

RDT

RECURSO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO



RELATÓRIO FINAL

RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND



Outubro/2016

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	2
2 COMPATIBILIDADE DO PAVIMENTO PARA FINS DE RECICLAGEM COM CIMENTO	4
3 PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM PARA MISTURAS RECICLADAS COM CIMENTO	13
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
EQUIPE EXECUTORA	23
APÊNDICE I.....	24

1 INTRODUÇÃO

O Projeto de Pesquisa RDT – Ecorodovias/ANTT, intitulado “Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland”, foi desenvolvido nos últimos dois anos com a finalidade de desenvolver e fornecer ao meio técnico (DNIT, DERs, Consultores e Construtores) documentação (manuais, normas e procedimentos) sobre a tecnologia de reciclagem *in situ* ou em usina de pavimentos asfálticos com adição de cimento Portland.

Para cumprir com o proposto, o projeto foi dividido em quatro etapas, conforme fluxograma da Figura 1.

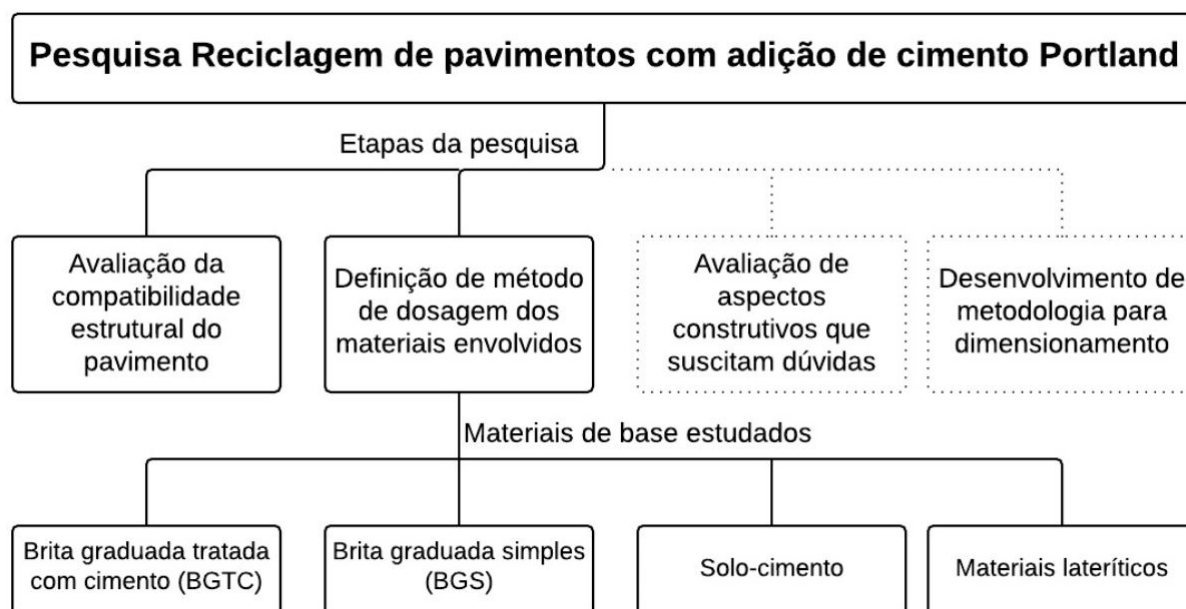


Figura 1 – Etapas da pesquisa global com destaque para o enfoque desta pesquisa

As Etapas que foram propostas para serem desenvolvidas durante esses dois anos de pesquisa correspondem àquelas com linha contínua e consistiram em:

- Etapa I - Análise de compatibilidade estrutural do pavimento existente para fins de reciclagem;
- Etapa II - Dosagem de materiais para emprego em reciclagem com adição de cimento.

Como objetivos da Etapa I destacam-se: disponibilização de diretrizes para a adoção da reciclagem em projetos; orientação de fundamentação teórica para respaldar e escolha da técnica e possibilidade de relação entre o nível de degradação do pavimento e a necessidade de reciclar. Para sua realização, seriam necessárias avaliações visando identificar parâmetros que apontem a reciclagem como técnica mais adequada para restauração.

Os objetivos da Etapa II compreenderam o desenvolvimento de um método de dosagem de materiais reciclados com cimento, além da fundamentação teórica para embasar o procedimento sugerido. A metodologia recomendada foi composta de estudo laboratorial com moldagem de corpos de prova para analisar arranjos (moldagem, cura e rompimento) que constituem o processo de dosagem e posterior análise estatística.

Este relatório, o qual compreende os resultados finais do projeto, está dividido em duas seções: Etapa I e Etapa II. Em apêndice, apresenta-se uma proposição de norma sobre dosagem de misturas cimentadas para reciclagem de pavimentos. A partir deste, busca-se responder a todas as questões propostas para a presente pesquisa.

2 COMPATIBILIDADE DO PAVIMENTO PARA FINS DE RECICLAGEM COM CIMENTO

A *Portland Cement Association* (PCA, 2010) indica que a aplicação da técnica de reciclagem com cimento é mais apropriada para as seguintes situações:

- a) O pavimento existente está seriamente degradado e não pode ser reabilitado com um simples recapeamento;
- b) Os defeitos no pavimento indicam que o problema possivelmente está localizado na base ou na sub-base;
- c) É necessária a aplicação de remendos profundos em mais de 20% da área total do pavimento, para que possam ser sanados os defeitos existentes;
- d) A estrutura do pavimento é inadequada para o atual ou futuro tráfego.

Entretanto, existem outras questões que devem ser analisadas para confirmar a compatibilidade estrutural do pavimento para fins de reciclagem com adição de cimento Portland. A Figura 2 apresenta um fluxograma, elaborado pela Austroads (2002), visando este tipo de avaliação para fins de estabilização e reciclagem.

A seguir são apresentadas notas, elaboradas pela Austroads (2002), acerca do fluxograma da Figura 2 (estas notas procuram esclarecer dúvidas a respeito do procedimento e estão relacionadas com as etapas do fluxograma através de legendas):

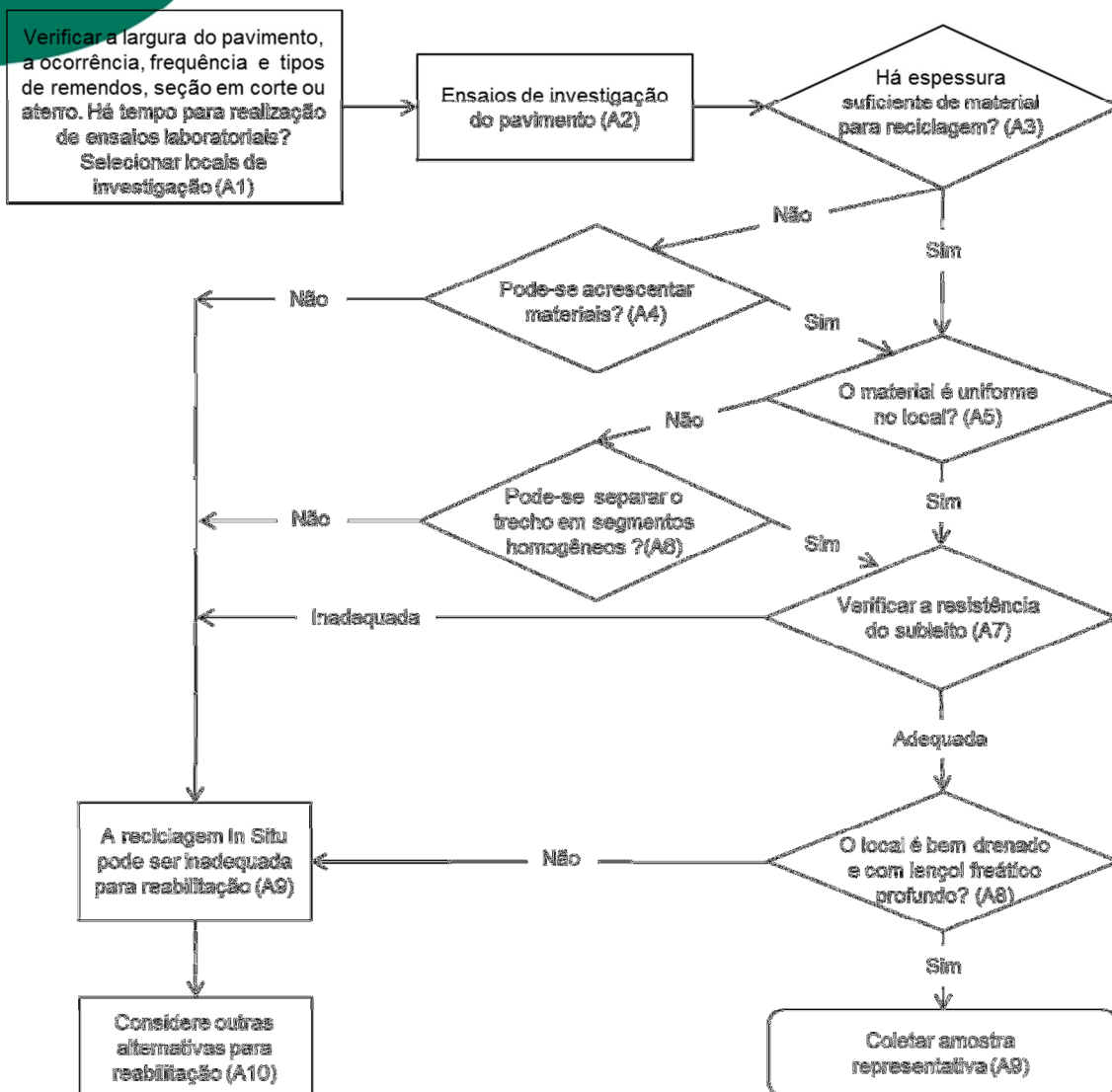


Figura 2 – Fluxograma para avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem (fonte: baseado em AUSTROADS, 2002)

- a) A1: os locais do pavimento selecionados para investigação devem ser definidos através de dados históricos e, caso seja possível, dados provenientes da utilização de georradars ou de cone de penetração dinâmica (DCP), complementados com aberturas de poços de inspeção. Após a seleção dos trechos, indica-se a realização de medições das deflexões através de FWD (*Falling Weight Deflectometer*), viga Benkelman ou LWD (*Light Weight Deflectometer*).

- b) A2: devem-se selecionar quantidades suficientes dos materiais constituintes do pavimento para realização *in situ* de ensaios relevantes para o programa de investigação, como análise granulométrica, índice de plasticidade e Índice de Suporte Califórnia (ISC) *in situ*. Isto é facilitado pela abertura de poços de inspeção. Nesta etapa também se deve verificar se a recicladora realiza uma adequada trituração do material.
- c) A3: quando não há material de base suficiente para realização da reciclagem, pode-se optar pela utilização do material da sub-base em conjunto. Esta prática é interessante principalmente quando o material da sub-base é de má qualidade, o que torna esse material adequado para reciclagem, devido à melhora obtida no seu comportamento. Salienta-se que na reciclagem tanto a incorporação de base quanto de sub-base deve ser plena, pois o processo degrada a(s) camada(s) existente(s).
- d) A4: a adição de materiais virgens (inclusive de finos) à mistura é condicionada à possibilidade de mudança de geometria da pista. Além disso, deve-se verificar se a faixa granulométrica da mistura após a adição de material ainda é adequada para reciclagem. A impossibilidade de acrescentarem-se novos materiais pode inviabilizar a reciclagem.
- e) A5: verifica-se principalmente a similaridade na granulometria dos materiais locais, em termos de teor de umidade e na aparência física. Esta etapa é mais importante para a reciclagem *in situ* do que para aquela realizada em usina.
- f) A6: a divisão do trecho em segmentos homogêneos pode ser realizada através da análise da estrutura do pavimento existente, do tipo de material, da espessura das camadas e da resistência do subleito, considerando-se ainda os resultados de levantamentos defletométricos.
- g) A7: a norma australiana indica que para o subleito ser capaz de suportar os esforços de compactação (necessários para que a camada estabilizada atinja a densidade especificada), esse necessita de um ISC mínimo de 5%. Entretanto, como a maioria dos subleitos brasileiros apresenta capacidade de suporte mais elevada, este valor mínimo poderá ser revisto.

Comentários adicionais: Para não comprometer a vida de fadiga da camada reciclada, é de extrema importância evitar relações modulares (quociente entre os módulos de deformação elástica da camada reciclada e do subleito) muito elevadas. Como, ao natural, os módulos das camadas recicladas com cimento são elevados, é fundamental que o subleito não seja muito deformável. O ensaio de ISC (ou CBR) não fornece qualquer informação sobre a deformabilidade elástica e isto deverá ser adequadamente avaliado através de retroanálise de bacias deflectométricas, podendo-se empregar métodos simplificados, que dão uma estimativa com acurácia significativa do módulo do subleito.

Ainda, na presença de subleito deformável, é imperativo o emprego de camadas recicladas espessas (soma de espessuras de camadas recicladas não inferior a 25 cm) de forma a minimizar as tensões atuantes nas fibras inferiores das mesmas, o que resultará em baixas deformações de extensão (ou tração) associadas. Em um primeiro momento, seguindo a experiência sul-africana, pode-se limitar a deformação de extensão na fibra inferior da camada tratada com cimento em $50 \mu\text{strain}^1$.

- h) A8: se o local não for bem drenado e não houver a possibilidade de se instalar a devida drenagem, a execução da reciclagem não é indicada. A dificuldade de instalar dispositivos de drenagem é mais comum quando a reciclagem é feita *in situ*, sem remoção prévia das camadas de revestimento, base e eventualmente sub-base.

Comentários adicionais: Quando o lençol freático está próximo à superfície, ou ainda em trechos em corte ou seção mista, a água poderá atingir a camada reciclada com cimento. Se a camada reciclada não apresentar materiais sensíveis à umidade, a reciclagem com cimento ainda poderá ser considerada como medida restauradora. Em princípio, as britas graduadas não são sensíveis à umidade (embora sua saturação cause efeitos nefastos ao pavimento); isto é, não expandem na presença de água. Contudo, é possível que na brita graduada tenham sido incluídos agregados pétreos com algum teor de finos expansivos.² Os ensaios de absorção e de expansão, incluídos na norma

¹ $1 \mu\text{strain} = 10^{-6} \text{ m/m}$.

² Embora seja obrigatória a realização de ensaios de sanidade aos sulfatos e de Equivalente de Areia na caracterização de materiais de bases granulares e de misturas asfálticas, não é descartada inteiramente a presença de algum teor, mesmo que baixo, de argilo-mineral expansivo, especialmente em rochas ígneas extrusivas (especificamente o basalto).

australiana como opcionais, parecem nesses casos (trechos com LF próximo ao pavimento ou com seção em corte ou mista) recomendáveis.

- i) A9: a partir dos dados obtidos na investigação, verifica-se se a reciclagem é ou não adequada para a reabilitação do pavimento. Caso a resposta seja positiva, devem-se coletar um volume adicional de materiais do pavimento para realização de um projeto de dosagem adequado em laboratório.
- j) A10: caso a reciclagem não seja recomendável, é indicado considerar a utilização de outras técnicas para a reabilitação do pavimento.

COMENTÁRIOS COMPLEMENTARES DECORRENTES DE ANÁLISES DE DOCUMENTOS FRANCESES

Casos em que a reciclagem in situ é desaconselhada

No documento francês *Guide technique – Retraitement em place à froid des anciennes chaussées* (SETRA, 2003) estabelece-se que a reciclagem *in situ* com cimento não pode ser realizada em caso de:

- a) haver na camada a ser reciclada blocos (calçamento), estruturas de concreto ou materiais excessivamente graúdos, que possam obstaculizar a circulação do trem de reciclagem. As tecnologias atuais permitem a reciclagem *in situ* de materiais com dimensões inferiores a 80 mm;
- b) presença de produtos que possam interferir na pega do cimento ou que causem expansão (nitratos, sulfatos, cloretos e matéria orgânica).

Sobre a sondagem do pavimento existente

De acordo com o mesmo documento, as sondagens devem ser realizadas preferencialmente por meio de escavação de trincheiras, atravessando uma faixa de rolamento, com um número mínimo de 1 sondagem a cada 500 m de pavimento a reciclar, e com menor espaçamento (por exemplo 1 sondagem a cada 200 m) se a estrutura for heterogênea.

Deve-se coletar cerca de 100 kg de materiais para a realização de análises granulométricas de fragmentos com dimensão inferior a 80 mm e verificar seu enquadramento na faixa granulométrica da norma NF EN 13-285. Caso a curva granulométrica dos materiais não se enquadre na referida faixa, pode proceder-se à correção, através do aporte de novos materiais que corrijam a granulometria.

Prevê-se igualmente a determinação do teor de argila e sua atividade (expansão) contida nos materiais. Para tal podem ser realizados os seguintes ensaios:

- Índice de Plasticidade (IP) ou
- Valor de Azul de Metileno- V_{BS} - (NBR 14949:2003).

Se $IP \leq 12\%$ ou $V_{BS} \leq 0,8$, pode realizar-se a reciclagem com cimento. Os materiais com curva granulométrica incluída na faixa especificada pela norma e com $V_{BS} \leq 0,8$ é classificado como sendo de qualidade **M1**. Se uma das duas condições não é atendida, o material é de qualidade **M2**. Se $IP > 12\%$ ou $V_{BS} > 0,8$, deve-se tratar previamente com cal o material a ser reciclado (posteriormente com cimento). O teor de cal será o que produz redução suficiente do IP.

É oportuno mencionar que na França é sugerido um Teste de Aptidão, que tanto se aplica a solos a serem estabilizados quanto a materiais a serem reciclados com cimento. Esse teste é descrito no documento francês *Traitement des sols aux liants hydrauliques – CIMBÉTON*. A aptidão do solo à estabilização com cimento é avaliada através de ensaios de expansão volumétrica (G_v) acelerada e de resistência à tração na compressão diametral (R_{ti}), segundo a norma NF P 94-100. A aptidão ao tratamento com cimento pode ser avaliada com emprego da Tabela 1.

Tabela 1 – Critérios para interpretação da aptidão ao tratamento com cimento

Condição	Expansão volumétrica G_v (%) (NF EM 13286-49)	R_{ti} (MPa) após 7 dias de imersão 40°C (NF EM 13286-42)
Apto	$G_v < 5$	e $R_{ti} > 0,2$
Duvidoso	$5 \leq G_v \leq 10$	ou $0,1 \leq R_{ti} \leq 0,2$

Inapto	$G_v > 10$	ou	$R_{ti} < 0,1$
--------	------------	----	----------------

O mesmo documento determina que seja avaliado o comportamento na presença de água de materiais tratados com cimentos. A sensibilidade à água do solo tratado com cimento é avaliada da seguinte maneira:

- a) Mede-se a resistência à compressão simples do material tratado com cimento após 60 dias de cura normal a 20°C (R_{c60}),
- b) Mede-se a resistência à compressão simples do mesmo material após 28 dia de cura normal, seguidos de 32 dias de imersão total em água a 20°C (R_{ci}).

Os valores mínimos aceitáveis do quociente R_{ci}/R_{c60} são:

$$R_{ci}/R_{c60} \geq 0,80 \text{ se } VBS \leq 0,5$$

$$R_{ci}/R_{c60} \geq 0,70 \text{ se } VBS > 0,5$$

COMENTÁRIOS COMPLEMENTARES DECORRENTES DE ANÁLISES DE DOCUMENTOS SULAFRICANOS

No documento intitulado “*Cementitious Stabilization of Road Materials*” preparado pelo CSIR Built Environment da República da África do Sul, estabelece-se que os materiais a serem reciclados devem ser adequados para a produção de uma camada cimentada apropriada. Materiais de qualidade muito variável são extremamente difíceis de serem estabilizados e construídos eficientemente. A variabilidade no teor de necessário de estabilizante (no caso, cimento Portland) e no teor de umidade de compactação pode resultar em áreas localizadas de baixa qualidade.

O documento cita componentes que podem causar efeitos deletérios no processo de cimentação, tais como:

- Sulfatos;
- Sais solúveis;
- Ácido sulfúrico;
- Minerais secundários, especialmente argilas esmectitas; e

- Compostos orgânicos.

A durabilidade das camadas tratadas com cimento pode ser afetada de forma danosa pelos sulfatos, seja na forma de cristalização de sais, ataque por sulfatos ou materiais excessivamente ácidos, que podem causar a perda completa da cimentação e/ou excessiva expansão e trincamento. Por essa razão, o máximo teor de sulfato solúvel ácido em materiais a serem tratados com cimento deve ser:

- 0,25% se o Índice de Plasticidade (IP) dos finos for inferior a 8% e a percentagem de material com dimensão inferior a 2 μm (0,002 mm) superar 12%;
- 1% para materiais com menores valores de IP e menor teor de argila.

Ainda, o teor máximo de sulfato solúvel em água dos materiais a serem reciclados com cimento não deve exceder 2,5 g/litro de SO_3 .

Se não for possível atender as exigências quanto ao teor de sulfato, o ensaio para determinação da resistência à compressão simples (RCS) deve ser realizado em corpos de prova previamente imersos em água durante sete dias. Se, após esse período de imersão, os corpos de prova não apresentarem trincamento ou significativa expansão e se a RCS dos mesmos não for inferior a 80% de corpos de prova curados por sete dias sem imersão, os materiais são aceitos. A RCS pode ser empregada em substituição aos ensaios de determinação de teor de sulfato ou como uma guia adicional.

Ao abordar a reciclagem a frio, observa-se no documento que, embora as camadas dos pavimentos sejam, geralmente, bastante uniformes (uma vez que foram construídos seguindo normas estritas), deve-se levar em conta o efeito de remendos e outros reparos e a variabilidade da espessura das camadas.

Em termos da determinação do teor de cimento para reciclagem de pavimentos, no capítulo 9 (*Materials Utilisation and Design*) do **South African Pavement Engineering Manual** salienta-se que a quantidade de cimento (ou outro agente estabilizador) é definida segundo o padrão de desempenho que se deseja para cada camada do pavimento. Provavelmente, o mais importante no projeto da mistura é assegurar sua durabilidade. Um teor insuficiente de estabilizador resulta em resistências baixas, possíveis quedas do pH do material e instabilidade dos produtos cimentantes.

Realizam-se ensaios de resistência (à compressão simples - RCS - ou à tração na compressão diametral – RCD) em corpos de prova com diferentes teores de cimento e se traçam curvas da resistência em função do teor de estabilizante, para definir o teor necessário para produzir as resistências de projeto, que devem estar entre os limites indicados na Tabela 2. Nessa tabela limitam-se os valores da RCS com o objetivo de minimizar-se o trincamento por retração.

Tabela 2 – Requisitos de resistência para materiais estabilizados quimicamente
(adaptado)

Tipo de material cimentado gerado	C1	C2	C3	C4
RCS para dosagem (MPa)				
	Máx 12 Mín 6	Máx 6 Mín 3	Máx 3 Mín 1,5	Máx 1,5 Mín 0,75
	Máx 6 Mín 4	Máx 4 Mín 2	Máx 2 Mín 1	Máx 1 Mín 0,5
RCD (kPa) com GC = 100%			Mín 250	Mín 200

Os materiais cimentados C1 e C2 têm como material de origem (base) britas graduadas muito bem compactadas; enquanto que os materiais C3 e C4 têm pedregulhos como material de origem.

Estudos realizados na República da África do Sul mostraram que a RCS de um material cimentado não é um indicativo confiável de sua durabilidade. Para os materiais cimentados dos tipos C3 e C4; isto é, com RCS inferior a 1,5 MPa, alcançar a RCD mínima é mais importante do que atender o valor de RCS especificado.

³ GC = Grau de Compactação mínimo em relação ao peso específico aparente seco máximo de laboratório, correspondente ao ensaio de compactação na energia Modificada.

3 PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM PARA MISTURAS RECICLADAS COM CIMENTO

Neste item apresenta-se o método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento sugerido por Fedrigo (2015) e corroborado por Kleinert (2016), considerando-se como referência o método de dosagem de materiais estabilizados com cimento da Austroads (2002) e realizando-se adaptações com base nos resultados obtidos nesta pesquisa e publicados nos diversos relatórios trimestrais apresentados à ANTT. O método sugerido é apresentado na Figura 3; ainda, abaixo, são apresentadas considerações referentes a algumas etapas do procedimento de dosagem sugerido (estas notas estão relacionadas com as etapas do fluxograma através da legenda que apresentam):

- 1) Para misturas contendo materiais semelhantes aos empregados nesta pesquisa, sugerem-se valores mínimos de RCS igual a 2,5 MPa e RCD igual a 0,40 MPa, ambos para 7 dias de cura. Conforme verifica-se na Figura 4, as misturas com os diferentes materiais de base (BGS, BGTC, solo-cimento e solo laterítico) e formadas pelos níveis médios das variáveis analisadas alcançam o valor referência de RCS;
- 2) Para misturas recicladas com cimento contendo materiais semelhantes aos estudados nesta pesquisa, sugere-se a utilização de teores de cimento de até 4%, pois elevadas resistências e rigidezes são obtidas com o emprego de tais teores de cimento. Além disso, o emprego de teores mais elevados, apesar de aumentar significativamente a resistência contra a água, pode agravar os efeitos da retração por secagem e aumentar o custo da obra;

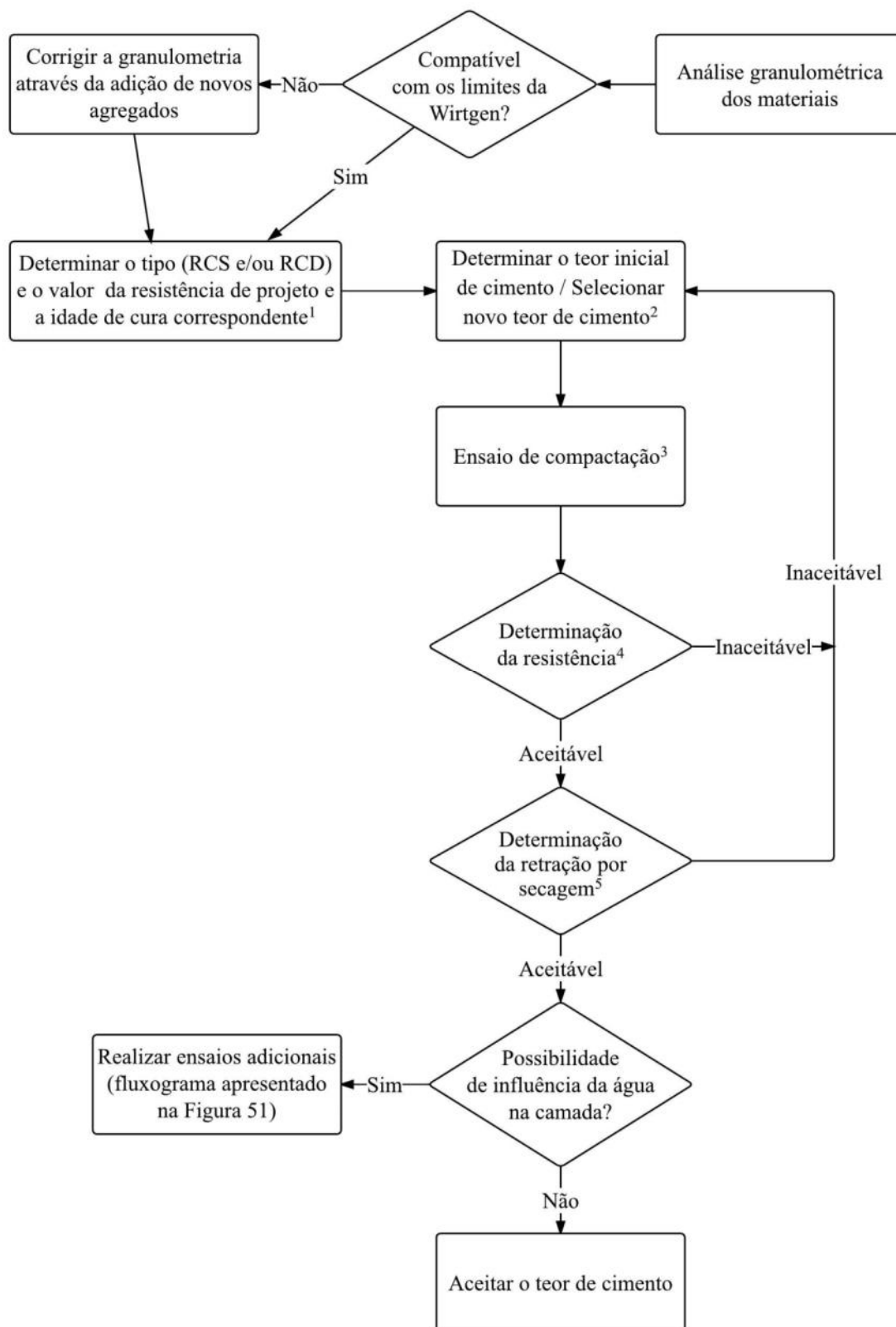


Figura 3 - Sugestão de método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento

- 3) Sugere-se a utilização de energia de compactação equivalente à Modificada do ensaio de Proctor, já que tal energia gera grande acréscimo na resistência e rigidez da mistura, permitindo-se trabalhar com menores teores de cimento. Além disso, tal energia também favorece a resistência contra a água, reduzindo a porosidade da camada;
- 4) A seguir são descritas algumas considerações acerca dos ensaios de RCS e RCD, válidas para misturas semelhantes às estudadas nesta pesquisa:
- para ensaios de RCS sugere-se a utilização de corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura;
 - para ensaios de RCD sugere-se a utilização de corpos de prova do tipo Marshall, com dimensões iguais a 10,20 cm de diâmetro e 6,50 cm de altura;
 - devem ser moldados 3 corpos de prova (triplicata) para cada mistura analisada e para cada tempo de cura especificado ou então empregado um planejamento experimental adequado que proporcione confiabilidade aos ensaios (semelhante ao empregado no segundo ano da pesquisa e detalhado nos relatórios trimestrais);
 - para fins de controle de moldagem, sugere-se tolerância de aceitação para o teor de umidade da mistura de $\pm 1\%$ e para o valor de peso específico aparente seco do corpo de prova de $\pm 0,3 \text{ kN/m}^3$, ambos em relação aos valores ótimos obtidos no ensaio de compactação;
 - a cura dos corpos de prova deve ser realizada preferencialmente em câmara úmida que mantenha a temperatura próxima à 23°C e a umidade relativa maior que 95%;
 - a resistência da mistura será considerada a média das três resistências individuais obtidas, lembrando-se que as resistências individuais devem diferir no máximo em $\pm 10\%$ do valor médio;

- as taxas de carregamento aplicadas nos ensaios de RCS devem ser iguais a 0,25 MPa/s (ou inferior), para prensas hidráulicas, e a 1 mm/min, para prensas não hidráulicas, seguindo, assim, as orientações das normas DNER-ME 201 (DNIT, 1994a) e DNER-ME 091 (DNIT, 1998b);
- a taxa de carregamento aplicada no ensaio de RCD deve ser igual a 0,80 mm/s, seguindo o método da norma DNIT-ME 136 (DNIT, 2010);

5) Sugere-se a utilização da norma AS 1012.13 (STANDARDS AUSTRALIA, 1992). A realização de tal ensaio é imprescindível, visto que tais efeitos podem se agravar consideravelmente quando do emprego de teores de cimento acima de 4% e/ou de materiais que possuam maior fração de finos do que bases compostas por materiais granulares, como é o caso dos solos lateríticos, por exemplo. A Austroads (2002) sugere que para misturas estabilizadas com cimento, o limite de retração seja igual a 200 μm aos 7 dias de cura.

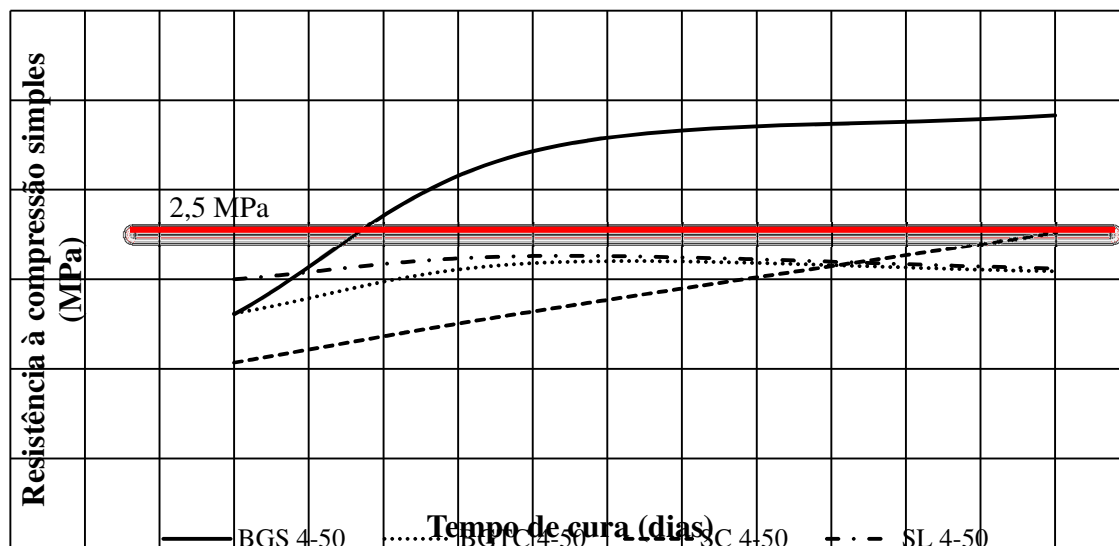


Figura 4 – Evolução da RCS das misturas recicladas estudadas por Fedrigo (2015) e Kleinert (2016)

Os ensaios apresentados no fluxograma da Figura 5 são imprescindíveis quando a realização da reciclagem de pavimentos com adição de cimento ocorrer em localidades onde possa existir influência da água na camada reciclada, ou seja, locais em que o lençol freático se encontre próximo da superfície, locais onde existam problemas de drenagem e quando da existência de fluxo lateral (seções em corte).

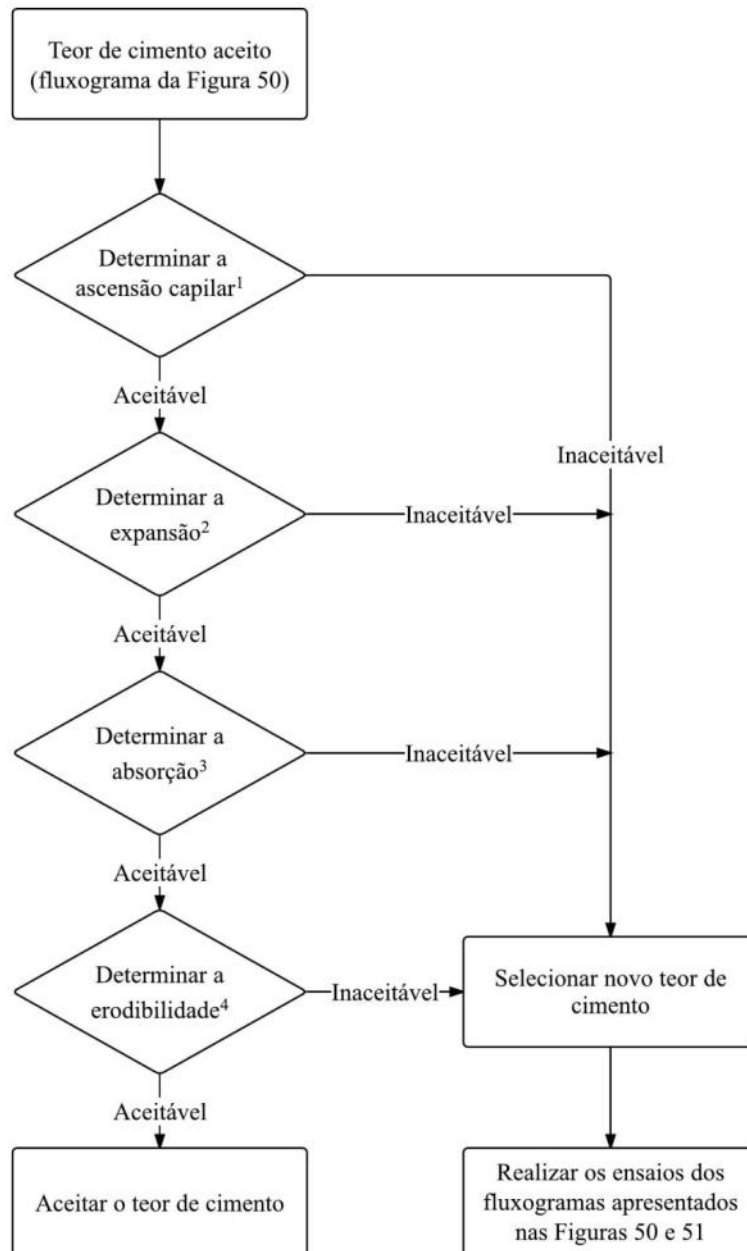


Figura 5 - Ensaio adicionais imprescindíveis quando da possibilidade de influência da água na camada reciclada

Abaixo são apresentadas notas referentes aos ensaios apresentados na Figura 5 (tais notas estão relacionadas com as etapas do fluxograma através da legenda que apresentam):

- 1) Ascensão capilar: Sugere-se a utilização da norma australiana AS 1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996). O limite sugerido pela

Austroads (2002) é de 25% da altura total para corpos de prova curados por 7 dias e expostos a uma lâmina d'água de 1 cm de altura por 24 horas. Verificou-se que diversas misturas apresentaram resultados superiores a tal limite, principalmente quando do emprego de teores baixos de cimento e energia intermediária de compactação;

- 2) Expansão: Sugere-se a utilização da norma australiana AS 1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996). Entretanto, devido a grande variabilidade dos resultados obtidos aplicando-se tal ensaio, também se aconselha que corpos de prova curados por 7 dias que apresentem expansão livre (tipo de expansão medida pelo ensaio sugerido) superior a 1% após 72 horas de exposição à lâmina d'água de 1 cm de altura, sejam ensaiados conforme o método para verificação da expansão descrito na norma DNER-ME 049 (DNIT, 1994), neste método são aplicadas sobrecargas no corpo de prova e este é imerso por um período de 4 dias. Assim, considerando que a camada reciclada será a base do pavimento restaurado, pode-se limitar esta expansão em valor igual a 0,5%;
- 3) Absorção: Sugere-se a utilização da norma australiana AS 1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996). Devido à falta de um limite para absorção por parte da norma australiana e da Austroads (2002), sugere-se a adoção de um valor igual a 2%. A *Highways Agency* (HA, 2006), agência pertencente ao *Department for Transport* do Reino Unido, cita tal valor como limite de absorção para misturas de agregados utilizados na fabricação de concreto para pavimentos;
- 4) A norma australiana TM-T186 (RTA, 1994) preconiza a realização do ensaio de erodibilidade, entretanto não sugere valores limites. Assim, a Austroads (2002) define que, quando da necessidade de reduzirem-se o máximo possível os problemas de erosão, deve-se objetivar um material que apresente erosão nula, entretanto, pode ser bastante difícil alcançar tal condição.

Além do método apresentado, no Apêndice I apresenta-se uma proposição de norma para dosagem de misturas de reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Globalmente, verifica-se que a reciclagem com cimento é uma estratégia para recuperação estrutural de pavimentos com amplo potencial de emprego em nosso país. Além de apresentar vantagens técnicas em relação a outras práticas, a reciclagem é uma prática sustentável, o que tem lhe conferido um caráter prioritário em vários países.

Esta pesquisa, fruto da parceria de vários órgãos e empresas, notadamente da concessionária de rodovias ECO-101 e o Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da UFRGS, se tornou possível graças a aportes de recursos RDT sob aprovação e supervisão da ANTT. Se alguns pontos ainda precisam ser esclarecidos, é inegável que a pesquisa proporcionou um significativo avanço no conhecimento do comportamento mecânico de misturas recicladas com cimento, o que conduziu à proposta do método de dosagem. Previamente, com base na experiência nacional e internacional (especialmente da Austrália, da França e da República da África do Sul) tinha-se definido em que condições a reciclagem com cimento é uma estratégia factível de recuperação de pavimentos.

Este relatório final foi elaborado pelos engenheiros William Fedrigo e Thaís Radünz Kleinert, doutorandos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, sob supervisão do Prof. Washington Peres Núñez.

Destaca-se que ao longo da pesquisa, contou-se com a colaboração de alunos de Graduação e auxiliares de pesquisa do curso de Engenharia Civil da UFRGS, bem como de muitos colegas da concessionária ECO-101, da empresa Tecnopav, da ABCP, do IPR/DNIT, do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) e do Laboratório de Geotecnologia (LAGEOtec) da UFRGS e da empresa Wirtgen. A todos, a equipe do LAPAV/UFRGS externa sua gratidão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTROADS. **Mix design for stabilised pavement materials: Austroads Publication AP-T16.** Sydney, 43p. 2002.

CEMENTITIOUS STABILIZATION OF ROAD MATERIALS, Manual prepared by CSIR Built Environment, Pretoria, 2014.

CIMBÉTON, Terrassements et assises de chaussée: Traitement des sols aux liants hydrauliques. T70. 148 p. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Solo-cimento – compressão axial de corpos de prova cilíndricos:** DNER-ME 201/94. Rio de Janeiro, 4 p. 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos:** DNER-ME 091/98. Rio de Janeiro, 6 p. 1998b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio:** DNIT 136/2010 – ME. Rio de Janeiro, 6 p. 2010a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Solos determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas:** DNER-ME 049/94. Rio de Janeiro, 14 p. 1994b.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland – Proposição de um método de dosagem.** 2014. 88 p. Relatório de seminário (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

HIGHWAYS AGENCY. **Manual of Contract Documents for Highway Works – Volume 1 Specification for highway Works: Series 1000 – Road pavements – Concrete materials.** 33 p. 2006.

KLEINERT, T. R. **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design of full-depth reclamation with Portland cement (FDR-PC) pavements. In: 2010 ANNUAL CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA – **Anais...** Halifax, 2010. 12 p.

ROADS AND TRAFFIC AUTHORITY. **Determination of the Erodibility of Stabilized Materials:** Test Method T186 Draft. Roads and Traffic Authority, Sydney, 7p. 1994.

SETRA/LCPC. **Guide technique – Retraitement em place à froid des anciennes chaussées.** 2003.

SOUTH AFRICAN PAVEMENT ENGINEERING MANUAL, CHAPTER 9: Materials Utilizations and Design, 2014.

STANDARDS AUSTRALIA. **Determination of the drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory:** AS 1012.13-1992. Standards Australia, Strathfield, New South Wales, 13p. 1992.

STANDARDS AUSTRALIA. **Method for sampling and testing aggregates: method 53: absorption, swell and capillary rise of compacted materials:** AS 1141.53-1996. Standards Australia, Strathfield, New South Wales, 8p. 1996.

EQUIPE EXECUTORA

INSTITUIÇÃO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR PROPONENTE:

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

UNIDADE PROPONENTE:

LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO - LAPAV - PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL.

COORDENADOR DO PROJETO:

PROF. JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI

VICE-COORDENADOR DO PROJETO:

PROF. DR. WASHINGTON PÉRES NÚÑEZ

EQUIPE UFRGS

PROF. DSc. JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI

PROF. DR. WASHINGTON PÉRES NÚÑEZ

PROF. PhD. LUIS CARLOS PINTO DA SILVA FILHO

PROF^A. PhD. ÂNGELA GAIO GRAEFF

ENG. MSc WILLIAM FEDRIGO

ENG. MESTRANDA THAÍS REDÜNTZ KLEINERT

ACADÊMICO DE ENG^a CIVIL GABRIEL S. ZÍLIO

EQUIPE ECO 101 | ECORODOVIAS

ENG. DULTEVIR VILAR GUERREIRO DE MELO

ENG. EVERTON CESAR SOUZA

ENG. PAULO ROSA MACHADO FILHO

ENG. GUILHERME SAMPAIO GONÇALVES

ENG^a. BIANCA JACOB DE FREITAS GONÇALVES

ENG. ADOLFO MACHADO DE MAGALHÃES

ENG^a. CRISTIANA MARA MAGALHÃES DE OLIVEIRA

ENG^a. CECILIA FORTES MERIGHI

APÊNDICE I

PROPOSIÇÃO DE NORMA PARA DOSAGEM DE MISTURAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO

RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A FRIO COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND – DOSAGEM – PROCEDIMENTO

1 Escopo

Esta norma estabelece os requisitos para a determinação da quantidade de cimento Portland necessária para a execução da reciclagem de pavimentos, pela medida da resistência à compressão simples (RCS) e/ou resistência à tração por compressão diametral (RCD) de corpos de prova cilíndricos.

2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação deste documento.

DNER-ME 091/98 - Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos

DNER-ME 201/94 - Solo-cimento - compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos

DNIT 136/2010-ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral

DNIT 164/2013-ME: Solos - Compactação utilizando amostras não trabalhadas

ROADS AND TRAFFIC AUTHORITY. RTA TM T186. Determination of the Erodibility of Stabilized Materials.

STANDARDS AUSTRALIA. AS 1012.13-1992. Determination of the drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory.

STANDARDS AUSTRALIA. AS 1141.53-1996. Method for sampling and testing aggregates: method 53: absorption, swell and capillary rise of compacted materials.

3 Procedimento

3.1 Seleção do teor de cimento para o ensaio de compactação

As Figuras 1 a 7 apresentam sugestões para a seleção do teor de cimento em massa para o ensaio de compactação, conforme o tipo de material de base do pavimento, a

porcentagem de material fresado asfáltico da mistura e a resistência (RCS e/ou RCD) que se deseja alcançar.

3.2 Ensaio de compactação

As amostras devem ser secas ao ar, devendo-se adicionar o teor de cimento sobre a massa total de base mais fresado e misturar os componentes secos da mistura até que a coloração seja uniforme em toda a massa. Imediatamente após, deve-se adicionar a água e misturar até a uniformização da umidade na massa. Executar o ensaio de compactação conforme o método de ensaio DNIT 164/2013-ME, através do Método C (energia modificada).

3.3 Seleção do teor de cimento para os ensaios de resistência

A moldagem de corpos de prova para os ensaios de resistência deve ser realizada com no mínimo três teores de cimento, visando determinar aquele que atenda ao critério de resistência mínima aos 7 dias de cura de 2,5 MPa para compressão simples e/ou 0,4 MPa para tração por compressão diametral. As informações das Figuras 1 a 7 podem ser utilizadas como referência para a seleção dos teores de cimento.

3.4 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova devem ser moldados através de compactação de modo a se reproduzir o teor ótimo de umidade e o peso específico aparente seco máximo obtidos através do ensaio de compactação. A Tabela 1 apresenta as características para moldagem dos corpos de prova.

Devem ser moldados três corpos de prova para cada teor de cimento e a cura deve ser realizada em câmara úmida que mantenha a temperatura próxima à 23°C e a umidade relativa maior que 95%. Quando o teor de umidade de moldagem diferir do ótimo em mais de 1% ou quando o peso específico aparente seco do corpo de prova diferir do máximo em mais de 0,3 kN/m³, o corpo de prova deve ser rejeitado.

Tabela 1 – Características para moldagem dos corpos de prova

Ensaio	Soquete	Molde	Número de camadas
RCS	Proctor grande	Cilíndrico (10 x 20 cm)	5

RCD	Marshall	Cilíndrico / Marshall (10,2 x 6,5 cm)	1 (compactada em ambas as faces)
-----	----------	--	-------------------------------------

3.5 Ensaio de resistência

Decorrido o tempo de cura de 7 dias, os corpos de prova devem ser submetidos aos ensaios de resistência. As taxas de carregamento aplicadas nos ensaios de RCS devem ser iguais a 0,25 MPa/s (ou inferior), para prensas hidráulicas, e a 1 mm/min, para prensas não hidráulicas, seguindo, assim, as orientações dos métodos de ensaio DNER-ME 201/94 e DNER-ME 091/98. A taxa de carregamento aplicada no ensaio de RCD deve ser igual a 0,80 mm/s, seguindo o método da norma DNIT 136/2010-ME.

4 Resultados

4.1 Determinação da resistência média

Calcular a média aritmética das resistências (RCS e/ou RCD) dos três corpos de prova, descartando-se os valores individuais que se afastem da média em mais ou menos 10%. O procedimento deve ser repetido até que se consiga obter o número mínimo mencionado.

4.2 Seleção do teor de cimento

Deve ser adotado como teor de cimento o valor obtido por interpolação gráfica onde a resistência aos 7 dias de cura seja igual ou superior a 2,5 MPa para RCS e 0,4 MPa para RCD. É proibida a extrapolação de dados.

5 Ensaio adicionais

5.1 Retração por secagem

No caso do pavimento reciclado possuir base composta por material com maior fração de finos que possam aumentar os riscos de retração por secagem da mistura reciclada, como por exemplo, solos lateríticos ou misturas de solo-cimento, ou quando do emprego de teores acima de 4% de cimento, indica-se a verificação de tal propriedade através do método de ensaio australiano AS 1012.13-1992.

5.2 Ascensão capilar, expansão, absorção e erodibilidade

Quando a realização da reciclagem ocorrer em localidades onde possa existir influência da água na camada reciclada, ou seja, locais em que o lençol freático se encontre próximo da superfície, locais onde existam problemas de drenagem e quando da existência de fluxo lateral (seções em corte), indica-se a verificação da ascensão capilar, expansão, absorção e da erodibilidade através dos métodos de ensaio australianos AS 1141.53-1996 e RTA TM T186.

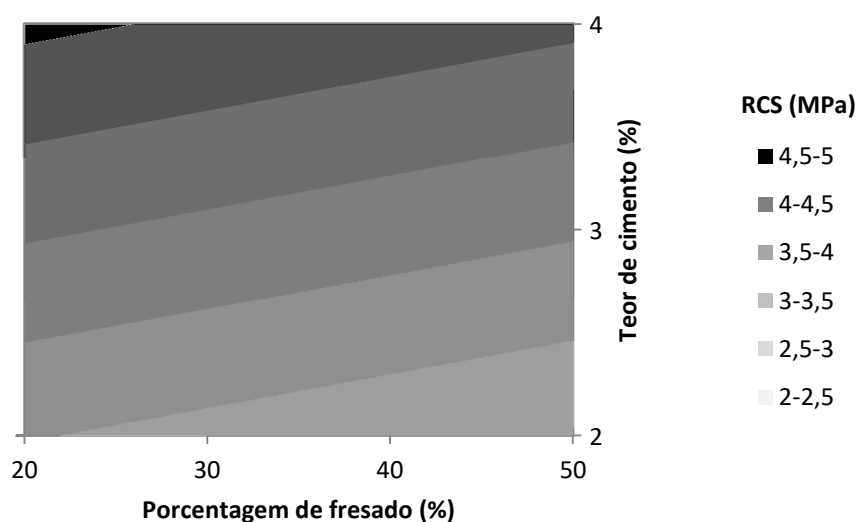


Figura 1 – RCS em função do teor de cimento e da porcentagem de fresado para misturas com base de brita graduada simples (BGS)

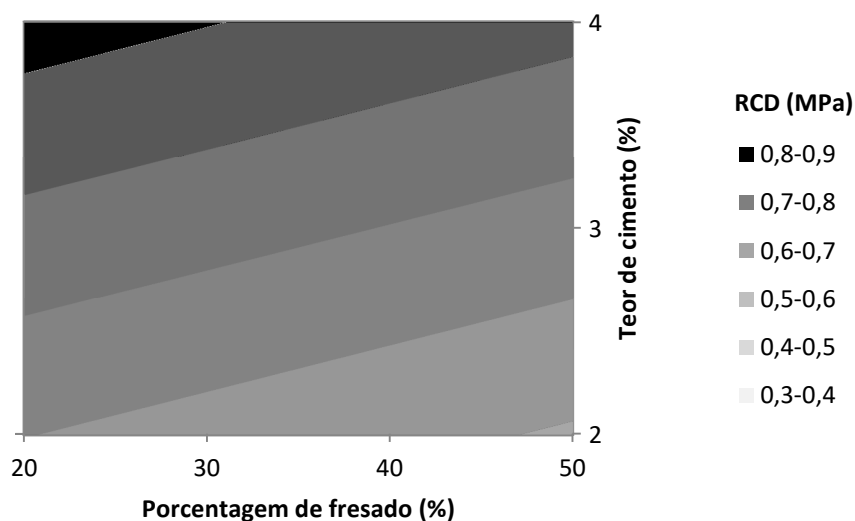


Figura 2 – RCD em função do teor de cimento e da porcentagem de fresado para misturas com base de brita graduada simples (BGS)

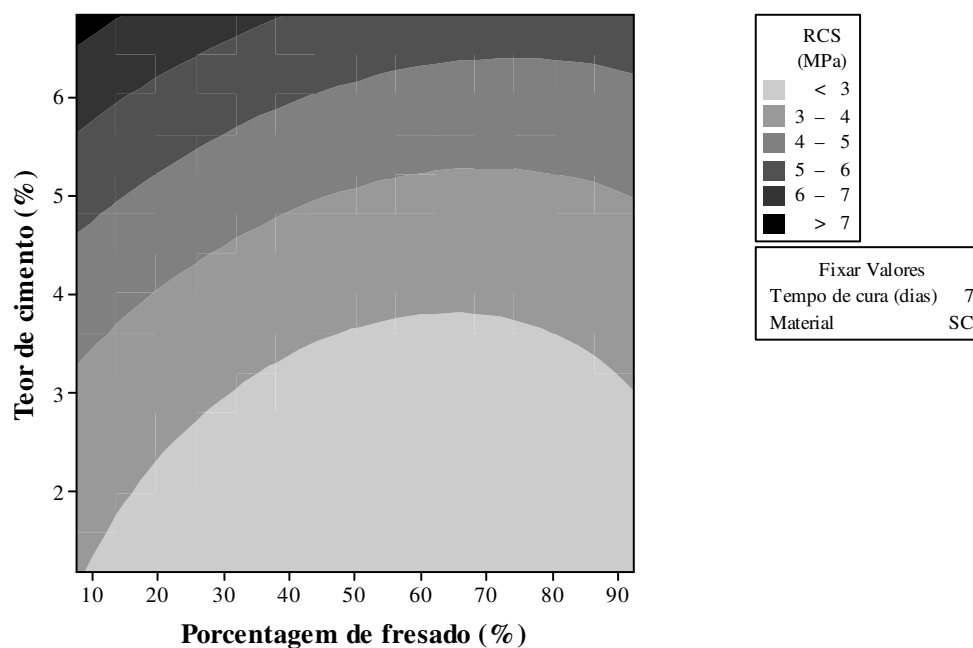


Figura 3 – RCS em função do teor de cimento e da porcentagem de fresado para misturas com base de brita graduada tratada com cimento (BGTC)

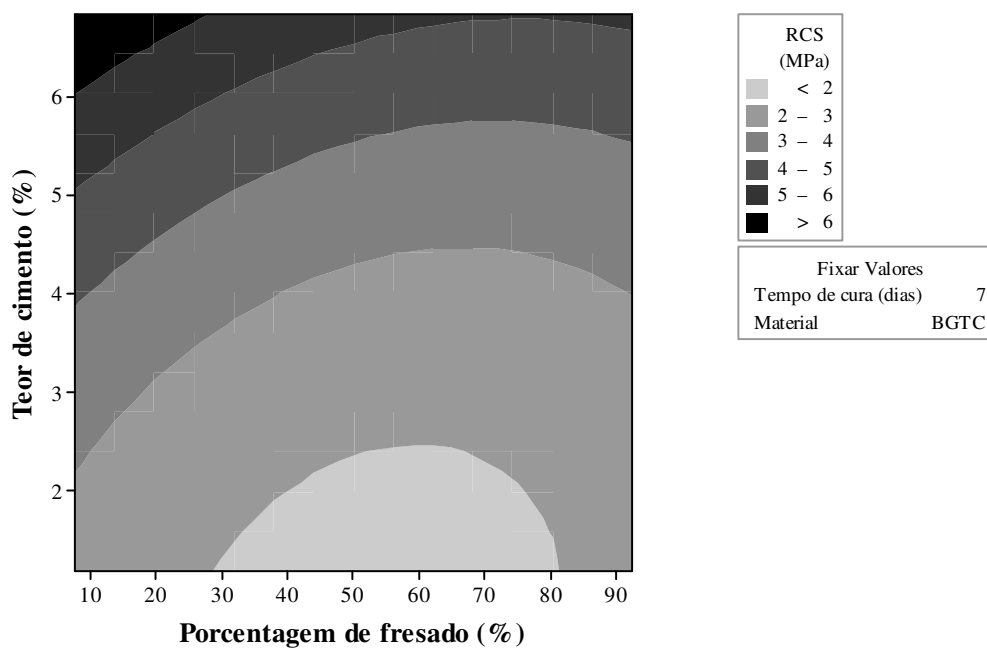


Figura 4 – RCD em função do teor de cimento e da porcentagem de fresado para misturas com base de brita graduada tratada com cimento (BGTC)

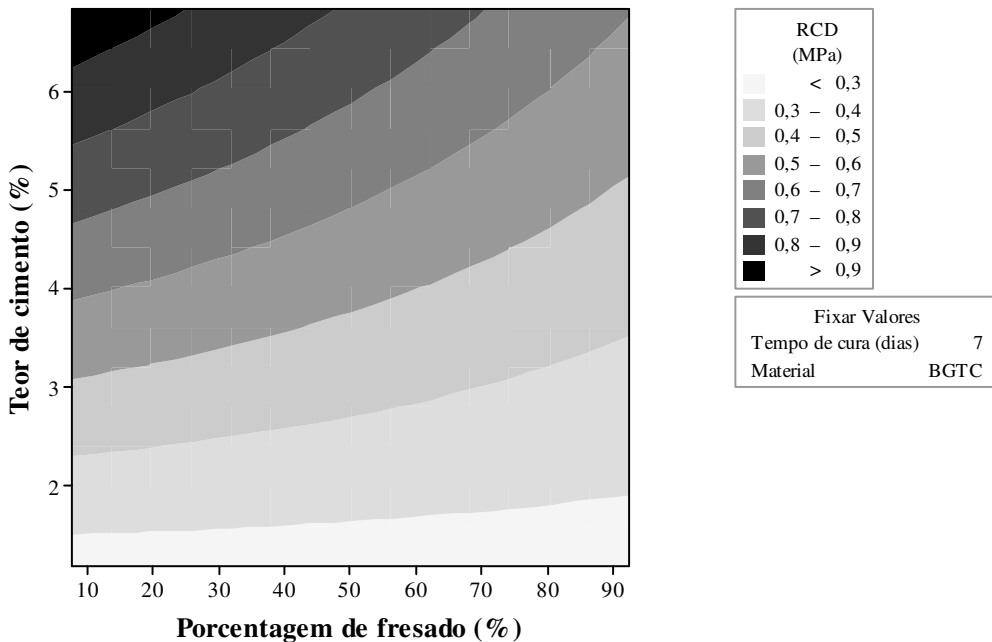


Figura 5 – RCS em função do teor de cimento e da porcentagem de fresado para misturas com base de solo-cimento (SC)

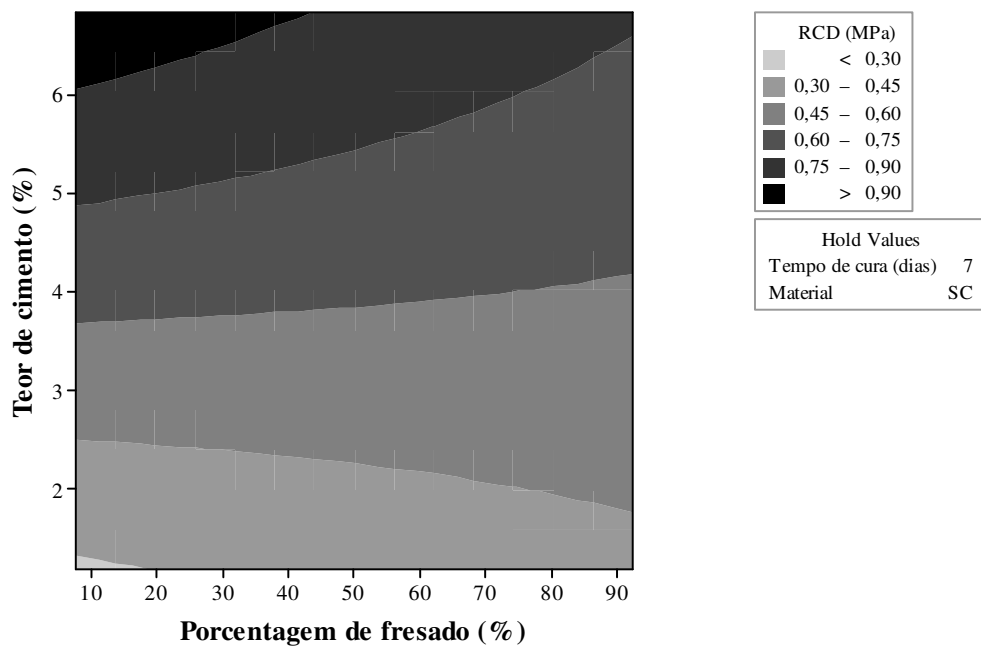


Figura 6 – RCD em função do teor de cimento e da porcentagem de fresado para misturas com base de solo-cimento (SC)

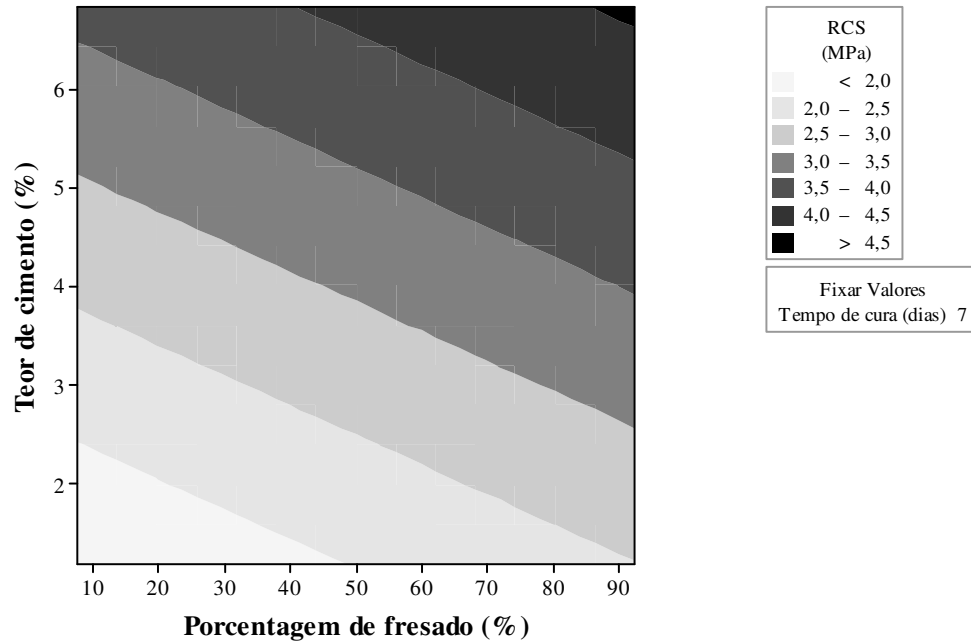


Figura 7 – RCS em função do teor de cimento e da porcentagem de fresado para misturas com base de solo laterítico