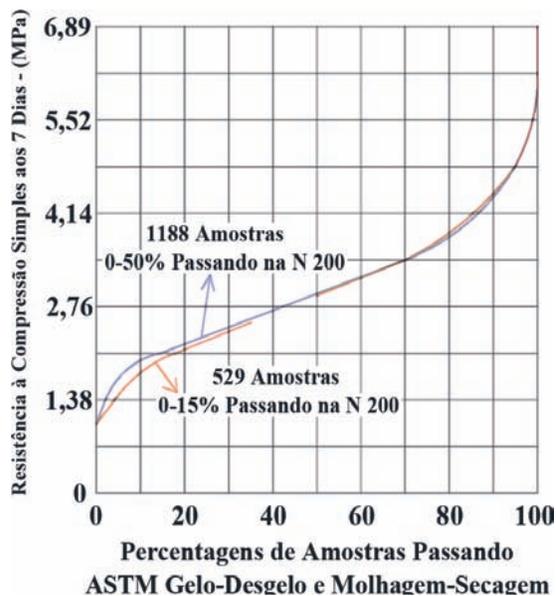


Fig. 1 – Relação entre resistência à compressão simples e durabilidade (Scullion *et al.*, 2005).

No período em que muitos desses padrões foram admitidos, o teor de cimento utilizado era muito elevado adotando-se dessa maneira uma prática muito conservadora para muitos solos ou agregados. O ensaio de durabilidade passou a ser visto como um parâmetro positivo, pois com mais cimento aumenta-se a resistência dos solos ou dos agregados e os mesmos tornavam-se mais duráveis.

No entanto, pesquisas mais recentes indicam que a alta resistência obtida após os 7 dias de cura na verdade pode ser prejudicial ao desempenho em longo prazo da mistura.

Determinar o teor “ótimo” de cimento hoje é visto como um ato de interação entre os teores necessários para satisfazer os critérios da resistência, durabilidade e também não atingir elevados teores de modo a não proporcionar o aparecimento de fissuras pelo processo da retração.

O aparecimento de fissuras em si não é tido, necessariamente, como um problema estrutural, mas muitas vezes proporciona a deterioração da estrutura por meio de um número exagerado de trincas e também porque leva a problemas secundários quando a umidade penetra nas camadas.

Em vários casos documentados observou-se uma desintegração total da camada de base provocada pela ação da umidade. A causa do aparecimento das fissuras foi bastante estudada entre os anos de 1960 e 1970. Por meio dos estudos desenvolvidos compreendeu-se que o aparecimento das fissuras está relacionado aos seguintes fatores: contração do agregado fino, quantidade de água utilizada no momento da homogeneização e falta de cura adequada (George, 1972).

Em 1971 a PCA desenvolveu uma abordagem sistemática para a determinação da quantidade de cimento a ser incorporado aos solos ou agregados para utilização da mistura resultante como camada de base para pavimento.

Na Fig. 2 ilustra-se a abordagem da respectiva sistemática. Nesta sistemática, a RCS e a durabilidade são os parâmetros principais para determinação do teor mais adequado de cimento.

Os ensaios de gelo-desgelo, ASTM D560-03 (2003), e molhagem-secagem, ASTM D559-03 (2003) são os ensaios recomendados para avaliar a durabilidade da mistura.

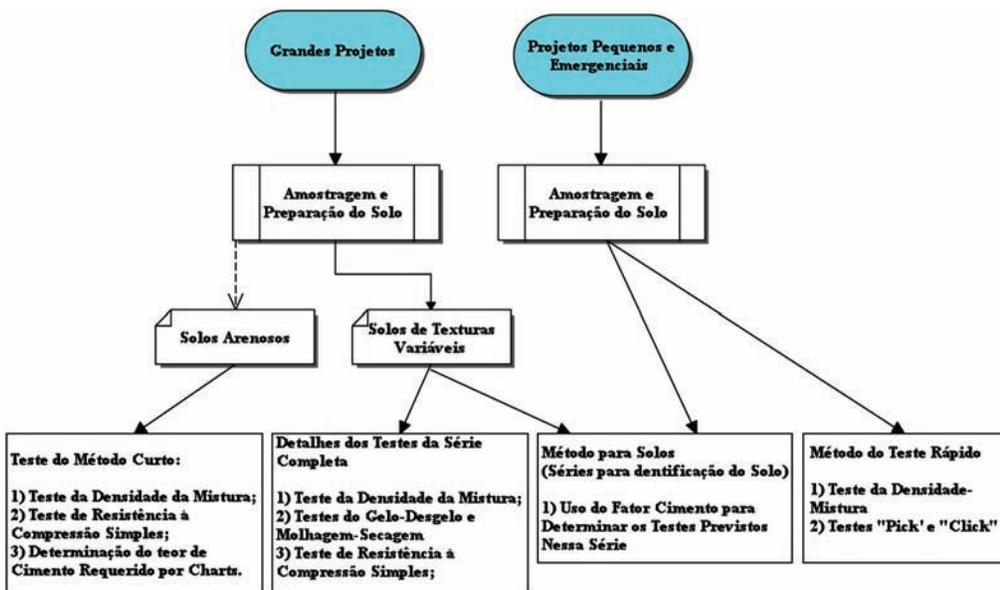


Fig. 2 – Métodos para ensaios de solo-cimento em laboratório (PCA, 1971 citado por Scullion *et al.*, 2005).

No Quadro 1 detalham-se os valores recomendados da perda de peso em percentagem após a realização do ensaio de durabilidade para cada tipo de solo. As exigências contidas no Quadro 1 aplicam-se apenas aos materiais cimentados voltados para a construção de camada de base de pavimento.

Foi sugerido por Epps *et al.* (1971) que os critérios de gelo-desgelo e molhagem-secagem não são adequados para avaliar a estabilização do leito do pavimento (fundação do pavimento), uma vez que o mesmo se encontra em profundidade maior de modo a não estar sujeito a estes ataques.

**Quadro 1** – Valores admitidos para perda de peso após a realização do ensaio de durabilidade (Scullion *et al.*, 2005).

Classificação dos Solos		Perda Máxima Admissível de Peso Após 12 Ciclos de Molhagem-Secagem ou Gelo-Desgelo
AASHTO	UNIFICADO	
A-1	GW, GP, GM, SW, SP e SM	14%
A-2-4 e A-2-5	GM, GC, SM e SC	
A-3	SP	
A-2-6 e A-2-7	GM, GC, SM e SC	10%
A-4	CL, ML	
A-5	ML, MH e OH	
A-6	CL e CH	7%
A-7	OH, MH e CH	

Os critérios adicionais que devem ser observados durante o ensaio de durabilidade são:

- 1) A máxima variação de volume durante a realização do ensaio mostra ser menor do que 2% do volume inicial;
- 2) A máxima quantidade de água requerida durante o ensaio mostra ser menor do que a quantidade de água requerida para saturar a amostra durante a etapa de moldagem;
- 3) A resistência à compressão mostra um incremento com a idade da amostra.

A resistência à compressão não confinada geralmente é definida de acordo com a norma ASTM D1633-00 (2003). No Quadro 2 detalham-se os valores recomendados das RCS em função do tempo de cura e dos tipos de solos utilizados na mistura.

**Quadro 2** – Faixas típicas de resistência à compressão não confinada para solo-cimento (Epps *et al.*, 1971).

Tipo de Solos e Classificação de acordo com os Grupos		Resistência à Compressão Simples Saturada	
		7 Dias	28 Dias
		(MPa)	(MPa)
Areia e Solos Grossos		2,07 - 4,14	2,76 - 6,89
AASHTO: A-1, A-2 e A-3	UNIFICADO: GW, GC, GP, GF, SW, SC, SP e SF		
Solos Siltosos		1,72 - 3,45	2,07 - 6,20
AASHTO: A-4 e A-5	UNIFICADO: ML e CL		
Solos Argilosos		1,38 - 2,76	1,72 - 4,14
AASHTO: A-6 e A-7	UNIFICADO: MH e CH		

O USACE (*United States Army Corps of Engineers*) também desenvolveu especificações de projeto para misturas de solo-cimento de acordo com os requisitos dos ensaios de durabilidade e resistência à compressão simples (ACI, 1990). Os valores recomendados pelo USACE para o ensaio de durabilidade e de resistência não confinada em função do tipo de solo visando à estabilização pela incorporação do cimento encontram-se apresentados, respectivamente, nos Quadros 3 e 4.

**Quadro 3** – Valores requeridos pelo USACE para perda de peso após a realização do ensaio de durabilidade (Scullion *et al.*, 2005).

Tipo de Solo	Perda Máxima Admissível de Peso Após 12 Ciclos de Molhagem-Secagem ou Gelo-Desgelo
Granular com IP < 10%	11%
Granular com IP > 10%	8%
Siltes	8%
Argilas	6%

**Quadro 4** – Valores de resistência à compressão simples recomendados pelo USACE.

Camada Estabilizada	Resistência Mínima Após Sete Dias	
	Pavimento Flexível (MPa)	Pavimento Rígido (MPa)
Base	5,171	3,447
Sub-base ou leito do pavimento	1,724	1,379

O Departamento de Transportes dos EUA baseava seus critérios de dimensionamento com base nas diretrizes da PCA. A lógica era que, se a resistência necessária à compressão simples era obtida, então os resultados do ensaio de durabilidade não seriam um problema.

Entretanto, na década de 1960, o departamento de transportes da Califórnia propôs uma resistência mínima para materiais de base no valor de 5,86 MPa ao fim de sete dias.

A experiência adquirida com essa resistência mínima foi que a alta resistência contribuiu para a existência de problemas graves na estrutura devido ao aparecimento do grande número de fissuras por retração.

Sendo assim, de acordo com Hitek (1998), a resistência mínima a compressão simples aos sete dias passou a ser reduzida do valor exigido pelo departamento. Naquele momento outras agências passaram a adotar os seus próprios valores, tais como:

- a) Departamento de Transportes do Texas – 3,45 MPa ou 4,82 MPa;
- b) Laboratório de Pesquisas de Transportes do Reino Unido – 1,72 MPa ou 2,76 MPa, dependendo do volume de tráfego;
- c) Força Aérea dos Estados Unidos – 2,07 MPa;
- d) Departamento de Transportes de Iowa – 3,10 MPa.

O Departamento de Transportes do Texas construiu vários quilômetros de estradas na década de 1960, com camada de base projetada para atender a resistência de 5,17 MPa. No entanto, em várias extensões das estradas construídas o desempenho obtido foi insatisfatório, principalmente por causa de graves problemas surgidos por fissuras desenvolvidas pelo fenômeno da retração.

Segundo Wimsatt (1998), nos últimos anos a RCS aos 7 dias para misturas de solo-cimento, visando a sua aplicação em camada de base de pavimentos rodoviários, tem sido no intervalo de 1,38 MPa a 2,07 MPa. Por isso na especificação da norma brasileira, ABNT NBR 12253 (2012) – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento - exige-se o valor de 2,1 MPa ao final de 7 dias de cura.

### **3.2 – Critério do fenômeno da retração**

Os problemas mais graves encontrados com misturas de solo-cimento estão relacionados com o aparecimento de fissuras por retração. Microfissurações distantes não são consideradas um problema estrutural, porém, quando essas fissuras aumentam em suas dimensões proporcionam um aumento na probabilidade de danificar a estrutura.

O aparecimento de grandes fissuras proporciona a degradação da estrutura através dos seguintes fatores:

- 1) Infiltração da água, que contribui para o bombeamento de finos da camada do leito do pavimento e, portanto, perda de apoio para a camada de solo-cimento acima deste;
- 2) Deterioração da camada de solo-cimento pela presença da umidade induzida o que contribui ainda mais para o aparecimento de fissuras ou trincas;
- 3) Redução da durabilidade da camada de solo-cimento por causa da perda de apoio no leito do pavimento;
- 4) Perda de bloqueio total da fissura, resultando em perda de continuidade do pavimento e redução da capacidade estrutural do mesmo.

A retração das misturas de solo-cimento resulta da perda de água por secagem e da auto-dessecação durante a hidratação do cimento. A magnitude e a taxa da retração do solo-cimento são influenciadas por diversos fatores, incluindo proporções das misturas e propriedades dos materiais.

Geralmente, os solos de granulometria mais fina apresentam maior retração do que os solos de granulometria mais grossa. O surgimento das fissuras ocorre quando do desenvolvimento da retração provocada pelas partículas constituintes do solo, desenvolvendo dessa maneira uma tensão de contração muito maior do que a resistência à tração da mistura.

Com base na literatura técnica, chegou-se à conclusão de que as variáveis que influenciam diretamente na redução do fenômeno da retração são:

- a) Seleção de materiais e formulação da mistura;
- b) Uso de aditivos químicos para retardar o endurecimento rápido da mistura solo-cimento;
- c) Modo de cura;
- d) Aplicação de técnicas de construção específicas.

### **3.3 – Seleção do tipo de material a ser estabilizado com cimento**

De acordo com Caltabiano e Rawlings (1992), o guia australiano de prática para aplicações de camada de base de solo-cimento foi alterado após realização de pesquisas e trabalhos de campo desenvolvidos em Queensland. As mudanças incluíram recomendações sobre a granulometria dos materiais bem como o uso do ensaio de retração linear como um indicador do potencial de retração. A pesquisa concluiu que para obter menor influência no fenômeno da retração os materiais deveriam apresentar as seguintes características:

- Índice de Plasticidade - máximo de 4%;
- Introdução de uma mistura de cimento-cinza;
- Percentagem de material passando no peneiro N° 200  $\leq$  7,0%;
- A retração linear do material de base tratado com cimento não deve exceder 250 microstrains após 21 dias.

### **3.4 – Seleção do tipo de cura**

Norling (1973) recomenda a aplicação do revestimento betuminoso sobre a superfície da camada de base apenas após um determinado período de cura da mesma, quando o aparecimento de fissuras em toda sua superfície torna-se visível. Essa recomendação contribui para uma menor tensão de contração na parte inferior do revestimento betuminoso evitando dessa maneira que as fissuras se prolonguem para o topo da superfície da camada betuminosa.

A redução da perda de umidade durante o processo de cura do solo-cimento, especialmente nos primeiros dias de cura, é importante para minimizar a retração e os problemas decorrentes do aparecimento de fissuras. Um processo de cura adequado evita um rápido ressecamento que provoca a retração e também promove o ganho de resistência por meio da hidratação do cimento.

Kuhlman (1994) recomenda que a cura de uma camada de base de solo-cimento recém construída deve ter aplicação de rega de cura com emulsão betuminosa e também permanecer sem passagem de tráfego durante o período mínimo de sete dias. Isto se deve ao fato de que a proteção com emulsão betuminosa evita a rápida evaporação da água contida na mistura reduzindo o ressecamento da camada.

O autor afirma que este é o melhor método para minimizar o aparecimento de fissuras por retração após as fases de compactação e acabamento da camada. Ele ainda recomenda a colocação do revestimento betuminoso sobre a camada de solo-cimento logo após 24 horas do término da conclusão da mesma.

### 3.5 – Procedimento de construção

De acordo com Williams (1986), para evitar que as fissuras da camada de solo-cimento se propaguem para as camadas betuminosas, a África do Sul, Novo México, Arizona e British Colúmbia construíram seus pavimentos inserindo uma camada granular entre a camada de solo-cimento e camadas betuminosas, embora este método não reduza o aparecimento de trincas na camada de base.

Vários trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de determinar um possível padrão de aceitação de fissuras em camadas de solo-cimento. Nesses estudos tem-se utilizado um tipo de serra que corta a superfície da camada cimentada em espaços regulares. Aplicando-se esse método foram observados vários relatos de resultados promissores. Este método é conhecido como indução de fissuração.

Entretanto, o espaçamento predeterminado entre os cortes para induzir as fissuras deve estar associado com a suficiente resistência à compressão, a rigidez da camada de solo-cimento, as condições para o desenvolvimento de tensão de contração e o correspondente potencial de fissuras.

O comportamento à fadiga da base de solo-cimento resultante da passagem do tráfego também deve ser considerado na avaliação do espaçamento ideal dos cortes.

Uma vez que pouco ou nada pode ser feito para evitar o aparecimento de fissuras por retração, é melhor induzi-las através da introdução de cortes realizados na superfície da camada como é regularmente feito com pavimentos de betão. Williams (1986) comentou que a realização de cortes na superfície da camada cimentada por serragem pode ter custo inviável.

De modo geral foi constatado que a indução de pré-fissuramento por corte tem contribuído para bons resultados. Sendo assim, de acordo com Litzka e Haslehner (1995) as agências austríacas deram início ao desenvolvimento do programa de pré-fissuramento na camada de solo-cimento logo no início do seu período de cura. Este tipo de pré-fissura pode ser induzido por qualquer tipo de tráfego após 24 horas da construção da camada ou por meio da passagem do rolo compactador entre 24 e 72 horas.

Litzka e Haslehner (1995) relataram que cinco passagens do rolo compactador contribuíram para um resultado satisfatório, desenvolvendo uma rede de microfissuração que eliminou o desenvolvimento de fissuras maiores por retração.

### 3.6 – Critério da durabilidade e abrasão

#### 3.6.1 – Ensaio da escova de fios de aço

Os dois procedimentos mais comumente recomendados para realizar o ensaio de durabilidade nas camadas de solo-cimento são o preconizado pela ASTM D559-03 (2003), para resistência a molhagem e secagem, e ASTM D560-03 (2003), para resistência ao congelamento e descongelamento.

De acordo com a ASTM D559-03 (2003), a perda de peso do material estabilizado com cimento através da escovagem por fios de aço é determinada após 12 ciclos de molhagem e secagem e uma técnica semelhante é utilizada por 12 ciclos de gelo-desgelo. No Brasil a norma utilizada para realizar o ensaio de durabilidade é a ABNT NBR 13554-03 (2012) que estabelece apenas seis ciclos de molhagem e secagem.

Em trabalhos desenvolvidos pela PCA observou-se que apenas cerca de 20% das amostras com resistência à compressão de 2,07 MPa satisfaziam o ensaio de durabilidade por gelo-desgelo, enquanto que cerca de 70% das amostras satisfaziam o ensaio quando apresentavam resistência à compressão de 3,45 MPa.

Foi observada correlação entre a resistência à compressão e a percentagem de amostras de laboratório passando nos ensaios de gelo-desgelo. Essa relação, ilustrada anteriormente na Fig. 1,

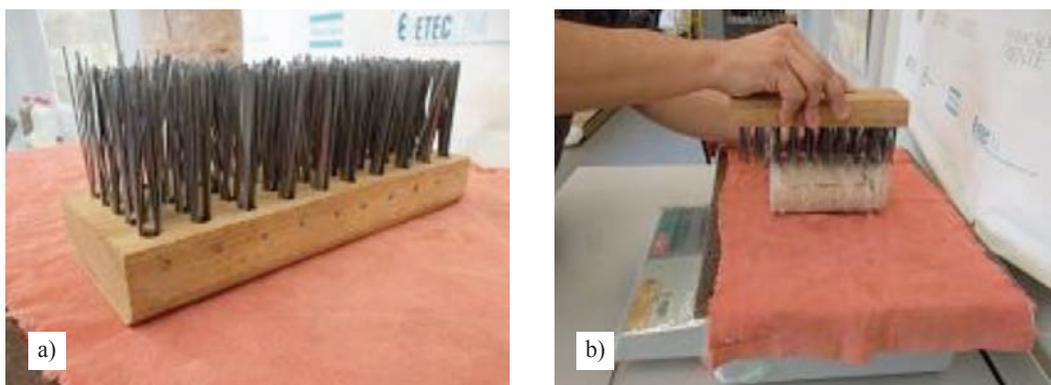
pode ser usada para selecionar o mínimo de resistência à compressão para conseguir determinado grau de proteção contra o gelo-desgelo.

No entanto, o dano provocado pelo efeito do gelo-desgelo é função dos vazios contidos na estrutura da matriz cimentícia e do nível de saturação presente, por isso a relação com a resistência pode ser tida como consequência inter-relacionada. Certos fatores que produzem maior resistência, tais como maiores teores de cimento e maior massa específica, também diminuem o tamanho dos poros e reduzem a permeabilidade. Isso faz com que a amostra torne-se mais difícil de saturar.

A maioria dos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem leva um tempo considerável para serem realizados (12 ciclos de molhagem e secagem demoram cerca de seis semanas para serem desenvolvidos).

Uma desvantagem adicional do ensaio de durabilidade por molhagem-secagem é que, embora se determine uma força específica de aplicação igual a 15 N, o processo de escovação é manual e depende do operador e das cerdas da escova (Fig. 3).

Um estudo desenvolvido por Samson (1986) demonstrou que a tentativa de reproduzir o processo da molhagem e secagem pelo método da escovação manual utilizada na África do Sul é deficiente devido ao fato da escovação ser inadequada por causa das técnicas adotadas por diferentes laboratórios.



**Fig. 3** – a) Detalhe da escova de aço padrão para realização do ensaio de durabilidade conforme ABNT NBR 13554 (2012); b) Detalhe do processo de escovação (Guedes, 2013).

### **3.6.2 – Ensaio de erosão / ensaio sul africano do rastro de roda**

De acordo com Van Wijk e Lovell (1986) nos Estados Unidos o ensaio da escova era o ensaio mais amplamente recomendado para determinação da durabilidade de materiais do tipo solo-cimento, no entanto, outros ensaios têm sido recomendados em todo o mundo. O ensaio do cisalhamento por rotação com água corrente é um exemplo.

Um excelente estudo dos pontos positivos e negativos do ensaio por rotação foi feito por De Beer (1989). Baseado nas limitações dos ensaios tradicionais, o autor relatou o desenvolvimento de um novo ensaio chamado de ensaio do afundamento de roda sul-africano para avaliação da erodibilidade de materiais pouco cimentados.

O objetivo do ensaio consiste em tentar simular de maneira mais realística as condições de tensão desenvolvidas na superfície da camada sob passagem de cargas pesadas de veículos de carga. Detalhes do ensaio assim como o critério de avaliação atribuído encontram-se ilustrados nas Figs. 4 e 5.

O objetivo do ensaio do afundamento de roda consiste em verificar se os materiais de granulometria fina são suscetíveis à erosão, para que dessa maneira seu uso possa ser evitado ou se

necessário esta característica seja modificada. Neste ensaio, três amostras retangulares encontram-se submersas em água e cobertas com uma membrana de neoprene áspera. Cada membrana tem uma textura igual ao de uma lixa que proporciona um contato rugoso.

Uma roda de massa igual a 17,775 kg com borda chanfrada é aplicada em cima da membrana, e, logo em seguida, inicia-se o processo de passagem sobre a mesma de modo a percorrer todo o comprimento da amostra. Em seguida, após 5000 repetições, realiza-se a medida da profundidade, por meio da leitura de quinze pontos, da erosão provocada pelo afundamento da trilha desenvolvida na superfície da amostra.

O índice de erosão é expresso como a média da profundidade obtida para as três amostras ensaiadas. Este ensaio simula a ação da erosão real que ocorre na camada de base estabilizada quando na presença da água.

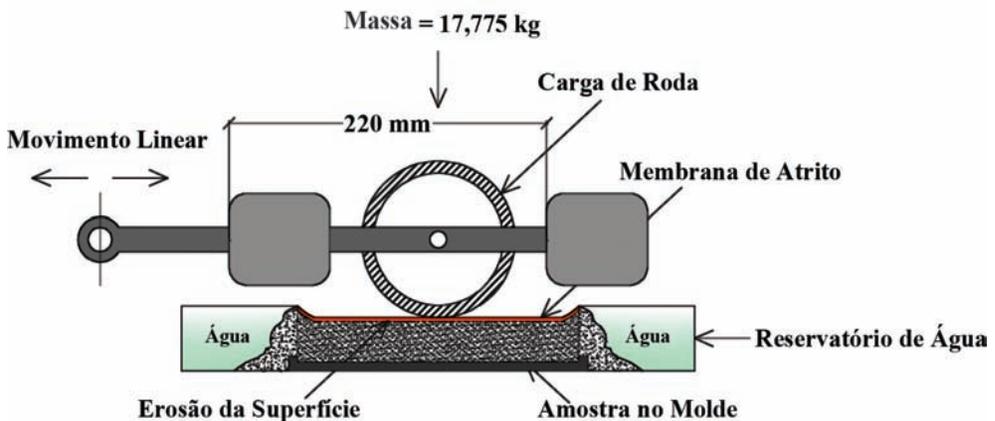


Fig. 4 – Exemplo do ensaio de rastro de roda sul-africano (De Beer, 1989).

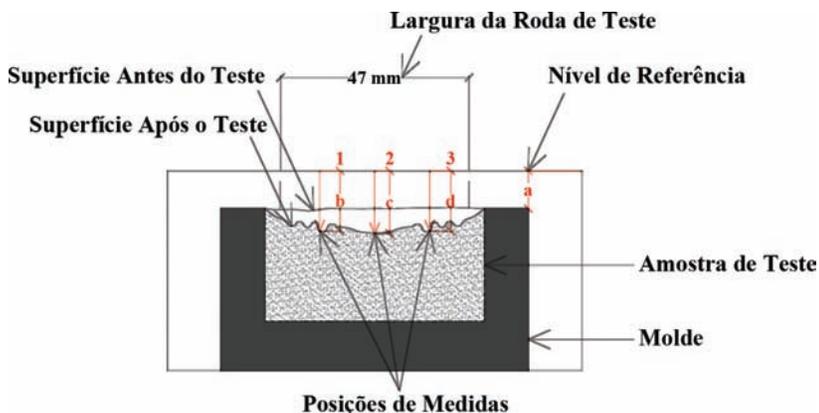


Fig. 5 – Medidas da erosão no ensaio de afundamento de trilha de roda (De Beer, 1989).

### 3.7 – Critério de suscetibilidade à umidade

A maioria dos problemas relacionados com a deterioração das camadas estabilizadas com cimento encontra sua origem na influência da umidade. Em vários casos, essas reações estão associadas com a penetração da água e seu movimento no interior da camada estabilizada.

Quando a umidade penetra nas fissuras da camada cimentada e se acomoda em seu interior desenvolve a degradação acelerada da base por lixiviação das partículas finas (neste caso o cimento) contribuindo para formação de uma estrutura menos estável.

A presença desta umidade, associada com a carga mecânica cíclica, contribui ainda mais para o processo de degradação da camada. Em alguns estudos foi observado que a umidade aprisiona-se dentro da camada de solo-cimento devido ao fato de se utilizar um material contendo muita argila ou pela utilização de um agregado graúdo com alta capacidade de absorção. Para avaliar este aspeto foi desenvolvido o ensaio de tubo de sucção.

O Departamento de Transportes do Texas avaliou um novo procedimento de ensaio para identificar problemas decorrentes dos agregados utilizados nas camadas de base. Scullion e Saarenketo (1997) propuseram um ensaio para identificar o baixo desempenho provocado pela desestabilização dos materiais de base por meio da medição de ascensão capilar e do valor da constante dielétrica, designado por ensaio TST.

Um exemplo do ensaio TST é ilustrado na Fig. 6 (b). Trata-se de uma amostra compactada na umidade ótima em um molde cilíndrico de betão cujas dimensões são  $0,15 \times 0,20$  metros e que contém em sua base uma série de pequenos furos. A amostra é levada para uma sala de temperatura  $40^{\circ}\text{C}$  onde deve permanecer por vários dias até secar e a partir de então se inicia o processo de monitoração da umidade devido à ascensão capilar por meio de um aparelho que mede a constante dielétrica na superfície da amostra. As medidas realizadas na superfície da amostra correlacionam-se com o valor da sucção de água por forças capilares na matriz da amostra.

São os minerais constituintes das partículas finas que proporcionam maior reação com a água. A constante dielétrica correlaciona-se com a umidade que ascende no interior da amostra. É esta umidade de ascensão ou “livre” que é responsável pelo baixo desempenho da camada quando sujeita a sollicitação do tráfego e também pela fraca resistência às ações cíclicas do gelo-desgelo.

Estudos foram realizados no Texas e na Finlândia com o objetivo de relacionar o desempenho em laboratório e no campo dos materiais classificados pelo ensaio TST. Estudos realizados em laboratório por Scullion e Saarenketo (1997) concluíram que os materiais que foram mal classificados pelo TST também apresentam baixa capacidade de carga pelo seu módulo de resiliência e as propriedades relacionadas à deformação permanente. Além disso, Guthrie e Scullion (2000) comentam que os materiais que tiveram uma classificação não satisfatória pelo TST também foram altamente suscetíveis aos danos do congelamento.

Com base nos estudos desenvolvidos no Texas e na Finlândia, foram estabelecidos critérios experimentais para o material da camada de base, tais como: se a constante dielétrica excede o valor 10 esse material possivelmente não terá comportamento satisfatório sob ações das cargas de tráfego pesado em áreas que são sujeitas ao fenômeno cíclico de gelo-desgelo. Se a constante dielétrica ultrapassar o valor 16 recomenda-se uma estabilização química.

O TST foi modificado e ampliado para realização de ensaios em materiais estabilizados quimicamente para uso em camada de base. No procedimento modificado, as amostras dos materiais estabilizados são primeiramente curadas durante sete dias antes de ir para a secagem. Em seguida, as amostras são colocadas em  $0,03$  m de água deionizada para poder começar o ensaio.

Trabalhos desenvolvidos pelo Departamento de Transportes do Texas associaram os resultados do TST com o baixo desempenho das bases estabilizadas quimicamente. Se a umidade pode influenciar na camada estabilizada quimicamente através das fissuras superficiais ou de camadas dos leitos dos pavimentos saturados, então pode ocorrer deterioração.

Devido à natureza metaestável de muitos dos minerais associados com os produtos químicos de estabilização, o movimento da água pode lixiviar os metais alcalinos e alcalino-terrosos, diminuindo, portanto, a resistência do material estabilizado.

Por exemplo, o hidróxido de cálcio é um dos principais constituintes dos materiais estabilizados tanto com o cimento quanto com a cal, e tem solubilidade muito elevada na presença da água pura,

podendo facilmente ser lixiviado de forma muito rápida. Uma vez que a água evapora, íons em solução começam a precipitar como sais solúveis (por exemplo, o gesso).

A suscetibilidade de materiais estabilizados quimicamente quando da entrada de umidade não é abordada nos métodos e especificações existentes. Pesquisas desenvolvidas por McCallister e Petry (1991), Scullion e Harris (1998) e Syed e Scullion (1998a), comentam que se água pode migrar numa camada de base quimicamente estabilizada, então, as reações químicas podem ser modificadas.

Às vezes essa reação pode levar a reversão de estabilização. Syed e Scullion (1998b) comentam que a migração da água internamente à base de solo-cimento causou lixiviação apenas do cimento na matriz restando apenas os agregados limpos. Um estudo foi realizado para correlacionar o TST e o ensaio da escova para avaliar durabilidade do solo-cimento (Syed, 2000).

Observou-se que existe uma forte correlação entre os dois métodos de ensaio. Em seus estudos, Syed (2000) variou o tamanho das amostras e concluiu que a melhor correlação foi obtida para a amostra de 0,10 metros de diâmetro por 0,11 metros de altura (Figura 6c).

O simples fato de a água poder migrar através da matriz dos materiais estabilizados quimicamente é suficiente para iniciar o desenvolvimento de compostos químicos secundários. Muitas vezes, esses compostos secundários são prejudiciais para as camadas estabilizadas do pavimento, o que as leva a uma perda de resistência e consequente deterioração rápida.

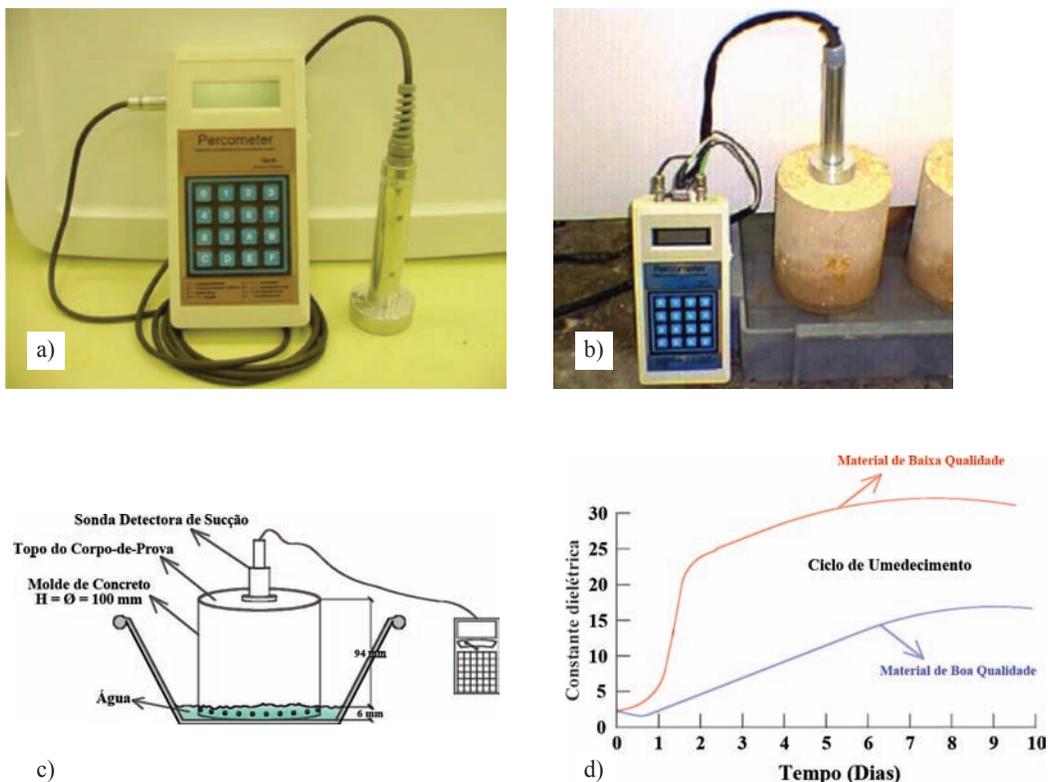


Fig. 6 – a) Equipamento de medição dielétrica; b) Exemplo de medição de constante dielétrica em corpo de prova; c) Sistema de ensaios; d) Resultados típicos (Guedes, 2013).

#### 4 – SÍNTESE DOS ASPECTOS MAIS RELEVANTES ABORDADOS

Após as descrições das técnicas citadas, verifica-se claramente que apenas os ensaios de resistência à compressão simples e durabilidade não são suficientes para analisar o real comportamento de uma mistura estabilizada com cimento.

Para obter uma dosagem ótima de cimento num determinado tipo de solo ou agregado, a ser utilizado como camada de pavimento, Scullion *et al.* (2005) recomendam o confronto entre os resultados dos teores obtidos com base nos critérios de quatro ensaios de desempenho, são eles:

- Resistência à compressão não confinada;
- Retração;
- Resistência à abrasão;
- Susceptibilidade à umidade pelo TST (*Tube Suction Test*).

Entretanto, chamamos atenção para o fato de que, no Brasil, o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (ABNT NBR 13554, 2012) encontra-se praticamente em desuso, pois foi verificado que, quando a mistura solo-cimento atinge o valor de 2,1 MPa de resistência à compressão simples, a perda de massa, para seis ciclos de molhagem e secagem, sempre admite valor inferior ao mínimo especificado pelo USACE, ou seja, o ensaio de durabilidade é satisfeito.

Além do mais, o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem leva um tempo de duas semanas para sua realização, além de ser bastante trabalhoso. Uma desvantagem adicional do referido ensaio é que, embora se determine uma força específica de aplicação igual a 15 N, o processo de escovação é manual e depende do operador e das cerdas da escova.

Em seu trabalho, Guedes (2013) tinha como objetivo desenvolver uma mistura envolvendo solo, cimento e fibras de polipropileno, para uso como revestimento primário em estradas não pavimentadas. Em seu estudo, o autor variou o tamanho das fibras (6 e 24 mm) e o teor das mesmas (0,25, 0,50 e 0,75%) em relação à mistura de solo + 5% de cimento. O mesmo realizou uma significativa quantidade de ensaios de compressão simples e durabilidade e verificou que, por fixar o valor da RCS igual a 2,1 MPa para todos os tipos de misturas desenvolvidas, também todos os resultados obtidos para os ensaios de durabilidade foram satisfeitos.

Entretanto, Guedes (2013) chama atenção para o fato de que essa condição apenas é satisfatória se e somente se o número de ciclos de molhagem e secagem for apenas seis, como determina a norma NBR 13554 (2012). Para o caso de doze ciclos, como determina a norma ASTM D559-03 (2003), seria necessário realizar outra análise.

Apesar de tentar reproduzir a ação das intempéries em mistura contendo cimento, o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, já deveria ter sido substituído pelo ensaio de afundamento de roda Sul-Africano, pois este último tenta simular de maneira mais realística as condições de tensão desenvolvidas na superfície da camada sob passagem de cargas desenvolvidas pelas rodas dos veículos. O objetivo do ensaio consiste em verificar se os materiais de granulometria fina são suscetíveis à erosão, para que dessa maneira seu uso possa ser evitado ou se necessário, esta característica seja modificada, ou seja, o material seja estabilizado de maneira mais eficaz.

Por último, para complementar as análises dos estudos envolvendo o comportamento de materiais estabilizados com cimento para pavimentação, deve ser realizado de maneira indispensável a análise da suscetibilidade a umidade por meio do ensaio do tubo de sucção TST (*Tube Suction Test*), o qual caracteriza o comportamento estrutural do material estabilizado em função da relação existente entre o valor de sua ascensão capilar e sua constante dielétrica (medida por meio da sucção), pois a maioria dos problemas relacionados com a deterioração das camadas estabilizadas com cimento encontra sua origem na influência da umidade.

Quando a umidade penetra nas fissuras da camada cimentada e se acomoda em seu interior desenvolve a degradação acelerada da base por lixiviação das partículas finas (neste caso o

cimento) contribuindo para formação de uma estrutura menos estável. A presença desta umidade, associada com a carga mecânica cíclica, contribui ainda mais para o processo de degradação da camada. Em alguns estudos foi observado que a umidade aprisiona-se dentro da camada de solo-cimento devido ao fato de se utilizar um material contendo muita argila ou pela utilização de um agregado graúdo com alta capacidade de absorção.

Por fim, realizando uma análise cuidadosa dos resultados obtidos nos ensaios descritos acima, com exceção do ensaio de durabilidade, e relacionando os resultados obtidos dos mesmos, determina-se um teor mais econômico e eficiente de cimento ao solo ou agregado a ser utilizado para obras de pavimentação. Entretanto, deve-se chamar atenção para o fato de, para se adquirir um melhor desempenho do material cimentado como estrutura de pavimento, apenas os ensaios desenvolvidos e as análises dos resultados não são suficientes para garantir um bom desempenho do material na estrutura a qual se destina. Fatores tais como procedimento de construção, tipo de cura, tipo de material a ser estabilizado e o fenômeno da retração, possuem influência significativa no comportamento mecânico da mistura cimentada ao longo do seu funcionamento.

Por meio da divulgação do presente trabalho, os autores esperam que o teor ótimo de cimento a ser incorporado nas camadas de base, sub-base e de reforço do leito do pavimento, seja realizada de maneira racional levando em consideração a análise dos fatores de influência descritos no presente artigo.

Também se espera que a divulgação do respectivo trabalho sirva para incentivo científico de novas técnicas de determinação do teor eficaz de cimento, assim como para outros tipos de produtos usados para melhoramento do comportamento mecânico dos solos, para aplicação em diversas obras da engenharia civil.

## 5 – AGRADECIMENTOS

O primeiro autor manifesta o seu agradecimento ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, à FACEPE, ao CNPq e aos professores orientadores do presente trabalho.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 12023 (2012). *Solo-Cimento – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro. 7 p.

ABNT NBR 12253 (2012). *Dosagem para camada de pavimento – Procedimento*. Rio de Janeiro. 3 p.

ABNT NBR 13554 (2012). *Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 4 p.

ACI (1990). *State-of-the-Art Report on Soil Cement*, ACI Committee 230. ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 4, pp. 395-417.

Alcântara, M.A.M. (1995). *Estabilização química dos solos para fins rodoviários: técnicas disponíveis e estudo de caso dirigido à estabilização solo-cal de três solos de Ilha Solteira-SP*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Viçosa. 91 p.

ASTM D 559-03 (2003). *Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures*.

ASTM D 560-03 (2003). *Standard test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures*.

- ASTM D 1633-00 (2003). *Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders*. 4 p.
- ATIC-Associação Técnica da Indústria do Cimento (1993). *Estradas de Solo-Cimento*. Boletim Técnico N° 13.
- Branco, F.; Pereira, P.; Santos, L.P. (2008). *Pavimentos Rodoviários*. Coimbra: Almedina.
- Caltabiano, M.A.; Rawlings, R.E. (1992). *Treatment of reflection cracks in Queensland*. 7th International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, England.
- De Beer, M. (1989). *Aspects of erodibility of lightly cementitious materials*. Research Report DPVT 39, Roads and Transport Technology, CSIR, South Africa.
- Epps, J.A.; Dunlap, W.A.; Gallaway, B.M. (1971). *Basis for the development of a soil stabilization index system*. USAF Technical Report, AFWL-TR-70-176, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland AFB, NM.
- Feuerharmel, M.R. (2000). *Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 152 f.
- Foppa, D. (2005). *Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica dos solos artificialmente cimentados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 146 f.
- George, K.P. (1972). *Mechanism of shrinkage cracking in soil-cement bases*. Highway Research Record, v. 442, pp. 1-21.
- Guedes, S.B. (2013). *Estudo do comportamento mecânico de um solo-cimento microrreforçado com fibras sintéticas para uso como revestimento primário em estradas não-pavimentadas*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 515 f.
- Guthrie, W.S.; Scullion, T. (2000). *Assessing aggregate strength and frost susceptibility characteristics with the TST*. Paper presented at the Texas ASCE meeting, El Paso, TX.
- Hitek Consultants (1998). *Minimizing cracking in soil cement for improved performance*. Technical Memorandum, prepared by Hitek Engineering Consultants Inc. for PCA, Oxford, MS.
- Ingles, O.G.; Metcalf, J.B. (1972). *Soil Stabilization: Principles and Practice*. New York - Toronto, 374 p.
- Kuhlman, R.H. (1994). *Cracking in soil cement - cause, effect, control*. Concrete International, pp. 56-59.
- Lima, D.C.; Bueno, B.S.; Silva, C.H.C. (1993). *Estabilização dos Solos II: Técnicas e Aplicações a Solos da Microrregião de Viçosa*. Viçosa: UFV. 32 p.
- Litzka, J.; Haslehner, W. (1995). *Cold in-place recycling on low volume roads in Austria*. Proceedings of the Sixth International Conference on Low Volume Roads, Minnesota, June.
- McCallister, L.D.; Petry, T.M. (1991). *Physical property changes in a lime-treated expansive clay caused by leaching*, Transportation Research Record, 1295, pp. 37-44.

- Norling, L.T. (1973). *Minimizing reflective cracks in soil-cement pavements: a status report of laboratory studies and field practices*. Highway Research Record 442, HRB, Washington D.C.
- Pereira, R.S. (2005). *Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais*. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 329 f.
- Portland Cement Association. (1960). *Subgrades, Sub-Bases and Shoulders for Concrete Pavement*. Skokie. 5 f.
- Samson, L.R. (1986). *A study of the precision limits of wet/dry brushing durability test for cement-stabilized materials*. Technical Report RP/26, NITRR, CSIR, South Africa.
- Scullion, T.; Sebesta, S.; Harris, J.P.; Syed, I. (2005). *Evaluating the performance of soil-cement and cement-modified soil for pavements: a laboratory investigation*. Illinois: Portland Cement Association. 142 p.
- Scullion, T.; Saarenketo, T. (1997). *Using suction and dielectric measurements as performance indicators for aggregate base materials*, Transportation Research Record, 1577, pp. 37-44.
- Scullion, T.; Harris, P. (1998). *Forensic evaluation of three failed cement treated base pavements*, Transportation Research Record, 1611, pp. 10-18.
- Senço, W. (2001). *Manual de Técnicas de Pavimentação*. 1. ed. São Paulo: PINI. v. 2.
- Syed, I. Scullion, T. (1998a). *Performance indicator for moisture susceptible stabilized base material in pavements*. American Society of Civil Engineers, Texas Section Meeting, USA.
- Syed, I.; Scullion, T. (1998b). *In-place engineering properties of recycled and stabilized pavement layers*. Report 3930-S, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, TX.
- Syed, I. (2000). *Moisture movement in cement-stabilized base materials*. Ph.D. Thesis, Texas A&M University, College Station, TX.
- Van Wijk, A.J.; Lovell, C.W. (1986). *Prediction of Subbase Erosion Caused by Pavement Pumping*. Transportation Research Record No. 1099, USA.
- Williams, R.I.T. (1986). *Cement Treated Bases: Materials, Design and Construction*, Elsevier Publishers, Ltd.
- Wimsatt, A. (1998). *TxDOT Fort Worth District Pavement Design Engineer*, Private Communication.