

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE  
CIMENTO PORTLAND: DEFINIÇÃO DAS BASES PARA UM  
MÉTODO DE DOSAGEM**

**William Fedrigo**

Porto Alegre  
2015

WILLIAM FEDRIGO

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE  
CIMENTO PORTLAND: DEFINIÇÃO DAS BASES PARA UM  
MÉTODO DE DOSAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia

Porto Alegre  
2015

Ficha Catalográfica

---

F294r Fedrigo, William

Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland : definição das bases para um método de dosagem / William Fedrigo. – 2015.  
162 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2015.

Orientadores: Washington Peres Núñez e Jorge Augusto Pereira Ceratti.

1. Reciclagem. 2. Cimento Portland. 3. Pavimentos. 4. Ensaio de materiais.  
I. Núñez, Washington Peres, orient. II. Ceratti, Jorge Augusto Pereira, orient.  
III. Título.

CDU: 625.84(043)

---

**WILLIAM FEDRIGO**

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE  
CIMENTO PORTLAND: DEFINIÇÃO DAS BASES PARA UM  
MÉTODO DE DOSAGEM**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, na área de concentração Geotecnia e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 19 de Março de 2015

Prof. Washington Peres Núñez  
Dr. em Engenharia pela UFRGS / Brasil  
Orientador

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
DSc. pela UFRJ / Brasil  
Orientador

Prof. Armando Miguel Awruch  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

Yves George François Jean Brosseauud (IFSTTAR)  
Directeur de Recherche – Direction Générale du Personnel et de l'Administration  
Ministère des Transports de l'Équipement du Tourisme et de la Mer, França

Prof. Pedro Domingos Marques Prietto (UPF)  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)  
PhD pela University of Leeds, Reino Unido

Prof.<sup>a</sup> Ângela Gaio Graeff (UFRGS)  
PhD pela University of Sheffield, Reino Unido

Dedico este trabalho à minha querida família.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao professor Washington Peres Núñez, orientador e amigo, pelo conhecimento transmitido, pela confiança em mim depositada e por ceder seu tempo para auxiliar no andamento da pesquisa em tantas oportunidades, sempre acompanhadas de belas canções e ótimas refeições. Professor, muito obrigado pelo esforço a mim dedicado.

Agradeço ao professor Jorge Augusto Pereira Ceratti, orientador deste trabalho e coordenador do projeto de pesquisa no qual está inserida esta dissertação, pela oportunidade oferecida e pela disponibilidade do Laboratório de Pavimentação, o qual coordena com maestria.

Aos companheiros do Laboratório de Geotecnologia (LAGEOTEC), Jair Silva, Lucas Delongui, Matheus Matuella e Mattheus Porto, pela amizade, por estarem sempre prontos para ajudar e pelos sempre divertidos eventos gastronômicos.

A todos da equipe do Laboratório de Pavimentação (LAPAV): André Bock, Bruna Werle, Caroline Brawers, Daniel Pinheiro Fernandes, Danilo Tomasi, Dionísio Doering, Douglas Engelke, Douglas Martins Mocelin, Fábio Conterato, Filipe Pereira dos Reis, Gracieli Bordin Colpo, Gustavo Fermino, Isadora Castelli, Ivo de Azevedo, Jefferson Niewierowski, Kethelin Klagenberg, Larissa Montagner, Leonardo Gabriel da Paz, Lélío Brito, Lucas Pereira, Lysiane Pacheco, Maria Bernadette Bado Corrêa, Marlova Johnston, Mateus Felipe, Maximiliano Cavalcanti, Rodrigo Santos da Silva, Tatiani Paviani, Thomás Jung Spier e Vinicius Alves. Agradeço pela troca de conhecimento, pelos almoços descontraídos e pela ajuda na realização dos ensaios. Em especial aos técnicos Daniel e Rodrigo, e aqui devo incluir novamente o amigo Matheus Matuella, agradeço pelas inúmeras vezes em que disponibilizaram translado para os materiais utilizados nesta pesquisa.

Aos parceiros do projeto de pesquisa da reciclagem de pavimentos com cimento, Mario Alexander Castañeda López, Thaís Radünz Kleinert e Gabriel Symanski Zilio, pelo gás na reta final dos ensaios. Ao antigo membro desta equipe, Vinicius Ely, agradeço pela parceria e pelas diversas viagens à Canoas em busca de cimento.

Agradeço à equipe do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), em especial à professora Ângela Gaio Graeff, aos mestrandos Diego Guimarães e Fernanda Bianchi da Costa, aos ex-bolsistas de iniciação científica Lucas Aragão e Michael Parisotto, aos técnicos Edgar Wallace Pereira Lucas e Eurípedes Martins Fontes, e ao funcionário José Orvandır.

Aos componentes das bancas de seminário e defesa de dissertação, Ângela Gaio Graeff, Juliana de Azevedo Bernardes, Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, Pedro Domingues Marques Prietto e Yves George François Jean Brosseaud, pelos comentários e críticas construtivas que possibilitaram a melhoria do trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) pela qualidade de formação. Estendo meus agradecimentos aos funcionários e aos colegas à época das disciplinas.

Às empresas Tecnopav e Traçado pela coleta dos materiais utilizados nesta pesquisa.

À Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), ao Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do DNIT e às empresas parceiras na pesquisa, Tecnopav, Wirtgen, CCR e Ecorodovias.

Ao engenheiro e mestre Paulo César Arrieiro de Oliveira pelo conhecimento técnico repassado, pela ajuda no início da pesquisa e pelas dúvidas esclarecidas no seu decorrer.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

Ao primo Jean Pandolfo e família por me acolherem em sua casa no início desta caminhada.

Aos amigos de Serafina e região, especialmente Gustavo Damo, Jonas Bianchet, Mauricio Dall'Agnol e Maurício Pereto, pela amizade e pelos momentos de descontração quando da volta pra casa.

À minha namorada Larissa Vivan pelo carinho, apoio e incentivo a mim dedicados e por compreender minha constante ausência, estando sempre ao meu lado, mesmo de longe.

Por fim, agradeço às minhas irmãs Roberta e Jaqueline, à minha sobrinha Eduarda e, especialmente, aos meus pais Neiva e Ivaldo. Agradeço a vocês pelo apoio incondicional, pela preocupação e pelos momentos de alegria, em meio à confusão promovida pelas duas pequenas, quando do retorno ao lar.

Acho que vou ter de usar meu tempo de forma sensata e  
manter meus pensamentos direcionados, se quiser ter  
sucesso e levar a carga que transporto com tanto cuidado a  
lugares mais distantes.

*Neil Young*



## RESUMO

FEDRIGO, W. Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland: Definição das bases para um método de dosagem. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A reciclagem profunda com adição de cimento Portland é uma técnica de recuperação estrutural e funcional de pavimentos empregada há muitos anos no país, devido a vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Contudo, a difusão mais ampla da técnica esbarra na carência de normas e procedimentos nacionais, o que resulta na adoção de variados critérios nos projetos que incluem reciclagem com cimento, às vezes, comprometendo sua eficácia. A pesquisa relatada nesta dissertação teve por objetivo principal estabelecer as bases para a proposição de um método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento, considerando-se como referência o método de dosagem de materiais estabilizados com cimento da Austroads (2002). Para verificar a validade deste método para materiais de pavimentos brasileiros, desenvolveu-se um programa experimental no qual foram avaliadas propriedades mecânicas (resistência, rigidez e erodibilidade) e volumétricas (retração, absorção, expansão e ascensão capilar) de misturas constituídas por fresado asfáltico, brita graduada e cimento, variando-se a porcentagem de fresado (20% e 50%), o teor de cimento (2%, 4% e 6%), a energia de compactação (Intermediária e Modificada) e o tempo de cura dos corpos de prova (3, 7 e 14 dias). Os resultados dos ensaios mostraram que todas as variáveis analisadas afetam significativamente a resistência à compressão simples, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de resiliência das misturas, enquanto que a retração, a erodibilidade, a absorção, a expansão e a ascensão capilar são afetadas por algumas das variáveis independentes. Dentre outras conclusões, destaca-se que são obtidos elevados valores de resistência à compressão simples (1,61 MPa a 6,08 MPa), resistência à tração por compressão diametral (0,29 MPa a 1,00 MPa) e de módulo de resiliência (10390 MPa a 25719 MPa) com teores baixo (2%) e médio (4%) de cimento, sendo desnecessário e arriscado, pela elevada retração associada, o emprego de teor mais elevado (6%). Ainda, observou-se que o aumento da energia de compactação permite compensar a utilização de teores mais baixos de cimento no que se refere às resistências (à compressão, à tração e à erosão) e módulos obtidos. Globalmente, conclui-se que o método de dosagem de materiais estabilizados com cimento da Austroads (2002) pode ser usado como modelo para o desenvolvimento de um método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento, sendo necessárias pequenas complementações ou adaptações. O método de dosagem sugerido nesta Dissertação é, ao mesmo tempo, simples o suficiente para ser empregado em laboratórios de canteiros de obra e amplo o bastante para identificar as propriedades mecânicas e volumétricas que devem ser avaliadas ao elaborar-se um projeto de mistura reciclada com cimento.

**Palavras-chave:** *pavimento; reciclagem com cimento; dosagem; propriedades mecânicas; propriedades volumétricas.*

## ABSTRACT

FEDRIGO, W. Full-depth reclamation of pavements with Portland cement: Setting the basis for a mix design method. 2015. MSc Dissertation – Post-Graduation Program in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

Full-depth reclamation (FDR) with Portland cement is a technique used for structural and functional rehabilitation of pavements and has been used in Brazil for many years, especially because its technical, economical and environmental advantages. However, a larger diffusion of the technique has been inhibited by the lack of national standards and procedures, resulting in the adoption of different design criteria, which sometimes leads to a low efficiency of the FDR with cement. This research was carried out with the objective of setting the basis for a mix design method for FDR with cement, considering the Austroads (2002) mix design method for stabilized pavement materials as a model. In order to verify the applicability of the Austroads method to Brazilian pavement materials, an experimental program was carried out testing mechanical (strength, stiffness and durability) and volumetric (drying shrinkage, absorption, swell and capillary rise) properties of mixtures made of reclaimed asphalt pavement (RAP), graded crushed stone and cement. Specimens with different RAP contents (20% and 50%), cement contents (2%, 4% and 6%), compacted with two different efforts (Brazilian Intermediate and Modified) were cured for 3, 7 and 14 days. Test results showed that all the studied variables affect the unconfined compressive strength, indirect tensile strength and resilient modulus of the mixtures, while drying shrinkage, erodibility, absorption, swell and capillary rise are affected by some of the independent variables. Among other conclusions, it is pointed out that high values of unconfined compressive strength (1,61 MPa to 6,08 MPa), indirect tensile strength (0,29 MPa to 1,00 MPa) and resilient modulus (10390 MPa to 25719 MPa) may be achieved with low (2%) and intermediary (4%) cement contents, thus making the use of higher (6%) cement content unnecessary and unsafe, due to the higher costs and to the drying shrinkage associated. It was also observed that increases in the compaction effort may compensate the use of lower cement contents as regards to strengths and moduli obtained. Generally, can be concluded that the Austroads (2002) mix design method for stabilized pavement materials may be used as a model for the development of a mix design method for FDR with cement, being necessary only a few additions or adaptations. The suggested method is, simultaneously, simple enough to be used in field laboratories and comprehensive enough for including the mechanical and volumetric properties that must be evaluated when designing a mix for FDR with cement.

**Key-words:** *pavement, FDR with cement, mix design, mechanical properties, volumetric properties.*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA.....	23
1.2 OBJETIVOS.....	25
1.2.1 Objetivo geral.....	25
1.2.2 Objetivos específicos .....	25
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
<b>2 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS</b> .....	27
2.1 CONCEITO.....	27
2.2 TIPOS DE RECICLAGEM .....	28
2.3 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.....	29
2.4 HISTÓRICO DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE RECICLAGEM COM CIMENTO.....	29
2.4.1 Experiência Internacional.....	29
2.4.2 Experiência Nacional .....	31
2.5 COMPATIBILIDADE DO PAVIMENTO PARA FINS DE RECICLAGEM COM CIMENTO.....	33
2.6 NORMAS TÉCNICAS NACIONAIS SOBRE RECICLAGEM COM CIMENTO.....	36
2.7 PROCESSO EXECUTIVO DA RECICLAGEM COM CIMENTO .....	39
2.7.1 In situ.....	39
2.7.2 Em usina.....	43

2.8 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS RECICLADOS COM CIMENTO.....	44
2.9 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA TÉCNICA DE RECICLAGEM COM CIMENTO.....	50
2.10 PESQUISAS RECENTES ACERCA DA RECICLAGEM COM CIMENTO.....	55
<b>3 DOSAGEM DE MISTURAS RECICLADAS COM CIMENTO .....</b>	<b>64</b>
3.1 EXPERIÊNCIA NACIONAL.....	64
3.1.1 Normas técnicas .....	64
3.1.2 Métodos de dosagem empregados por pesquisadores brasileiros.....	65
3.2 EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL.....	66
3.2.1 Método de dosagem da Portland Cement Association .....	67
3.2.2 Método de dosagem do Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones . .....	68
3.2.3 Método de dosagem da Wirtgen .....	70
3.2.4 Método de dosagem da Asphalt Recycling and Reclaiming Association .... .....	72
3.2.5 Método de dosagem da Austroads .....	73
3.2.6 Comparação entre os métodos apresentados.....	77
3.3 CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIAM A DOSAGEM E AS PROPRIEDADES DO MATERIAL RECICLADO .....	80
3.3.1 Tipo de cimento.....	80
3.3.2 Porcentagem de material fresado .....	80
3.3.3 Heterogeneidade.....	81

<b>4 METODOLOGIA</b> .....	82
4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	82
4.2 MATERIAIS .....	85
4.2.1 Materiais oriundos da rodovia RSC-453.....	85
4.2.2 Cimento .....	86
4.3 MÉTODOS.....	86
4.3.1 Caracterização dos materiais.....	87
4.3.1.1 Análise granulométrica.....	87
4.3.1.2 Determinação do teor de ligante asfáltico do material fresado .....	87
4.3.1.3 Granulometria das misturas de BGS e fresado .....	88
4.3.2 Compactação .....	88
4.3.3 Moldagem dos corpos de prova .....	89
4.3.4 Resistência à compressão simples.....	91
4.3.5 Resistência à tração por compressão diametral .....	93
4.3.6 Módulo de resiliência.....	94
4.3.7 Retração por secagem.....	96
4.3.8 Ascensão capilar, expansão e absorção.....	98
4.3.9 Erodibilidade .....	99
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS .....	101
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	103
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	103
5.1.1 Análise granulométrica .....	103
5.1.2 Teor de ligante asfáltico do material fresado .....	104

5.1.3 Granulometria das misturas de BGS e fresado .....	104
5.2 COMPACTAÇÃO .....	105
5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	107
5.3.1 Análise estatística dos resultados de RCS .....	110
5.3.2 Efeito da imersão na RCS .....	111
5.3.3 Efeito da taxa de carregamento na RCS.....	112
5.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	113
5.4.1 Análise estatística dos resultados de RCD.....	116
5.4.2 Relação entre RCD e RCS .....	117
5.5 MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	118
5.5.1 Análise estatística dos resultados de MRD .....	121
5.5.2 Relação entre MRD e RCS .....	122
5.6 RETRAÇÃO POR SECAGEM .....	123
5.6.1 Análise estatística dos resultados de retração por secagem.....	125
5.7 ASCENSÃO CAPILAR.....	126
5.7.1 Análise estatística dos resultados de ascensão capilar .....	128
5.8 EXPANSÃO.....	130
5.8.1 Análise estatística dos resultados de expansão .....	132
5.9 ABSORÇÃO .....	133
5.9.1 Análise estatística dos resultados de absorção.....	135
5.10 ERODIBILIDADE.....	136
5.10.1 Análise estatística dos resultados de erodibilidade .....	138

<b>5.11 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS OBTIDOS POR OUTROS PESQUISADORES.....</b>	<b>139</b>
5.11.1 Resistência à compressão simples.....	140
5.11.2 Resistência à tração por compressão diametral .....	141
5.11.3 Módulo de resiliência.....	142
<b>6 SUGESTÃO DE MÉTODO DE DOSAGEM PARA RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO .....</b>	<b>144</b>
<b>7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>149</b>
7.1 CONCLUSÕES.....	149
7.2 SUGESTÕES .....	155
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>157</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas da pesquisa global com destaque para o enfoque deste estudo .....	25
Figura 2: Fluxograma para avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem (baseado em: AUSTROADS, 2002).....	34
Figura 3: Faixas granulométricas para reciclagem com cimento citadas nas normas nacionais .....	38
Figura 4: Distribuição do cimento através de distribuidor de aglomerante hidráulico .....	40
Figura 5: Máquina recicladora a frio modelo Wirtgen WR 2500 S .....	40
Figura 6: Configuração do rolo fresador/misturador (baseado em: PCA, 2005).....	41
Figura 7: Cilindro e bits de corte de uma recicladora (WIRTGEN, 2007) .....	41
Figura 8: Conformação da mistura reciclada sobre a pista.....	42
Figura 9: Proteção da camada reciclada através de (a) pintura de cura e (b) salgamento .....	43
Figura 10: Usina de reciclagem modelo Wirtgen KMA 200 (WIRTGEN, 2007) .....	43
Figura 11: Processo de funcionamento de uma usina móvel de reciclagem a frio com cimento (baseado em: WIRTGEN, 2007) .....	44
Figura 12: Proposta de procedimento de dosagem para reciclagem de pavimento asfáltico com cimento (GUSMÃO, 2008) .....	66
Figura 13: Fluxograma de dosagem de materiais estabilizados para pavimentação (baseado em: AUSTROADS, 2002).....	75
Figura 14: Limites granulométricos para reciclagem com cimento citados por métodos internacionais.....	79
Figura 15: Esquema do programa experimental da pesquisa .....	84
Figura 16: Realização da (a) coleta com auxílio da máquina recicladora e (b) medição da espessura coletada da camada .....	85
Figura 17: Amostras de (a) fresado asfáltico e (b) brita graduada .....	86
Figura 18: Estrutura do aparelho extrator por refluxo.....	87
Figura 19: Procedimento para (a) compactação de uma das camadas e (b) aparência da mistura de código 6-20-INT com teor de umidade igual a 8% após compactação .....	89
Figura 20: Procedimentos de (a) moldagem e (b) cura dos corpos de prova para RCS .....	92



Figura 21: Realização da (a) ruptura do corpo de prova à compressão e demonstração do (b) sistema digital para programação do ensaio .....	92
Figura 22: Imagem do (a) molde e soquete utilizados na confecção dos corpos de prova para RCD e da (b) prensa utilizada para ruptura à tração dos corpos de prova .....	94
Figura 23: Realização do (a) preparo do corpo de prova para o ensaio de MRD e (b) equipamento pronto para realização do ensaio .....	95
Figura 24: Procedimentos de (a) moldagem do corpo de prova para o ensaio para ensaios de retração e de (b) cura em câmara climatizada .....	97
Figura 25: Leitura da retração do corpo de prova .....	97
Figura 26: Posicionamento dos (a) corpos de prova em lâmina d'água de 1 cm e (b) detalhe da ascensão da água nos corpos de prova.....	98
Figura 27: Posicionamento dos (a) corpos de prova com sobrecargas (esquerda) em lâmina d'água de 2,5 cm e (b) CP introduzido no recipiente cilíndrico preso à mesa vibratória.....	100
Figura 28: Curvas granulométricas da brita graduada simples .....	103
Figura 29: Curvas granulométricas do fresado.....	104
Figura 30: Curvas granulométricas das misturas enquadradas aos limites da Wirtgen (primeira coleta) .....	104
Figura 31: Curvas granulométricas das misturas enquadradas aos limites da Wirtgen (segunda coleta) .....	105
Figura 32: Curvas de compactação obtidas .....	106
Figura 33: Evolução da RCS com o tempo de cura.....	109
Figura 34: Valores de RCS medidos e previstos pelo modelo obtido .....	111
Figura 35: Evolução da RCD com o tempo de cura .....	114
Figura 36: Valores de RCD medidos e previstos pelo modelo obtido .....	116
Figura 37: Relação entre RCD e RCS .....	117
Figura 38: Evolução do MRD com o tempo de cura.....	119
Figura 39: Valores de MRD medidos e previstos pelo modelo obtido .....	121
Figura 40: Relação entre MRD e RCS .....	122
Figura 41: Evolução da retração (em $\mu\text{m}$ ) com o tempo de cura .....	124
Figura 42: Valores de retração medidos e previstos pelo modelo obtido.....	126
Figura 43: Valores de ascensão capilar medidos e previstos pelo modelo obtido .....	129

Figura 44: Valores de expansão medidos e previstos pelo modelo obtido.....	132
Figura 45: Valores de absorção medidos e previstos pelo modelo obtido .....	136
Figura 46: Valores de erodibilidade medidos e previstos pelo modelo obtido .....	138
Figura 47: Comparação entre os valores de RCS obtidos neste e em outros estudos .....	140
Figura 48: Comparação entre os valores de RCD obtidos neste e em outros estudos.....	141
Figura 49: Comparação entre os valores de MRD obtidos neste e em outros estudos.....	143
Figura 50: Sugestão de método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento .....	145
Figura 51: Ensaio adicionais imprescindíveis quando da possibilidade de influência da água na camada reciclada.....	147

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos processos de reciclagem .....	28
Tabela 2: Casos de aplicações da reciclagem com cimento na pavimentação internacional ...	31
Tabela 3: Casos de aplicações da reciclagem com cimento na pavimentação nacional.....	32
Tabela 4: Comparação entre as especificações nacionais sobre reciclagem com cimento .....	37
Tabela 5: Limites das faixas granulométricas propostas pelas especificações nacionais.....	38
Tabela 6: Propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (parte 1) .....	45
Tabela 7: Propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (parte 2) .....	46
Tabela 8: Propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (parte 3) .....	47
Tabela 9: Propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (parte 4) .....	48
Tabela 10: Propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (parte 5).....	49
Tabela 11: Comparação de uso de energia e materiais entre uma base reciclada com cimento e uma base nova .....	53
Tabela 12: Benefícios proporcionados pela reciclagem com cimento e outras técnicas de restauração .....	53
Tabela 13: Categorias de tráfego espanholas .....	69
Tabela 14: Estruturas indicadas para RCS da camada reciclada de no mínimo 2,5 MPa .....	69
Tabela 15: Estruturas indicadas para RCS da camada reciclada de no mínimo 3,5 MPa .....	70
Tabela 16: Procedimento de cálculo para composição da mistura .....	71
Tabela 17: Teores típicos de cimento conforme sua aplicação.....	71
Tabela 18: Classificação dos materiais conforme sua RCS aos 7 dias de cura.....	72
Tabela 19: Materiais gerados pela estabilização com cimento.....	74
Tabela 20: Comparação entre os métodos de dosagem internacionais citados .....	78
Tabela 21: Limites granulométricos citados pelos métodos de dosagem internacionais .....	79
Tabela 22: Resumo das misturas estudadas na pesquisa .....	83

Tabela 23: Características da moldagem de corpos de prova para cada ensaio realizado.....	90
Tabela 24: Número de corpos de prova moldados para cada ensaio realizado .....	91
Tabela 25: Parâmetros obtidos a partir das curvas de compactação.....	105
Tabela 26: Resultados de RCS aos 3 dias de cura.....	107
Tabela 27: Resultados de RCS aos 7 dias de cura.....	108
Tabela 28: Resultados de RCS aos 14 dias de cura.....	108
Tabela 29: Redução da RCS com o aumento de fresado.....	108
Tabela 30: Aumento da RCS com a utilização de energia de compactação mais elevada.....	109
Tabela 31: Aumento da RCS com o acréscimo do teor de cimento .....	109
Tabela 32: Efeito da imersão prévia na RCS.....	112
Tabela 33: Taxas de carregamento aplicadas .....	112
Tabela 34: Resultados obtidos para RCS com aplicação de diferentes taxas de carregamento .....	112
Tabela 35: Resultados de RCD aos 3 dias de cura .....	113
Tabela 36: Resultados de RCD aos 7 dias de cura .....	113
Tabela 37: Resultados de RCD aos 14 dias de cura .....	114
Tabela 38: Redução da RCD com o aumento de fresado .....	115
Tabela 39: Aumento da RCD com a utilização de energia de compactação mais elevada ....	115
Tabela 40: Aumento da RCD com o acréscimo do teor de cimento .....	115
Tabela 41: Resultados de MRD aos 3 dias de cura .....	118
Tabela 42: Resultados de MRD aos 7 dias de cura .....	118
Tabela 43: Resultados de MRD aos 14 dias de cura .....	119
Tabela 44: Redução da MRD com o aumento de fresado .....	120
Tabela 45: Aumento da MRD com a utilização de energia de compactação mais elevada ...	120
Tabela 46: Aumento da MRD com o acréscimo do teor de cimento .....	120
Tabela 47: Resultados de retração por secagem em $\mu\text{m}$ .....	123
Tabela 48: Resultados de retração por secagem em porcentagem .....	124

Tabela 49: Aumento da retração (em $\mu\text{m}$ ) com o acréscimo do teor de cimento.....	124
Tabela 50: Aumento da retração (em $\mu\text{m}$ ) com uso de uma maior energia de compactação.....	125
Tabela 51: Resultados de ascensão capilar após 24 horas de exposição à água.....	127
Tabela 52: Resultados de ascensão capilar após 72 horas de exposição à água.....	127
Tabela 53: Redução da ascensão capilar com o acréscimo do teor de cimento .....	128
Tabela 54: Redução da ascensão capilar com a utilização de energia de compactação mais elevada.....	128
Tabela 55: Aumento da ascensão capilar com o tempo de exposição à água .....	128
Tabela 56: Resultados de expansão após 24 horas de exposição à água.....	130
Tabela 57: Resultados de expansão após 72 horas de exposição à água.....	130
Tabela 58: Aumento da expansão com o tempo de exposição à água.....	131
Tabela 59: Aumento da expansão com o acréscimo de fresado .....	131
Tabela 60: Resultados de absorção após 24 horas de exposição à água.....	133
Tabela 61: Resultados de absorção após 72 horas de exposição à água.....	133
Tabela 62: Redução da absorção com o acréscimo do teor de cimento .....	134
Tabela 63: Redução da absorção com a utilização de energia de compactação mais elevada.....	134
Tabela 64: Aumento da absorção com com o tempo de exposição à água .....	134
Tabela 65: Resultados de erodibilidade.....	137
Tabela 66: Redução da erodibilidade com a utilização de energia de compactação mais elevada.....	137
Tabela 67: Redução da erodibilidade com o acréscimo do teor de cimento .....	137
Tabela 68: Redução da erodibilidade com o aumento de fresado .....	138

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A: Absorção

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC: Ascensão capilar

AENOR: *Asociación Española de Normalización y Certificación*

AIPCR: *Association mondiale de la Route*

ANNT: Agência Nacional de Transportes Terrestres

ARRA: *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

BGS: Brita Graduada Simples

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR: *California Bearing Ratio*

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono

CPs: Corpos de prova

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DCP: *Dynamic Cone Penetrometer*

DER-PR: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná

DER-SP: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

E: Expansão

FHWA: *Federal Highway Administration*

FWD: *Falling Weight Deflectometer*

GC: Grau de Compactação

$\gamma_{sm\acute{a}x}$ : Peso específico aparente seco máximo

HA: *Highways Agency*

IECA: *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones*

IPR/DNIT: Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ISC: Índice de Suporte Califórnia

LAGEOTEC: Laboratório de Geotecnologia – UFRGS

LAPAV: Laboratório de Pavimentação – UFRGS

LEME: Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais – UFRGS

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

LWD: *Light Weight Deflectometer*

$\mu$  – Coeficiente de Poisson

MR: Módulo de resiliência

MRD: Módulo de resiliência diametral

PCA: *Portland Cement Association*

RAP: *Reclaimed Asphalt Pavement*

RCD: Resistência à tração por compressão diametral

RCS: Resistência à compressão simples

RTA: *Roads and Traffic Authority*

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

$\omega_{ot}$ : Teor de umidade ótimo

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo faz-se uma contextualização do problema de pesquisa, explicitando as razões que motivaram seu desenvolvimento. Além disso, são apresentados os objetivos que nortearam a realização da investigação.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos, o desenvolvimento econômico e a marcada predominância do modal rodoviário ocasionaram uma crescente demanda das rodovias, com aumento tanto do número de veículos que as trafegam quanto das cargas que estes transportam.

Em resposta ao aumento das solicitações do tráfego, têm-se dimensionado pavimentos flexíveis com revestimentos asfálticos cada vez mais robustos. Essas espessuras maiores, embora possam assegurar ao pavimento uma longa vida de fadiga, aumentam o risco de rupturas por cisalhamento, como o afundamento nas trilhas de roda e o surgimento de trincas de cima para baixo. Isto também reflete em um maior custo e consumo de recursos naturais não renováveis. Portanto, tal prática, embora corrente nas rodovias mais importantes, não é considerada sustentável.

Além de gerar a necessidade de se dimensionar revestimentos mais espessos, o aumento das solicitações do tráfego também ocasiona a degradação precoce destes pavimentos. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (2014), em torno de 25% dos 98.475 km de rodovias pesquisados apresenta um padrão de qualidade inferior ao estado regular; fato que mostra a necessidade de intervenções objetivando a melhoria da condição estrutural e funcional das mesmas.

Assim como a construção de novos pavimentos com revestimentos robustos, as práticas tradicionais de restauração rodoviária, como recapeamentos, são igualmente onerosas, causam impactos ambientais e nem sempre proporcionam o desempenho esperado.

Entretanto, pavimentos devem ser dimensionados, construídos e restaurados para durar. Assim, observa-se que nos países com avançada tecnologia em pavimentação é usual a



inclusão de camadas artificialmente cimentadas nos pavimentos, com os pavimentos flexíveis dando lugar a pavimentos semirrígidos ou invertidos.

Nesta perspectiva, a reciclagem profunda de pavimentos com adição de cimento Portland aparece como uma alternativa às intervenções tradicionalmente utilizadas na restauração de pavimentos, principalmente pelo fato da técnica gerar uma base rígida, resistente e durável, pela rapidez executiva e pela preservação ambiental.

No Brasil, a reciclagem de pavimentos com cimento vem sendo aplicada há algumas décadas; entretanto, a documentação técnica para orientar a realização deste tipo de serviço é escassa. Este fato acaba por se tornar um limitador ao pleno emprego da técnica e faz com que perdurem dúvidas acerca de seu uso.

Dentre as lacunas deixadas pela documentação nacional, destaca-se a inexistência de um procedimento de dosagem de misturas recicladas com cimento, o que resulta na adoção de variados métodos e critérios nos projetos de misturas recicladas, às vezes, comprometendo sua eficácia. Deste modo, fica explícita a necessidade de desenvolver-se um procedimento para dosagem e, assim, proporcionar ao meio técnico um procedimento que seja, simultaneamente, exequível e qualificado, do ponto de vista científico.

Destaca-se que o estudo apresentado nesta dissertação é o primeiro produto de uma pesquisa muito ampla sobre reciclagem de pavimentos com cimento, que vem sendo realizada no Laboratório de Pavimentação e no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da UFRGS, contando com a participação da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), do Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNIT (IPR/DNIT) e de concessionárias de rodovias, de empresas que realizam a reciclagem e produtoras de equipamentos para reciclagem. A Figura 1 apresenta um esquema no qual são demonstradas as etapas da pesquisa global, destacando-se (linha contínua) as realizadas nesta pesquisa.

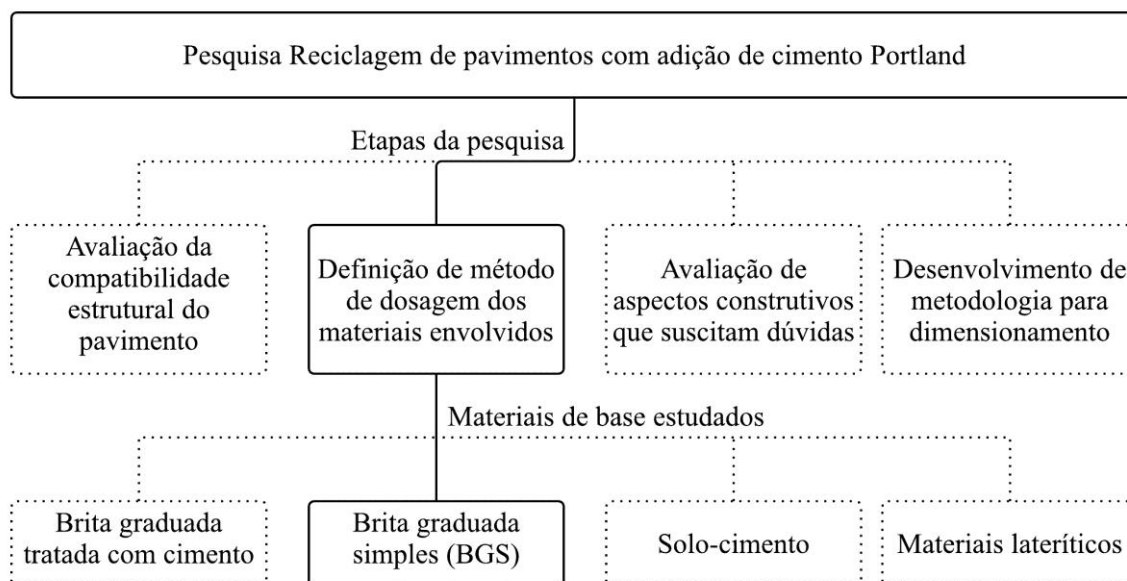


Figura 1: Etapas da pesquisa global com destaque para o enfoque deste estudo

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo geral de estabelecer as bases para a proposição de um método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento, através de ensaios experimentais e considerando-se como referência o método de dosagem de materiais estabilizados com cimento da Austroads (2002).

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para que fosse possível alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) executar ensaios mecânicos (resistência à compressão simples e erodibilidade) e volumétricos (ascensão capilar, expansão, absorção e retração por secagem) descritos no método de dosagem de materiais estabilizados com cimento da Austroads (2002), para verificar a aplicabilidade do mesmo, considerando misturas de materiais brasileiros recicladas com cimento;

- b) realizar ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência para avaliar o comportamento mecânico das misturas estudadas;
- c) avaliar a influência do teor de cimento, do teor de fresado asfáltico, da energia de compactação e do tempo de cura no comportamento das misturas estudadas.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente documento divide-se em sete capítulos, cujos conteúdos são apresentados sumariamente a seguir. Neste primeiro capítulo foram apresentados o problema de pesquisa, a relevância do estudo e os objetivos que se visou alcançar através da realização da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma compilação sobre o estado da arte das técnicas de reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland, incluindo sua conceituação, o histórico de aplicação, as propriedades de camadas recicladas com cimento, vantagens e desvantagens do emprego da técnica e um relato sobre pesquisas recentemente realizadas.

O capítulo 3 foca na revisão bibliográfica do tema principal deste trabalho, a dosagem de misturas recicladas com cimento para emprego em pavimentos, sendo apresentados métodos de dosagem utilizados em âmbito nacional e internacional.

No capítulo 4 apresenta-se o programa experimental da pesquisa, definindo-se os ensaios a serem considerados na proposição de um método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento e descrevendo-se os materiais e métodos utilizados. Além disso, relata-se o tipo de análise estatística utilizada para verificar a relevância dos resultados experimentais.

No capítulo 5 apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios, que foram tratados estatisticamente e comparados com resultados obtidos por outros pesquisadores.

O capítulo 6 apresenta uma sugestão de método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento, considerando-se como base o método de dosagem de materiais estabilizados com cimento da Austroads (2002) e realizando-se algumas adaptações a partir dos resultados obtidos nesta dissertação.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas, bem como sugestões para continuidade da pesquisa.

## 2 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Neste capítulo são apresentados conceitos e um breve histórico sobre a técnica de reciclagem de pavimentos. Ainda, se procura explicar os diferentes tipos e classificações às quais a técnica pode se enquadrar. Posteriormente, são apresentados conceitos, histórico de aplicação, processo executivo, vantagens e desvantagens, pesquisas diversas e outros aspectos relativos à reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland.

### 2.1 CONCEITO

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de reabilitação rodoviária que consiste em reutilizar materiais existentes triturados mais adição de agentes rejuvenescedores e/ou ligantes asfálticos novos, ou ainda com incorporação de agregado para correção granulométrica, de espuma de asfalto, de emulsões asfálticas e até de cimento Portland ou outro aditivo químico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Para a *Federal Highway Administration* (FHWA, 1997), com o aproveitamento do material do pavimento existente, existe uma considerável economia de materiais, dinheiro e energia. Além disso, problemas de descarte são minimizados, a geometria e espessura podem ser mantidas e, geralmente, a interrupção do tráfego é menor comparada a outras intervenções.

Segundo a *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 2001), a reciclagem de pavimentos não é uma técnica nova. Existem relatos do uso de reciclagem a frio na década de 1900, já o primeiro caso documentado de reciclagem a quente *in situ* data da década de 1930. Entretanto, foi apenas na década de 1970 que houve um grande avanço desta tecnologia, isto devido à crise do petróleo e ao desenvolvimento em larga escala de equipamentos de fresagem. Desde então, os métodos e equipamentos envolvidos na reciclagem se desenvolveram exponencialmente.

## 2.2 TIPOS DE RECICLAGEM

Há uma série de métodos diferentes empregados para efetuar a reciclagem dos materiais de um pavimento existente. Bonfim (1999 *apud* GUSMÃO, 2008) apresenta uma classificação dos processos de reciclagem quanto a diversos critérios (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação dos processos de reciclagem

Parâmetro	Tipo	Observação
Geometria	Sem modificação	Greide é mantido
	Com modificação	
Local de processamento	Usina	Fixa ou móvel
	<i>In situ</i>	
	<i>In situ</i> com usinado	Reciclagem <i>in situ</i> da base e posterior aplicação de reciclado processado em usina
Fresagem do material	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do material
Profundidade de corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e até sub-base
Mistura reciclada	Mistura a frio	Pré-misturado a frio
	Mistura a quente	Concreto asfáltico usinado a quente, pré-misturado a quente
Uso da mistura	Base	
	Camada de ligação	
	Revestimento	
Materiais adicionados	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland	Aumento de capacidade estrutural
	Emulsão asfáltica, CAP, Polímeros	Rejuvenescimento
	Mistura asfáltica	Adição de material fresado

(fonte: Bonfim, 1999 *apud* Gusmão, 2008)

## 2.3 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Segundo a *Portland Cement Association* (PCA, 2010), a reciclagem de pavimentos com incorporação de cimento Portland é a técnica que tritura o revestimento asfáltico juntamente com camadas inferiores (geralmente a base e, possivelmente, a sub-base) do pavimento existente e mistura esse material com cimento para, depois de devida compactação, gerar uma nova base estabilizada. Finaliza-se o processo com a aplicação da camada de revestimento, dando origem, assim, a uma nova estrutura a partir da reciclagem do pavimento degradado. A base estabilizada será mais homogênea, resistente e proporcionará um melhor desempenho em relação ao pavimento original, resultando em uma camada com maior durabilidade e que ocasionará menores esforços de manutenção.

Marín e Álvarez (2001) definem como material reciclado com cimento a mistura convenientemente distribuída e compactada do material proveniente de um pavimento existente triturado com cimento, água e, eventualmente, agregados adicionais. A espessura final da camada reciclada deverá ficar compreendida entre 20 e 35 cm e todo o processo de execução deverá ser realizado a temperatura ambiente.

## 2.4 HISTÓRICO DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE RECICLAGEM COM CIMENTO

Este item apresenta um breve histórico acerca da técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland. Primeiramente, é relatado o histórico internacional e, em seguida, o histórico desta tecnologia dentro no país. Em ambos, são relatadas experiências de sucesso e números interessantes a respeito da utilização e do desenvolvimento da reciclagem com cimento.

### 2.4.1 Experiência Internacional

Jasienski e Rens (2001) relatam que as primeiras experiências de reciclagem de pavimentos utilizando cimento datam da década de 1950, sendo a França e os Estados Unidos os países pioneiros em tais estudos.

A Malásia foi um dos primeiros países a aplicarem a técnica como uma alternativa para reabilitação de pavimentos degradados. O primeiro projeto utilizando tal processo foi executado em 1985, no qual foram reciclados em torno de 15 km de pavimento de uma via de baixo volume de tráfego no estado de Pahang. Desde então, a reciclagem com cimento se tornou muito aceita no país, sendo considerada a principal solução para reabilitação de pavimentos (SUFIAN *et al.*, 2009a).

Em 1989, a técnica de reciclagem com adição de cimento foi utilizada pela primeira vez na Bélgica, no município de Vaux-sur-Sûre, onde foi recuperada uma área de 6000 m<sup>2</sup> de pavimento. Desde a primeira utilização, até o ano de 2001, cerca de 300.000 m<sup>2</sup> de pavimentos foram recuperados no país através da técnica (JASIENSKI e RENS, 2001).

Na África do Sul, a técnica foi introduzida em 1991, quando foi efetuada a reciclagem de um trecho de 23 km de uma rodovia federal do país. Atualmente, existem mais de vinte máquinas recicladoras no país e estima-se que milhares de quilômetros de pavimentos foram reabilitados através da reciclagem nos últimos anos, sendo o cimento o principal aditivo empregado (COLLINGS, 2001).

Segundo Vorobieff e Wilmot (2001), as primeiras recicladoras profundas de pavimentos chegaram à Austrália em junho de 1992. Os autores salientam que o cimento Portland é o ligante mais utilizado em obras de reciclagem no país, devido a sua aptidão para estabilização da maior parte dos materiais, baixo preço e disponibilidade.

A Espanha é um dos países onde a técnica de reciclagem com cimento é mais difundida. Data de 1992 a primeira experiência com a técnica no país, na qual foi reciclado um trecho de 12 km de extensão. A partir de 2006, a quantidade de material reciclado no país sofreu grande aumento de produção, sendo reciclados anualmente mais de 2,5 milhões de metros quadrados de pavimentos. Estima-se que, até o ano de 2012, foram reciclados cerca de 25,4 milhões de metros quadrados de pavimentos, o que representa uma extensão de 3500 km (IECA, 2013).

Uma compilação de localidades onde a técnica de reciclagem com cimento foi empregada é exibida na Tabela 2. A tabela ainda traz breves informações sobre as obras relatadas.

Tabela 2: Casos de aplicações da reciclagem com cimento na pavimentação internacional

Ano	Local	Característica	Fonte
1985	Pahang, Malásia	Reciclagem de 15 km de pavimento	Sufian <i>et al.</i> (2009a)
1989	Pahang, Malásia	Reciclagem de 55 km de pavimento	Sufian <i>et al.</i> (2009a)
1990	Bélgica	Reciclagem de mais de 10000 m <sup>2</sup> de pavimento	Jasienski e Rens (2001)
1991	Rodovia National Route 2 (África do Sul)	Reciclagem de 23 km de revestimento asfáltico e base granular	Collings (2001)
1992	Rodovia II/408, Znojmo, República Tcheca	Reciclagem com espessura de 30 cm de pavimento com base granular	Stehlik <i>et al.</i> (2001)
1993	Bélgica	Reciclagem de mais de 50000 m <sup>2</sup> de pavimento	Jasienski e Rens (2001)
1994	Rodovia C-519 (Valladolid, Espanha)	Reciclagem de revestimento asfáltico e base granular	Minguela (2011)
1995	Rodovia N-430 (Acedera – Presa de García Sola, Espanha)	Reciclagem com espessura entre 20 e 22 cm	Minguela (2011)
1995	Amarillo, Texas, EUA	Reciclagem de revestimento asfáltico e base granular	FHWA (1997)
1995	Estrada N-630 (Ruta de 31a Plata, Espanha)	Reciclagem de 36 km de pavimento, com espessura entre 25 e 30 cm	Segarra (2001)
1996	Mariembourg, Bélgica	Reciclagem de uma área de 16300 m <sup>2</sup> de pavimento	Jasienski e Rens (2001)
1997	Rodovia AV-902 (Ávila, Espanha)	Reciclagem de 4,5 km de pavimento	Minguela (2011)
1998	Saint-Ghislain, Bélgica	Reciclagem de uma área de 33600 m <sup>2</sup> de pavimento	Jasienski e Rens (2001)
1999	Espanha	Reciclagem de 25 trechos, representando uma superfície de 1220000 m <sup>2</sup>	Minguela (2011)
2000	Espanha	Reciclagem de 20 trechos, representando uma área de 1547000 m <sup>2</sup>	Minguela (2011)
2001	Bélgica	Reciclagem de cerca de 7000 m <sup>2</sup> de pavimento	Jasienski e Rens (2001)
2002 – 04	Malásia	Reciclagem de mais de 90 km de pavimento	Sufian <i>et al.</i> (2009a)
2007	Laramie County, Wyoming, EUA	Início do uso de reciclagem profunda com cimento na região	PCA (2012)
2009	Richland County, Montana, EUA	Reciclagem de tratamento superficial e base granular	PCA (2012)

#### 2.4.2 Experiência Nacional

No Brasil, a técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland já vem sendo utilizada há cerca de três décadas. Conforme Paiva e Oliveira (2009) estima-se que, até



o ano de 2009, a técnica de reciclagem com incorporação de cimento tenha recuperado mais de sete milhões de metros quadrados de pavimento no país.

Segundo Paiva *et al.* (2013), durante os últimos anos, somente no estado de São Paulo, milhares de quilômetros de rodovias têm sido restaurados pela reciclagem com adição de cimento. Os autores mencionam diversas rodovias onde a técnica foi empregada com sucesso no estado, podendo-se citar as seguintes: SPA-272, SP-300, SP-304, SP-264, SP-141 e a SP-079.

Além da vasta utilização da técnica no estado de São Paulo, existem relatos da aplicação da reciclagem com cimento em diversas regiões brasileiras. A Tabela 3 apresenta um resumo de algumas localidades do país onde foi empregado tal procedimento para restauração rodoviária.

Tabela 3: Casos de aplicações da reciclagem com cimento na pavimentação nacional

Ano	Local	Característica da obra	Fonte
1998	Rodovia Fernão Dias (BR-381: São Paulo / SP - Belo Horizonte / MG)	Reciclagem de cerca de 30000 m <sup>3</sup> de pavimento	Silva e Miranda (2000)
2000	Rodovia SP-352	Reciclagem de revestimento asfáltico e base de solo-cimento	Paiva <i>et al.</i> (2013)
2004	Rodovia Pedro Monteleone (SP-351: Bebedouro - Palmares Paulista / SP)	Reciclagem de 22 Km de revestimento asfáltico e base de solo-cimento	Oliveira <i>et al.</i> (2005)
2007	Rodovia SC-150 (BR-282: Joaçaba - Capinzal / SC)	Reciclagem de 30 Km de revestimento asfáltico e base de brita graduada	Trichês e Santos (2013)
2011	Rodovia Fernão Dias (BR-381: São Paulo / SP - Belo Horizonte / MG)	Reciclagem de base de solo-brita	Aranha (2013)
-	Rodovia BR-040 / MG	Reciclagem de revestimento asfáltico e base de cascalho laterítico	Oliveira (2003)
-	Rodovia SP-294	Reciclagem de revestimento asfáltico e base de solo-cimento	Oliveira (2003)
-	BR-163 / BR-277	Reciclagem de pavimentos no estado do Paraná	Andrade (2007)
-	Rodovia BR-459 / MG	Reciclagem de trecho entre Pouso Alegre e Congonhal / MG	Gusmão (2008)
-	Rodovia BR-135 / MG	Reciclagem de revestimento asfáltico e base de cascalho laterítico	Paiva e Oliveira (2009)
-	Rodovia SP-563 (região de Andradina / SP)	Reciclagem de revestimento asfáltico de base de solo-cimento	Paiva e Oliveira (2010)

## 2.5 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 da legenda que cada uma apresenta. Destaca-se que também são tecidos breves comentários que visam complementar as notas apresentadas):

- 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 georradares 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;

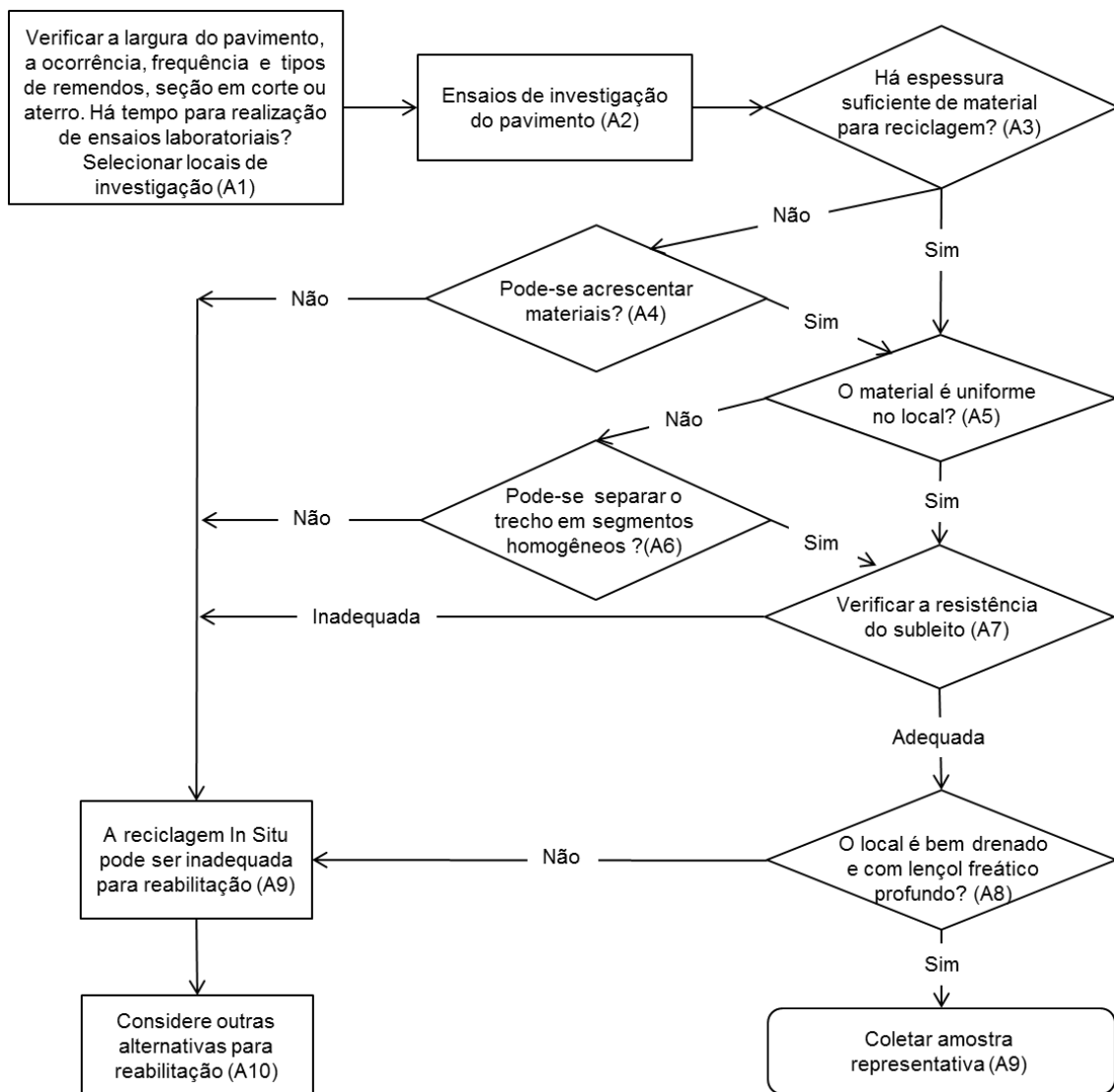


Figura 2: Fluxograma para avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem (baseado em: AUSTROADS, 2002)

- 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 grande 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) na mistura é condicionada a possibilidade de mudança de geometria da pista. Além disso, deve-se verificar se a curva 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 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 deflectométricos;
- g) A7: embora a norma australiana indique que um ISC (ou CBR) mínimo de 5% deva ser exigido para que o subleito suporte os esforços de compactação necessários para que a camada estabilizada atinja o peso específico estabelecido, considerando que a maioria dos subleitos brasileiros apresenta capacidade de suporte mais elevada, este valor mínimo poderá ser revisto. Contudo, de forma a 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 excessivamente deformável. O ensaio de ISC não fornece qualquer informação sobre a deformabilidade elástica e isto deverá ser melhor avaliado através de retroanálise de bacias deflectométricas;
- 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;

- i) A9: a partir dos dados obtidos na investigação, verifica-se a adequabilidade da reciclagem para a reabilitação do pavimento. Caso a resposta seja positiva, deve-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.

## 2.6 NORMAS TÉCNICAS NACIONAIS SOBRE RECICLAGEM COM CIMENTO

As normas técnicas existentes no país acerca da reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland são especificações de serviço desenvolvidas pelos Departamentos de Estradas de Rodagem (DER) dos estados do Paraná e de São Paulo e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Essas especificações são listadas abaixo:

- e) DER-PR ES-P 33/05 – Pavimentação: Reciclagem de pavimento *in situ* com adição de cimento (DER-PR, 2005);
- f) DER-SP ET-DE-P00/035 – Reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com cimento e brita (DER-SP, 2006);
- g) DNIT 167/2013-ES – Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço (DNIT, 2013a).

Existem divergências em itens importantes no processo de reciclagem do pavimento descrito em cada uma das especificações acima citadas, as principais diferenças são apresentadas na Tabela 4.

Além dos itens apresentados na Tabela 4, ainda existem diferenças na faixa granulométrica de trabalho à qual deve ser enquadrada a composição granulométrica do material reciclado. Os Departamentos de Estradas de Rodagem de São Paulo e do Paraná utilizam os mesmos limites para a faixa granulométrica de trabalho. Já o Departamento Nacional de Infraestrutura de

Transportes trabalha com duas faixas granulométricas distintas, e menciona que a granulometria do material a ser reciclado deve ser bem graduada. Os limites para as faixas granulométricas citadas são apresentados na Tabela 5 e na Figura 3.

Tabela 4: Comparação entre as especificações nacionais sobre reciclagem com cimento

Item analisado	Especificação de serviço		
	DER-PR ES- P 33/05	DER-SP ET-DE-P00/035	DNIT 167/2013-ES
Profundidade de corte mínima atingida pela recicladora (cm)	Não estabelece	12	30
Teor máximo de material fresado do revestimento asfáltico (%)	Não estabelece	Não estabelece	50
Energia de compactação	Intermediária	Intermediária	Modificada
Grau de compactação mínimo em campo (%)	100	100	98
Tolerância para o teor de umidade ótima em campo (%)	$\pm 1$	- 2 e + 1	Não estabelece
Resistência à compressão simples aos 7 dias de cura (MPa)	3,5 a 8	Não estabelece	2,1 a 2,5
Resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias de cura (MPa)	Não estabelece	Não estabelece	0,25 a 0,35
Liberação ao tráfego da camada reciclada	Após 7 dias de cura	Após salgamento, desde que a camada apresente resistência compatível com a solicitações impostas	Após salgamento, durante 3 a 7 dias, para que eventuais deficiências possam ser verificadas e sanadas

Tabela 5: Limites das faixas granulométricas propostas pelas especificações nacionais

Peneira (mm)	Limites DNIT (%)				Limites DER-SP e DER-PR (%)	
	Faixa I		Faixa II		Mínima	Máxima
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
50,8	100	100	100	100	-	-
38,1	-	-	-	-	100	100
25,4	75	90	100	100	-	-
9,5	40	75	50	85	-	-
4,75	30	60	35	65	50	100
2,36	20	45	25	50	-	-
0,425	15	30	15	30	15	100
0,075	5	15	5	15	5	100

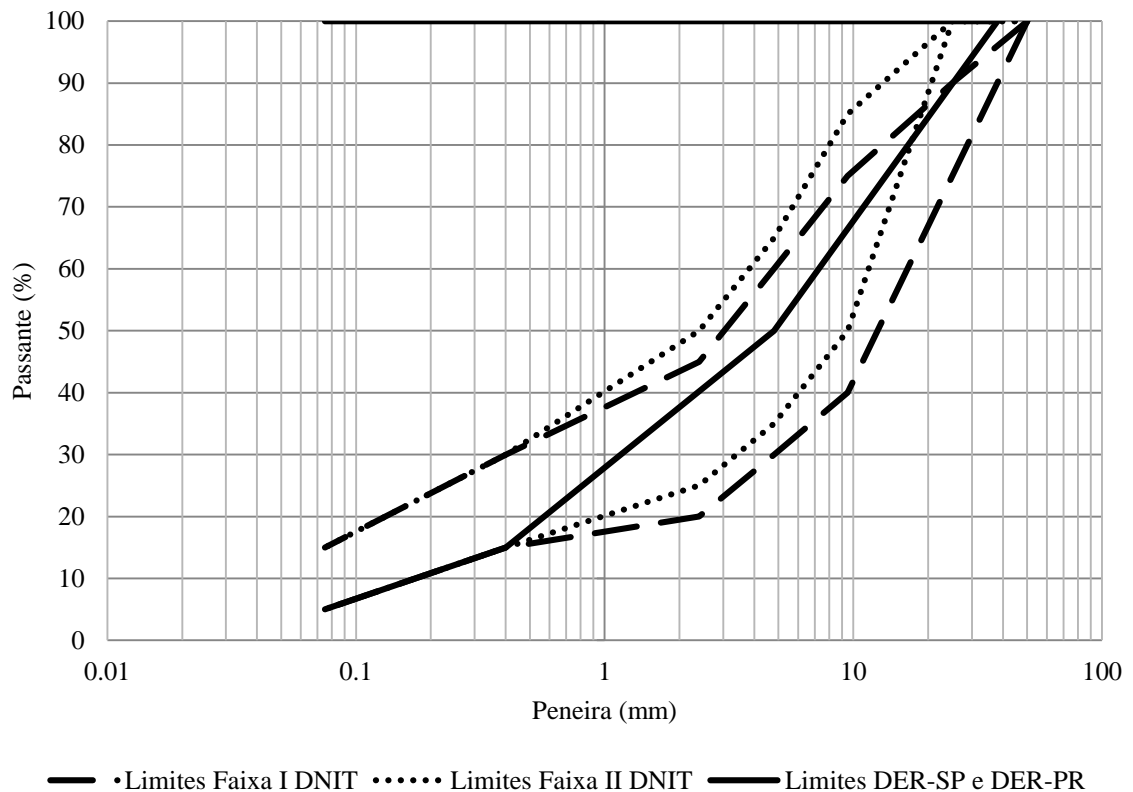


Figura 3: Faixas granulométricas para reciclagem com cimento citadas nas normas nacionais

## 2.7 PROCESSO EXECUTIVO DA RECICLAGEM COM CIMENTO

Assim como em outras técnicas de reciclagem de pavimentos a frio, a reciclagem com adição de cimento Portland pode ser realizada tanto no próprio local (*in situ*) como em usina. A seguir são apresentados os processos executivos empregados em cada um desses procedimentos.

### 2.7.1 *In situ*

Com base nas especificações citadas no item anterior (DER-PR, 2005; DER-SP, 2006; DNIT, 2013a), a seguir é apresentada uma descrição concisa do processo executivo da reciclagem de pavimentos com adição de cimento realizada *in situ*.

Inicia-se o processo com a coleta de amostras de campo para elaboração do projeto de dosagem em laboratório. Após a definição do projeto de dosagem, deve-se realizar um trecho experimental para verificação do desempenho do material reciclado. Nesta etapa, devem ser definidos os tipos de equipamentos a serem utilizados e a técnica de compactação mais adequada. Outra consideração antes do início da reciclagem com cimento é que a temperatura ambiente à sombra deve estar entre 5 e 35 °C e não deve haver possibilidade de chuva.

A realização do espalhamento do agregado adicional sobre o pavimento a ser reciclado (caso seja necessária correção granulométrica da mistura) é realizada preferencialmente com emprego de distribuidor de agregados, porém, caso não seja possível, é admitido o emprego de motoniveladora.

A etapa seguinte é o espalhamento do cimento sobre o pavimento existente, isto pode ser realizado na forma seca ou em forma de lama (ou pasta). Caso o espalhamento seja realizado na forma seca, é indicado o emprego de distribuidor de aglomerante hidráulico (Figura 4) ou, desde que se garanta a homogeneidade da taxa de cimento, é admitido espalhamento manual. Neste caso, o controle da taxa de cimento pode ser realizado através da utilização de bandejas com área e massa conhecidas. Optando-se pelo espalhamento na forma de lama, o mesmo pode ser realizado diretamente sobre o pavimento existente ou através de injeção no interior do tambor de reciclagem da máquina recicladora. A grande vantagem deste método é que não existe a preocupação de eventual perda de cimento na forma de pó.



Com a conclusão dessas etapas, acontece a passagem do trem de reciclagem, composto pela máquina recicladora, caminhão tanque para abastecê-la com água (posicionado à frente da mesma), rolos necessários para a compactação e motoniveladora.



Figura 4: Distribuição do cimento através de distribuidor de aglomerante hidráulico

No decorrer da passagem da máquina recicladora (Figura 5), o material do pavimento existente é triturado na profundidade definida em projeto e misturado com os materiais adicionais e água, como apresentado no esquema da Figura 6. Na mesma figura é mostrado o sentido de deslocamento da máquina e de giro do cilindro de corte.



Figura 5: Máquina recicladora a frio modelo Wirtgen WR 2500 S

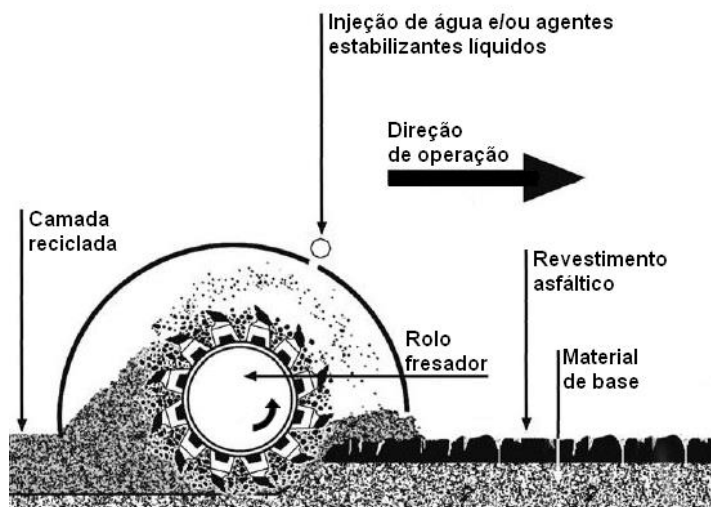


Figura 6: Configuração do rolo fresador/misturador (baseado em: PCA, 2005)

A quantidade de água adicionada é a necessária para que se atinja a umidade ótima da mistura (obtida através de ensaios de compactação) e é calculada a partir da umidade do material em campo, geralmente de forma expedita (como, por exemplo, através do método da frigideira).

Deve-se ter atenção especial no controle das velocidades tanto da máquina recicladora quanto da rotação do cilindro de corte, pois estas têm influência direta na granulometria do material triturado. Uma imagem das ferramentas de corte do cilindro, conhecidas como *bits*, é apresentada na Figura 7.



Figura 7: Cilindro e bits de corte de uma recicladora (WIRTGEN, 2007)

A própria recicladora realiza a conformação da mistura reciclada sobre a pista (Figura 8) e, logo em seguida, realiza-se uma pré-compactação com emprego de rolos pé-de-carneiro para confinar a camada e evitar perdas de umidade à medida que a recicladora avança. Após a pré-compactação, efetua-se a conformação geométrica inicial da camada através do emprego de motoniveladora.

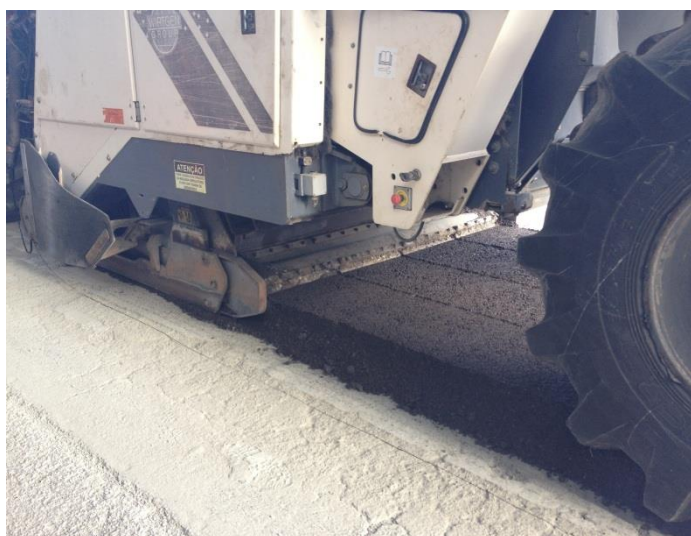


Figura 8: Conformação da mistura reciclada sobre a pista

Em seguida, ocorre a etapa de compactação final, onde atuam rolos vibratórios lisos e rolos pneumáticos com pressão regulável para que se atinja o grau de compactação mínimo definido em projeto. O controle do grau de compactação em campo, geralmente, é realizado através do método do frasco de areia.

No final do processo de compactação realiza-se o acerto final da superfície, de acordo com o projeto geométrico. Nesta etapa, a motoniveladora deve atuar exclusivamente em operação de corte, não sendo aceita a correção de depressões pela adição de material.

Na sequência, a camada reciclada recebe uma pintura de cura para evitar a evaporação da água, por meio de aplicação de emulsão asfáltica diluída em água. Posteriormente, em caso de liberação imediata da pista ao tráfego, deve-se aplicar um salgamento sobre a pintura de cura (areia ou pó de pedra) para oferecer proteção mecânica à base reciclada. Ambos os procedimentos são apresentados na Figura 9. Por fim, é realizado o novo revestimento ou tratamento superficial que servirá como camada de rolamento.



Figura 9: Proteção da camada reciclada através de (a) pintura de cura e (b) salgamento

### 2.7.2 Em usina

No caso da reciclagem do pavimento com incorporação de cimento ser realizada em usina (Figura 10), o material do pavimento existente é fresado a frio, transportado e estocado próximo à usina, que geralmente é móvel e está instalada nas proximidades da obra, e então é introduzido no misturador, que produz uma mistura homogênea e com alto controle. A mistura reciclada é finalmente carregada em caminhões e transportada para o local onde será aplicada (WIRTGEN, 2007).



Figura 10: Usina de reciclagem modelo Wirtgen KMA 200 (WIRTGEN, 2007)

Na Figura 11 é apresentado um esquema que demonstra o funcionamento de uma usina móvel de reciclagem a frio, a qual conta com um sistema controlado por um microprocessador que monitora com alto grau de precisão a adição de materiais e de cimento no interior da câmara de mistura (WIRTGEN, 2007). As considerações que antecedem a realização da técnica *in situ* também são válidas para a reciclagem em usina, assim como os procedimentos de compactação, acabamento, liberação ao tráfego e controle de qualidade.

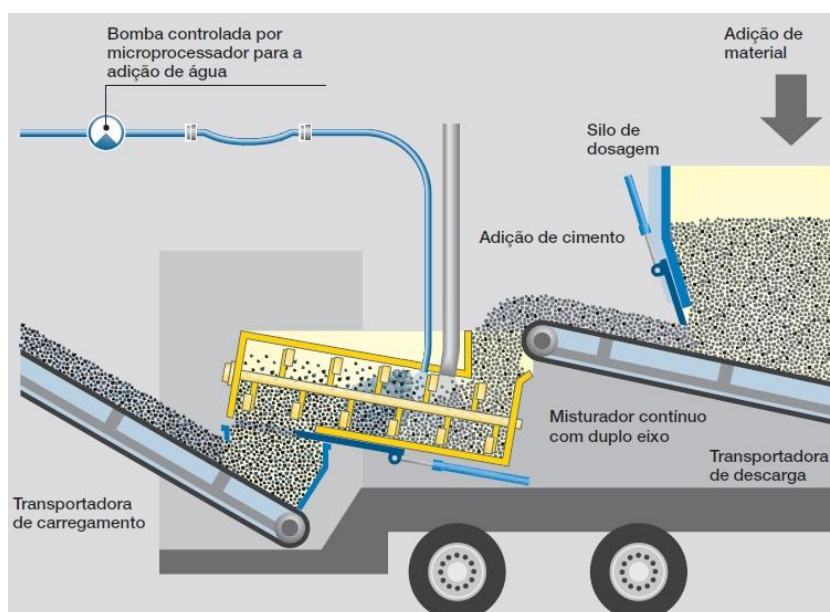


Figura 11: Processo de funcionamento de uma usina móvel de reciclagem a frio com cimento (baseado em: WIRTGEN, 2007)

## 2.8 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS RECICLADOS COM CIMENTO

Neste item apresentam-se propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (Tabelas 6 a 10). Apresentam-se resultados de resistências à compressão simples (RCS), à tração por compressão diametral (RCD) e à tração na flexão (RTF) e de módulo de resiliência nas compressões triaxial (MRT) e diametral (MRD). Alguns desses resultados são, posteriormente, comparados com os obtidos na presente pesquisa. Analisando-se os dados apresentados, percebe-se que existe a tendência da resistência e da rigidez das misturas reduzirem conforme se aumenta o teor de material fresado. Ainda, efeito oposto acontece quando se utilizam maiores energias de compactação e teores de cimento mais elevados.

Tabela 6: Propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (parte 1)

Autor	Material da base	Teor de cimento (%)	Teor de fresado (%)	Energia de compactação	Idade de cura (dias)	RCS (MPa)	RCD (MPa)	RTF (MPa)	MRT (MPa)	MRD (MPa)	
Aranha (2013)	Solo-brita-cimento	5	0	Intermediária	3	-	0,90	-	-	-	
					7	7,00	1,20	-	-	-	
					28	9,50	1,70	-	-	-	
		5	0	Intermediária	3	-	0,40	-	-	-	-
					7	4,00	0,70	-	-	-	
					28	6,00	1,00	-	-	-	
		5	0	Modificada	3	-	0,50	-	-	-	-
					7	6,00	0,70	-	5500*	-	
					28	9,00	1,00	-	8000*	-	
		Solo-cimento	6	0	Modificada	3	-	0,60	-	-	-
						7	8,00	0,80	-	5200*	-
						28	10,50	1,20	-	8200*	-
	7	0	Modificada	3	-	0,40	-	-	-	-	
				7	5,00	0,90	-	6500*	-		
				28	6,00	1,60	-	8000*	-		
Dellabianca (2004)	Cascalho laterítico	2	25	Intermediária	3	0,70	-	-	-	-	
					7	0,90	-	-	278,20 <sup>0,20</sup>	-	
					28	1,30	-	-	-	-	

\*Aplicada apenas uma pressão de confinamento no ensaio, igual a 0,1 MPa

Tabela 7: Propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (parte 2)

Autor	Material da base	Teor de cimento (%)	Teor de fresado (%)	Energia de compactação	Idade de cura (dias)	RCS (MPa)	RCD (MPa)	RTF (MPa)	MRT (MPa)	MRD (MPa)
Ely (2014)	Brita graduada	4	70	Intermediária	3	1,29	0,19	-	-	3663
					7	1,9	0,26	-	-	6298
					14	2,08	0,28	-	-	7892
				Modificada	3	2,03	0,21	-	-	4865
					7	2,54	0,26	-	-	7432
					14	2,72	0,45	-	-	8420
Gusmão (2008)	Brita graduada simples	3	40	Intermediária	3	4,93	-	-	-	-
					3	3,00	-	-	-	-
				Intermediária	1	0,95	0,08	-	-	-
					3	1,11	0,14	-	-	-
				Intermediária	28	2,11	0,42	-	-	-
					1	0,68	0,06	-	-	-
				Intermediária	3	1,00	0,12	-	-	-
					28	2,09	0,39	-	-	-
				Intermediária	1	0,49	0,04	-	-	-
					3	1,00	0,12	-	-	-
				Intermediária	28	2,09	0,38	-	-	-
					7	1,31	-	-	-	-
Minguela (2011)	Material granular	3,5	33	Modificada	7	2,61	0,19	0,45	-	-
					28	3,17	0,26	0,54	-	-
				Modificada	90	3,96	0,39	0,69	-	-
					7	3,23	-	-	-	-
				Modificada	33	3,3	-	-	-	-
					4,5	3,3	-	-	-	-

Tabela 8: Propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (parte 3)

Autor	Material da base	Teor de cimento (%)	Teor de fresado (%)	Energia de compactação	Idade de cura (dias)	RCS (MPa)	RCD (MPa)	RTF (MPa)	MRT (MPa)	MRD (MPa)
Oliveira (2003)	Solo-cimento	3	30	Normal	7	2,41	-	-	-	-
		4				2,53	-	-	-	
		5				2,82	-	-	-	
	Cascalho laterítico	3	85	Normal	7	1,33	-	-	-	-
		4				1,82	-	-	-	
		5				2,11	-	-	-	
Paiva e Oliveira (2009)*	Cascalho laterítico	4	40	Intermediária	3	-	-	-	-	-
					7	2,60	-	-	-	
					28	3,53	-	-	-	
Paiva e Oliveira (2010)**	Solo-cimento	3	Não informada	Modificada	7	1,70	0,31	-	-	-
						2,47	0,22	-	-	-
Paiva e Oliveira (2013)	Solo-cimento	3	30	Modificada	7	3,32	-	-	-	-
						3,5	-	-	-	
						4	-	-	-	
		4,5				4,56	-	-	-	
						5,49	-	-	-	
Silva e Miranda (2000)	-	-	100	Modificada	7	3,63	-	-	-	-
						4,56	-	-	-	
						5,49	-	-	-	

\*No estudo foram utilizados vários tipos de cimento. A tabela apresenta a média dos valores de RCS obtidos, excluídos os que não se enquadraram no intervalo da média  $\pm$  desvio padrão. \*\*O estudo realiza uma comparação entre as resistências obtidas a partir da moldagem de CPs com vários graus de compactação. A tabela apresenta os valores obtidos para GC = 100%.



Tabela 9: Propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (parte 4)

Autor	Material da base	Teor de cimento (%)	Teor de fresado (%)	Energia de compactação	Idade de cura (dias)	RCS (MPa)	RCD (MPa)	RTF (MPa)	MRT (MPa)	MRD (MPa)	
Sufian <i>et al.</i> (2009)*	Brita graduada simples	3	0	Modificada	1	1,91	0,18	-	-	7751	
					2	3,64	0,27	-	-	14161	
					3	3,70	0,27	-	-	15055	
					7	4,10	0,41	-	-	15642	
					28	6,51	0,45	-	-	20273	
					1	2,42	0,22	-	-	8124	
			25	Modificada	2	2,84	0,23	-	-	9093	
					3	3,07	0,26	-	-	10409	
					7	3,37	0,34	-	-	12447	
					28	6,03	0,47	-	-	15500	
					1	1,66	0,22	-	-	6186	
					2	1,70	0,29	-	-	7527	
		3	Modificada	50	3	1,92	0,29	-	-	8347	
					7	1,98	0,37	-	-	10807	
					28	3,84	0,51	-	-	12149	
					1	1,56	0,18	-	-	3130	
					2	1,64	0,26	-	-	4621	
				75	Modificada	3	1,75	0,34	-	-	7006
						7	1,83	0,48	-	-	8720
						28	2,75	0,55	-	-	-
						1	0,40	0,14	-	-	1267
						2	0,65	0,17	-	-	2012
		3	Modificada	100	3	0,67	0,20	-	-	3130	
					7	0,90	0,31	-	-	4472	
					28	1,10	0,44	-	-	5962	

\*Valores obtidos graficamente com auxílio do software Engauge Digitizer 4.1

Tabela 10: Propriedades mecânicas de misturas recicladas com cimento estudadas por diversos pesquisadores (parte 5)

Autor	Material da base	Teor de cimento (%)	Teor de fresado (%)	Energia de compactação	Idade de cura (dias)	RCS (MPa)	RCD (MPa)	RTF (MPa)	MRT (MPa)	MRD (MPa)	
Trichês <i>et al.</i> (2013)	Não informado	3	40	Modificada	3	0,97	0,21	0,24	-	-	
					7	1,63	0,34	0,34	-	-	
		3,5	40	Modificada	28	2,49	0,52	0,50	-	-	-
					7	2,06	0,37	0,36	-	-	
		4	40	Modificada	28	3,31	0,65	0,63	-	-	-
					7	2,85	0,45	0,48	-	-	
	4,5	40	Modificada	28	4,30	0,71	0,70	-	-	-	
				7	3,33	-	0,52	-	-		
	2	30	Intermediária	28	4,84	-	0,82	-	-	-	-
				3	0,54	-	-	-	-		
	3	30	Intermediária	7	0,86	0,22	-	-	-	-	-
				28	1,14	0,24	-	602*	-		
	4	30	Intermediária	3	1,10	-	-	-	-	-	-
				7	1,31	0,31	-	-	-		
	2	25	Modificada	28	1,85	0,57	-	1685*	-	-	-
				3	1,29	-	-	-	-		
	3	25	Modificada	7	2,02	0,57	-	-	-	-	-
				28	2,65	0,84	-	2615*	-		
	4	25	Modificada	7	1,24	0,27	-	2669*	-	-	-
				28	1,51	0,35	-	3727*	-		
4	25	Modificada	7	1,74	0,35	-	3212*	-	-	-	
			28	2,25	0,54	-	4861*	-			
4	25	Modificada	7	2,05	0,53	-	4685*	-	-	-	
			28	2,86	0,70	-	5518*	-			

\*Ensaio realizado sem aplicação de pressão de confinamento, apenas tensão desvio

## 2.9 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA TÉCNICA DE RECICLAGEM COM CIMENTO

Neste item são apresentadas as vantagens e desvantagens do processo de reciclagem de pavimentos com adição de cimento, seja a mesma realizada *in situ* ou em usina.

Com base nos trabalhos publicados por Minguela (2011) e pelo *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones* (IECA, 2013), a seguir são apresentadas as principais vantagens da reciclagem com cimento quanto aos aspectos técnico, econômico e ambiental:

### a) vantagens técnicas:

- permite reabilitar um pavimento degradado ou inadequado ao tráfego que deveria suportar. Isto acontece através da introdução de uma camada estabilizada que será mais homogênea, estável e de espessura importante, gerando elevadas características mecânicas;
- diminui as tensões verticais que chegam ao subleito e as tensões de tração que se manifestam no revestimento asfáltico;
- os efeitos negativos ocasionados pela mudança de umidade na estrutura do pavimento são reduzidos;
- aproveitamento dos materiais envelhecidos ou que apresentem características inadequadas;
- homogeneização geométrica e da resistência do pavimento;
- possibilidade de reabilitação de faixas individuais, não sendo necessária a interdição total da via. Este aspecto é muito importante em rodovias de duas ou mais faixas com mesmo sentido, onde a degradação pode se concentrar somente nas pistas externas devido ao tráfego lento e pesado;
- permite manter o greide inicial, não gerando aumento da cota e do gabarito da rodovia e não produzindo degraus no acostamento do pavimento;
- redução dos transtornos causados pelo tráfego da obra e da possibilidade de desgastes nas vias adjacentes, devido ao volume reduzido de material a ser

transportado para a obra (principalmente quando a reciclagem for realizada *in situ*);

- caso um eventual aumento na largura da rodovia seja necessário, este pode ser realizado simultaneamente com a reciclagem. Isto é de grande interesse quando, além de degradações, o pavimento apresenta largura insuficiente. O processo é realizado utilizando-se materiais semelhantes aos materiais do pavimento a ser reciclado, resultando assim, em misturas com características muito similares.

b) vantagens econômicas:

- a reutilização dos materiais existentes representa uma economia significativa, pois se diminui o volume necessário de novos agregados a serem utilizados na obra e, portanto, os custos de extração, trituração e classificação;
- quando o processo for realizado *in situ*, não é necessário instalar uma usina de dosagem, nem realizar transporte de materiais (economia de combustível, menor desgaste de veículos, etc);
- menores custos para reabilitação de antigos pavimentos degradados;
- redução do tempo de construção e interrupção do tráfego;
- as vantagens técnicas já citadas também se traduzem como vantagens econômicas.

c) vantagens ambientais:

- a reutilização dos materiais do pavimento existente contribui para que não seja necessária a abertura de novas jazidas de agregados, além disso, as reservas já existentes também são poupadas. Ainda, não são necessários bota-foras, já que não existe descarte de materiais;
- ao se reduzir os transportes (um dos principais bônus da reciclagem *in situ*), é reduzida a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e os impactos provocados em áreas adjacentes (erosão, poeira, etc) são minimizados;

- é uma técnica a frio (o processo é realizado a temperatura ambiente) e, portanto, consome pouca energia;
- com a diminuição da emissão de gases nocivos, reduzem-se notavelmente os danos à qualidade do ar, principalmente se comparado a outras soluções para restauração de pavimentos;
- quando realizada *in situ*, não existe a possibilidade de danos ambientais causados pela instalação de uma usina de dosagem, como a eliminação da camada vegetal, modificação da drenagem, poluição acústica, etc.

Além das vantagens citadas acima, a Wirtgen (2012) acrescenta as seguintes:

- a) quando a reciclagem for realizada *in situ*, a perturbação do subleito é minimizada. Isto acontece pelo fato da reciclagem ser tipicamente uma operação de uma única passada e pelas rodas da recicladora não entrarem em contato com as camadas inferiores, se deslocando sobre a superfície do material reciclado;
- b) pelo fato da operação de reciclagem *in situ* poder ser acomodada no limite da largura de uma faixa de trânsito, ela proporciona níveis relativamente altos de segurança. Em estradas com duas faixas, a reciclagem é normalmente realizada nas metades das larguras, acomodando-se o trânsito de uma mão na metade oposta durante o horário de trabalho. A largura total da rodovia pode ser aberta ao trânsito fora do horário de trabalho, inclusive a faixa reciclada que for concluída;
- c) quando a reciclagem for realizada em usina, existe um grande controle dos insumos (os materiais podem ser selecionados, tratados de antemão, armazenados em pilhas de estocagem e testados antes da mistura) e da qualidade da mistura (ajustes podem ser realizados no misturador para variar o tempo pelo qual o material é retido na câmara de mistura, melhorando a qualidade);
- d) aceitação, disponibilidade e facilidade de aplicação do agente estabilizador. O cimento é um material bem conhecido pela indústria da construção (e existem especificações normativas sobre o mesmo), pode ser obtido com facilidade em

qualquer parte do mundo e pode ser facilmente aplicado de forma manual (na ausência de espalhadores ou unidades de mistura). Além disso, em comparação com o ligante asfáltico, o cimento pode ser considerado barato.

A Tabela 11 apresenta uma comparação da utilização de energia e materiais entre uma base gerada pela reciclagem com cimento e a construção de uma nova base. Esta comparação é de autoria da PCA (2005), sendo baseada em um trecho de 1,6 km de extensão com 7,3 m de largura (duas faixas de tráfego) e uma espessura reciclada de 15 cm. A PCA (2012) também apresenta uma comparação entre a reciclagem com cimento e outras técnicas de restauração rodoviária, em termos de benefícios proporcionados (Tabela 12).

Tabela 11: Comparação de uso de energia e materiais entre uma base reciclada com cimento e uma base nova

Solução	Base reciclada com cimento	Base nova
Número de caminhões	12	180
Materiais novos (t)	300	4500
Material de aterro (m <sup>3</sup> )	0	2100
Consumo de combustível (L)	1900	11400

(fonte: PCA, 2005)

Tabela 12: Benefícios proporcionados pela reciclagem com cimento e outras técnicas de restauração

Benefício	Técnica de restauração		
	Reciclagem com cimento	Recapeamento	Remoção e reconstrução
Nova estrutura	X	X	X
Construção rápida	X	X	
Mínima interrupção do tráfego	X		
Mínimo transporte de material	X		
Conservação de recursos	X		
Manutenção da cota existente	X		X
Baixo custo	X		

(fonte: PCA, 2012)

Com relação à economia proporcionada pela reciclagem com cimento, a PCA (2005) aponta que os custos deste tipo de reciclagem são normalmente de 25 a 50% menores do que a alternativa de remoção e reconstrução do pavimento.

Quanto às desvantagens e limitações da reciclagem de pavimentos com cimento, pode-se ressaltar:

- a) caso o pavimento existente tenha uma estrutura muito heterogênea em sua extensão, o material resultante da reciclagem pode se tornar mais heterogêneo que uma mistura nova (MINGUELA, 2011);
- b) o processo *in situ* é realizado em faixas de pouco mais de 2 metros de largura, isto pode provocar o aparecimento de trincas longitudinais caso não sejam adotadas as precauções pertinentes para garantir uma adequada união entre os materiais das faixas adjacentes (MINGUELA, 2011);
- c) as trincas por retração são inevitáveis, como em qualquer material tratado com cimento Portland, porém, podem ser minimizadas (WIRTGEN, 2012). Oliveira (2003) sugere utilizar baixos teores de cimento para reduzir o nível de trincas por retração ou, ainda, a aplicação sobre a camada reciclada de asfaltos modificados, mantas geossintéticas ou camadas granulares para inibir a propagação dessas trincas para o revestimento. Outro procedimento com o objetivo de prevenir a reflexão de trincas indicado por alguns autores (RENS, 2003; PCA, 2005; ANDRADE, 2007; IECA, 2013), porém, não citado pelas normas brasileiras, é a pré-fissuração ordenada da camada reciclada através da abertura de juntas transversais. Essas juntas são realizadas preferencialmente criando-se descontinuidades no material fresco, mas também podem ser serradas após a compactação final;
- d) aumento da rigidez em pavimentos flexíveis (WIRTGEN, 2012). A PCA (2005) ressalta que os efeitos desse enrijecimento podem ser minimizados utilizando-se camadas mais espessas e com baixos teores de cimento ao invés de se empregar camadas esbeltas estabilizadas com elevados teores.

## 2.10 PESQUISAS RECENTES ACERCA DA RECICLAGEM COM CIMENTO

Nas últimas décadas, diversos estudos sobre a reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland foram desenvolvidos. Alguns desses estudos, assim como suas principais conclusões, são concisamente relatados a seguir. Ressalta-se que alguns desses autores tiveram seus resultados apresentados no item 2.8 (Tabelas 6 a 10).

Silva e Miranda (2000) descreveram a experiência de reciclagem da camada asfáltica da rodovia BR-381 (Fernão Dias). A espessura média de corte foi de 15 cm, sendo adicionados 4,2% de cimento e 5% de pó-de-brita, ambos em massa. É relatado que foram reciclados aproximadamente 29.700 m<sup>3</sup> de pavimento.

Os autores verificaram através de medições com viga Benkelman que houve redução no valor das deflexões do pavimento após a reciclagem. Ainda, através de comparação entre os custos da reciclagem e de uma possível remoção e reconstrução do pavimento, foi verificado que o custo por m<sup>3</sup> seria cerca de 40% maior caso fosse adotada a segunda opção.

Oliveira (2003) realizou um estudo laboratorial para verificação da influência do prazo de trabalhabilidade do cimento Portland na resistência à compressão simples da mistura reciclada. Os materiais utilizados foram coletados das rodovias SP-294 e BR-040 (MG). O material da primeira rodovia era formado por revestimento asfáltico e base de solo-cimento, já o material da segunda era formado por revestimento asfáltico e base de cascalho laterítico.

A energia utilizada nos ensaios de compactação foi equivalente à Normal do ensaio de Proctor. Os teores de cimento utilizados foram de 3%, 4% e 5%, em massa. Foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5,1 x 10,2 cm e, então, estes foram ensaiados à compressão simples após 7 dias de cura em câmara úmida.

Os resultados mostraram que, para os dois materiais, a resistência reduz quando a compactação é retardada em 2, 4 e 6 horas, quando comparada à resistência obtida a partir de condições normais de compactação. O autor observa que essa redução é menor nas duas primeiras horas, o que pode estar associado à perda de água relativamente pequena neste período.



Dellabianca (2004) estudou o comportamento de materiais fresados de revestimento asfáltico, visando sua aplicação em reciclagem de bases de pavimentos rodoviários. As misturas estudadas englobavam o material fresado do revestimento e cascalho laterítico, sendo o material fresado utilizado em diversas porcentagens (16%, 20%, 25% e 35%) para definição do teor ótimo de tal material. Foram estudadas misturas não estabilizadas e estabilizadas com cal ou cimento, ambos em teor igual a 2%, e a energia de compactação empregada foi igual à Intermediária do ensaio de Proctor.

Na pesquisa foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, índice de suporte Califórnia (ISC), cisalhamento direto e de módulo de resiliência. Além disso, também foram realizadas análises estrutural e econômica do uso da reciclagem, que indicaram a técnica como sendo amplamente viável.

Segundo o autor, uma das principais conclusões do trabalho foi que a película de ligante que envolve os grãos do fresado influencia nas propriedades do material. Ela reduz o ângulo de atrito interno, aumenta o repique elástico durante o ensaio de compactação e confere ao fresado uma componente de deformação viscosa. Isto se reflete na redução dos valores de índice de suporte Califórnia, resistência à compressão simples e de módulo de resiliência.

Também é relatado que o ISC não é o tipo de ensaio mais indicado para prever o comportamento de misturas recicladas e que parece haver um teor ótimo de fresado para o qual a mistura atinge uma resistência à compressão simples máxima (naquela pesquisa, igual a 25%).

Oliveira *et al.* (2005) relataram o processo de reciclagem do pavimento da rodovia SP-351 (Pedro Monteleone). O trecho com extensão de cerca de 22 km, entre Bebedouro e Palmares Paulista, foi reciclado com espessura média de corte de 20 cm (aproximadamente 5 cm de capa e 15 cm de base) e com adição de 3,5% de cimento CP III – 40 e 10% de mistura de brita 1 e 2, ambos em massa.

É mencionado pelos autores que, na dosagem em laboratório, o valor mínimo de resistência estipulado (2,5 MPa aos 7 dias) foi alcançado somente com 5% de cimento, porém, tendo em vista que um dos fatores responsáveis pelo trincamento de materiais cimentados é o alto teor de cimento, decidiu-se pela incorporação de brita, a fim de manter a resistência mínima e

reduzir o teor de cimento. A energia de compactação utilizada na dosagem foi correspondente à Modificada do ensaio de Proctor.

Os autores observaram que, em campo, a resistência à compressão simples e o grau de compactação foram sempre superiores aos mínimos preconizados. Além disso, as deflexões máximas apresentaram valores médios inferiores ao valor admissível e observou-se uma redução considerando-se as medidas realizadas antes (2002) e depois (2004) da restauração.

Gusmão (2008) apresentou um estudo acerca da evolução da resistência ao longo do tempo de misturas que simularam a reciclagem de pavimentos com adição de cimento. Foram utilizadas misturas de brita graduada e brita graduada mais material fresado, ambas com adição de cimento, as quais foram ensaiadas à compressão simples e tração por compressão diametral após 1, 3 e 28 dias de cura.

Os teores de cimento utilizados variaram de 3% a 5%, em massa, e a energia de compactação utilizada foi equivalente à Intermediária do ensaio de Proctor. Os corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão simples foram moldados no cilindro de Proctor (pequeno).

O autor relata que as misturas com maior porcentagem de brita graduada atingiram maiores resistências e que quanto maior o tempo de cura, maior a resistência alcançada, fato que é mais evidente entre 1 e 3 dias de cura. Assim, é proposta a liberação ao tráfego da camada reciclada somente após tal período de cura. O trabalho ainda apresenta uma proposta de metodologia para dosagem de misturas recicladas com adição de cimento Portland.

Sufian *et al.* (2009b) estudaram, em laboratório, misturas de brita graduada e fresado recicladas com dois agentes estabilizadores diferentes: cal e cimento (empregados separadamente). Os teores de fresado empregados foram de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, já os teores de cimento e de cal foram fixados em 3%. A energia de compactação empregada no estudo foi equivalente à Modificada de Proctor e os tempos de cura adotados foram de 1, 2, 3, 7 e 28 dias. As misturas tiveram suas características mecânicas determinadas através de ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência na compressão diametral.

O estudo também envolveu a execução de quatro pistas experimentais com várias seções diferentes, nas quais foram utilizadas misturas compostas por brita graduada (20%) e fresado

(80%) recicladas com os dois agentes estabilizadores separadamente, sendo estes aplicados em diversos teores diferentes. Estas pistas foram dimensionadas para possuírem a mesma resistência, para suportarem o mesmo tráfego e durarem o mesmo período de tempo. Tais pistas foram monitoradas em termos de tipo e severidade de trincas e profundidade do afundamento nas trilhas de rodas.

Os autores concluíram que o teor de fresado possui forte influência nas misturas recicladas, assim, tanto as misturas recicladas com cimento quanto as recicladas com cal apresentaram maiores resistências e rigidez quando da incorporação de uma menor quantidade de tal material. Também é relatado que, para as idades de cura estudadas em laboratório, as misturas recicladas com cimento mostraram maior resistência e rigidez que as recicladas com cal, entretanto, quando da análise das pistas experimentais após três anos de construção, a diferença de comportamento funcional observada entre as pistas recicladas com cimento e cal foi insignificante.

Paiva e Oliveira (2010) realizaram um estudo de laboratório para verificar as alterações causadas nas resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral quando das variações no grau de compactação e nos teores de umidade em amostras de material reciclado procedente da rodovia SP-563, localizada na região de Andradina.

A mistura estudada era composta por 77% de fresado, 20% de agregado virgem e 3% de cimento, todos em massa. Foram realizados ensaios de compactação na energia Modificada e moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm para verificação das resistências após 7 dias de cura. Tais corpos de prova foram moldados com diferentes graus de compactação (90, 92, 95, 97 e 100%) e com umidade variando em  $\pm 1\%$  em relação à ótima.

Os autores concluíram que a resistência é diretamente proporcional ao grau de compactação da mistura e que a adição de cimento não é garantia de boa resistência se o material não for devidamente compactado. As resistências encontradas foram maiores para teores de umidade 1% acima da ótima, pois foi possível tirar maior proveito da hidratação do cimento.

Ainda, os autores relataram que quando os corpos de prova são compactados com decréscimo de 1% de umidade em relação à ótima, os valores de resistência não sofrem variações expressivas para graus de compactação acima de 95%, o mesmo também é observado para a

umidade ótima. Assim, não haveria prejuízo para a resistência quando a camada reciclada fosse liberada com graus de compactação de 95 e 97%.

Trichês e Santos (2011) apresentaram uma avaliação do desempenho da reciclagem com adição de cimento empregada na restauração da rodovia SC-303 (atual SC-150). O trecho, entre Joaçaba e Capinzal, com 30 km de extensão foi reciclado entre os anos de 2006 e 2007. A espessura de corte era de cerca de 20 cm (8 cm de revestimento e 12 cm de base) e foram empregados 3% de cimento e 15% de agregado virgem, em massa.

A energia de compactação aplicada nos ensaios laboratoriais foi correspondente à Modificada do ensaio de Proctor. Foram moldados corpos de prova para determinação da resistência à compressão simples (15 x 30 cm), resistência à tração por compressão diametral (10,2 x 6,5 cm) e resistência à tração na flexão (15 x 15 x 50 cm), dos quais foi possível observar que a resistência à tração na flexão é cerca de 0,15 a 0,24 da resistência à compressão simples e que é possível avaliar a resistência à tração na flexão através do ensaio de compressão diametral.

Os autores relataram que a liberação ao tráfego ocorria entre o terceiro e sétimo dia de cura da camada. Foi realizado um controle das deflexões com viga Benkelman, através do qual se observou uma grande redução nos valores de deflexão após 3 dias de cura, além da homogeneização da deflexão da estrutura.

Em 2010, foi realizado o levantamento das condições superficiais do pavimento. Observou-se que 84% das seções investigadas não apresentavam qualquer tipo de patologia. Quando da construção, constatou-se a ocorrência de trincas por retração na base, porém, estas não se propagaram para o revestimento, sendo observado pelos autores que foram utilizados geossintéticos e revestimento de asfalto-borracha para inibir a evolução de tal patologia.

Trichês e Santos (2013) relataram nova análise das condições da rodovia SC-150 após a reciclagem com cimento. Foi realizado um levantamento da condição superficial do pavimento, no qual se cadastraram as patologias encontradas. Além disso, também foram realizadas medidas de deflexões através de FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e efetuadas medições das trilhas de rodas e da irregularidade do pavimento com emprego de perfilômetro a laser.

Os autores concluíram que a camada reciclada estaria íntegra, isto é, sem desenvolvimento de trincas por fadiga, pois houve redução no nível deflectométrico em relação ao levantamento de 2007. Ainda, em 98% do trecho a trilha de roda foi considerada baixa (inferior a 6 mm) e o nível de irregularidade médio também foi baixo, com apenas alguns segmentos necessitando de correções.

Segundo os autores, deve-se tomar cuidado com as trincas por retração, pois estas podem levar ao colapso da estrutura. Portanto, esse tema deve ser pesquisado para especificação de um procedimento para minimizar o aparecimento de tais trincas e de como realizar a recuperação, sendo sugerida a aplicação de geossintéticos para inibir a propagação das trincas para a camada de revestimento.

Por fim, após seis anos de abertura ao tráfego, foi observado que 11,3% do revestimento precisa ser restaurado, o que sugere que a rodovia não atenderá o período de projeto pelo critério de porcentagem de área trincada. Entretanto, a maior parte das patologias se deve a problemas restritos à camada de revestimento, fato que é evidenciado pelos levantamentos realizados no pavimento.

Trichês *et al.* (2013) apresentaram os resultados de uma pesquisa de laboratório acerca da caracterização de três misturas recicladas com cimento. A primeira mistura apresentada foi a reciclada da rodovia SC-150, o estudo laboratorial foi realizado como citado anteriormente na pesquisa de Trichês e Santos (2011). Os módulos da camada reciclada foram calculados a partir de retro análise das bacias deflectométricas medidas com viga Benkelman.

O segundo material estudado foi uma mistura de revestimento fresado (30%), brita graduada (70%) e cimento. A energia de compactação aplicada foi equivalente à Intermediária do ensaio de Proctor. Foram moldados corpos de prova cilíndricos, com diferentes teores de cimento e idades de cura, para realização de ensaios de resistência à compressão simples (10 x 20 cm), resistência à tração por compressão diametral (corpos de prova Marshall) e de módulo de resiliência por compressão triaxial (10 x 20 cm). Através dos resultados, foi possível obter modelos para estimar a resistência à tração aos 28 dias a partir da mesma resistência aos 7 dias e a resistência à tração aos 28 dias a partir da resistência à compressão aos 28 dias.

A terceira mistura foi proveniente da reciclagem de uma rodovia localizada no oeste do estado de Santa Catarina. A mistura correspondia a 6 cm de revestimento asfáltico e 12 cm de base,

mais adição de 23% de agregado virgem. A energia de compactação foi equivalente à Modificada do ensaio de Proctor. Os teores de cimento e ensaios realizados foram os mesmos aplicados à segunda mistura, apenas com algumas diferenças com relação às idades de cura. Essa última mistura teve o teor de cimento definido a partir do peso específico, assim, apresentou em torno de 18% mais cimento que as duas anteriores. Este fato fez com que houvesse um aumento na resistência e na rigidez.

Os autores concluíram que tanto a resistência quanto o módulo de resiliência aumentam com o aumento do teor de cimento e da idade de cura. Para 3% de cimento, a resistência à compressão simples aos 28 dias de cura das 3 misturas variou de 1,85 MPa a 2,49 MPa, já a resistência à tração por compressão diametral variou de 0,47 a 0,57 MPa. A resistência à tração representa 20% a 30% da resistência à compressão (acima do apresentado na literatura para materiais cimentados). Com relação ao módulo de resiliência, os valores obtidos com teor de cimento igual a 3% ficaram entre 100 e 4700 MPa, sendo esta variação da rigidez considerada bastante significativa, pois possui influência no dimensionamento da estrutura.

Aranha (2013) desenvolveu um estudo sobre reciclagem de solo-agregado com adição de cimento. Os materiais estudados foram provenientes da base de solo-brita da rodovia Fernão Dias (trecho que liga São Paulo a Belo Horizonte). A pesquisa foi dividida em duas frentes: estudos laboratoriais e estudos de campo.

No estudo laboratorial foram utilizadas misturas com diferentes porcentagens de solo e brita, também foram utilizadas diferentes energias de compactação e teores de cimento. Foram moldados corpos de prova para realização de ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples e de módulo de resiliência. Os tempos de cura dos corpos de prova foram de 3, 7 e 28 dias.

Verificou-se que a variação da energia de compactação não gerou ganho significativo de resistência à tração, porém, se mostrou eficiente quanto à compressão. Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência apresentaram grande variabilidade, provavelmente devido à instrumentação utilizada, que não apresentou uma sensibilidade compatível com a elevada rigidez do material.

Segundo o autor, o trecho experimental foi construído em 2011, na rodovia Fernão Dias, sendo recicladas diferentes espessuras com um teor de cimento igual a 5%, em massa. Foram

realizados dois levantamentos deflectométricos, após um mês e um ano da restauração do pavimento. Também foram extraídos corpos de prova da pista, 7 e 8 meses após a construção, para realização de ensaios de ultrassom, módulo de resiliência, módulo de elasticidade e resistência à compressão simples.

Os resultados do segundo levantamento deflectométrico mostraram uma melhoria na condição estrutural em relação ao primeiro, provavelmente devido às condições climáticas favoráveis (período de estiagem) e à consolidação das camadas em decorrência do tráfego. Os ensaios de módulo de resiliência e ultrassom apresentaram resultados com baixa variabilidade, mostrando que a compactação foi eficiente para as diferentes espessuras de camada reciclada. Já os ensaios de resistência à compressão simples e de módulo de elasticidade indicaram maior rigidez nas camadas menos espessas, possivelmente sugerindo um grau de compactação mais elevado.

Paiva e Oliveira (2013) realizaram um estudo laboratorial sobre a reciclagem de um pavimento com base de solo-cimento. No estudo, foram avaliadas as propriedades mecânicas do material reciclado (30% revestimento asfáltico + 70% base) estabilizado com 3% de cimento CP II E 32 (em massa) através de ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, ambos com idade de cura igual a 7 dias. A energia de compactação utilizada na dosagem foi correspondente à Modificada do ensaio de Proctor.

Os autores relataram que o teor de cimento utilizado é suficiente para desenvolver processos físico-químicos de ganho de resistência e que os valores obtidos atenderam os recomendados pela literatura. Também é citado que a granulometria do material foi determinante para que se alcançassem tais valores, pois o solo-cimento preencheu os vazios deixados pela fração pedregulho criando ligações nos contatos intergranulares e promovendo uma resistência mais efetiva. A cimentação das partículas também foi favorecida pela pequena porcentagem de silte e argila e pela ausência de plasticidade do material.

Ely (2014) estudou o comportamento mecânico de misturas constituídas por brita graduada simples e altos teores de fresado recicladas com cimento. Na pesquisa, foi empregado teor de fresado igual a 70% (superior ao limite citado pela norma do DNIT) e teor de cimento igual a 4%. Foram empregadas duas energias de compactação, equivalente à Intermediária e à

Modificada do ensaio de Proctor. Para caracterização mecânica das misturas, realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência na compressão diametral. Os tempos de cura empregados foram de 3, 7 e 14 dias.

A principal conclusão do autor foi que a reciclagem de pavimentos com adição de cimento pode ser realizada mesmo que a porcentagem de material fresado na mistura exceda o limite de 50% indicado pela norma do DNIT (2013a). Entretanto, o projetista deve estar consciente de que, quanto maior porcentagem de fresado, maior a influência desta no comportamento mecânico da mistura, reduzindo, assim, a resistência e a rigidez da camada reciclada. Portanto, a dosagem deve ser realizada corretamente, garantindo que a resistência considerada para o projeto seja alcançada.



### 3 DOSAGEM DE MISTURAS RECICLADAS COM CIMENTO

Este capítulo apresenta considerações acerca do procedimento de dosagem de misturas recicladas com cimento. São apresentados procedimentos empregados em âmbito nacional e internacional. Por fim, são relatadas características que influenciam diretamente na dosagem e nas propriedades dos materiais reciclados com cimento.

#### 3.1 EXPERIÊNCIA NACIONAL

No país, ainda não existe consenso sobre o procedimento de dosagem de misturas recicladas com adição de cimento Portland. A experiência nacional com respeito à dosagem é abordada neste item. Primeiramente, são apresentadas considerações realizadas pelas normas brasileiras e, em seguida, são relatados alguns métodos de dosagem empregados por pesquisadores e profissionais brasileiros.

##### 3.1.1 Normas técnicas

Como citado anteriormente (item 2.7), antes de se executar a reciclagem de pavimentos com cimento, deve-se realizar um projeto de dosagem em laboratório. Embora existam especificações brasileiras sobre a técnica, nenhuma delas apresenta um procedimento de dosagem dos materiais para este tipo de mistura. Estas especificações apenas apresentam alguns parâmetros aos quais as misturas devem estar de acordo (Tabelas 4 e 5, item 2.6), porém, não existe consenso entre as mesmas.

As especificações de serviço do DER-PR (2005) e do DNIT (2013a) também apresentam, mesmo que concisamente, algumas orientações para a dosagem da mistura reciclada. Essas orientações são:

- a) coleta de amostras: a coleta deve ser realizada com auxílio da própria recicladora utilizada nos serviços, sendo fundamental que a coleta seja feita de forma a cobrir todas as possíveis variações da estrutura do pavimento existente;
- b) apresentação da dosagem da mistura reciclada: dentre as informações que devem ser indicadas no relatório de dosagem pode-se citar a granulometria dos

materiais, a granulometria da mistura e seu enquadramento na faixa de trabalho, a umidade ótima da mistura, o peso específico aparente seco máximo da mistura reciclada, a energia de compactação utilizada, o teor ótimo e o tipo de cimento e as resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral aos 7 dias de cura.

### 3.1.2 Métodos de dosagem empregados por pesquisadores brasileiros

Neste item relatam-se alguns procedimentos de dosagem idealizados por profissionais e pesquisadores brasileiros. Os resumos destas pesquisas foram relatados no item 2.10.

Silva e Miranda (2000) descreveram a experiência de reciclagem com cimento do lote 8 da rodovia BR-381, incluindo o processo de dosagem adotado, reproduzido a seguir. A dosagem foi realizada tomando-se como parâmetro uma resistência à compressão simples (RCS) aos 7 dias de cura igual a 4,5 MPa. Assim, realizaram-se ensaios de compactação na energia Modificada, utilizando-se vários teores de cimento, em massa.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de compactação, moldaram-se corpos de prova, em triplicata, para realização de ensaios de resistência à compressão simples. Os moldes utilizados foram os empregados no ensaio de Índice de Suporte Califórnia, porém, sem o disco espaçador. Por fim, o teor ótimo de cimento foi determinado graficamente, verificando-se qual teor de cimento proporcionava a resistência mínima.

Oliveira (2003), em estudo laboratorial destinado a verificar a influência do prazo de trabalhabilidade do cimento na resistência à compressão simples da mistura reciclada, adotou a norma NBR-12253 (ABNT, 1992a), destinada à dosagem de solo-cimento com aplicação em pavimentos, para a dosagem de misturas recicladas com cimento. Assim, a resistência à compressão simples mínima a ser atingida é fixada em 2,1 MPa, como preconiza a norma supracitada. O autor ainda relata que os ensaios de compactação foram realizados conforme a norma NBR-12023 (ABNT, 1992b), que também foi desenvolvida para misturas de solo-cimento, visando sua aplicação na pavimentação.

Gusmão (2008) estudou, em laboratório, a evolução da resistência ao longo do tempo de várias misturas simulando a reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland. Ao

final do trabalho, a autora propõe um procedimento de dosagem a ser adotado em serviços de reciclagem com cimento, que é apresentado na Figura 12.

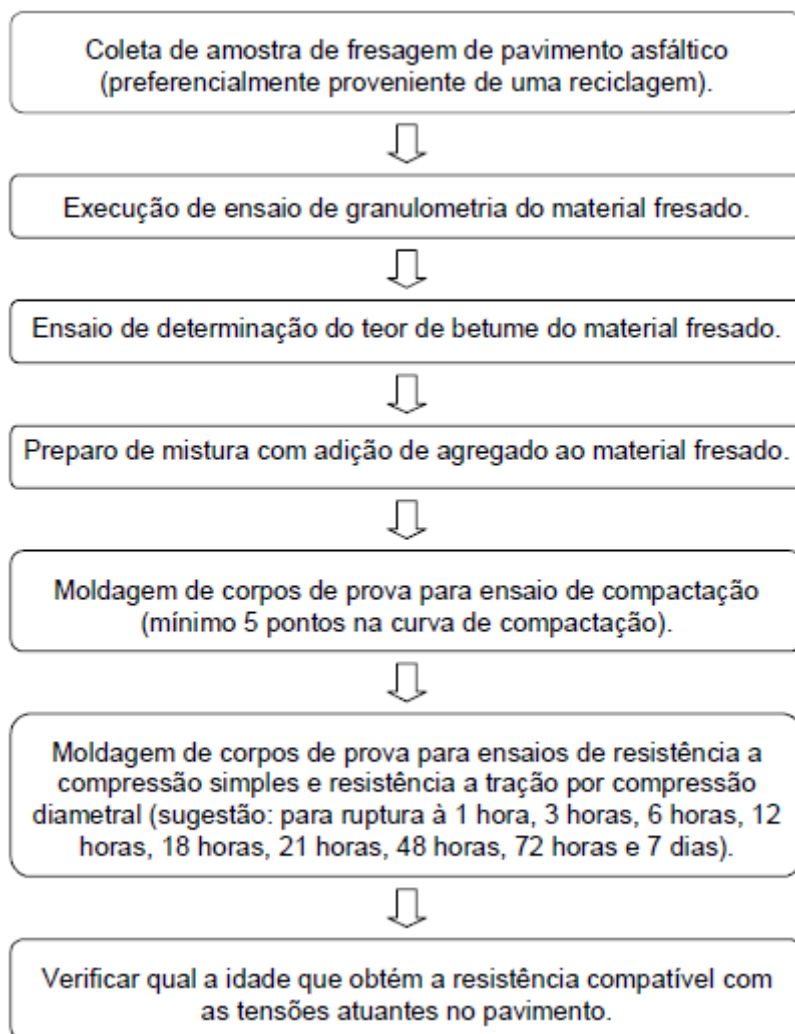


Figura 12: Proposta de procedimento de dosagem para reciclagem de pavimento asfáltico com cimento (GUSMÃO, 2008)

### 3.2 EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL

Internacionalmente, existem alguns procedimentos mais detalhados para dosagem de materiais reciclados com cimento Portland. A seguir são apresentados alguns desses métodos propostos por organizações internacionais.

### 3.2.1 Método de dosagem da Portland Cement Association

A PCA (2005) relata que a dosagem do teor de cimento e do teor de água depende da resistência à compressão simples de projeto e da granulometria da mistura. Para realização da dosagem em laboratório, primeiramente, deve-se coletar material de um local representativo da rodovia onde se pretende realizar a reciclagem com cimento. Caso exista diferença significativa nos materiais encontrados no pavimento, mais de um projeto de dosagem pode ser necessário.

No procedimento apresentado pela PCA, o primeiro ensaio a ser realizado é a análise granulométrica dos materiais; assim, será possível obter-se a curva granulométrica da mistura a ser reciclada. Idealmente, a granulometria da mistura deve ter 100% do material passante na peneira de 3", 95% passante na peneira de 2"; e 55% passante na peneira Nº 4 (Tabela 21, item 3.2.6). Quanto maior a quantidade de finos, maior será o teor de cimento e água necessários, devido à elevada superfície específica das partículas finas. Também é indicado que não mais do que 50% da mistura seja formada por material fresado do revestimento asfáltico.

Posteriormente, é realizado ensaio de compactação da mistura reciclada com um teor estimado de cimento, aplicando-se a energia Normal. Com os parâmetros obtidos no ensaio de compactação, são moldados corpos de prova cilíndricos para ensaios de resistência à compressão simples, com dimensões de 10,16 cm de diâmetro e 11,64 cm de altura, conforme a norma ASTM D1633 (ASTM, 2007). Nesta etapa, geralmente são utilizados três teores diferentes de cimento, sendo recomendada a preparação de dois corpos de prova para cada teor de cimento. Esses corpos de prova devem ser curados em câmara úmida por um período de 7 dias.

Os limites de resistência propostos pela PCA variam de 2,1 MPa a 2,8 MPa (próximos aos apresentados na norma do DNIT). A principal razão para se limitar a resistência dentro deste intervalo é para que a camada não se torne muito frágil (decorrência da excessiva rigidez), além de reduzir os efeitos da retração. Assim, a camada deve ser suficientemente resistente, durável e impermeável, porém, não tão rígida a ponto de gerar outros problemas ao pavimento.

A partir dos resultados obtidos através dos ensaios de resistência à compressão simples, define-se o teor de cimento ideal para que seja possível alcançar a resistência de projeto. A seguir, realiza-se um ensaio de compactação utilizando-se este teor de cimento para determinação dos parâmetros ótimos de compactação (teor de umidade ótimo e peso específico aparente seco máximo) que serão utilizados como fatores de controle do procedimento em campo.

### 3.2.2 Método de dosagem do Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones

Conforme o IECA (2013), primeiramente, deve-se dividir a rodovia considerada para reciclagem com cimento em segmentos homogêneos quanto ao tráfego, o tipo de pavimento, o estado do pavimento, entre outras características. Se houver grande heterogeneidade dos materiais, serão necessários vários projetos de dosagem, contemplando cada um dos segmentos homogêneos.

O início da dosagem se dá através da determinação da granulometria dos materiais, para que seja obtida a granulometria da mistura a ser reciclada e, caso necessário, esta seja ajustada através da adição de agregados virgens. Além disso, se determinam os limites de Atterberg dos materiais, para verificar se a utilização do cimento é adequada para a estabilização dos mesmos.

A definição do teor ótimo de cimento é feita determinando-se a resistência à compressão simples de corpos de prova moldados com diferentes teores de cimento (não são relatadas as dimensões dos corpos de prova) e rompidos aos 7 dias de cura. São moldados três corpos de prova para cada teor de cimento utilizado. Entretanto, dada à variabilidade dos materiais, é aconselhável que seja utilizado um teor de cimento de no mínimo 4%, a fim de assegurar que se alcance a resistência de projeto.

No procedimento de dosagem, todos os corpos de prova são moldados com o teor de umidade ótimo obtido no ensaio de compactação realizado utilizando-se energia equivalente à Modificada do ensaio de Proctor, para a realização de tal ensaio adota-se um único teor de cimento, pois existe pouca variabilidade nos parâmetros ótimos de compactação obtidos. Os corpos de prova são compactados de forma a alcançarem o grau de compactação mínimo exigido em obra, sendo este equivalente a 97% do peso específico aparente seco máximo obtido nos ensaios de compactação.

A resistência à compressão simples a ser atingida depende do nível do tráfego (categorizado na Tabela 13) e da resistência do subleito, sendo o valor mínimo admitido para RCS igual a 2,5 MPa. Entretanto, esse valor pode aumentar para 3,5 MPa no caso de se dimensionarem camadas recicladas delgadas. As Tabelas 14 e 15 apresentam catálogos com estruturas típicas empregadas na Espanha. Através desses catálogos é possível definir quando utilizar cada uma das resistências mínimas citadas.

Tabela 13: Categorias de tráfego espanholas

Categoria de tráfego	T00	T0	T1	T2		T3		T4	
Subcategoria	T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
Volume médio diário	24000	2000 a 3999	800 a 1999	400 a 799	200 a 399	100 a 199	50 a 99	25 a 49	0 a 24

(fonte: IECA, 2013)

Tabela 14: Estruturas indicadas para RCS da camada reciclada de no mínimo 2,5 MPa

Subleito	Camadas	Categoria de tráfego								
		T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
ISC > 12%	Revestimento asfáltico (cm)	20	18	16	12	12	10	10	8	5
	Camada reciclada com cimento (cm)	35	35	35	35	30	30	25	25	25
ISC > 5%	Revestimento asfáltico (cm)			20	15	12	10	10	8	5
	Camada reciclada com cimento (cm)			35	35	35	35	30	30	30

(fonte: IECA, 2013)

Tabela 15: Estruturas indicadas para RCS da camada reciclada de no mínimo 3,5 MPa

Subleito	Camadas	Categoria de tráfego								
		T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
ISC > 12%	Revestimento asfáltico (cm)		18	16	12	12	10	10	8	5
	Camada reciclada com cimento (cm)		30	30	30	25	25	22	22	22

(fonte: IECA, 2013)

Definido o teor de cimento, devem-se realizar análises de sensibilidade quanto à variação do grau de compactação. Assim, são realizados ensaios com corpos de prova moldados com grau de compactação de 95% e 96% (não é definido o número de corpos de prova).

Por último, é conveniente que se determine o prazo de trabalhabilidade do material reciclado, sendo este o período de tempo entre o final da mistura do material e o início de pega do cimento, no qual ainda é possível compactar o material sem que ocorram perdas de propriedades mecânicas. É citada a norma técnica espanhola UNE-EN 13286-45 (AENOR, 2004) para se realizar essa verificação.

### 3.2.3 Método de dosagem da Wirtgen

O manual de reciclagem a frio da Wirtgen (2012), uma das principais empresas produtoras de máquinas recicladoras, apresenta um procedimento de dosagem mais detalhado, que é apresentado a seguir.

O procedimento tem início com a coleta dos materiais em campo, sendo necessários, no mínimo, 100 kg de cada material. A coleta pode ser realizada com auxílio de uma pequena fresadora ou da própria recicladora utilizada no serviço, que deve desagregar os materiais para simular a granulometria que será obtida quando o pavimento for reciclado.

São realizados ensaios de análise granulométrica para que seja possível traçar a curva granulométrica da mistura. É apresentada uma faixa granulométrica (mostrada na Tabela 21, item 3.2.6) à qual a curva da mistura deve se enquadrar. Caso isto não ocorra, devem-se acrescentar materiais virgens para promover a correção granulométrica. Também são

indicados ensaios de limites de Atterberg, para determinar o Índice de Plasticidade dos materiais, e ensaios de compactação, na energia Modificada, para cada material coletado.

A proporção de cada material na composição da mistura deve ser calculada a partir da multiplicação da massa específica *in situ* pela espessura da camada, como exemplificado na Tabela 16; para que assim, se represente, da melhor forma possível, em laboratório o pavimento a ser reciclado.

Tabela 16: Procedimento de cálculo para composição da mistura

Material	Espessura da camada (cm)	Massa específica <i>in situ</i> (kg/m <sup>3</sup> )	Massa/m <sup>2</sup> (kg)	Proporção
Revestimento asfáltico	6	2300	0,06 x 2300 = 138	138 / 418 = 0,33
Brita graduada simples	14	2000	0,14 x 2000 = 280	280 / 418 = 0,67
Total			418	1

(fonte: WIRTGEN, 2012)

Posteriormente, realiza-se o ensaio de compactação da mistura dos materiais, no qual se emprega energia equivalente à Modificada. O teor de cimento a ser empregado no ensaio deve ser o mais próximo ao ideal previsto para o material coletado. A Tabela 17 apresenta alguns teores típicos de cimento conforme a posterior aplicação do material como base ou sub-base. Depois de realizada a mistura, a compactação deve ser retardada em uma hora, para que sejam reproduzidos possíveis atrasos de compactação que acontecem em campo.

Tabela 17: Teores típicos de cimento conforme sua aplicação

Aplicação	Teor de cimento (%)	Condição
Sub-base	2	material graúdo (> 50% retido na peneira de 4,75 mm)
	3	material miúdo (< 50% retido na peneira de 4,75 mm)
Base	3	material graúdo (> 50% retido na peneira de 4,75 mm)
	4	material miúdo (< 50% retido na peneira de 4,75 mm)

(fonte: WIRTGEN, 2012)



A partir da umidade ótima obtida no ensaio de compactação, são confeccionados corpos de prova, utilizando-se o molde cilíndrico grande do ensaio de Proctor (cilindro do ISC), para realização de ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RCD).

São moldados três corpos de prova para cada teor de cimento (no mínimo três teores), com emprego de energia de compactação equivalente à Modificada. Deve-se determinar a umidade higroscópica dos materiais antes da mistura, para possibilitar a correta adição de água de forma a alcançar-se o teor de umidade ótimo. Os corpos de prova devem ser curados em câmara úmida durante 7 dias. Para efeito comparativo, também se pode optar por cura acelerada em estufa durante 24 horas, com temperatura entre 70°C a 75°C.

É recomendada a imersão em água dos corpos de prova durante 4 horas antes dos ensaios de resistência (apenas RCS). Após este procedimento, 2 corpos de prova são ensaiados à compressão simples (taxa de carga constante de 0,14 MPa por segundo) e o último é ensaiado à compressão diametral (taxa constante de deformação de 50,8 mm por minuto).

A partir dos resultados obtidos, traçam-se gráficos correlacionando a RCS com o teor de cimento, e através da RCS de projeto, define-se o teor ótimo de cimento a ser adotado. O manual classifica os materiais que podem ser obtidos a partir da reciclagem com cimento quanto à sua RCS aos 7 dias de cura, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18: Classificação dos materiais conforme sua RCS aos 7 dias de cura

Tipo de material	RCS <sub>7dias</sub> (MPa)
Levemente cimentado	< 4
Cimentado	4 a 10

(fonte: WIRTGEN, 2012)

### 3.2.4 Método de dosagem da Asphalt Recycling and Reclaiming Association

A ARRA (2001) também apresenta um procedimento de dosagem para materiais reciclados com cimento, porém, menos detalhado que os anteriores.

Primeiramente, deve-se determinar a granulometria e o índice de plasticidade dos materiais a serem reciclados, para verificar a necessidade de possíveis adições de agregados virgens e confirmar a aptidão do uso do cimento como agente estabilizador. Após, define-se a composição da mistura dos materiais.

A seguir, são selecionados vários teores de cimento para realização de ensaios de compactação. A energia de compactação utilizada pode ser equivalente à Normal ou à Modificada. É indicado que, antes da compactação, a mistura permaneça em repouso por um período de cerca de 2 horas, para reproduzir possíveis atrasos na compactação que ocorrem em campo.

A partir dos parâmetros obtidos no ensaio de compactação (umidade ótima e peso específico aparente seco máximo), são moldados corpos de prova (não são definidas as dimensões) para realização de ensaios de resistência à compressão simples. Geralmente, são moldados 3 corpos de prova por teor de cimento avaliado. A cura é realizada por sete dias, em condições de umidade relativa de 95% a 100% e temperatura entre 22°C e 25°C.

Determinados os valores de resistência à compressão simples, o teor de cimento que conduzir a mistura ao valor de resistência mínimo de projeto (não é definida uma RCS mínima) é considerado o teor ótimo. Por fim, é aconselhado realizar avaliações de durabilidade e sensibilidade à umidade das misturas, através de ensaios como umedecimento e secagem, gelo e degelo ou outros similares.

### 3.2.5 Método de dosagem da Austroads

Dentre os métodos internacionais, destaca-se o método de dosagem de materiais estabilizados com cimento visando sua utilização em pavimentos, desenvolvido pela Austroads (2002), principal órgão rodoviário da Austrália e da Nova Zelândia. Este método é a principal referência para definição das bases do método de dosagem sugerido neste trabalho.

Primeiramente, se determina a granulometria dos materiais envolvidos, então, é verificado se a curva granulométrica da mistura desses materiais se enquadra na faixa granulométrica ideal apresentada pelo método (Tabela 21, item 3.2.6).

Também é indicado que se deve determinar o índice de plasticidade do material para verificar se é indicada a estabilização com cimento. Quando o material possuir mais de 25% passante

pela peneira de número 200 e índice de plasticidade maior que 20, a aplicabilidade do cimento é questionável. Além disso, deve-se ter especial atenção com outros materiais que podem dificultar a ação do cimento, como matérias orgânicas e sulfatos. Caso seja necessária adição de materiais virgens, também se devem realizar os ensaios citados em amostras destes materiais.

Após a definição das misturas, deve-se realizar o ensaio de compactação para determinar o teor de umidade ótimo e o peso específico aparente seco máximo; estes dados serão utilizados na moldagem de corpos de prova para determinação da RCS da mistura. A energia utilizada pode ser tanto a Normal quanto a Modificada; porém, a energia Normal é mais recomendada. Para diminuir o número de ensaios realizados, é indicado que se realize o ensaio de compactação sem adição de cimento.

A Austroads classifica os materiais que podem ser gerados a partir da estabilização com cimento quanto a sua resistência à compressão simples aos 28 dias, como mostrado na Tabela 19. Também são apresentados valores de referência do teor de cimento, os quais variam de 1,0% a 5,5%, dependendo das características do material que se espera obter.

Tabela 19: Materiais gerados pela estabilização com cimento

Nível de cimentação do material	Resistência à compressão simples (MPa)	Módulo flexural (MPa)
Modificado	< 1,00	< 1000
Levemente cimentado	1,00 - 4,00	1500 - 3000
Fortemente cimentado	> 4,00	> 5000

(fonte: AUSTROADS, 2002)

Quanto à umidade, deve-se trabalhar com uma faixa entre o teor ótimo (obtido para a mistura sem cimento) e mais 2% para materiais considerados fortemente cimentados, com a umidade ótima para materiais levemente cimentados e com uma faixa entre a umidade ótima e menos 1% para materiais considerados modificados.

Na Figura 13 é apresentado um fluxograma explicando os procedimentos para realização da dosagem a partir dos ensaios de RCS, este fluxograma foi tomado como referência para a

definição das bases do método de dosagem proposto neste trabalho. A Austroads indica que a cura dos corpos de prova pode ser realizada tanto convencionalmente quanto através de processo acelerado em estufa (temperatura entre 60°C e 70°C). Além disso, deve-se verificar a taxa de ganho de RCS entre corpos de prova ensaiados aos 7 dias e aos 28 dias de cura convencional.

Existe a possibilidade de se optar por um procedimento básico ou mais complexo, no qual são realizados ensaios adicionais para determinação de outras propriedades mecânicas e volumétricas. O procedimento com ensaios adicionais é indicado quando não se conhecem as propriedades e o comportamento do material a ser reciclado. Assim, se procura reduzir o risco de danos à camada reciclada causados pela umidade, além da redução de trincas indesejáveis e de erosão.

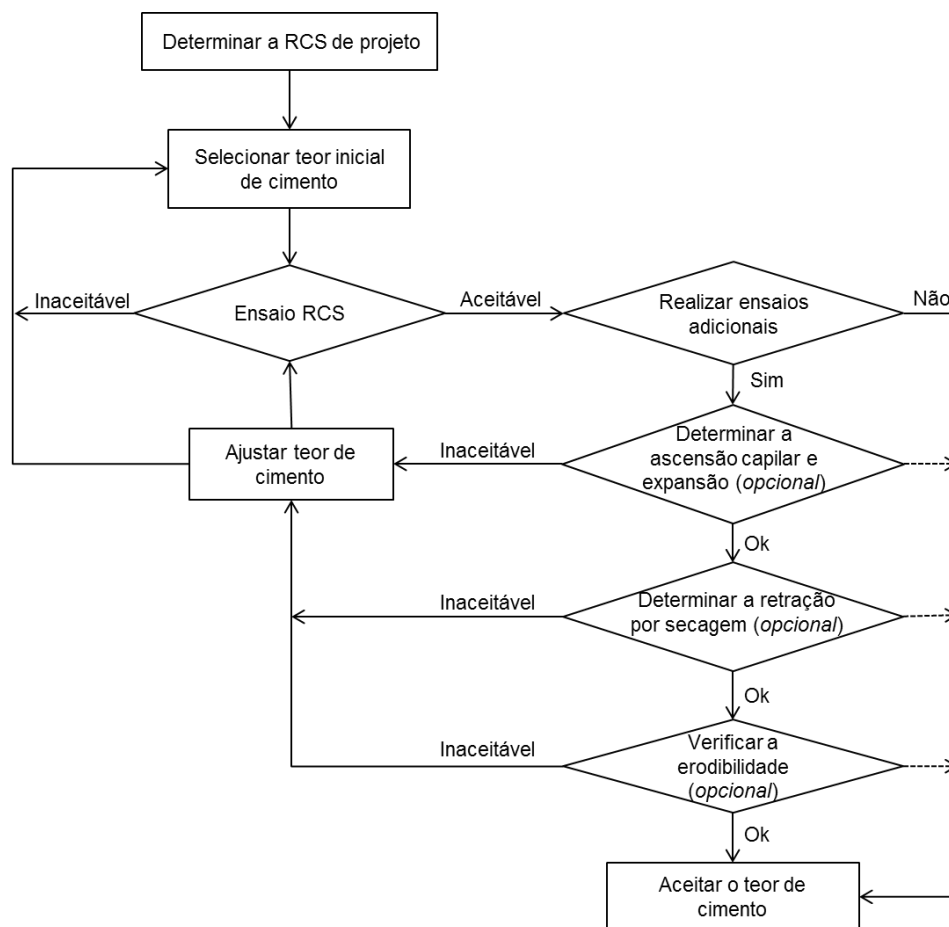


Figura 13: Fluxograma de dosagem de materiais estabilizados para pavimentação (baseado em: AUSTROADS, 2002)

A seguir são descritos os ensaios adicionais, citados anteriormente e apresentados no fluxograma, que podem ser incorporados ao método de dosagem da Austroads:

a) Ascensão capilar, expansão e absorção

Os ensaios de ascensão capilar, expansão e absorção devem ser realizados conforme a norma australiana AS1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996). A norma não especifica o nível máximo de ascensão capilar admitido. Entretanto, a Austroads (2002) sugere o valor limite de 25 mm em cada 100 mm de altura, ou seja, 25% da altura, em um período de 24 horas. Não são apresentados valores limites para expansão e absorção.

b) Retração por secagem

As trincas causadas pela retração por secagem são afetadas por diversos fatores, como o teor e o tipo de cimento, a umidade de moldagem e as condições de cura. Para assegurar um bom comportamento do pavimento, é necessário identificar a influência desses efeitos na retração por secagem.

O ensaio geralmente é realizado comparando-se as dimensões de um corpo de prova prismático antes e após processo de cura controlado. Os limites de magnitude para retração por secagem apresentados pela Austroads variam de 200  $\mu\text{m}$  a 4500  $\mu\text{m}$ , dependendo do tipo de material empregado. O manual cita duas normas que podem ser utilizadas como base para realização do ensaio, uma desenvolvida para solos (STANDARDS AUSTRALIA, 2008) e outra para concreto (STANDARDS AUSTRALIA, 1992).

c) Erodibilidade

A erosão superficial de um material ocorre quando ações hidráulicas e mecânicas, devido aos carregamentos do tráfego, desgastam a camada do pavimento. Isso tende a aumentar quando existe aplicação de tensões elevadas no pavimento, umidade em grande quantidade e quando os materiais são suscetíveis à erosão. Assim, se faz necessária a verificação da erodibilidade do material estabilizado com cimento.

A erodibilidade é geralmente descrita como a perda de massa do material por unidade de tempo, sendo o ensaio realizado com base na norma TM-T186 (RTA, 1994). Não são apresentados limites para erosão do material, porém, é recomendado que seja a menor possível. Ainda, é relatado que o aumento no teor de cimento, apesar de diminuir a erosão,

aumenta a probabilidade de trincas geradas por retração, o que pode, por conseguinte, elevar o potencial de erodibilidade, devido a maior infiltração provocada pelas trincas.

É indicado que se realizem ensaios em corpos de prova com pesos específicos mais baixos que o máximo para verificar o efeito do grau de compactação, característica que influencia diretamente na erodibilidade do material. Por fim, o ensaio não deve ser realizado para materiais classificados como modificados e levemente cimentados.

### 3.2.6 Comparação entre os métodos apresentados

A Tabela 20 apresenta uma comparação entre os métodos de dosagem empregados por órgãos internacionais apresentados nos itens anteriores. Observa-se que todos os métodos têm como principal parâmetro de dosagem a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura, apesar de alguns não estabelecerem as dimensões do corpo de prova a ser utilizado na determinação da RCS. Além disso, há praticamente um consenso entre os métodos de que se deve empregar energia de compactação Modificada para a moldagem dos corpos de prova e posterior compactação em campo. Tais fatos também são corroborados pela experiência francesa, através do guia de reciclagem de pavimentos da *Association mondiale de la Route* (AIPCR, 2003).

Também se pode observar que tanto a quantidade de cimento geralmente utilizada (1% a 4%) quanto a RCS que se tenciona obter (1 a 4 MPa) são baixas, excetuando-se os casos em que se pretende obter materiais fortemente cimentados ( $RCS > 4$  MPa), que se tornam mais rígidos e trabalhariam praticamente como placas de concreto.

A Tabela 21 mostra os limites das faixas granulométricas indicadas em cada um dos métodos citados que empregam este tipo de controle dos materiais a serem reciclados. Na Figura 14, esses limites são apresentados graficamente. Percebe-se que os limites empregados pela Wirtgen e pela Austroads são semelhantes, porém, a segunda utiliza uma faixa de trabalho mais fechada. Já a PCA trabalha com apenas algumas peneiras no controle granulométrico da mistura, não utilizando as peneiras abaixo da número 4. Entretanto, este é o único órgão que define uma porcentagem máxima de material fresado na composição da mistura reciclada (50%).

Tabela 20: Comparação entre os métodos de dosagem internacionais citados

Característica	Método de dosagem				
	PCA (2005)	IECA (2013)	Wirtgen (2012)	ARRA (2001)	Austroroads (2002)
Ensaios preliminares	Análises granulométrica	Análise granulométrica; Limites de Atterberg	Análise granulométrica; Limites de Atterberg	Análise granulométrica; Limites de Atterberg	Análise granulométrica; Limites de Atterberg
Controle da granulometria	Tabela 21	Não estabelece	Tabela 21	Não estabelece	Tabela 21
Teor máximo de fresado asfáltico (%)	50	Não estabelece	Não estabelece	Não estabelece	Não estabelece
Energia de compactação	Normal	Modificada	Modificada	Normal ou Modificada	Normal ou Modificada
Principal parâmetro para dosagem	RCS	RCS	RCS	RCS	RCS
Dimensões dos corpos de prova para RCS	CPs cilíndricos (10,16 cm x 11,64 cm)	Não estabelece	Cilindro de Proctor grande (ISC)	Não estabelece	Não estabelece
Teores típicos de cimento	Não estabelece	4% (mínimo sugerido)	2% a 4%	Não estabelece	1% a 5,5%
Número de teores de cimento para RCS	3	Não estabelece	3	Não estabelece	Teores crescentes até que se atinja a RCS
Número de corpos de prova para RCS	2	3	2	3	Não estabelece
Tipo de cura	Convencional	Convencional	Convencional ou acelerada em estufa	Convencional	Convencional ou acelerada em estufa
Período de cura para RCS (dias)	7	7	7	7	7 (com opção para 28 dias)
RCS (MPa)	2,1 a 2,8	> 2,5 MPa	Tabela 18	Não estabelece	Tabela 19
Ensaios adicionais indicados	Não estabelece	Sensibilidade do grau de compactação; Prazo de trabalhabilidade	Resistência à tração por compressão diametral	Durabilidade; Sensibilidade à umidade	Ascensão capilar, absorção e expansão; Retração; Erodibilidade

Tabela 21: Limites granulométricos citados pelos métodos de dosagem internacionais

Peneira (mm)	Limites Wirtgen (%)		Limites Austroads (%)		Limites PCA (%)
	Grossa	Fina	Grossa	Fina	Mínimo Passante
76,2	-	-	-	-	100
50,8	100	100	-	-	95
38,1	85	100	-	-	-
25,4	72	100	73	100	-
19	60	100	64	100	-
12,7	50	100	-	-	-
9,5	42	90	44	75	-
6,3	35	80	-	-	-
4,75	30	72	29	55	55
2,36	21	56	23	45	-
1,18	14	44	18	38	-
0,6	9	35	14	31	-
0,425	7	31	-	-	-
0,3	5	27	10	27	-
0,15	3	21	8	24	-
0,075	2	18	5	20	-

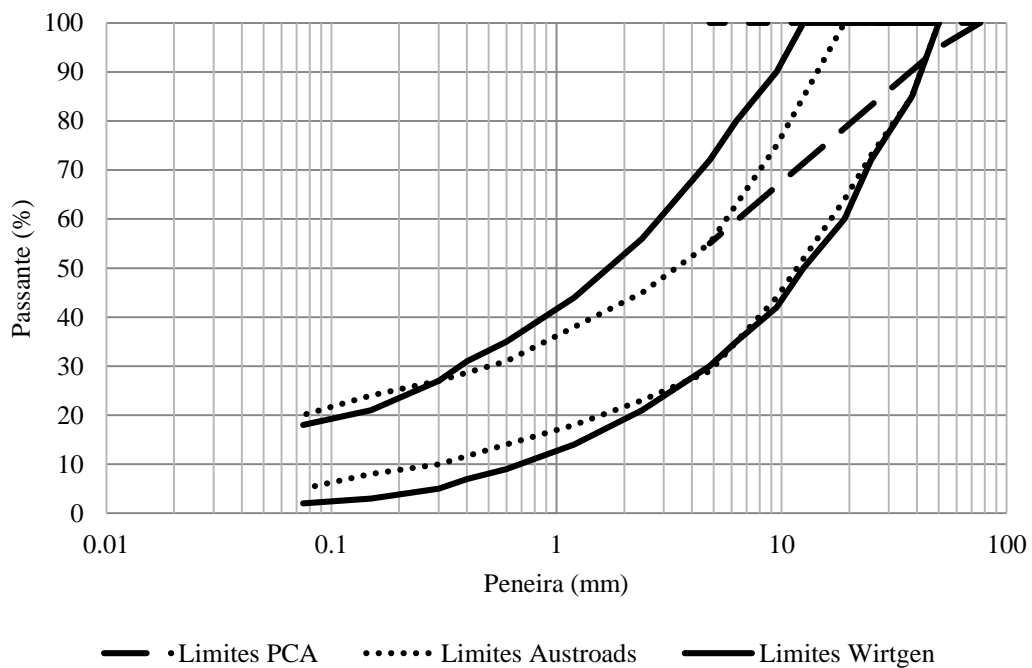


Figura 14: Limites granulométricos para reciclagem com cimento citados por métodos internacionais



### 3.3 CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIAM A DOSAGEM E AS PROPRIEDADES DO MATERIAL RECICLADO

Neste item são discutidas características importantes que influenciam diretamente na dosagem da mistura reciclada com cimento e que são pouco comentadas nos métodos de dosagem relatados anteriormente. As características em questão são: o tipo de cimento mais adequado, a porcentagem de material fresado admitida na mistura e a heterogeneidade dos materiais envolvidos.

#### 3.3.1 Tipo de cimento

Em se tratando do tipo de cimento, após estudo onde se avaliou a influência de diversos tipos de cimento Portland na reciclagem de pavimentos, Paiva e Oliveira (2009) concluíram que a escolha do tipo de cimento em função da resistência à compressão simples não deve ser o critério prioritário, visto que os cimentos que alcançam maiores resistências são citados na literatura como sendo responsáveis pela elevação do calor de hidratação e pela redução do tempo de pega. Assim, para minimizar os efeitos da retração, é preferível adotar teores mais elevados de cimentos com menor concentração de clínquer e gesso (como, por exemplo, o CP III ou os cimentos compostos do tipo CP II) do que teores baixos de cimentos que possuam maior quantidade de tais substâncias (como o cimento do tipo CP V).

Os tipos mais recomendados, segundo Paiva *et al.* (2013), são os cimentos compostos (no Brasil, classificados como: CP II E, CP II F e CP II Z) de classe de resistência intermediária. Estes são indicados por possuírem prazo de trabalhabilidade compatível com o processo construtivo, por proporcionarem moderado calor de hidratação e por apresentarem resistência mecânica intermediária, quando aplicados em baixos teores. Internacionalmente, a AIPCR (2003) também relata que tais tipos de cimento são os mais adequados para a realização da reciclagem de pavimentos.

#### 3.3.2 Porcentagem de material fresado

Nunes (2003, *apud* PAIVA e OLIVEIRA, 2009) destaca que a presença do revestimento asfáltico na mistura poderá reduzir a capacidade de aderência da pasta de cimento aos agregados envoltos pelo ligante remanescente.

Outro inconveniente é que a presença do filme asfáltico nos agregados diminui o ângulo de atrito interno das partículas. Esta característica é responsável pelo aumento do repique elástico durante a compactação e redução da energia efetivamente armazenada a cada golpe (DELLABIANCA, 2004).

Além disso, a formação de placas de asfalto durante a trituração do pavimento pode dificultar a compactação da camada, pois, nesse caso será necessário aplicar uma energia maior para atingir o peso específico exigido (PAIVA e OLIVEIRA, 2010).

Também existem relatos de que a predominância de revestimento asfáltico na mistura pode influenciar negativamente suas propriedades. Por exemplo, Jofré (2001) relata que ao se aumentar o percentual de fresado na mistura, se reduz o módulo de elasticidade. Assim, a PCA (2005) sugere que a mistura deva conter no máximo 50%, em massa, de material fresado (o que também é indicado pelo DNIT), a menos que seja aprovado pelo engenheiro supervisor da obra e realizado o devido procedimento de dosagem.

### 3.3.3 Heterogeneidade

Quanto à heterogeneidade dos materiais constituintes da mistura, Nunes (2003, *apud* PAIVA e OLIVEIRA, 2009) ressalta que esta propriedade pode variar muito na estrutura do pavimento. Assim, os materiais utilizados inicialmente podem variar significativamente de tipo e qualidade no decorrer de uma obra. Tendo isso em vista, deve-se tomar cuidado com a existência de contaminações por materiais que são inibidores da correta hidratação do cimento, como argilas e/ou matérias orgânicas, ou mesmo com a ocorrência de teores importantes de sulfatos, pois isto pode reduzir a durabilidade do pavimento reciclado.

Essa heterogeneidade também torna mais difícil o controle de compactação do material reciclado, pois não é possível saber se o material *in situ* terá a mesma característica que o material utilizado para determinar o peso específico aparente seco máximo em laboratório (PAIVA e OLIVEIRA, 2010).

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados o programa experimental e os materiais e métodos utilizados para que se alcançasse o objetivo proposto, ou seja, a definição das bases para a proposição de um método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento, fundamentando-se no método de dosagem de materiais estabilizados com cimento da Austroads (2002), apresentado no item 3.2.5. Além disso, também é definido o tipo de análise estatística utilizada para avaliar a representatividade dos resultados obtidos através dos ensaios experimentais.

### 4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi elaborado objetivando avaliar a aplicabilidade do método de dosagem de materiais estabilizados com cimento da Austroads (item 3.2.5) para misturas compostas por materiais brasileiros e, assim, possibilitar o estabelecimento das bases para um método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento. Além dos ensaios citados pelo método da Austroads (2002), foram realizados outros ensaios para determinação do comportamento mecânico das misturas estudadas.

Deste modo, os ensaios realizados neste estudo se dividiram em dois grupos: ensaios de caracterização mecânica (resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e erodibilidade) e volumétrica (retração por secagem, ascensão capilar, expansão e absorção).

As variáveis controláveis estabelecidas foram o teor de cimento, o teor de fresado e a energia de compactação. Quanto ao teor de cimento, definiu-se que se utilizariam 3 teores, sendo estes iguais a 2%, 4% e 6%, em massa. Esses teores foram escolhidos visando o estudo de materiais modificados, levemente cimentados e fortemente cimentados, seguindo a classificação da Austroads (2002), apresentada na Tabela 19 (item 3.2.5).

Decidiu-se pela utilização de dois teores de fresado nas misturas deste material com brita graduada, sendo estes teores iguais a 20% e 50%. O primeiro teor foi adotado para que se

pudesse reproduzir a reciclagem de um pavimento com uma camada pouco espessa de revestimento asfáltico. Já o segundo foi escolhido devido à literatura relatar um valor de 50% como o limite para a porcentagem de material fresado na mistura (DNIT, 2013a; PCA, 2005).

Por fim, definiu-se pela utilização de energia Modificada do ensaio de Proctor para compactação das misturas com 2% de cimento e energia Intermediária para compactação das misturas com teor igual a 6% de cimento. A escolha de tais energias de compactação se deu devido ao fato da resistência de materiais estabilizados com baixos teores de cimento sofrer grande influência do intertravamento das partículas, o que não ocorre para materiais com adição elevada de cimento, onde a resistência é governada quase que exclusivamente pela coesão gerada pelo cimento. Então, visando identificar os efeitos da energia de compactação, decidiu-se utilizar ambas as energias citadas para a compactação das misturas com adição de 4% de cimento.

A Tabela 22 apresenta as misturas geradas pela combinação das variáveis controláveis. Na tabela também são apresentados códigos para identificação de tais misturas, estes códigos também serão utilizados nos capítulos seguintes.

Tabela 22: Resumo das misturas estudadas na pesquisa

Cimento (%)	Fresado (%)	Energia	Código
2	20	Modificada	2-20-MOD
2	50	Modificada	2-50-MOD
4	20	Modificada	4-20-MOD
4	50	Modificada	4-50-MOD
4	20	Intermediária	4-20-INT
4	50	Intermediária	4-50-INT
6	20	Intermediária	6-20-INT
6	50	Intermediária	6-50-INT

A Figura 15 demonstra, esquematicamente, o programa experimental empregado para que os objetivos da pesquisa fossem alcançados.

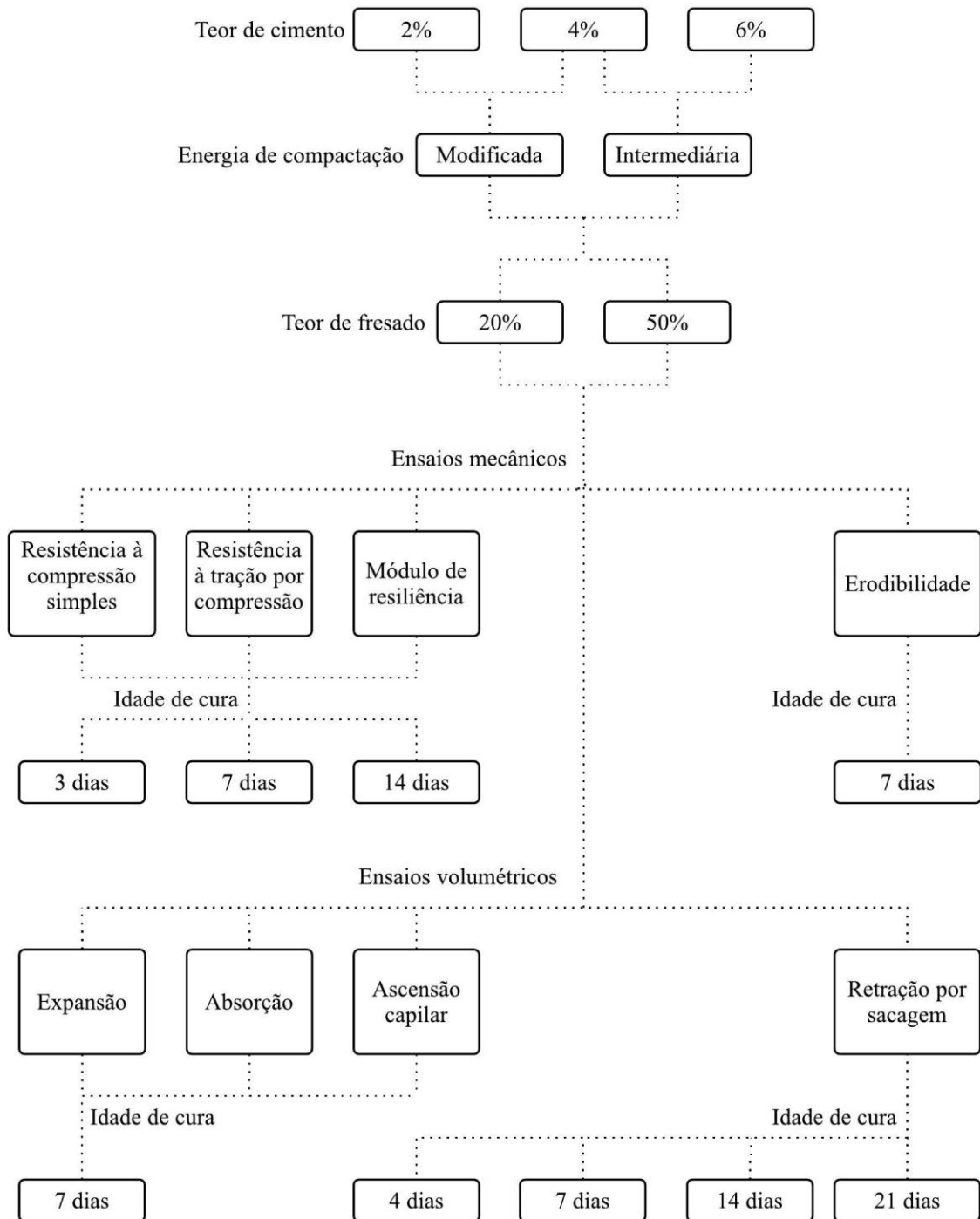


Figura 15: Esquema do programa experimental da pesquisa

## 4.2 MATERIAIS

Neste item são apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento do presente estudo, sendo descritos os materiais provenientes da coleta de campo (revestimento e base da rodovia RSC-453) e o cimento Portland empregado na pesquisa.

### 4.2.1 Materiais oriundos da rodovia RSC-453

Os materiais foram coletados da rodovia RSC-453, trecho entre o município de Caxias do Sul e o distrito de Lajeado Grande, pertencente ao município de São Francisco de Paula, no estado do Rio Grande do Sul. Devido à grande demanda de material para realização dos ensaios, foram realizadas duas coletas, ambas com auxílio de uma máquina recicladora modelo Wirtgen WR 2500 S. A primeira delas ocorreu no km 151 + 800 m, já a localização da segunda coleta não foi especificada pelos responsáveis pela sua realização.

O procedimento para realização das coletas foi semelhante, primeiramente, triturou-se o revestimento asfáltico na espessura de 5 cm para extração deste material. Em seguida, recolheu-se amostra da base de brita graduada simples (BGS) na profundidade de 15 cm abaixo do revestimento. A Figura 16 mostra o procedimento de coleta dos materiais e a medição da espessura coletada da camada.



Figura 16: Realização da (a) coleta com auxílio da máquina recicladora e (b) medição da espessura coletada da camada

Na Figura 17 é possível visualizar imagens das amostras de brita graduada simples e de fresado asfáltico, ressaltando-se que o fresado asfáltico possuía em sua constituição ligante asfáltico convencional.



Figura 17: Amostras de (a) fresado asfáltico e (b) brita graduada

#### 4.2.2 Cimento

O cimento escolhido para realização dos ensaios foi o tipo CP II E, de classe de resistência intermediária (classe 32), devido ao fato deste tipo de cimento ser o mais utilizado no país e de existirem diversas experiências de utilização de tal tipo de cimento em serviços de reciclagem de pavimentos.

Além disso, como já citado no item 3.3.1, os cimentos compostos do tipo CP II e com classe de resistência intermediária são os mais indicados para a execução da reciclagem (PAIVA *et al.*, 2013; AIPCR, 2003).

### 4.3 MÉTODOS

Os métodos empregados são apresentados neste item, sendo descritos os procedimentos usados na caracterização dos materiais oriundos da rodovia RSC-453 e nos ensaios de caracterização mecânica e volumétrica das misturas.

### 4.3.1 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais oriundos da rodovia RSC-453 foi realizada a partir de ensaios de análise granulométrica e de determinação do teor de ligante asfáltico do material fresado proveniente do revestimento.

#### 4.3.1.1 Análise granulométrica

Para determinação da granulometria do fresado e da brita graduada foram realizados ensaios de peneiramento, seguindo as instruções e utilizando os equipamentos descritos no método de ensaio DNER-ME 083 (DNIT, 1998a). Foram ensaiadas três amostras com massa igual a 10 kg para cada material (fresado asfáltico e BGS), o tamanho das amostras utilizadas nos ensaios foi definido a partir da dimensão máxima característica dos materiais, sendo esta igual a 25 mm.

#### 4.3.1.2 Determinação do teor de ligante asfáltico do material fresado

O teor de ligante asfáltico do material fresado do revestimento foi determinado através da utilização do extrator por refluxo (Figura 18), de acordo com o método de ensaio DAER/RS-EL 213/01 (DAER, 2001).



Figura 18: Estrutura do aparelho extrator por refluxo



Para realização do ensaio, foram separadas duas amostras de aproximadamente 250 g, obtidas a partir do quarteamento de uma amostra de 1000 g. Então, foram confeccionados dois cones de papel filtro, os quais tiveram suas massas secas determinadas e foram colocados no interior dos cones metálicos que fazem parte da estrutura do extrator por refluxo.

Em seguida, as amostras foram colocadas nos cones e estes, por sua vez, no interior da estrutura do extrator por refluxo, onde permaneceram até que o solvente passante pelos cones estivesse com coloração transparente. O solvente utilizado na realização do ensaio foi o tricloroetileno. A partir das massas inicial e final das amostras, determinou-se o teor de ligante do fresado.

#### 4.3.1.3 Granulometria das misturas de BGS e fresado

A partir das curvas granulométricas de cada material e da porcentagem de fresado nas misturas (20% e 50%, definidas no item 4.1), foram determinadas as curvas granulométricas das duas misturas compostas por fresado e BGS.

Então, verificou-se o enquadramento de ambas as curvas na faixa granulométrica para reciclagem com cimento proposta pelo manual de reciclagem a frio da Wirtgen (2012), esta faixa tem seus limites apresentados na Tabela 21, localizada no item 3.2.6. A faixa granulométrica proposta pela Wirtgen foi adotada pelo fato de seu manual ser considerado uma referência no meio da reciclagem a frio de pavimentos.

#### 4.3.2 Compactação

O peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{sm\acute{a}x}$ ) e a umidade ótica ( $\omega_{ot}$ ) das misturas de BGS e fresado, acrescidas de cimento, foram determinados através de ensaios de compactação, executados seguindo os procedimentos prescritos no método de ensaio DNIT-ME 164 (DNIT, 2013b), sendo estes realizados sem reuso de material.

Os ensaios foram executados tanto com cilindro quanto soquete grande, utilizados no ensaio de Proctor, sendo determinadas as dimensões e a massa do cilindro anteriormente ao início dos ensaios. As energias utilizadas nos ensaios são apresentadas na Tabela 22 (item 4.1) e os ensaios foram realizados apenas com os materiais oriundos da primeira coleta.

Para realização dos ensaios, as amostras de BGS e fresado foram secas ao ar, o teor de cimento foi adicionado sobre a massa seca das misturas e estas foram realizadas manualmente. O teor de umidade foi adicionado sobre a massa total da mistura (fresado, BGS e cimento) e o teor inicial variou para cada uma das misturas estudadas, esta umidade sendo aumentada no valor de um ponto percentual para cada um dos pontos do ensaio realizados posteriormente.

Após a compactação da última camada, a massa de cada ponto do ensaio (molde mais material compactado) foi determinada. Foi retirada uma amostra de material do interior do cilindro e colocada em estufa para determinação da umidade. Por fim, foram traçadas as curvas de compactação e definidos os valores de peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{sm\acute{a}x}$ ) e teor de umidade ótimo ( $\omega_{ot}$ ). A Figura 19 mostra o processo de compactação e a aparência de uma mistura com 20% de fresado, 80% de BGS, teor de cimento igual a 6% (6-20-INT) e teor de umidade igual a 8%, depois de compactada na energia Intermediária.



Figura 19: Procedimento para (a) compactação de uma das camadas e (b) aparência da mistura de código 6-20-INT com teor de umidade igual a 8% após compactação

#### 4.3.3 Moldagem dos corpos de prova

Os procedimentos apresentados neste item foram empregados para todos os ensaios realizados neste estudo. Outros detalhes específicos das moldagens dos corpos de prova relativos a cada ensaio são apresentados nos itens que tratam dos mesmos.

Para realização das misturas, as amostras de BGS e fresado foram secas ao ar e, então, suas umidades foram determinadas. A partir dessa umidade, calculou-se a massa seca do material e, depois de incluída a massa de cimento relativa ao teor utilizado, calculou-se a quantidade de água necessária para se alcançar o teor de umidade ótimo. As misturas foram realizadas manualmente e respeitando um mesmo período de homogeneização.

Os corpos de prova foram moldados através da compactação dinâmica de um número de camadas predeterminado. A quantidade de material adicionada por camada e o número de golpes dados foram ajustados para reproduzir o peso específico aparente seco máximo obtido através dos ensaios de compactação. Detalhes da moldagem, como o soquete e moldes utilizados, o número de camadas quando da compactação dos corpos de prova e a proveniência dos materiais utilizados para cada ensaio são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Características da moldagem de corpos de prova para cada ensaio realizado

Ensaio	Soquete	Molde	Número de camadas	Proveniência dos materiais
Resistência à compressão simples	Proctor grande	Cilíndrico (10 x 20 cm)	5	Coleta 1
Resistência à tração por compressão diametral	Marshall	Cilíndrico / Marshall (10,2 x 6,5 cm)	1	Coleta 1
Módulo de resiliência diametral	Marshall	Cilíndrico / Marshall (10,2 x 6,5 cm)	1	Coleta 1
Retração por secagem	Proctor grande	Prismático (7,5 x 7,5 x 28,5 cm)	2	Coleta 2
Ascensão capilar, expansão e absorção	Proctor grande	Cilíndrico / Proctor pequeno (10 x 12,73 cm)	3	Coleta 2
Erodibilidade	Proctor grande	Cilíndrico / Proctor grande (15,24 x 11,43 cm)	5	Coleta 2

Após a execução da última camada, colheu-se uma amostra de material para determinação da umidade de moldagem de cada corpo de prova. A tolerância de aceitação para o teor de umidade da mistura foi de  $\pm 0,5\%$  e para o valor de peso específico aparente seco do corpo de prova foi de  $\pm 0,2 \text{ kN/m}^3$ , ambos em relação aos dados obtidos nos ensaios de compactação.

A Tabela 24 apresenta o número de corpos de prova moldados por idade de cura e, por conseguinte, o número de corpos de prova moldados por ensaio. No total, foram moldados 200 corpos de prova, além de outros 22 corpos de prova moldados para realização de ensaios

adicionais de resistência à compressão simples, a fim de elucidar dúvidas a respeito dos procedimentos do ensaio, este fato é comentado no item 4.3.4.

Tabela 24: Número de corpos de prova moldados para cada ensaio realizado

Ensaio	Idades de cura (dias)	CPs / Idade de cura	CPs / Ensaio
Resistência à compressão simples	3, 7, 14	3	72
Resistência à tração por compressão	3, 7, 14	3	72
Módulo de resiliência diametral	3, 7, 14	2*	-
Retração por secagem	4, 7, 14, 21	2**	16
Ascensão capilar, expansão e absorção	7	3	24
Erodibilidade	7	2	16

\*São os mesmos corpos de prova utilizados para os ensaios de RCD. \*\*Dois corpos de prova são utilizados para realização dos ensaios em todas as idades de cura

#### 4.3.4 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples (RCS) é a principal característica analisada no método de dosagem da Austroads (item 3.2.5). Devido a isto e ao fato deste ensaio ser de simples execução, sendo realizado na grande maioria dos laboratórios de engenharia, decidiu-se pela sua utilização na presente pesquisa.

Como apresentado na Tabela 24 (item 4.3.3), foram definidas três idades de cura, sendo estas iguais a 3 dias, 7 dias e 14 dias. Assim, para cada curva de compactação obtida, foram moldados 9 corpos de prova (triplicata), totalizando em 72 corpos de prova.

Alguns detalhes particulares da moldagem foram a utilização de um colarinho extensor adaptado para possibilitar a execução da última camada (Figura 20a) e a realização de remate com pasta de cimento para efetuar a regularização da superfície dos corpos de prova. A cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida mantida a temperatura próxima de 23°C e umidade relativa maior que 90% (Figura 20b).

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados conforme o método de ensaio DNER-ME 091 (DNIT, 1998b). Fez-se uso de uma prensa hidráulica digital para realizar o rompimento dos corpos de prova (Figura 21). A velocidade de aplicação de tensão média nos corpos de prova foi mantida em 0,25 MPa/s e foram utilizados discos de neoprene na base e na parte superior dos corpos de prova para promover a regularização das extremidades.



Figura 20: Procedimentos de (a) moldagem e (b) cura dos corpos de prova para RCS



Figura 21: Realização da (a) ruptura do corpo de prova à compressão e demonstração do (b) sistema digital para programação do ensaio

Além da taxa de carregamento igual a  $0,25 \text{ MPa/s}$  (DNIT, 1998b), optou-se por realizarem-se ensaios adicionais com outras taxas de carregamento para verificar a influência desta na RCS. Assim, foram moldados 12 corpos de prova que foram rompidos com taxas iguais a  $0,14 \text{ MPa/s}$  e  $1 \text{ mm/min}$ , ambas prescritas na norma DNER-ME 201 (DNIT, 1994a), desenvolvida para ensaios de compressão axial em corpos de prova de solo-cimento. Foram utilizadas apenas algumas misturas e os tempos de cura empregados foram iguais a 3 ou 7 dias.

Devido ao fato da norma citada também apresentar em seus procedimentos a necessidade de imersão em água dos CPs (período de 4 horas) previamente à realização dos ensaios, optou-se por realizar um estudo em paralelo com a finalidade de se averiguar os efeitos de tal imersão. Para este fim, foram moldados 10 corpos de prova empregando-se algumas das misturas já citadas, sendo que estes permaneceram em processo de cura durante 3 ou 7 dias.

#### 4.3.5 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RCD) é outro teste comumente indicado na literatura para análise, não só de misturas recicladas com cimento, mas de qualquer material estabilizado quimicamente. Além disso, a tração é a principal solicitação sofrida por camadas cimentadas em pavimentos. Logo, decidiu-se pela sua aplicação na presente pesquisa.

Foram moldados corpos de prova em triplicata para cada idade de cura (3, 7 e 14 dias). Assim, para cada curva de compactação obtida, foram moldados 9 corpos de prova, totalizando em 72 corpos de prova (Tabela 24, item 4.3.3). A cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida mantida a temperatura de 23°C e umidade relativa maior que 90%. Um detalhe específico da moldagem foi a compactação realizada em uma única camada, sendo esta, compactada em suas duas faces, como realizado na dosagem Marshall.

A determinação da resistência à tração por compressão diametral foi realizada baseando-se no método de ensaio DNIT-ME 136 (DNIT, 2010a), originalmente desenvolvido para misturas asfálticas. No ensaio, os corpos de prova foram colocados com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos curvos em uma das faces, então, aplicou-se carga a uma velocidade de deslocamento constante de 0,8 mm/s até a separação dos corpos de prova em duas metades. A partir da carga de ruptura e através da Equação 1 foi calculada a resistência à tração por compressão diametral.

$$RCD = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (1)$$

Onde:

- RCD – resistência à tração por compressão diametral, em MPa;
- F – carga de ruptura, em N;

- D – diâmetro do corpo de prova, em cm;
- H – altura do corpo de prova, em cm.

A Figura 22a apresenta o molde e soquete utilizados, já a Figura 22b apresenta a prensa utilizada para realização do ensaio.



(a)



(b)

Figura 22: Imagem do (a) molde e soquete utilizados na confecção dos corpos de prova para RCD e da (b) prensa utilizada para ruptura à tração dos corpos de prova

#### 4.3.6 Módulo de resiliência

Também foram realizados ensaios para determinação do módulo de resiliência (MR) das misturas recicladas, visto que esta característica é muito importante no dimensionamento de pavimentos. Foram executados ensaios através de compressão diametral, com base na norma DNIT-ME 135 (DNIT, 2010b), originalmente desenvolvida para misturas de concreto asfáltico.

Foram ensaiados 2 corpos de prova por idade de cura (3, 7 e 14 dias) para cada mistura, totalizando em 48 corpos de prova. Entretanto, fez-se uso dos mesmos corpos de prova moldados para o ensaio de tração por compressão diametral (triplicata), isto devido ao fato de o ensaio de MR não ser destrutivo, assim, entende-se que o mesmo não compromete o corpo

de prova, devido às baixas tensões aplicadas em relação à tensão de ruptura. Desta forma, um destes corpos de prova foi rompido à tração (parâmetro necessário para realização do ensaio de módulo de resiliência diametral), enquanto os outros dois tiveram seu módulo de resiliência determinado e, posteriormente, também foram rompidos à tração.

Para realização do ensaio, primeiramente, os corpos de prova foram introduzidos na base do pórtico e um transdutor de deslocamentos do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) foi fixado no centro destes, através de duas garras presas nas faces externas dos mesmos. Então, ajustou-se o LVDT de modo a se obter os registros de deslocamentos via sistema de aquisição de dados. Posteriormente, a parte superior do pórtico foi colocada sobre os corpos de prova e, sobre este conjunto, foi assentado o pistão de carga.

O equipamento utilizado realiza a aplicação de 1 ciclo de carga por segundo (1 Hz) e esta carga foi programada para atingir um valor igual a 30% da carga de ruptura obtida no ensaio de tração por compressão diametral. A Figura 23a apresenta um corpo de prova sendo preparado para o ensaio, já a Figura 23b apresenta o equipamento pronto para o ensaio.



(a)



(b)

Figura 23: Realização do (a) preparo do corpo de prova para o ensaio de MRD e (b) equipamento pronto para realização do ensaio



Por fim, a partir dos parâmetros registrados e da Equação 2, o próprio software utilizado para realização do ensaio efetuou o cálculo do módulo de resiliência dos materiais. Foram realizadas 6 leituras de MRD por corpo de prova.

$$MRD = \frac{Fd}{100\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (2)$$

Onde:

- MRD – módulo de resiliência diametral, em MPa;
- Fd – carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, em N;
- $\Delta$  – deslocamento resiliente para aplicações de carga (F), em cm;
- H – altura do corpo de prova, em cm;
- $\mu$  – coeficiente de Poisson (foi utilizado valor igual a 0,17 como coeficiente de Poisson, pois este é um valor comumente utilizado para misturas de solo-cimento).

#### 4.3.7 Retração por secagem

O ensaio de retração por secagem também é citado pelo método de dosagem da Austroads (item 3.2.5). Tal ensaio foi realizado com base na norma australiana AS 1012.13 (STANDARDS AUSTRALIA, 1992), desenvolvida para avaliar a retração de concreto.

Como apresentado na Tabela 23 (item 4.3.3), o molde utilizado foi prismático com dimensões internas de 7,5 cm de largura, 7,5 cm de altura e 28,5 cm de comprimento. Nas extremidades longitudinais os moldes possuíam furos aos quais se acoplavam pinos metálicos utilizados posteriormente para realizar a leitura da retração dos corpos de prova.

Assim, após a execução da primeira camada, os pinos metálicos foram introduzidos nos moldes (Figura 24a) e então foi compactada a camada final. Foram moldados dois corpos de prova para cada mistura estudada, totalizando em 16 corpos de prova. A cura foi realizada em

câmara climatizada, onde os corpos de prova foram mantidos a temperatura igual a 23°C e umidade relativa igual a 50% (Figura 24b).



(a)



(b)

Figura 24: Procedimentos de (a) moldagem do corpo de prova para o ensaio para ensaios de retração e de (b) cura em câmara climatizada

A primeira leitura da variação longitudinal dos corpos de prova, realizada com auxílio de um comparador horizontal com precisão de milésimo de milímetro, foi efetuada logo após o desmolde, considerando esta a medida inicial, ou seja, considerou-se que os corpos de prova não sofreram retração nas primeiras 24 horas (Figura 25). Então, foram realizadas leituras aos 4, 7, 14 e 21 dias de cura, sendo que, para cada corpo de prova, era realizado um número mínimo de 3 leituras por idade de cura. A retração das amostras é apresentada em micrômetro ( $\mu\text{m}$ ) e foi calculada subtraindo-se o valor obtido na leitura inicial dos valores obtidos nas leituras realizadas para cada idade de cura.

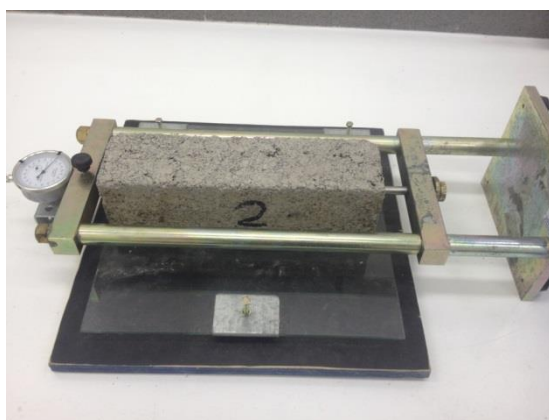


Figura 25: Leitura da retração do corpo de prova

#### 4.3.8 Ascensão capilar, expansão e absorção

Os ensaios de ascensão capilar, expansão e absorção foram realizados conforme a norma australiana AS1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996). Lembra-se que tais ensaios também são relatados no método de dosagem da Austroads (2002), citado no item 3.2.5, e por este motivo decidiu-se pelo emprego dos mesmos na pesquisa.

O molde utilizado para confecção dos corpos de prova foi o pequeno do ensaio de Proctor e a idade de cura utilizada foi de 7 dias. Foram moldados 3 corpos de prova para cada uma das misturas estudadas, totalizando em 24 corpos de prova.

Para realização do ensaio, após o período de cura estabelecido (realizado em câmara úmida mantida a temperatura de 23°C e umidade relativa superior a 90%), os corpos de prova foram secos em estufa até constância de massa (temperatura entre 50 e 60°C) e tiveram as medidas do diâmetro da base e massa aferidas. Então, os corpos de prova foram colocados, com a base para baixo, em um recipiente com uma lâmina d'água mantida a uma altura igual a 1 cm (Figura 26a). Posteriormente, foi determinada a altura de ascensão da água nos corpos de prova (Figura 26b). Além disso, também foram determinadas a altura total, o diâmetro da base e a massa dos corpos de prova.



(a)



(b)

Figura 26: Posicionamento dos (a) corpos de prova em lâmina d'água de 1 cm e (b) detalhe da ascensão da água nos corpos de prova

As leituras foram realizadas após 24 horas e 72 horas de exposição à lâmina d'água e para cada parâmetro foram realizadas três leituras, sendo calculada a média destas. Através destes

dados e fazendo-se uso das Equações 3, 4 e 5, foi possível calcular a ascensão capilar, a expansão e a absorção das amostras.

$$AC = \left(\frac{h}{H}\right) 100 \quad (3)$$

$$E = \left(\frac{(D_2)^2}{(D_1)^2} - 1\right) 100 \quad (4)$$

$$A = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_3}\right) 100 \quad (5)$$

Onde:

- AC – ascensão capilar, em porcentagem;
- E – expansão, em porcentagem;
- A – absorção, em porcentagem;
- h – altura da ascensão da água no corpo de prova, em cm;
- H – altura do corpo de prova, em cm;
- D<sub>1</sub> – diâmetro da base do corpo de prova após seco em estufa, em cm;
- D<sub>2</sub> – diâmetro da base do corpo de prova após período na lâmina d'água, em cm;
- m<sub>1</sub> – massa do corpo de prova após seco em estufa, em g;
- m<sub>2</sub> – massa do corpo de prova após período na lâmina d'água, em g;
- m<sub>3</sub> – massa seca do corpo de prova após a moldagem, desconsiderando a umidade adicionada, em g.

#### 4.3.9 Erodibilidade

O ensaio de erodibilidade faz parte do método de dosagem da Austroads (item 3.2.5), por tal motivo, também foi aplicado neste estudo. Para realização dos ensaios de erodibilidade foi

utilizada a norma australiana TM-T186 (RTA, 1994). A norma especifica que, no mínimo, duas amostras (duplicata) devem ser ensaiadas, assim, um total de 16 corpos de prova foi moldado (8 misturas e um período de cura igual a 7 dias).

O molde utilizado para confecção dos corpos de prova foi o grande do ensaio de Proctor (cilindro do ISC). A cura utilizada foi acelerada em estufa, assim, os corpos de prova foram envoltos por jornal úmido e papel alumínio, antes de serem introduzidos na estufa (temperatura entre 60°C e 70°C), a fim de propiciar umidade suficiente para o processo de cura.

A realização do ensaio se deu através da introdução do corpo de prova, após processo de cura, em um recipiente com uma lâmina d'água de 2,5 cm de altura, por um período de 1 hora. Durante este intervalo de tempo, sobrecargas (total de 6,75 kg) foram presas no topo do corpo de prova (Figura 27a). Então, o corpo de prova foi introduzido em um recipiente cilíndrico metálico, com 20 cm de diâmetro e já possuindo 200 ml de água em seu interior. Posteriormente, este recipiente metálico foi preso a uma mesa vibratória, que permanecia ligada por um período de aproximadamente 15 minutos (Figura 27b).



(a)



(b)

Figura 27: Posicionamento dos (a) corpos de prova com sobrecargas (esquerda) em lâmina d'água de 2,5 cm e (b) CP introduzido no recipiente cilíndrico preso à mesa vibratória

O material erodido do corpo de prova foi recolhido e introduzido em uma peneira de número 8 (abertura de 2,36 mm), onde foi lavado. Então, o material passante foi seco em estufa e teve sua massa determinada. A erodibilidade das amostras foi determinada a partir da relação entre a massa de finos (material passante pela peneira de número 8) e o tempo em que o corpo de prova permaneceu na mesa vibratória, sendo representada em gramas por minuto.

#### 4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A análise estatística dos resultados obtidos através dos ensaios experimentais foi realizada utilizando-se o software STATISTICA 12.0, desenvolvido pela empresa StatSoft Inc. (Dell Inc., atualmente). Dado o número elevado de variáveis independentes, cada uma com dois ou três níveis de variação, optou-se por buscar um modelo de regressão linear múltipla no qual a variável dependente é função apenas das variáveis independentes, desconsiderando-se qualquer interação entre estas.

As variáveis independentes consideradas na análise dos resultados de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e retração por secagem foram o teor de cimento, o teor de fresado, a idade de cura e a energia de compactação. No modelo (1) apresenta-se o modelo geral considerado para tais propriedades.

$$A = \text{Intercepto} + a(\% \text{ cim}) + b(\% \text{ fres}) + c(\text{idade}) + d(\text{en}) \quad (1)$$

Onde:

- % cim – teor de cimento, em porcentagem;
- % fres – teor de fresado, em porcentagem;
- idade – idade de cura, em dias;
- en – energia de compactação, em kN.m/m<sup>3</sup> (1293 kN.m/m<sup>3</sup> para energia Intermediária e 2735 kN.m/m<sup>3</sup> para energia Modificada).

Para a análise dos resultados de ascensão capilar, expansão e absorção, as variáveis independentes consideradas foram o teor de cimento, o teor de fresado, o tempo de exposição à água e a energia de compactação. O modelo geral considerado para tais propriedades é apresentado no modelo (2).

$$A = \text{Intercepto} + a(\% \text{ cim}) + b(\% \text{ fres}) + c(\text{exp. água}) + d(\text{en}) \quad (2)$$

Onde:

- exp. água – tempo de exposição à lâmina d'água, em dias.

Na análise estatística dos resultados de erodibilidade foram consideradas como variáveis independentes o teor de cimento, o teor de fresado e a energia de compactação. No modelo (3) é apresentado o modelo geral considerado para erodibilidade.

$$A = \text{Intercepto} + a(\% \text{ cim}) + b(\% \text{ fres}) + c(\text{en}) \quad (3)$$

Ainda, para cada propriedade mecânica e volumétrica analisada (variável dependente), realizou-se a codificação dos valores das variáveis independentes entre o intervalo de -1 a 1. Tal procedimento foi realizado com o objetivo de se obter modelos que pudessem proporcionar uma avaliação mais adequada da influência de cada variável independente, a partir da hierarquização das mesmas.

Avaliou-se a ocorrência de dados espúrios e de variáveis independentes não significativas, desconsiderando-se tais dados de novas análises realizadas posteriormente. Destaca-se que os modelos obtidos são válidos apenas para misturas contendo materiais semelhantes aos estudados nesta pesquisa e para a gama de valores obtidos para cada propriedade analisada.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e são realizados comentários e discussões acerca destes. Além disso, são realizadas análises estatísticas para fundamentar as discussões apresentadas. Por fim, os resultados são comparados com dados obtidos por outros pesquisadores. Destaca-se que para identificar as misturas são utilizados os mesmos códigos definidos na Tabela 22 (item 4.1).

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item são apresentados os resultados obtidos a partir da caracterização dos materiais da rodovia RSC-453. Primeiramente, são apresentadas as granulometrias dos materiais, em seguida, o teor de ligante asfáltico extraída do material fresado e, por fim, a granulometria das misturas de BGS e fresado.

#### 5.1.1 Análise granulométrica

As Figuras 28 e 29 apresentam as curvas granulométricas da brita graduada simples e do material fresado, respectivamente.

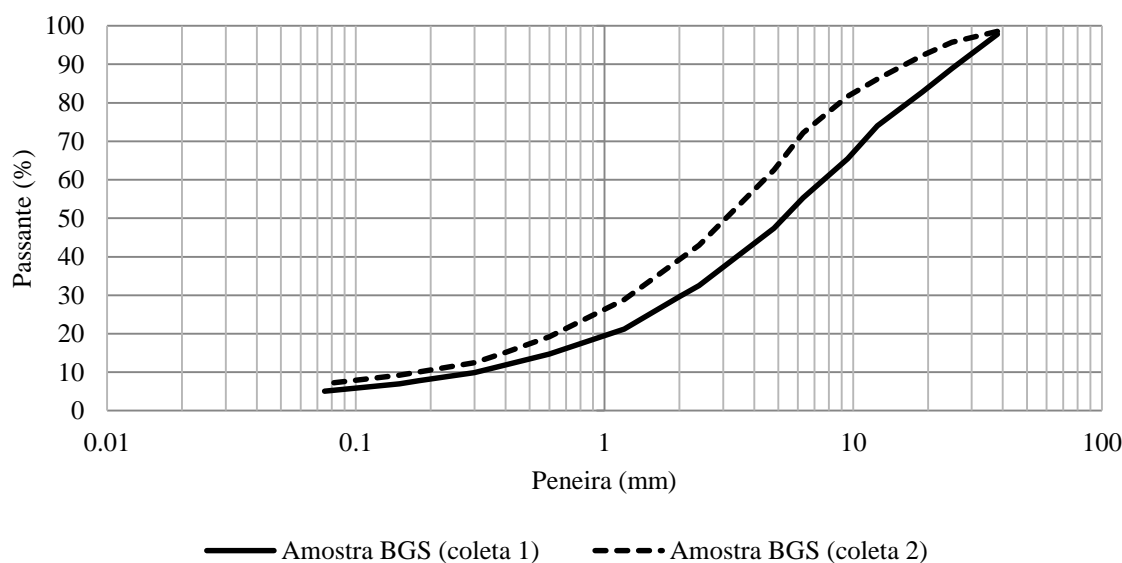


Figura 28: Curvas granulométricas da brita graduada simples



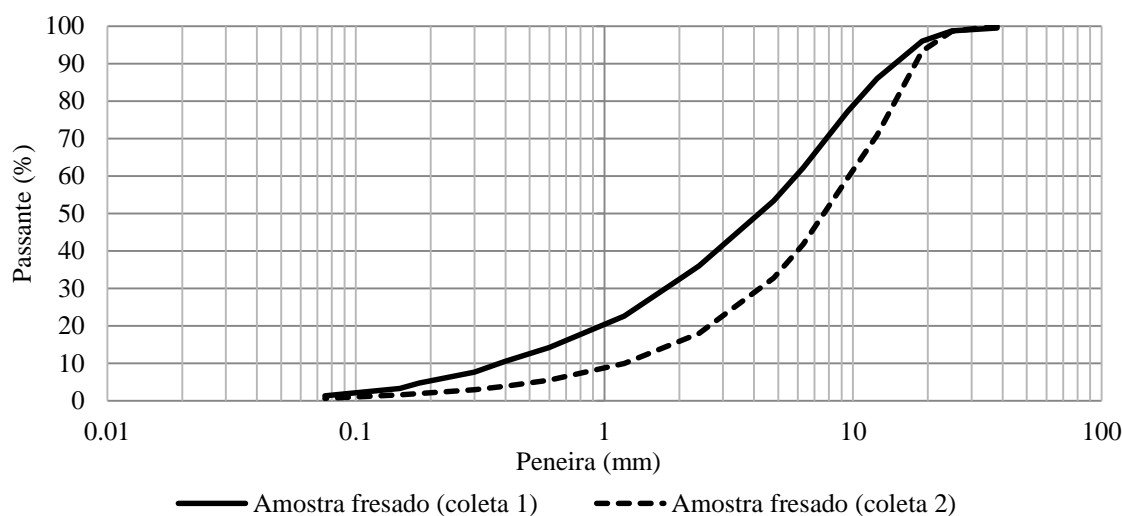


Figura 29: Curvas granulométricas do fresado

### 5.1.2 Teor de ligante asfáltico do material fresado

O teor de ligante asfáltico extraído do material fresado da primeira coleta foi igual a 4,16%. Já para a segunda coleta, o teor foi de 5,23%.

### 5.1.3 Granulometria das misturas de BGS e fresado

As curvas granulométricas das duas misturas de brita graduada e material fresado são apresentadas na Figura 30 (primeira coleta) e na Figura 31 (segunda coleta).

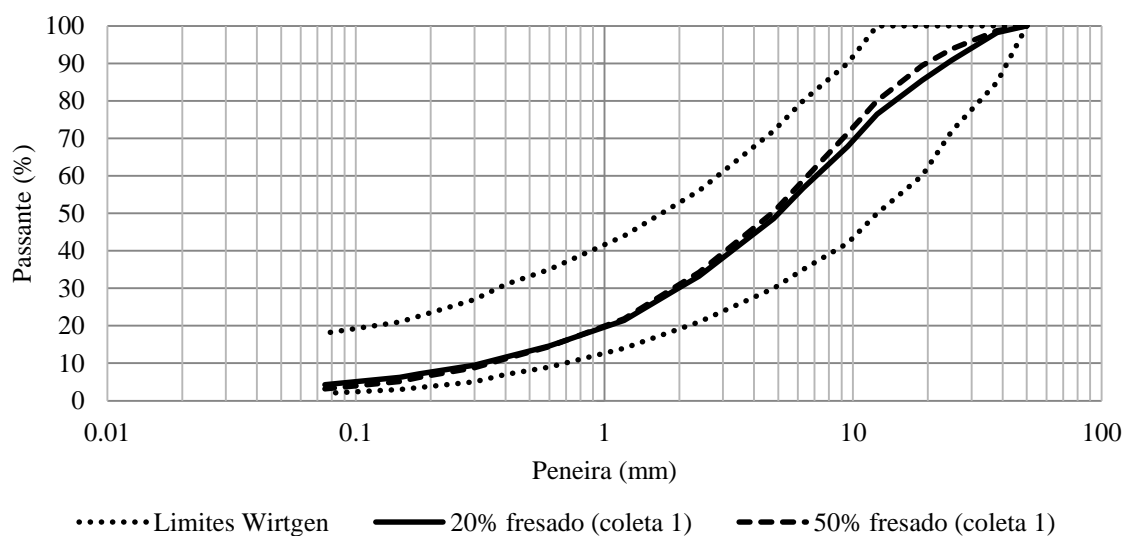


Figura 30: Curvas granulométricas das misturas enquadradas aos limites da Wirtgen (primeira coleta)

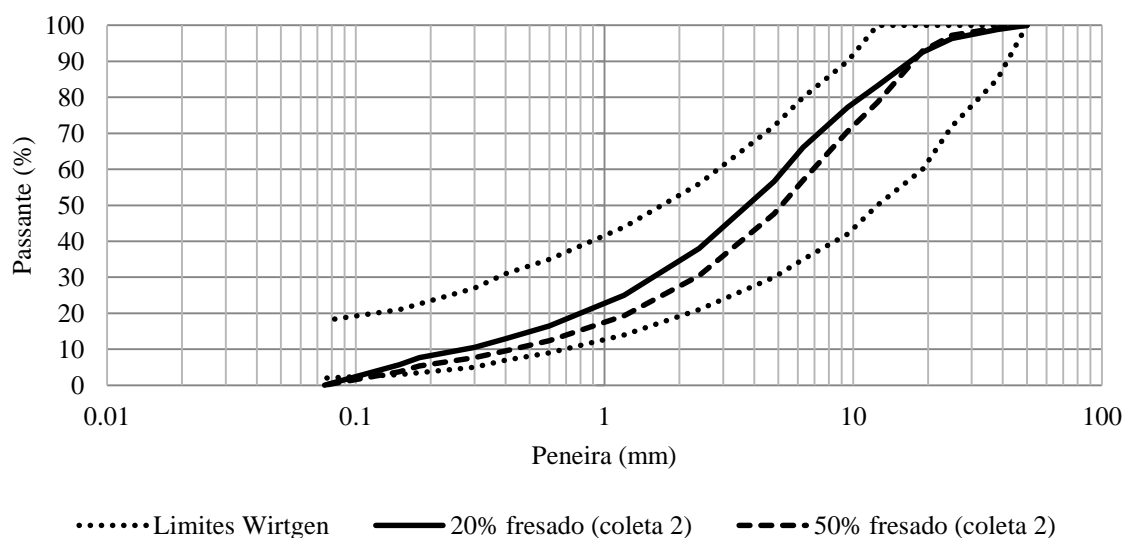


Figura 31: Curvas granulométricas das misturas enquadradas aos limites da Wirtgen (segunda coleta)

Nestas figuras também é apresentada a faixa granulométrica indicada para reciclagem com cimento definida pelo manual da Wirtgen (2012). Pode-se verificar que as curvas granulométricas das misturas se enquadram nos limites da faixa citada.

## 5.2 COMPACTAÇÃO

As curvas de compactação obtidas para as oito misturas estudadas são apresentadas na Figura 32. A Tabela 25 mostra os parâmetros de compactação obtidos a partir de cada curva.

Tabela 25: Parâmetros obtidos a partir das curvas de compactação

Mistura	Peso específico aparente seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de umidade ótimo (%)
2-20-MOD	20,75	8,2
2-50-MOD	20,60	8,0
4-20-MOD	21,10	7,6
4-50-MOD	20,70	7,1
4-20-INT	20,30	9,5
4-50-INT	20,25	9,1
6-20-INT	20,80	9,0
6-50-INT	20,70	8,0

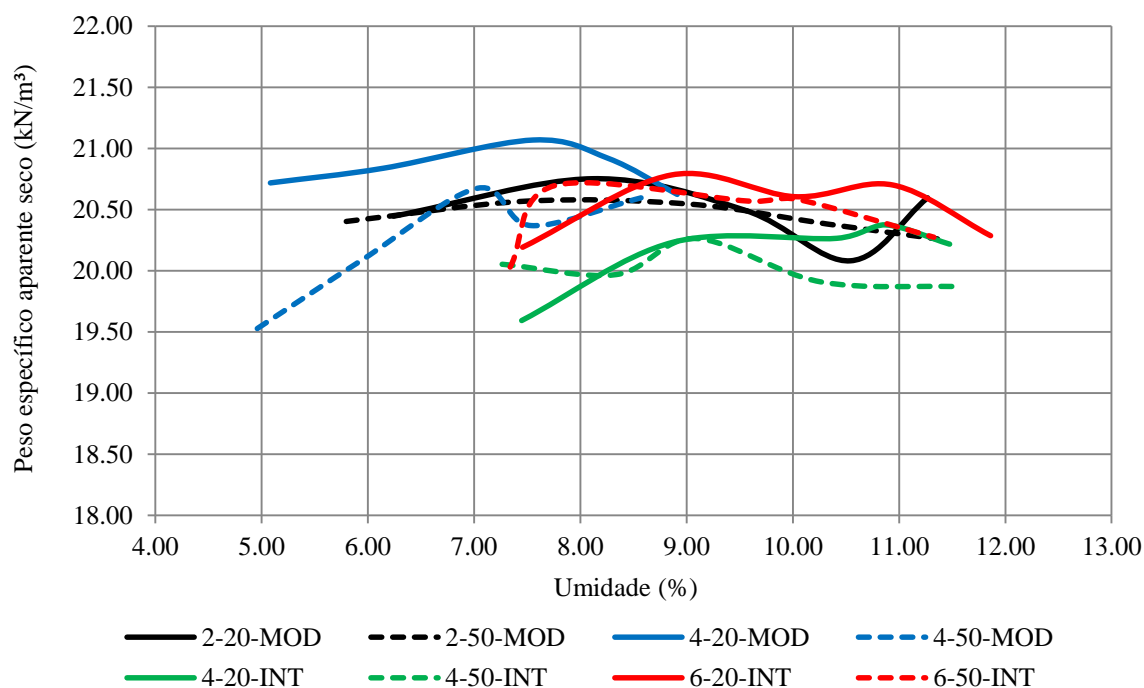


Figura 32: Curvas de compactação obtidas

Observa-se que, para um mesmo teor de cimento e energia de compactação, o aumento da porcentagem de fresado ocasiona um decréscimo tanto do peso específico aparente seco máximo quanto do teor de umidade ótimo. Este fato pode ser explicado pela menor quantidade de finos do material fresado em relação à BGS, que faz com que seja necessária menor quantidade de água para se atingir a umidade ótima da mistura.

Além disso, pode-se observar que existe pouca influência do teor de cimento nos parâmetros obtidos. Com relação às energias, como era esperado, o aumento na energia de compactação ocasiona acréscimo no peso específico aparente seco máximo e decréscimo no teor de umidade ótimo da mistura. Este fato fica evidenciado quando se observa as curvas de compactação das misturas com teor de cimento igual a 4%.

Globalmente, verifica-se que não existe grande variação dos valores de umidade ótima (7,1% a 9,5%) e peso específico aparente seco máximo (20,25 a 21,10 kN/m<sup>3</sup>), apesar do emprego das diferentes combinações de teor de cimento, porcentagem de fresado e energia de compactação.

Ainda, outro aspecto importante é o fato de algumas curvas apresentarem dois picos (BGS-4-20-INT, BGS-6-20-INT, BGS-6-50-INT) e outras um pico e meio (BGS-2-20-MOD, BGS-4-

50-MOD) de peso específico aparente seco. Lee e Suedkamp (1972) evidenciaram que tal comportamento é passível para materiais com baixo Limite de Liquidez (menor que 30%) e Índice de Plasticidade nulo (material não plástico).

Destaca-se que para a determinação dos parâmetros ótimos de compactação o segundo pico foi desprezado, pois este ocorreu em pontos onde já havia exsudação da água adicionada à mistura quando dos golpes aplicados, não representando a condição de umidade ótima.

### 5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Neste item são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão simples. Além disso, também é apresentada a análise estatística destes resultados. Por fim, apresentam-se dados obtidos a partir de estudos paralelos acerca de fatores relativos à realização do ensaio de RCS, que podem influenciar a determinação de tal característica.

As Tabelas 26, 27 e 28 apresentam os resultados de RCS obtidos para cada idade de cura (3, 7 e 14 dias). Os valores apresentados são médias dos resultados de 3 corpos de prova (triplicata) e as tabelas também apresentam o desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos. Destaca-se que o valor de resistência obtido para cada CP ficou entre o intervalo da média mais ou menos um desvio padrão e que os valores de coeficiente de variação obtidos se encontram abaixo de 15%.

Tabela 26: Resultados de RCS aos 3 dias de cura

Mistura	RCS <sub>3 dias</sub> (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
2-20-MOD	2,33	0,17	7,3
2-50-MOD	1,61	0,13	8,2
4-20-MOD	3,35	0,16	4,8
4-50-MOD	2,61	0,23	8,8
4-20-INT	1,85	0,17	9,4
4-50-INT	1,61	0,10	6,0
6-20-INT	4,51	0,26	5,7
6-50-INT	4,06	0,49	12,0

Tabela 27: Resultados de RCS aos 7 dias de cura

Mistura	RCS 7 dias (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
2-20-MOD	2,65	0,19	7,3
2-50-MOD	2,63	0,07	2,7
4-20-MOD	4,77	0,46	9,7
4-50-MOD	4,43	0,03	0,6
4-20-INT	3,03	0,06	1,9
4-50-INT	2,83	0,03	1,0
6-20-INT	5,65	0,44	7,8
6-50-INT	4,98	0,11	2,2

Tabela 28: Resultados de RCS aos 14 dias de cura

Mistura	RCS 14 dias (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
2-20-MOD	3,14	0,07	2,34
2-50-MOD	2,65	0,18	6,8
4-20-MOD	6,08	0,10	1,7
4-50-MOD	4,83	0,32	6,7
4-20-INT	3,68	0,04	1,2
4-50-INT	3,28	0,11	3,2
6-20-INT	5,78	0,20	3,4
6-50-INT	5,15	0,10	1,9

A Figura 33 apresenta a evolução da RCS com o tempo de cura. Pode-se verificar, a partir dos resultados apresentados, que o acréscimo de material fresado na mistura (aumento de 20% para 50%) gera redução na RCS (Tabela 29), fato já observado por outros autores (SUFIAN *et al.*, 2009b; GUSMÃO, 2008). Também se percebe que a resistência aumenta com a utilização de uma energia de compactação maior e com o acréscimo no teor de cimento, como esperado. Tais fatos podem ser facilmente observados nas Tabelas 30 e 31.

Tabela 29: Redução da RCS com o aumento de fresado

Misturas comparadas	Redução 3 dias (%)	Redução 7 dias (%)	Redução 14 dias (%)
2-20-MOD e 2-50-MOD	31	1	16
4-20-MOD e 4-50-MOD	22	7	21
4-20-INT e 4-50-INT	13	7	11
6-20-INT e 6-50-INT	10	12	11

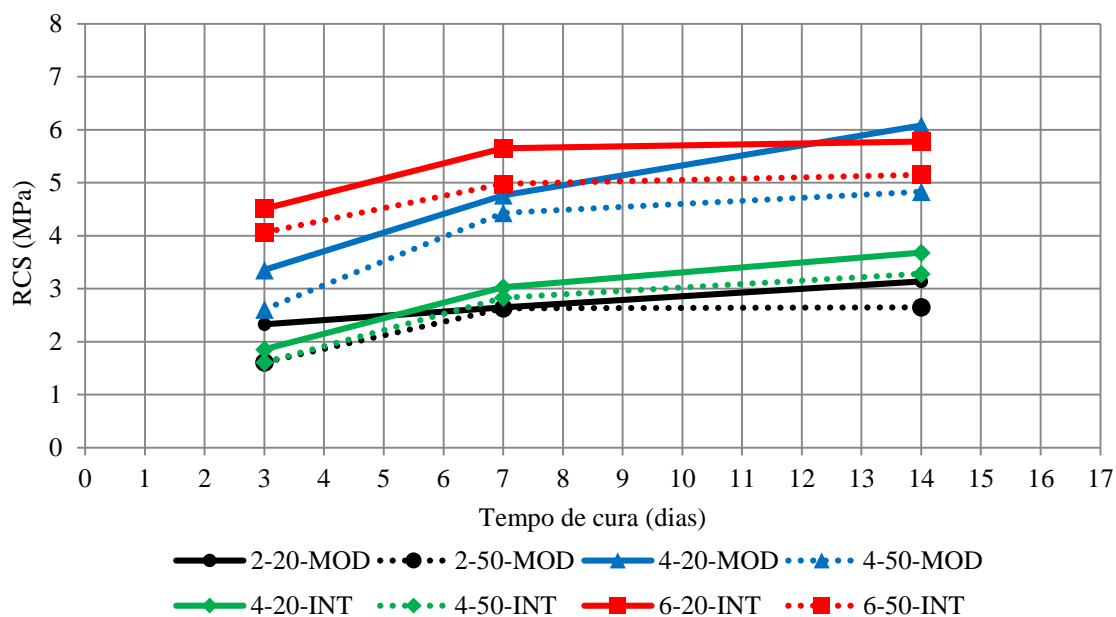


Figura 33: Evolução da RCS com o tempo de cura

Tabela 30: Aumento da RCS com a utilização de energia de compactação mais elevada

Misturas comparadas	Aumento 3 dias (%)	Aumento 7 dias (%)	Aumento 14 dias (%)
4-20-MOD e 4-20-INT	81	57	65
4-50-MOD e 4-50-INT	62	57	47

Tabela 31: Aumento da RCS com o acréscimo do teor de cimento

Misturas comparadas	Aumento 3 dias (%)	Aumento 7 dias (%)	Aumento 14 dias (%)
2-20-MOD e 4-20-MOD	44	80	94
2-50-MOD e 4-50-MOD	62	68	82
4-20-INT e 6-20-INT	143	86	57
4-50-INT e 6-50-INT	152	76	57

Outro fato observado é a tendência da RCS praticamente estabilizar-se aos 7 dias de cura, salvo exceções (2-20-MOD e 4-20-MOD). Além disso, verifica-se que a aplicação de uma maior energia de compactação compensa um teor mais baixo de cimento, fato interessante para evitarem-se problemas oriundos da retração por secagem e para redução de custos.

Também se observa que a RCS aos 7 dias de cura de todas as misturas foi superior ao intervalo limite sugerido pelo DNIT (2013a), entre 2,1 e 2,5 MPa (Tabela 4, item 2.6).

Algumas dessas misturas também apresentaram RCS aos 7 dias superior ao mínimo exigido pelo DER-PR (2005), igual a 3,5 MPa (Tabela 4, item 2.6).

Comparando-se os resultados obtidos com os dados da Tabela 19 (item 3.2.5), que exhibe a classificação de materiais cimentados proposta pela Austroads (2002), se verifica que nenhuma das misturas estudadas seria classificada como material modificado; de fato, seriam divididas em dois grupos: a) materiais levemente cimentados, composto por misturas com 2% de cimento compactadas na energia Modificada e misturas com 4% de cimento compactadas na energia Intermediária, e b) materiais fortemente cimentados, no qual estariam as misturas com 4% de cimento compactadas na energia Modificada e misturas com 6% de cimento compactadas na energia Intermediária.

Em se tratando de misturas recicladas semelhantes às aqui analisadas (especificamente, quando o material da base é brita graduada) parece adequado propor, para efeitos de dosagem, uma RCS mínima de 2,5 MPa, após 7 dias de cura. Observa-se, entretanto, que misturas recicladas com outros materiais de base poderão apresentar menores resistências à compressão simples.

### 5.3.1 Análise estatística dos resultados de RCS

Através da análise estatística dos resultados de RCS foi obtido o modelo (4). Não houve dados espúrios e todas as variáveis apresentaram-se significativas, com valor-p inferior ao nível de significância adotado ( $\alpha = 0,05$ ). O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentou-se bastante próximo a 1, com valor igual a 0,89. Além disso, o valor de F calculado (45,368) foi superior ao valor tabelado (2,895), o que reforça a validade do modelo obtido.

$$RCS = -3,264 + 1,038(\% cim) - 0,017(\% fres) + 0,135(idade) + 0,00113(en) \quad (4)$$

A partir da codificação dos valores das variáveis independentes entre -1 e 1, obteve-se o modelo (5). Observando-se tal modelo, confirma-se que o aumento na porcentagem de fresado reduz a RCS. Também se verifica que, como já relatado anteriormente, a RCS aumenta com o tempo de cura, com a utilização de uma maior energia de compactação e com o acréscimo do teor de cimento, sendo esta última variável, a que possui maior influência dentre as analisadas.

$$RCS = 3,71 + 2,08(\% cim) - 0,26(\% fres) + 0,74(idade) + 0,82(en) \quad (5)$$

A Figura 34 apresenta a comparação entre os valores de RCS medidos e previstos pelo modelo (4), observa-se que as hipérboles correspondentes a 95% de confiança, calculadas pelo software utilizado, aproximam-se da reta de igualdade, explicitando a significância estatística do modelo.

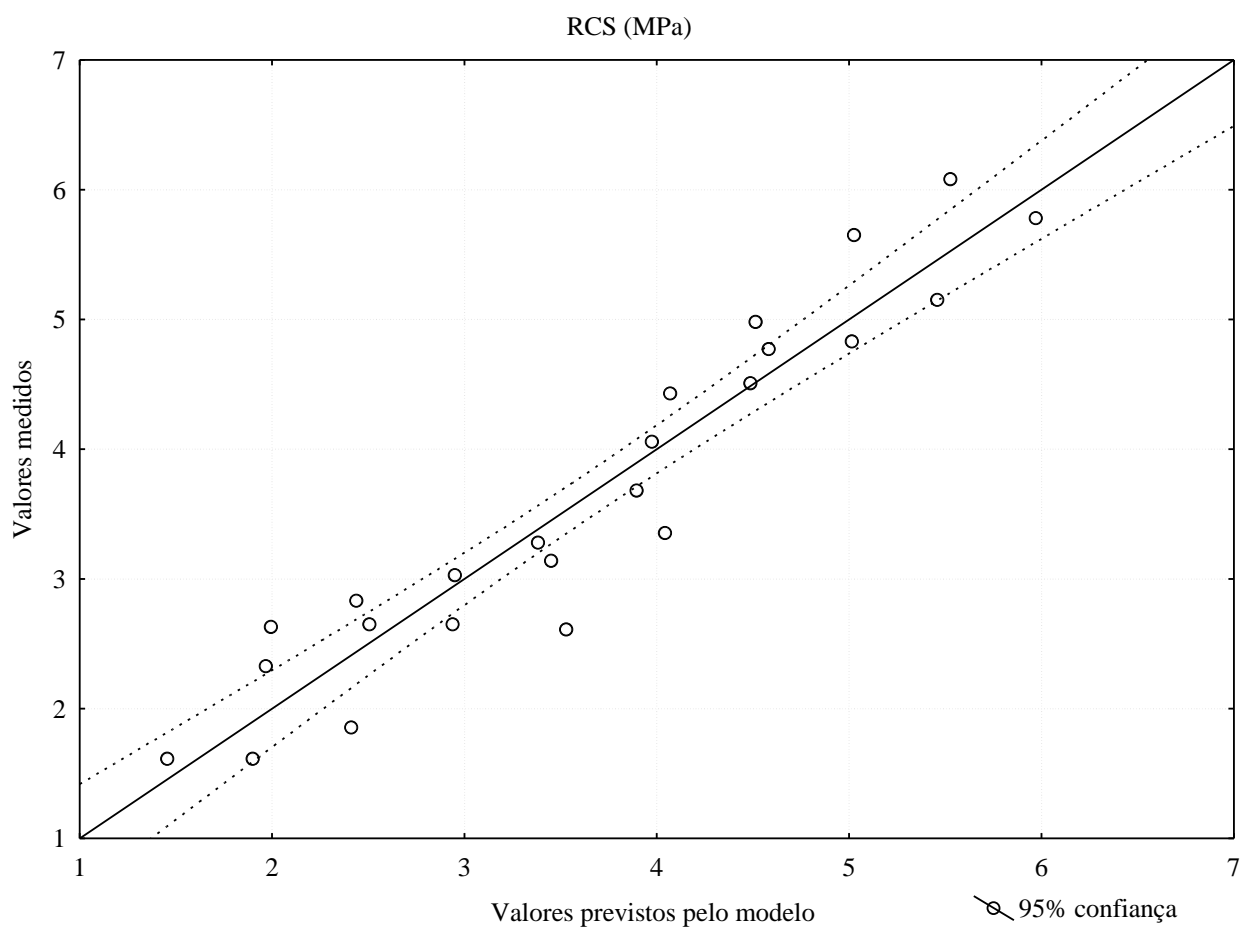


Figura 34: Valores de RCS medidos e previstos pelo modelo obtido

### 5.3.2 Efeito da imersão na RCS

A Tabela 32 apresenta uma comparação entre os resultados de RCS para CPs com e sem processo de imersão durante 4 horas. A partir dos resultados apresentados, observa-se que a imersão prévia, na maior parte dos casos, aumenta a RCS e quando reduz, pouco o faz (redução inferior a 5%), assim, parecendo ser desnecessária a inclusão de tal procedimento no método de dosagem.



Tabela 32: Efeito da imersão prévia na RCS

Mistura	Idade de cura (dias)	RCS (MPa)	RCS (MPa) após 4 horas em imersão
2-20-MOD	3	2,33	2,24
4-20-MOD	7	4,77	5,45
4-50-INT	7	2,83	2,74
6-20-INT	7	5,65	6,04
6-50-INT	7	4,98	5,17

### 5.3.3 Efeito da taxa de carregamento na RCS

A Tabela 33 apresenta as taxas de carregamento empregadas neste estudo paralelo e suas respectivas fontes, já a Tabela 34 apresenta os resultados obtidos para diversas misturas.

Tabela 33: Taxas de carregamento aplicadas

Taxa de carregamento	Norma
0,25 MPa/s	DNER-ME 091/98 (Concreto - média dos limites apresentados)
0,14 MPa/s	DNER-ME 201/94 (Solo-cimento)
1 mm/min	DNER-ME 201/94 (Solo-cimento)

Tabela 34: Resultados obtidos para RCS com aplicação de diferentes taxas de carregamento

Mistura	Idade de cura (dias)	Taxa de carregamento	RCS (MPa)
2-20-MOD	3	0,25 MPa/s	2,33
		0,14 MPa/s	2,23
4-20-MOD	7	0,25 MPa/s	4,77
		0,14 MPa/s	4,94
4-20-INT	7	0,25 MPa/s	3,03
		1 mm/min	2,77
4-50-INT	7	0,25 MPa/s	2,83
		0,14 MPa/s	2,73
6-20-INT	7	0,25 MPa/s	5,65
		0,14 MPa/s	5,61
6-50-INT	7	1 mm/min	4,81
		0,14 MPa/s	4,98

Os resultados mostram que não existe influência significativa da taxa de carregamento na RCS, para as taxas de carregamentos e misturas estudadas. Nenhuma das misturas apresentou variação maior que 10% entre os resultados obtidos para cada taxa empregada. Assim, sugere-

se utilizar as seguintes taxas de carregamentos para realização de ensaios de RCS: 0,25 MPa/s para prensas hidráulicas e 1 mm/min para prensas não hidráulicas.

#### 5.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados obtidos através dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e a análise estatística destes são apresentados neste item. Além disso, apresenta-se a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples.

Nas Tabelas 35, 36 e 37 são apresentadas as médias (triplicata) dos resultados de RCD para cada idade de cura (3, 7 e 14 dias). As tabelas também apresentam o desvio padrão e o coeficiente de variação. O valor de resistência obtido para cada CP ficou entre o intervalo da média mais ou menos um desvio padrão e o valor máximo de coeficiente de variação obtido foi igual a 15%. A Figura 35 apresenta a evolução da RCD com o tempo de cura.

Tabela 35: Resultados de RCD aos 3 dias de cura

Mistura	RCD <sub>3 dias</sub> (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
2-20-MOD	0,48	0,05	10,4
2-50-MOD	0,34	0,04	11,8
4-20-MOD	0,78	0,08	10,3
4-50-MOD	0,65	0,05	7,7
4-20-INT	0,29	0,02	6,9
4-50-INT	0,30	0,03	10,0
6-20-INT	0,66	0,04	6,1
6-50-INT	0,60	0,07	11,7

Tabela 36: Resultados de RCD aos 7 dias de cura

Mistura	RCD <sub>7 dias</sub> (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
2-20-MOD	0,48	0,06	12,5
2-50-MOD	0,42	0,05	11,9
4-20-MOD	0,90	0,07	7,8
4-50-MOD	0,74	0,05	6,7
4-20-INT	0,47	0,02	4,3
4-50-INT	0,51	0,08	15,7
6-20-INT	0,89	0,09	10,1
6-50-INT	1,02	0,02	2,0

Tabela 37: Resultados de RCD aos 14 dias de cura

Mistura	RCD 14 dias (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
2-20-MOD	0,70	0,04	5,7
2-50-MOD	0,51	0,05	9,8
4-20-MOD	1,00	0,10	10,0
4-50-MOD	0,79	0,04	5,1
4-20-INT	0,82	0,08	9,8
4-50-INT	0,54	0,05	9,3
6-20-INT	1,11	0,07	6,3
6-50-INT	1,07	0,09	8,4

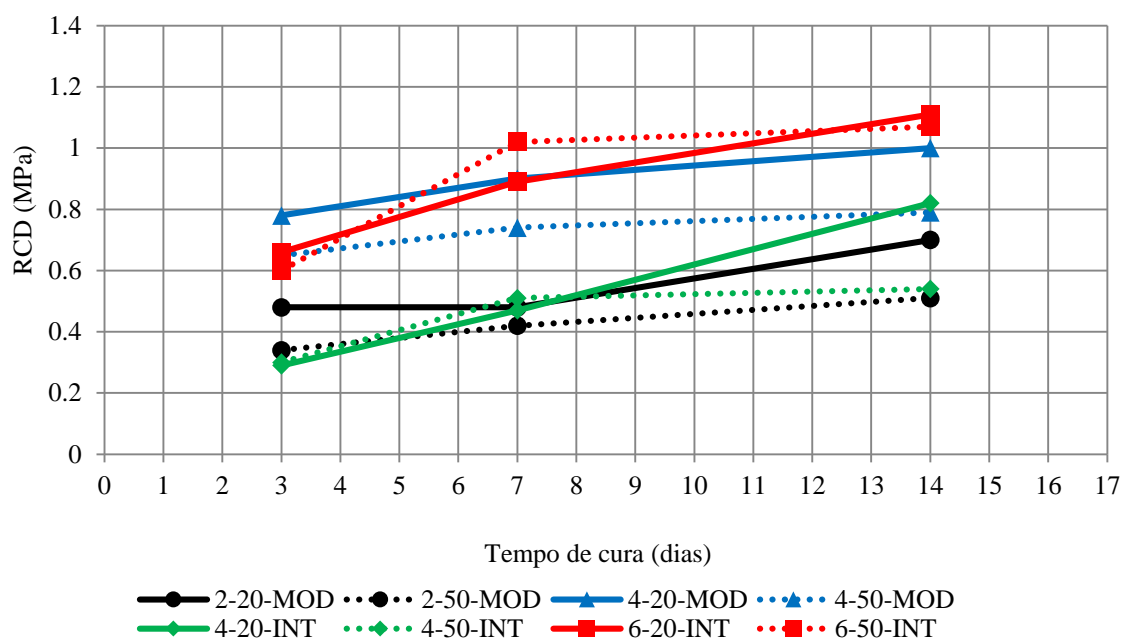


Figura 35: Evolução da RCD com o tempo de cura

A partir dos resultados, observa-se que, assim como para a RCS, o acréscimo de material fresado na mistura gera redução na RCD (salvo exceções), esta redução pode ser visualizada na Tabela 38, assim como as exceções mencionadas. Gusmão (2008) e Sufian *et al.* (2009b) observaram comportamento semelhante em seus estudos (Tabelas 7 e 9, item 2.8).

Observa-se também que a RCD aumenta com a utilização de uma energia de compactação maior e com o acréscimo no teor de cimento, como esperado (Tabelas 39 e 40). Novamente verifica-se que a aplicação de uma maior energia de compactação compensa um teor mais baixo de cimento.

Tabela 38: Redução da RCD com o aumento de fresado

Misturas comparadas	Redução 3 dias (%)	Redução 7 dias (%)	Redução 14 dias (%)
2-20-MOD e 2-50-MOD	29	13	27
4-20-MOD e 4-50-MOD	17	18	21
4-20-INT e 4-50-INT	-3	-9	34
6-20-INT e 6-50-INT	9	-15	4

Tabela 39: Aumento da RCD com a utilização de energia de compactação mais elevada

Misturas comparadas	Aumento 3 dias (%)	Aumento 7 dias (%)	Aumento 14 dias (%)
4-20-MOD e 4-20-INT	169	91	22
4-50-MOD e 4-50-INT	117	45	46

Tabela 40: Aumento da RCD com o acréscimo do teor de cimento

Misturas comparadas	Aumento 3 dias (%)	Aumento 7 dias (%)	Aumento 14 dias (%)
2-20-MOD e 4-20-MOD	63	88	43
2-50-MOD e 4-50-MOD	91	76	55
4-20-INT e 6-20-INT	128	89	35
4-50-INT e 6-50-INT	100	100	98

Além disso, a evolução da resistência à tração por compressão diametral com o tempo de cura parece apresentar uma tendência diferente da resistência à compressão simples. A RCD das misturas contendo 50% de fresado asfáltico estabiliza-se aos 7 dias de cura, já a RCD das misturas contendo 20% de fresado apresenta evolução entre o sétimo e o décimo quarto dia de cura. Também é possível observar que a RCD aos 7 dias de cura de todas as misturas foi superior ao intervalo limite sugerido pelo DNIT (2013a), entre 0,25 e 0,35 MPa (Tabela 4, item 2.6).

Verifica-se que os valores de resistência à tração por compressão diametral obtidos foram bastante elevados. Destaca-se que é importante que as misturas recicladas com cimento apresentem valores elevados de resistência à tração para evitar rupturas frágeis. Por fim, em se tratando de misturas recicladas contendo materiais semelhantes aos estudados parece adequado propor, para efeitos de dosagem, uma RCD mínima de 0,4 MPa, após 7 dias de cura.

### 5.4.1 Análise estatística dos resultados de RCD

O modelo (6) foi obtido através da análise estatística dos resultados de RCD. Apenas um dado espúrio foi verificado, sendo excluído da análise posterior. Todas as variáveis apresentaram-se significativas, com valor-p inferior ao nível de significância adotado ( $\alpha = 0,05$ ). O modelo apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,89 e o valor de F calculado (44,200) foi superior ao valor tabelado (2,928), mostrando a validade do modelo obtido.

$$RCD = -0,56 + 0,17(\% \text{ cim}) - 0,0038(\% \text{ fres}) + 0,027(\text{idade}) + 0,000223(\text{en}) \quad (6)$$

Na Figura 36 é possível visualizar-se a comparação entre os valores de RCD medidos e previstos pelo modelo (6), verifica-se que as hipérboles correspondentes a 95% de confiança, calculadas pelo software, situam-se muito próximas da reta de igualdade, mostrando a significância estatística do modelo.

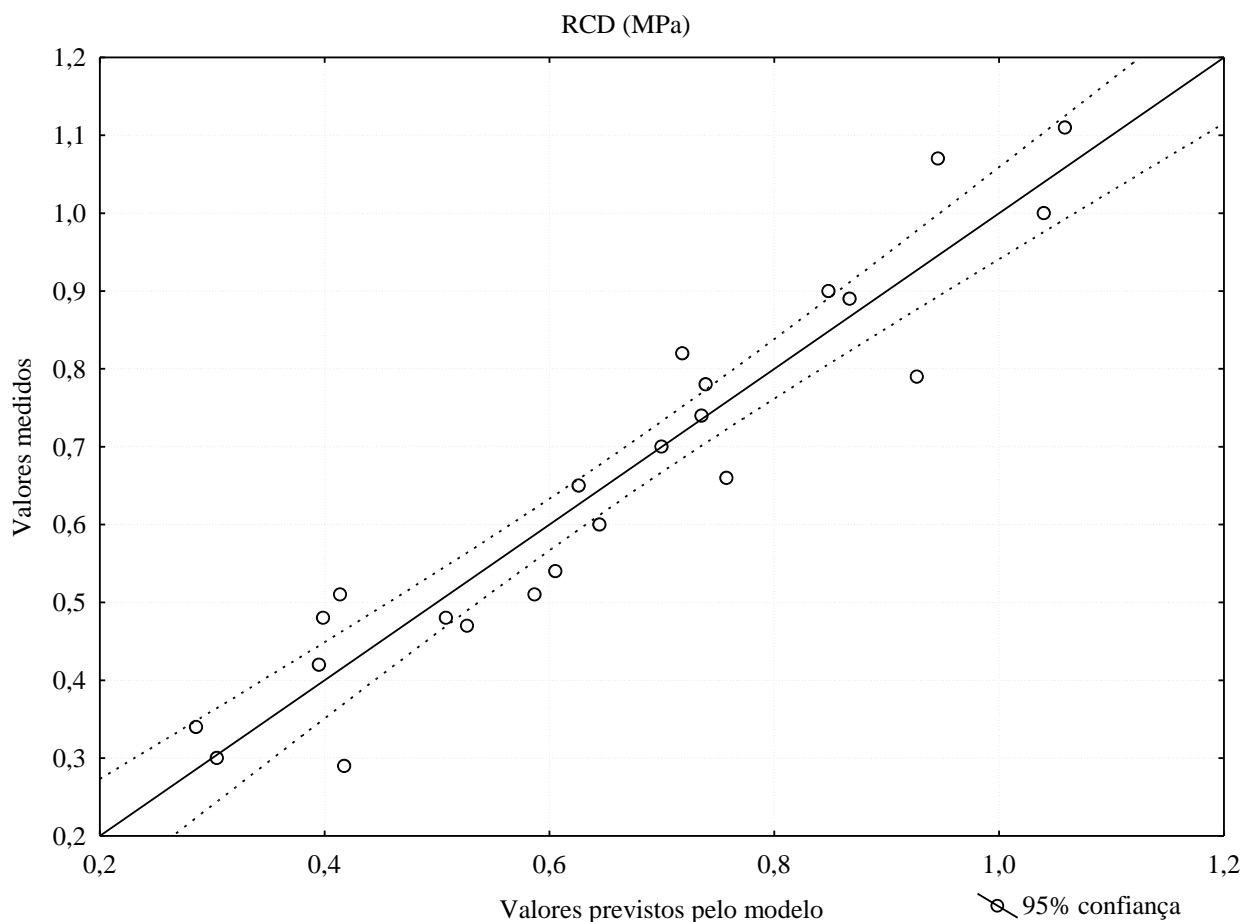


Figura 36: Valores de RCD medidos e previstos pelo modelo obtido

O modelo (7) foi obtido a partir da codificação das variáveis entre -1 e 1. Assim como para a RCS, confirma-se que o aumento na porcentagem de fresado reduz a RCD, já o acréscimo das outras variáveis independentes eleva a RCD, sendo o teor de cimento a variável que possui maior influência dentre as analisadas, seguido pela energia de compactação e, por fim, pela idade de cura.

$$RCD = 0,67 + 0,34(\% \text{ cim}) - 0,06(\% \text{ fres}) + 0,15(\text{idade}) + 0,16(\text{en}) \quad (7)$$

#### 5.4.2 Relação entre RCD e RCS

A Figura 37 apresenta a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples. Na própria figura também é apresentado o modelo da RCD em função da RCS. O coeficiente de determinação é relativamente alto e o F calculado (109,02) é superior ao F tabelado (4,301), o que reforça a validade do modelo apresentado. Assim, seria possível verificar valores de RCD a partir da RCS de uma determinada mistura. Lembra-se que o modelo é válido apenas para misturas semelhantes às estudadas nesta pesquisa (contendo BGS) e para valores de RCS iguais ou superiores a 1 MPa.

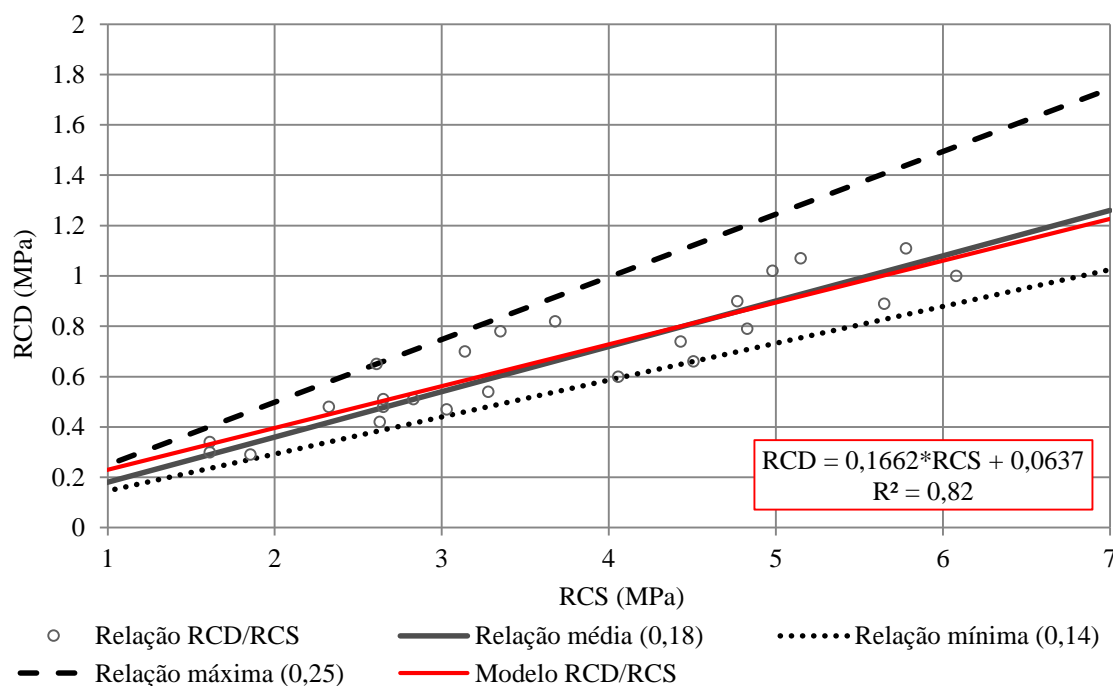


Figura 37: Relação entre RCD e RCS

Como apresentado na Figura 37, observou-se que, em média, a RCD representa aproximadamente 0,18 da RCS, com limite inferior igual a 0,14 e superior igual a 0,25. Estes valores são superiores aos de relações geralmente encontradas para solos estabilizados com cimento (0,10 a 0,15). Entretanto, em estudo com diversas misturas de materiais reciclados com cimento, Trichês *et al.* (2013) encontraram relação semelhante (entre 0,20 e 0,30).

## 5.5 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Neste item são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de módulo de resiliência diametral, assim como a análise estatística realizada acerca destes. Por fim, é apresentada a relação entre o módulo de resiliência e a resistência à compressão simples.

Os resultados de MRD obtidos para cada idade de cura (3, 7 e 14 dias) são apresentados nas Tabelas 41, 42 e 43.

Tabela 41: Resultados de MRD aos 3 dias de cura

Mistura	MRD <sub>3 dias</sub> (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
2-20-MOD	15019	305	2,0
2-50-MOD	10873	474	4,4
4-20-MOD	18902	823	4,4
4-50-MOD	14623	1428	9,8
4-20-INT	12571	269	2,1
4-50-INT	10390	466	4,5
6-20-INT	18353	955	5,2
6-50-INT	16787	1010	6,0

Tabela 42: Resultados de MRD aos 7 dias de cura

Mistura	MRD <sub>7 dias</sub> (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
2-20-MOD	16364	1236	7,6
2-50-MOD	13187	290	2,2
4-20-MOD	19727	949	4,8
4-50-MOD	18528	406	2,2
4-20-INT	16231	687	4,2
4-50-INT	13548	941	7,0
6-20-INT	23208	1336	5,8
6-50-INT	20597	262	1,3

Tabela 43: Resultados de MRD aos 14 dias de cura

Mistura	MRD <sub>14 dias</sub> (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
2-20-MOD	20012	826	4,1
2-50-MOD	18198	363	2,0
4-20-MOD	25719	1316	5,1
4-50-MOD	21447	2144	10,0
4-20-INT	18751	932	5,0
4-50-INT	18756	463	2,5
6-20-INT	24842	1040	4,2
6-50-INT	21062	1500	7,1

Destaca-se que os resultados apresentados são a média de um total de 12 leituras de MRD realizadas para dois corpos de prova e as tabelas também apresentam o desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos. Os valores de MRD obtidos para cada CP ficaram entre o intervalo da média mais ou menos um desvio padrão e os valores de coeficiente de variação obtidos foram baixos (inferiores a 10%). A Figura 38 apresenta a evolução do módulo de resiliência com o tempo de cura.

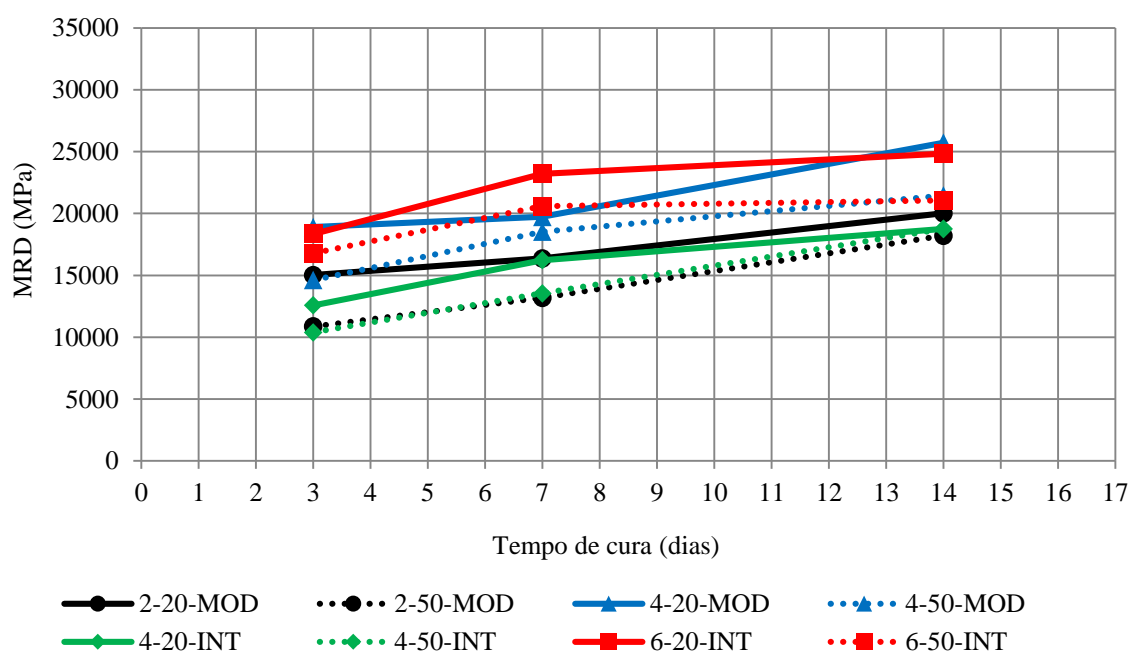


Figura 38: Evolução do MRD com o tempo de cura



Observando-se os resultados apresentados na Figura 38, pode-se inferir que, assim como acontece para a resistência, o acréscimo de material fresado na mistura ocasiona a redução do módulo de resiliência, a magnitude dessas reduções é apresentada na Tabela 44. Este fato já foi evidenciado por Sufian *et al.* (2009b), que observaram comportamento semelhante em misturas com elevado teor de fresado (Tabela 9, item 2.8).

Analisando-se os resultados, também se percebe que o MRD aumenta com o tempo de cura (as exceções são as misturas contendo 6% de cimento, estas apresentam praticamente uma estabilização do MRD aos 7 dias de cura), com a utilização de uma energia de compactação maior (Tabela 45) e com o acréscimo no teor de cimento (Tabela 46). E, da mesma forma que acontece com a resistência, verifica-se que a aplicação de uma maior energia de compactação compensa um teor mais baixo de cimento.

Tabela 44: Redução da MRD com o aumento de fresado

Misturas comparadas	Redução 3 dias (%)	Redução 7 dias (%)	Redução 14 dias (%)
2-20-MOD e 2-50-MOD	28	19	9
4-20-MOD e 4-50-MOD	23	6	17
4-20-INT e 4-50-INT	17	17	0
6-20-INT e 6-50-INT	9	11	15

Tabela 45: Aumento da MRD com a utilização de energia de compactação mais elevada

Misturas comparadas	Aumento 3 dias (%)	Aumento 7 dias (%)	Aumento 14 dias (%)
4-20-MOD e 4-20-INT	50	22	37
4-50-MOD e 4-50-INT	41	37	14

Tabela 46: Aumento da MRD com o acréscimo do teor de cimento

Misturas comparadas	Aumento 3 dias (%)	Aumento 7 dias (%)	Aumento 14 dias (%)
2-20-MOD e 4-20-MOD	26	21	29
2-50-MOD e 4-50-MOD	34	40	18
4-20-INT e 6-20-INT	46	43	32
4-50-INT e 6-50-INT	62	52	12

Destaca-se que os valores de MRD se apresentaram bastante elevados, superiores aos encontrados por outros pesquisadores (SUFIAN *et al.*, 2009b; ELY, 2014) que estudaram

misturas semelhantes (Tabelas 7 e 9, item 2.8). Salienta-se que, geralmente, o aumento exacerbado da rigidez torna as misturas cimentadas muito frágeis, o que representa risco de rupturas a baixos níveis de deformação.

### 5.5.1 Análise estatística dos resultados de MRD

A análise estatística dos resultados de MRD propiciou a obtenção do modelo (8). Não houve dados considerados espúrios e, igualmente às análises para resistência, todas as variáveis apresentaram-se significativas, com valor-p inferior ao nível de significância de 0,05. A validade do modelo é comprovada pelo alto coeficiente de determinação ( $R^2$  igual a 0,92) e pelo valor de F calculado (67,334) ser superior ao valor tabelado (2,895). A comparação entre os valores de MRD medidos e previstos pelo modelo (8) é mostrada na Figura 39.

$$MRD = -336,3 + 2495,6(\% \text{ cim}) - 88,06(\% \text{ fres}) + 572(\text{idade}) + 3,317(en) \quad (8)$$

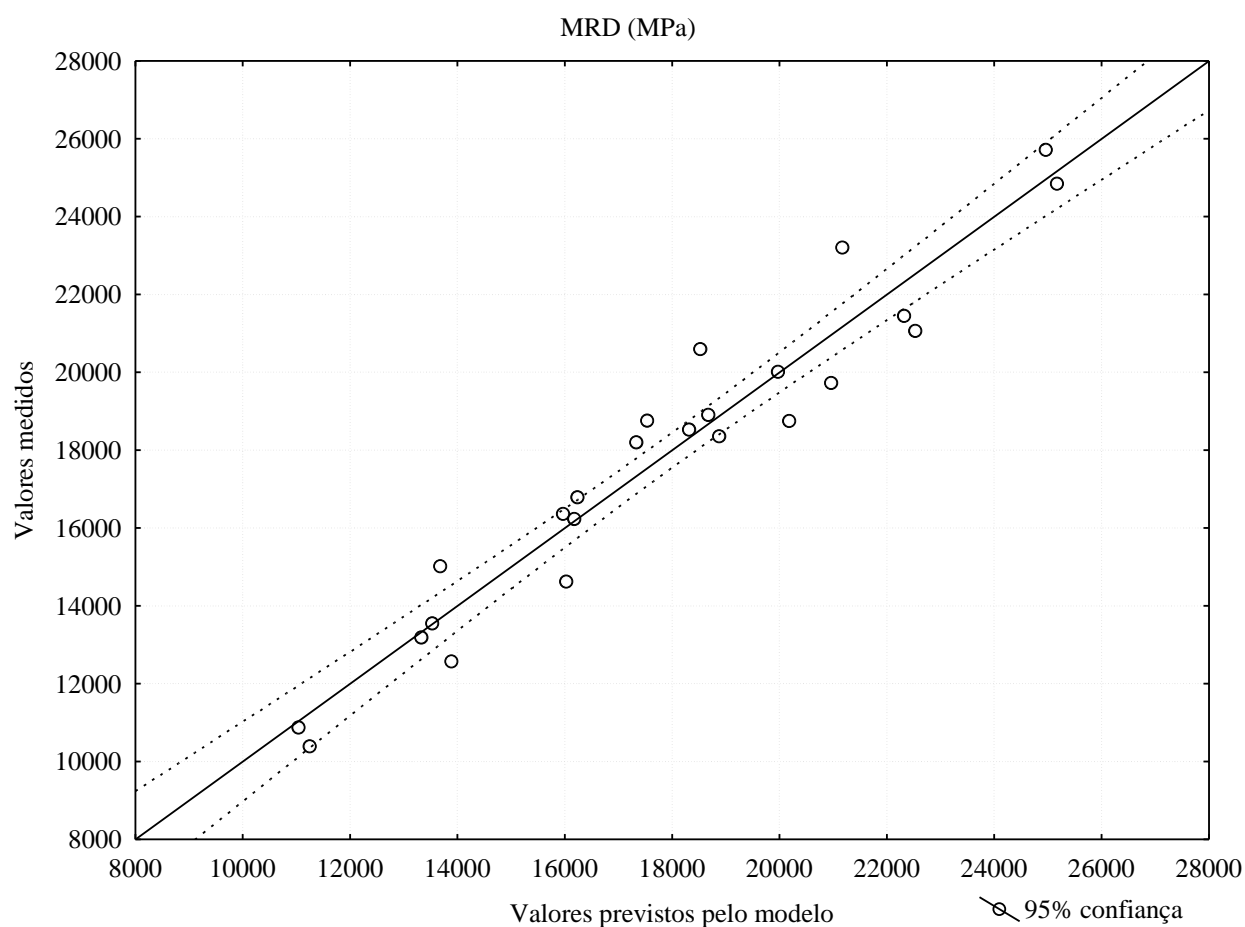


Figura 39: Valores de MRD medidos e previstos pelo modelo obtido

Destaca-se que, no gráfico apresentado na Figura 39, as hipérbolas correspondentes a 95% de confiança, calculadas pelo software, estão bastante próximas da reta de igualdade, o que mostra a significância estatística do modelo.

Codificando-se os valores das variáveis independentes entre -1 e 1, obteve-se o modelo (9). Do mesmo modo que para a resistência, a única variável que reduz o MRD é a porcentagem de fresado, o restante delas acarreta aumento do MRD, destacando-se o teor de cimento. Desta vez, a idade de cura parece possuir maior influência que a energia de compactação.

$$MRD = 18104 + 4991(\% \text{ cim}) - 1321(\% \text{ fres}) + 3148(\text{idade}) + 2392(\text{en}) \quad (9)$$

### 5.5.2 Relação entre MRD e RCS

A Figura 40 apresenta a relação entre módulo de resiliência e a resistência à compressão simples.

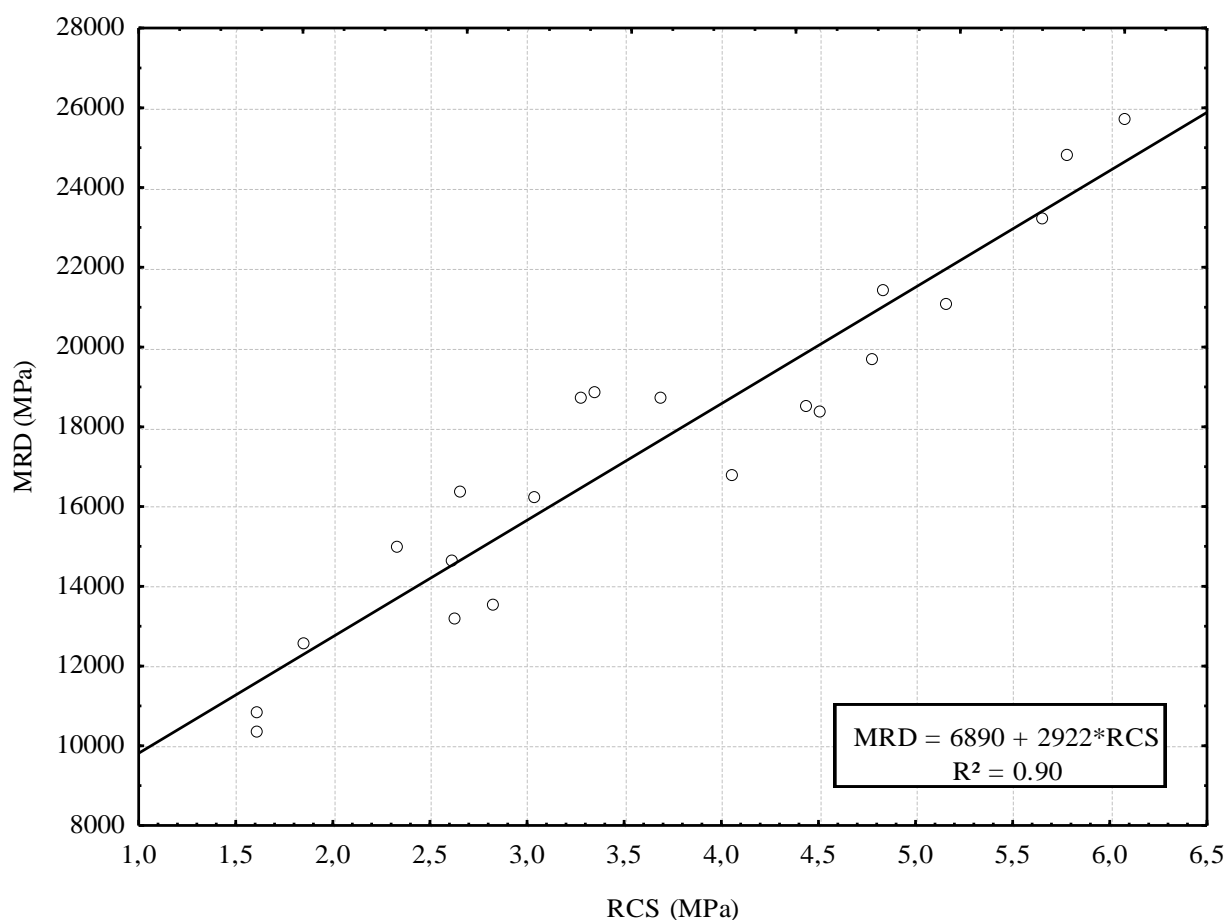


Figura 40: Relação entre MRD e RCS

O modelo que correlaciona o módulo de resiliência em função da resistência à compressão simples e o seu coeficiente de determinação também são apresentados na figura. Os dados considerados espúrios foram excluídos para determinação do modelo e a validade deste é evidenciada pelo alto coeficiente de determinação obtido ( $R^2 = 0,90$ ) e pelo fato do valor de F calculado (174,22) ser superior ao valor de F tabelado (4,381).

O modelo incluído na Figura 40 é proposto para verificação de valores de MRD, eventualmente definidos em projeto, sem necessidade de realização de ensaios de módulo de resiliência na compressão diametral, o que demanda equipamento nem sempre disponível em laboratórios de obra. Observa-se, contudo, que o modelo vale apenas para misturas semelhantes às estudadas nesta pesquisa e para valores de RCS iguais ou superiores a 1 MPa.

## 5.6 RETRAÇÃO POR SECAGEM

A Tabela 47 e a Figura 41 apresentam os resultados de retração (duplicata) para todas as idades de cura (4, 7, 14 e 21 dias), já a Tabela 48 apresenta os mesmos resultados em porcentagem.

A partir dos resultados apresentados, pode-se verificar que a retração por secagem aumenta com o acréscimo do teor de cimento (salvo a mistura 2-50-MOD), a magnitude desses aumentos pode ser visualizada na Tabela 49. Observa-se que o tempo de cura também eleva os valores de retração, contudo, esta praticamente se estabiliza aos 14 dias de cura para as misturas 4-20-MOD, 4-50-MOD, 6-20-INT e 6-50-INT.

Tabela 47: Resultados de retração por secagem em  $\mu\text{m}$

Misturas	Retração 4 dias ( $\mu\text{m}$ )	Retração 7 dias ( $\mu\text{m}$ )	Retração 14 dias ( $\mu\text{m}$ )	Retração 21 dias ( $\mu\text{m}$ )
2-20-MOD	-44,0	-56,5	-86,7	-108,3
2-50-MOD	-47,4	-73,7	-112,7	-142,2
4-20-MOD	-51,4	-86,5	-143,5	-146,2
4-50-MOD	-43,2	-72,7	-147,3	-146,3
4-20-INT	-39,0	-76,8	-122,7	-147,9
4-50-INT	-38,4	-67,8	-111,0	-119,9
6-20-INT	-69,2	-104,3	-160,4	-167,3
6-50-INT	-51,1	-95,1	-159,8	-171,5

Tabela 48: Resultados de retração por secagem em porcentagem

Misturas	Retração 4 dias (%)	Retração 7 dias (%)	Retração 14 dias (%)	Retração 21 dias (%)
2-20-MOD	-0,018	-0,023	-0,035	-0,043
2-50-MOD	-0,019	-0,029	-0,045	-0,057
4-20-MOD	-0,021	-0,035	-0,057	-0,058
4-50-MOD	-0,017	-0,029	-0,059	-0,059
4-20-INT	-0,016	-0,031	-0,049	-0,059
4-50-INT	-0,015	-0,027	-0,044	-0,048
6-20-INT	-0,028	-0,042	-0,064	-0,067
6-50-INT	-0,020	-0,038	-0,064	-0,069

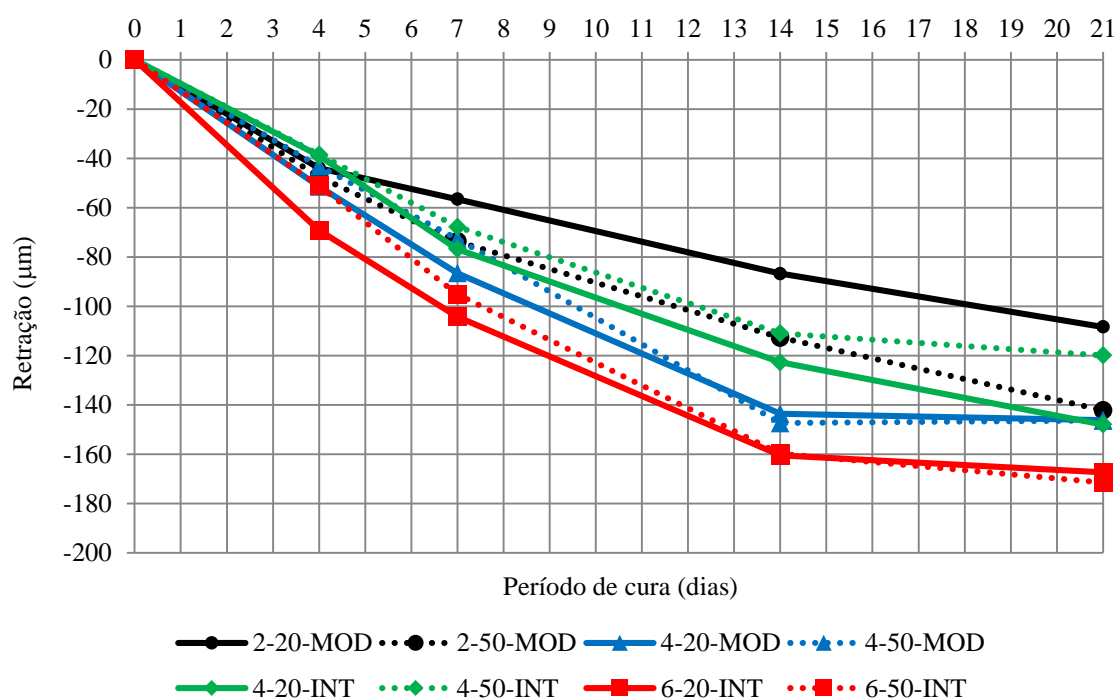


Figura 41: Evolução da retração (em µm) com o tempo de cura

Tabela 49: Aumento da retração (em µm) com o acréscimo do teor de cimento

Misturas comparadas	Aumento 3 dias (%)	Aumento 7 dias (%)	Aumento 14 dias (%)	Aumento 21 dias (%)
2-20-MOD e 4-20-MOD	17	53	65	35
2-50-MOD e 4-50-MOD	-9	-1	31	3
4-20-INT e 6-20-INT	78	36	31	13
4-50-INT e 6-50-INT	33	40	44	43

A influência do teor de fresado na retração por secagem não apresenta uma tendência definida e, quando se compara as misturas com 4% de cimento (Tabela 50), percebe-se que a utilização

de uma energia de compactação maior também acarreta certo aumento da retração (com exceção para as misturas com 20% de fresado, aos 21 dias de cura).

Tabela 50: Aumento da retração (em  $\mu\text{m}$ ) com uso de uma maior energia de compactação

Misturas comparadas	Aumento 3 dias (%)	Aumento 7 dias (%)	Aumento 14 dias (%)	Aumento 21 dias (%)
4-20-MOD e 4-20-INT	32	13	17	-1
4-50-MOD e 4-50-INT	13	7	33	22

A Austroads (2002) sugere que o limite de retração para materiais tratados com cimento deve ser igual a 200  $\mu\text{m}$ , aos 7 dias de cura (item 3.2.5). Analisando-se os resultados, percebe-se que nenhuma das misturas alcança tal limite, nem mesmo aos 21 dias de cura. Entretanto, as misturas com teor de cimento igual a 6% compactadas na energia Intermediária apresentaram os níveis mais elevados de retração dentre as estudadas. Desta maneira, para minimizar a retração, desaconselha-se a utilização de teores tão elevados de cimento, também pelo fato da utilização de uma energia de compactação maior compensar a redução de cimento no que se refere à resistência e rigidez do material, como verificado anteriormente.

### 5.6.1 Análise estatística dos resultados de retração por secagem

Através da realização da análise estatística dos resultados de retração por secagem obteve-se o modelo (10). Não houve dados considerados espúrios, entretanto, duas variáveis não se mostraram significantes (teor de fresado e energia de compactação), apresentando valor-p superior ao nível de significância adotado ( $\alpha = 0,05$ ), e foram excluídas da nova análise. O modelo apresentou  $R^2$  igual a 0,85 e valor de F calculado igual a 86,521, sendo este superior ao valor tabelado (3,328), fatos que mostram a relevância do modelo obtido.

$$\text{Retração} = 2,9198 - 9,5989(\% \text{ cim}) - 5,6392(\text{idade}) \quad (10)$$

Os valores de cada variável foram codificados entre -1 e 1, obtendo-se, assim, o modelo (11). Analisando-se o modelo codificado, verifica-se que a idade de cura tem maior efeito na retração que o teor de cimento.

$$\text{Retração} = -105,96 - 19,20(\% \text{ cim}) - 47,90(\text{idade}) \quad (11)$$

Na Figura 42 é apresentada a comparação entre os valores de retração medidos e previstos pelo modelo (10). Pode-se observar que as hipérboles correspondentes a 95% de confiança, calculadas pelo software, posicionam-se próximas à reta de igualdade, demonstrando a significância estatística do modelo.

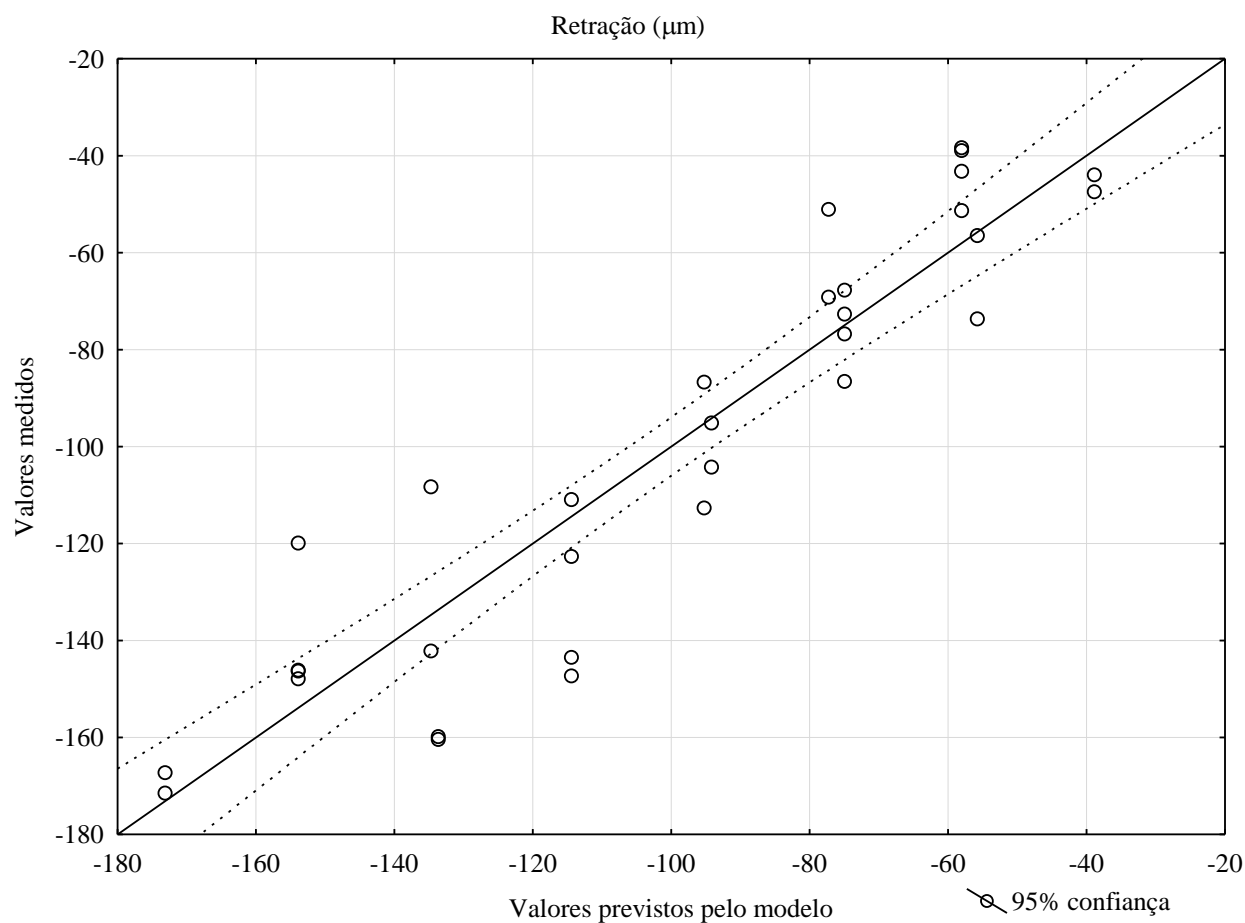


Figura 42: Valores de retração medidos e previstos pelo modelo obtido

## 5.7 ASCENSÃO CAPILAR

As Tabelas 51 e 52 apresentam os resultados de ascensão capilar (AC) obtidos após exposição à água durante 24 e 72 horas, respectivamente. Estes resultados correspondem à média de três corpos de prova e nas próprias tabelas também se apresentam os valores de desvio padrão e o coeficiente de variação. O valor de ascensão capilar obtido para cada CP ficou entre o intervalo da média mais ou menos um desvio padrão e o valor máximo obtido para o coeficiente de variação foi pouco maior que 25%.

Tabela 51: Resultados de ascensão capilar após 24 horas de exposição à água

Misturas	Ascensão capilar 24 horas (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
2-20-MOD	79,42	5,53	7,0
2-50-MOD	73,80	4,76	6,4
4-20-MOD	15,71	3,93	25,0
4-50-MOD	18,60	2,00	10,8
4-20-INT	73,92	6,62	9,0
4-50-INT	79,06	4,84	6,1
6-20-INT	12,78	0,16	1,3
6-50-INT	20,27	1,02	5,0

Tabela 52: Resultados de ascensão capilar após 72 horas de exposição à água

Misturas	Ascensão capilar 72 horas (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
2-20-MOD	89,31	9,56	10,7
2-50-MOD	82,83	15,13	18,3
4-20-MOD	17,94	3,12	17,4
4-50-MOD	21,70	3,92	18,1
4-20-INT	81,17	20,40	25,1
4-50-INT	100,00	0,00	0,0
6-20-INT	17,95	1,17	6,5
6-50-INT	22,58	1,98	8,8

O limite para ascensão capilar sugerido pela Austroads (2002) é igual a 25% da altura total do corpo de prova após 24 horas de exposição à água (item 3.2.5). Percebe-se que os valores de ascensão capilar apresentados pelas misturas com teor de cimento igual a 2% compactadas na energia Modificada e pelas misturas com teor de cimento igual a 4% compactadas na energia Intermediária ultrapassaram tal limite, já os valores de AC das misturas restantes ficaram abaixo deste valor, mesmo após 72 horas de exposição à água. Este fato acaba por dividir as misturas em dois grupos, levemente e fortemente cimentadas, como acontece com a RCS (item 5.3).

A partir dos resultados expostos, percebe-se que a ascensão capilar é bastante dependente do teor de cimento e da energia de compactação empregada, uma vez que estas duas variáveis afetam a porosidade da mistura. Observa-se que, ao aumentarem-se estas variáveis, a AC reduz de forma bastante significativa, como demonstrado nas Tabelas 53 e 54.



Tabela 53: Redução da ascensão capilar com o acréscimo do teor de cimento

Misturas comparadas	Redução 24 horas (%)	Redução 72 horas (%)
2-20-MOD e 4-20-MOD	80	80
2-50-MOD e 4-50-MOD	75	74
4-20-INT e 6-20-INT	83	78
4-50-INT e 6-50-INT	74	77

Tabela 54: Redução da ascensão capilar com a utilização de energia de compactação mais elevada

Misturas comparadas	Redução 24 horas (%)	Redução 72 horas (%)
4-20-MOD e 4-20-INT	79	78
4-50-MOD e 4-50-INT	76	78

Quanto ao teor de fresado, parece não existir uma tendência que mostre influência significativa de tal variável. O tempo de exposição à água eleva a ascensão capilar, fato que ocorre com maior intensidade nas primeiras 24 horas. A Tabela 55 apresenta a magnitude do aumento da ascensão capilar no período entre 24 e 72 horas.

Tabela 55: Aumento da ascensão capilar com o tempo de exposição à água

Misturas	Aumento (%)
2-20-MOD	12
2-50-MOD	12
4-20-MOD	14
4-50-MOD	17
4-20-INT	10
4-50-INT	26
6-20-INT	40
6-50-INT	11

### 5.7.1 Análise estatística dos resultados de ascensão capilar

O modelo (12) foi obtido através da análise estatística dos resultados de ascensão capilar. Um dado foi considerado espúrio e foi excluído da análise seguinte. Dentre as variáveis analisadas, apenas o teor de fresado não se mostrou significativo, com valor-p superior ao nível de significância de 0,05, assim, este foi excluído da análise. O modelo (12) apresentou  $R^2$

igual a 0,99 e valor de F calculado igual a 395,84 (superior ao valor tabelado de 3,587), estes fatos comprovam a validade do modelo obtido.

$$AC = 252,29 - 30,89(\% cim) + 2,64(exp. \acute{a}gua) - 0,042(en) \quad (12)$$

Na Figura 43 pode-se visualizar a comparação entre os valores de AC medidos e previstos pelo modelo (12). As hipérboles correspondentes a 95% de confiança, calculadas pelo software, se apresentam próximas à reta de igualdade, fato que comprova a significância estatística do modelo.

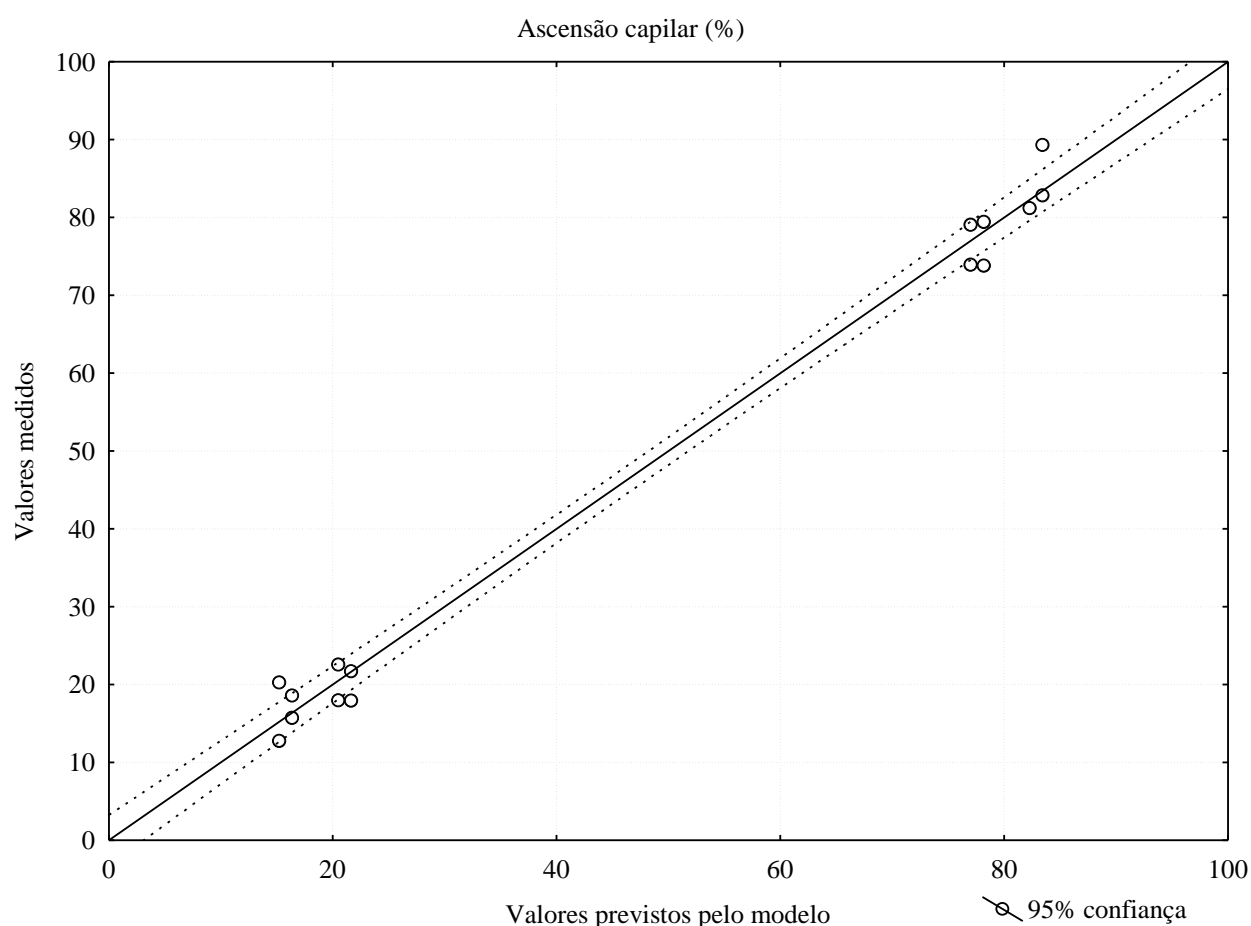


Figura 43: Valores de ascensão capilar medidos e previstos pelo modelo obtido

O modelo (13) foi obtido a partir da codificação dos valores das variáveis independentes entre -1 e 1.

$$AC = 49,33 - 61,78(\% cim) + 2,64(exp. \acute{a}gua) - 30,31(en) \quad (13)$$

Este modelo mostra que o teor de cimento é a variável que mais influencia para diminuir os efeitos da AC, seguido pela energia de compactação. Já o tempo de exposição à água aumenta a AC, como comentado anteriormente.

## 5.8 EXPANSÃO

Os resultados de expansão obtidos após 24 e 72 horas de exposição à água, considerando a média de três corpos de prova, são apresentados nas Tabelas 56 e 57, respectivamente. Os valores de desvio padrão e coeficiente de variação também são apresentados nessas tabelas. Verifica-se que grande parte dos valores de desvio padrão obtidos são bastante elevados, por consequência, o mesmo ocorre com os coeficientes de variação.

Tabela 56: Resultados de expansão após 24 horas de exposição à água

Misturas	Expansão 24 horas (%)	Desvio padrão (%)	Coeficiente de variação (%)
2-20-MOD	0,01	0,01	100
2-50-MOD	0,22	0,14	63,6
4-20-MOD	0,09	0,08	81,3
4-50-MOD	0,45	0,25	55,3
4-20-INT	0,12	0,07	60,2
4-50-INT	0,17	0,17	100
6-20-INT	0,15	0,11	72,1
6-50-INT	0,19	0,05	27,1

Tabela 57: Resultados de expansão após 72 horas de exposição à água

Misturas	Expansão 72 horas (%)	Desvio padrão (%)	Coeficiente de variação (%)
2-20-MOD	0,04	0,02	50,3
2-50-MOD	0,35	0,24	70,5
4-20-MOD	0,15	0,15	100
4-50-MOD	0,85	0,07	7,9
4-20-INT	0,30	0,26	86,6
4-50-INT	0,40	0,21	53,2
6-20-INT	0,35	0,20	58,1
6-50-INT	0,50	0,19	38,1

Pode-se verificar que a expansão aumenta com o tempo de exposição à água (Tabela 58) e com o acréscimo de fresado asfáltico à mistura (Tabela 59), fato que pode indicar a presença

de finos expansivos nesse material. Observa-se também que as variáveis “teor de cimento” e “energia de compactação” não afetam significativamente a expansão. Com o aumento do teor de cimento, seria de esperar-se redução na expansão, devido à liberação de cal durante a hidratação do cimento; aumentando-se a energia de compactação (redução do volume de vazios de ar) a expansão deveria tornar-se mais notória, mas não foram esses os efeitos observados.

Tabela 58: Aumento da expansão com o tempo de exposição à água

Misturas comparadas	Aumento (%)
2-20-MOD	300
2-50-MOD	58
4-20-MOD	64
4-50-MOD	91
4-20-INT	150
4-50-INT	131
6-20-INT	126
6-50-INT	168

Tabela 59: Aumento da expansão com o acréscimo de fresado

Misturas comparadas	Aumento <sub>24 horas</sub> (%)	Aumento <sub>72 horas</sub> (%)
2-20-MOD e 2-50-MOD	1558	771
4-20-MOD e 4-50-MOD	-79	458
4-20-INT e 4-50-INT	45	34
6-20-INT e 6-50-INT	22	44

Destaca-se que a Austroads (2002) e a norma utilizada no ensaio (STANDARDS AUSTRALIA, 1996) não apresentam valores limites para expansão. Os valores de expansão medidos neste estudo foram geralmente inferiores a 0,5%, com exceção para a mistura 4-50-MOD após 72 horas de exposição à água. Na falta de um limite máximo para a expansão, propõe-se, para efeito de dosagem, que quando a expansão livre (a medida através do ensaio estabelecido pela norma australiana) superar 1%, seja medida a expansão com sobrecargas, após 4 dias de imersão em água, da mesma forma que é realizado no ensaio de ISC (DNER-ME 049, DNIT, 1994b). Assim, considerando-se que a camada reciclada com cimento Portland será a base do pavimento restaurado, pode-se limitar a expansão com sobrecargas, após 4 dias de imersão em água, em um valor igual a 0,5%.

### 5.8.1 Análise estatística dos resultados de expansão

A partir da análise estatística dos resultados de expansão foi obtido o modelo (14). Na obtenção do modelo, um dos dados analisados foi considerado espúrio e, portanto, foi excluído. Duas das variáveis analisadas não se apresentaram significativas (valor-p > 0,05), estas variáveis foram o teor de cimento e a energia de compactação, o que confirma os comentários tecidos anteriormente. O modelo apresentou um baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,50$ ), mostrando-se pouco significativo, mesmo com um valor de F calculado (8,1096) superior ao valor tabelado (3,587). A Figura 44 apresenta a comparação entre os valores de expansão medidos e previstos pelo modelo (14).

$$\text{Expansão} = -0,104 + 0,006(\% \text{ fres}) + 0,068(\text{exp} \cdot \text{água}) \quad (14)$$

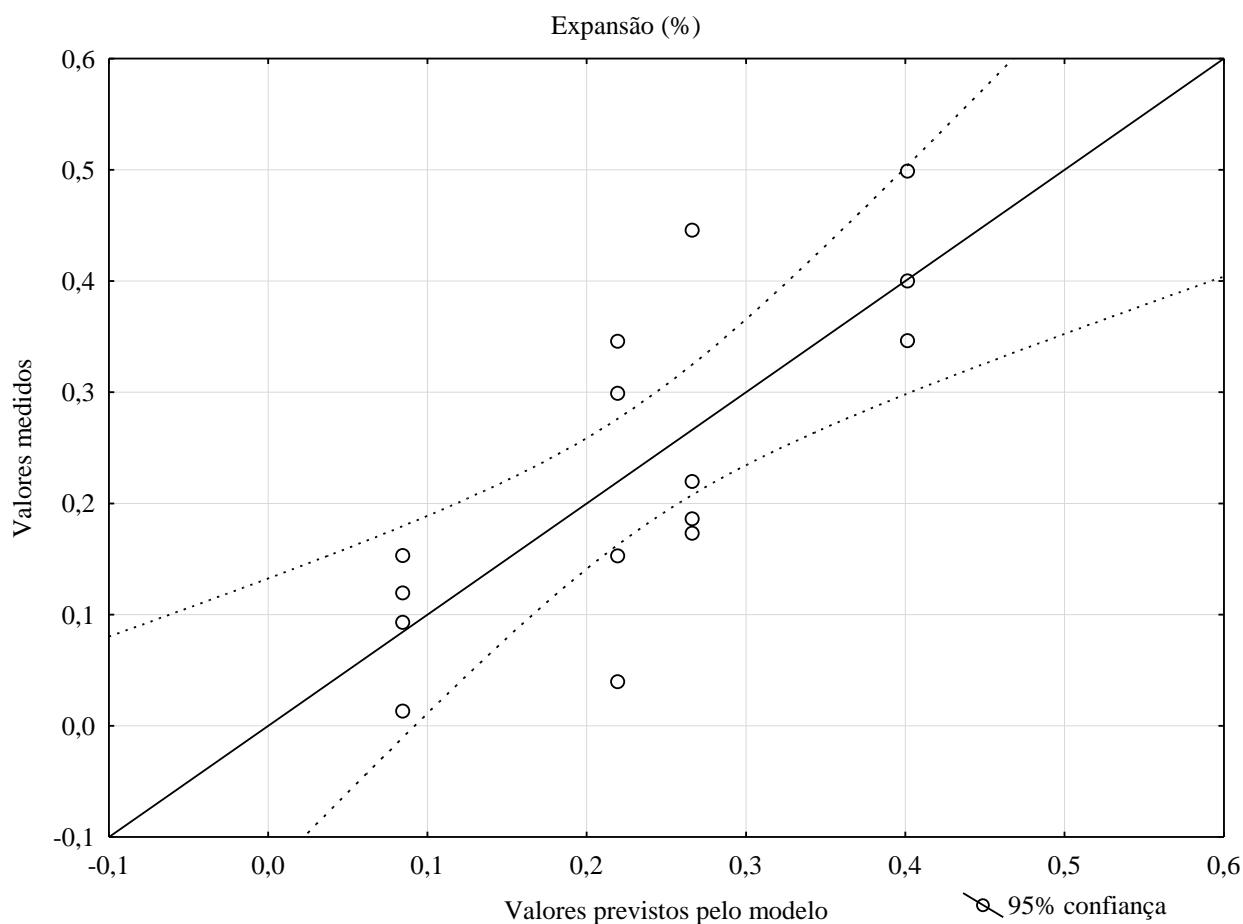


Figura 44: Valores de expansão medidos e previstos pelo modelo obtido

É possível observar que as hipérbolas correspondentes a 95% de confiança, calculadas pelo software utilizado, situam-se distantes da reta de igualdade, o que demonstra que o modelo não possui grande significância estatística.

O modelo (15) foi obtido codificando-se os valores das variáveis analisadas entre -1 e 1. Percebe-se que a expansão é mais sensível ao teor de fresado do que ao tempo de exposição à água.

$$\text{Expansão} = 0,24 + 0,09(\% \text{ fres}) + 0,07(\text{exp} \cdot \text{água}) \quad (15)$$

## 5.9 ABSORÇÃO

As Tabelas 60 e 61 apresentam a média (triplicata) dos resultados de absorção obtidos para 24 horas e 72 horas de exposição à água, respectivamente.

Tabela 60: Resultados de absorção após 24 horas de exposição à água

Misturas	Absorção 24 horas (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
2-20-MOD	2,69	0,23	8,5
2-50-MOD	2,37	0,59	24,8
4-20-MOD	0,89	0,34	38,6
4-50-MOD	0,96	0,28	29,1
4-20-INT	3,15	0,85	27,0
4-50-INT	3,00	0,84	28,1
6-20-INT	1,18	0,23	19,7
6-50-INT	1,45	0,14	9,8

Tabela 61: Resultados de absorção após 72 horas de exposição à água

Misturas	Absorção 72 horas (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
2-20-MOD	3,00	0,27	9,0
2-50-MOD	2,65	0,51	19,3
4-20-MOD	1,08	0,42	38,6
4-50-MOD	1,18	0,27	23,2
4-20-INT	3,54	0,93	26,4
4-50-INT	4,02	0,10	2,4
6-20-INT	1,52	0,17	10,9
6-50-INT	1,66	0,21	12,4

As tabelas também exibem os valores de desvio padrão e de coeficiente de variação, ambos apresentam-se relativamente elevados para grande parte das misturas estudadas. Os resultados apresentados mostram que, do mesmo modo que a ascensão capilar, a absorção depende fortemente do teor de cimento e da energia de compactação. Assim, o acréscimo do teor de cimento e a utilização de uma energia maior reduzem a absorção, a partir da redução da porosidade, como se pode verificar nas Tabelas 62 e 63.

Tabela 62: Redução da absorção com o acréscimo do teor de cimento

Misturas comparadas	Redução 24 horas (%)	Redução 72 horas (%)
2-20-MOD e 4-20-MOD	67	64
2-50-MOD e 4-50-MOD	59	55
4-20-INT e 6-20-INT	63	57
4-50-INT e 6-50-INT	52	59

Tabela 63: Redução da absorção com a utilização de energia de compactação mais elevada

Misturas comparadas	Redução 24 horas (%)	Redução 72 horas (%)
4-20-MOD e 4-20-INT	72	69
4-50-MOD e 4-50-INT	68	71

Obviamente, efeito oposto acontece quando se aumenta o tempo de exposição à água (Tabela 64). Quanto ao teor de fresado, esta variável parece pouco influenciar a absorção das misturas estudadas.

Tabela 64: Aumento da absorção com o tempo de exposição à água

Misturas comparadas	Aumento (%)
2-20-MOD	12
2-50-MOD	12
4-20-MOD	21
4-50-MOD	23
4-20-INT	12
4-50-INT	34
6-20-INT	29
6-50-INT	15

Novamente verifica-se uma divisão das misturas em dois grupos, estes são compostos pelas mesmas misturas pertencentes aos grupos de materiais denominados “levemente cimentado” e “fortemente cimentado” em discussão anterior (item 5.3). Não são relatados limites para absorção pela Austroads (2002) ou pela norma utilizada na realização do ensaio (STANDARDS AUSTRALIA, 1996).

O *Manual of Contract Documents for Highway Works* desenvolvido pela *Highways Agency* (HA, 2006), agência pertencente ao *Department for Transport* do Reino Unido, relata que, para misturas de agregados utilizados na fabricação de concreto para pavimentos, o limite de absorção deve ser igual a 2%, sendo esta determinada conforme a norma britânica BS EN 1097-6 (BSI, 2013). Tomando isto como referência, percebe-se que apenas as misturas consideradas fortemente cimentadas apresentariam absorção abaixo do limite citado.

### 5.9.1 Análise estatística dos resultados de absorção

A análise estatística dos resultados de absorção resultou no modelo (16). Apenas um dado dentre os resultados foi considerado espúrio e das variáveis analisadas, apenas o teor de fresado não se apresentou significativa, sendo estes excluídos da análise. O modelo apresentou coeficiente de determinação próximo a 1 ( $R^2 = 0,97$ ), além disso, apresentou valor de F calculado superior ao valor tabelado ( $181,37 > 3,587$ ), estes fatos atestam a significância do modelo obtido.

$$Absorção = 8,40 - 0,86(\% cim) + 0,144(exp . água) - 0,00155(en) \quad (16)$$

A codificação realizada atribuindo-se valores entre o intervalo de -1 e 1 para as variáveis independentes resultou no modelo (17). Analisando-se tal modelo, percebe-se que tanto a utilização de uma energia de compactação maior quanto o acréscimo no teor de cimento provocam redução na absorção, sendo a segunda variável a mais efetiva. Como já discutido anteriormente, o tempo de exposição à água acarreta no aumento da absorção.

$$Absorção = 2,10 - 1,73(\% cim) + 0,14(exp . água) - 1,12(en) \quad (17)$$

Na Figura 45 é apresentada a comparação entre os valores de absorção medidos e previstos pelo modelo (16). As hipérboles correspondentes a 95% de confiança, calculadas pelo software, estão muito próximas à reta de igualdade, isto aponta a significância estatística do modelo.



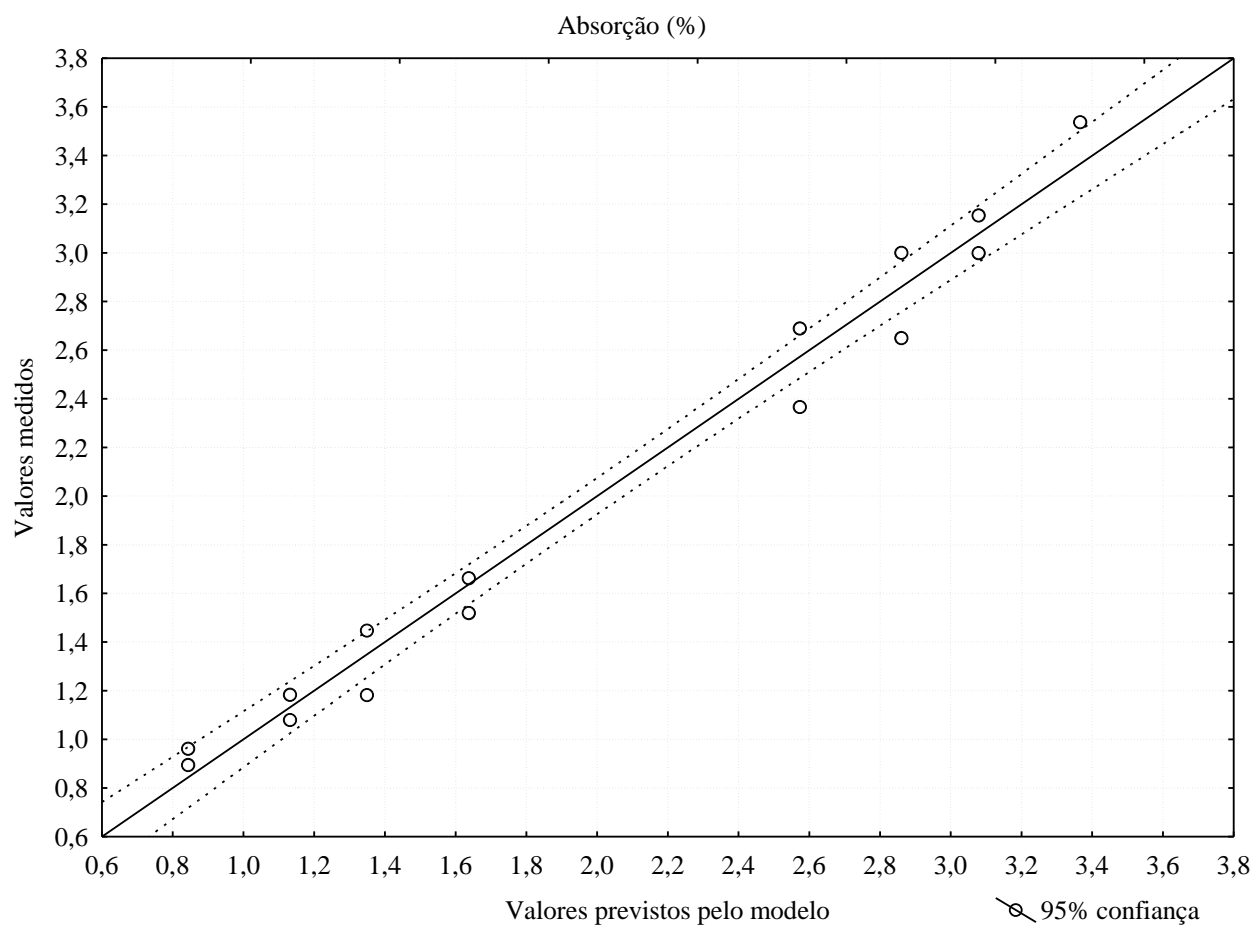


Figura 45: Valores de absorção medidos e previstos pelo modelo obtido

## 5.10 ERODIBILIDADE

Os resultados de erodibilidade são apresentados na Tabela 65, estes resultados mostram que, como relatado pela Austroads (2002), a erodibilidade do material é fortemente influenciada pelo peso específico alcançado, ou seja, pela energia de compactação empregada. Este fato fica evidenciado quando se comparam as misturas com 4% de cimento (Tabela 66), onde se percebe uma redução bastante significativa da erodibilidade ao aumentar-se a energia de compactação, devido à redução da porosidade da amostra causada pela maior densidade alcançada.

Percebe-se que o teor de cimento, quando acrescido, também provoca redução considerável da erodibilidade (menos significativa que a gerada pelo aumento da energia), como apresentado na Tabela 67. Entretanto, a Austroads (2002) relata que, apesar de maiores teores de cimento aumentarem a resistência contra a erosão, estes também são responsáveis por

agravarem os problemas de trincas geradas pela retração por secagem e, por consequência, essas trincas deixariam os materiais cimentados mais propícios à erosão.

Tabela 65: Resultados de erodibilidade

Misturas	Erodibilidade 7 dias (g/min)
2-20-MOD	1,07
2-50-MOD	0,92
4-20-MOD	0,38
4-50-MOD	0,31
4-20-INT	4,82
4-50-INT	3,35
6-20-INT	1,64
6-50-INT	1,61

Tabela 66: Redução da erodibilidade com a utilização de energia de compactação mais elevada

Misturas comparadas	Redução (%)
4-20-MOD e 4-20-INT	92
4-50-MOD e 4-50-INT	91

Tabela 67: Redução da erodibilidade com o acréscimo do teor de cimento

Misturas comparadas	Redução (%)
2-20-MOD e 4-20-MOD	64
2-50-MOD e 4-50-MOD	67
4-20-INT e 6-20-INT	66
4-50-INT e 6-50-INT	52

Ainda, o teor de material fresado parece não influenciar significativamente a erodibilidade; entretanto, todas as misturas com maior porcentagem de tal material apresentaram valores de erodibilidade ligeiramente inferiores (Tabela 68). Por fim, ressalta-se que não são relatados limites para erodibilidade pela norma utilizada na realização dos ensaios (RTA, 1994). A Austroads (2002) apenas 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.

Tabela 68: Redução da erodibilidade com o aumento de fresado

Misturas comparadas	Redução (%)
2-20-MOD e 2-50-MOD	14
4-20-MOD e 4-50-MOD	20
4-20-INT e 4-50-INT	31
6-20-INT e 6-50-INT	1

### 5.10.1 Análise estatística dos resultados de erodibilidade

O resultado da análise estatística dos dados de erodibilidade foi o modelo (18). A comparação entre os valores de erodibilidade medidos e previstos pelo modelo (18) é apresentada na Figura 46.

$$\text{Erodibilidade} = 10,09 - 0,776(\% \text{ cim}) - 0,0026(en) \quad (18)$$

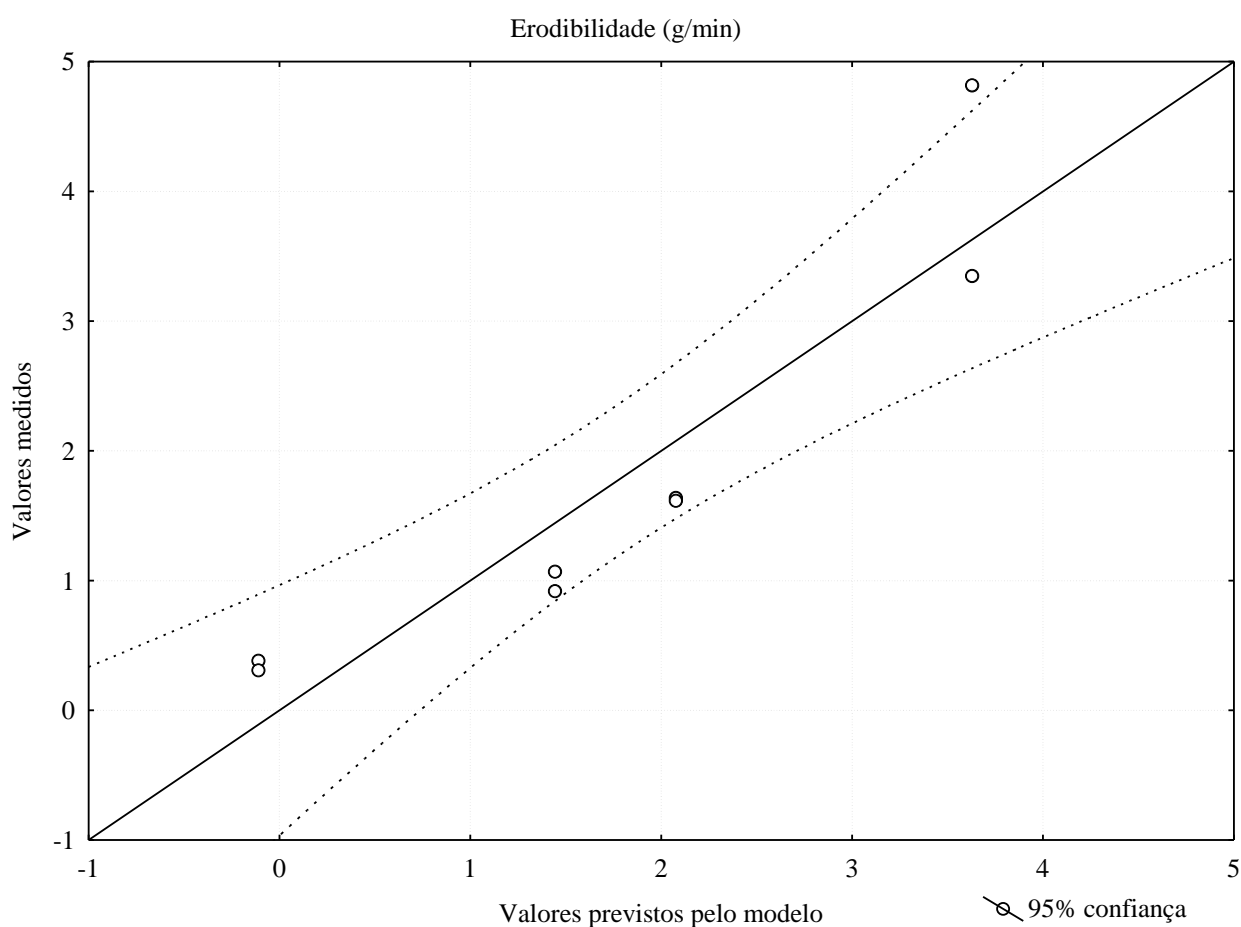


Figura 46: Valores de erodibilidade medidos e previstos pelo modelo obtido

Não houve dados considerados espúrios, entretanto, a variável “teor de fresado” foi excluída, pois não se mostrou significativa, apresentando valor-p superior ao nível de significância de 0,05. O modelo (18) possui coeficiente de determinação relativamente baixo, sendo este igual a 0,78. Já o valor de F calculado (13,169) foi superior ao valor de F tabelado (5,789).

Através da Figura 46, pode-se verificar que a significância estatística do modelo é baixa, já que as hipérbolas correspondentes a 95% de confiança situam-se distantes da reta de igualdade.

A seguir é apresentado o modelo (19), obtido a partir da codificação dos valores de cada variável independente entre o intervalo de -1 e 1. Observando-se o modelo, verifica-se que a influência da energia de compactação na erodibilidade do material realmente é maior que a do teor de cimento, entretanto, ambos reduzem-na, como discutido anteriormente.

$$\text{Erodibilidade} = 1,76 - 1,55(\% \text{ cim}) - 1,87(en) \quad (19)$$

## 5.11 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS OBTIDOS POR OUTROS PESQUISADORES

Este item apresenta comparações entre os resultados obtidos nesta pesquisa e resultados obtidos por outros pesquisadores. As características comparadas são as resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral e o módulo de resiliência na compressão diametral.

Os pesquisadores citados neste item (SUFIAN *et al.*, 2009b; TRICHÊS *et al.*, 2013; ELY, 2014) estudaram misturas recicladas muito semelhantes às empregadas neste estudo. As misturas apresentadas foram constituídas por diferentes porcentagens de BGS e fresado, estabilizadas com teores de cimento entre 2% e 4% e compactadas na energia equivalente à Modificada do ensaio de Proctor. Os resumos das pesquisas foram apresentados no item 2.10 e alguns resultados, além dos apresentados no presente item, são demonstrados nas Tabelas 7, 9 e 10 (item 2.8).

Os tempos de cura empregados na comparação de resultados foram iguais a 3, 7 e 14 dias. Observa-se que Sufian *et al.* (2009b) e Trichês *et al.* (2013) não realizaram ensaios aos 14 dias de cura, então, estes valores foram obtidos a partir da interpolação linear dos valores

obtidos para 7 e 28 dias de cura. Optou-se por tal procedimento para que os resultados em questão pudessem ser confrontados de forma adequada.

Os códigos das misturas utilizadas seguem o mesmo princípio já apresentado anteriormente, ou seja, o primeiro termo corresponde ao teor de cimento, o segundo ao teor de material fresado e o terceiro à energia de compactação empregada.

### 5.11.1 Resistência à compressão simples

A Figura 47 apresenta a comparação entre os resultados de RCS obtidos neste estudo e os resultados obtidos por outros pesquisadores (SUFIAN *et al.*, 2009b; TRICHÊS *et al.*, 2013; ELY, 2014).

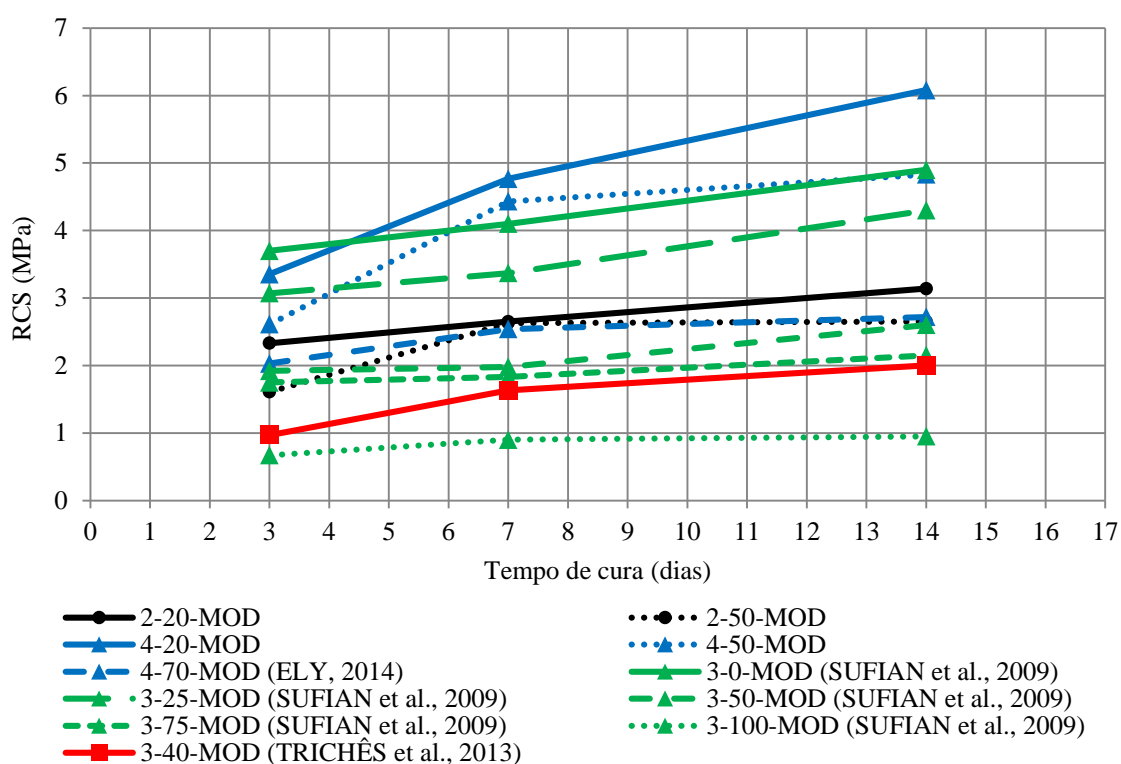


Figura 47: Comparação entre os valores de RCS obtidos neste e em outros estudos

A partir dos resultados apresentados na Figura 47 pode-se inferir que a porcentagem de fresado reduz a RCS, como já comentado no item 5.3. Isto fica claramente evidenciado pelos resultados obtidos por Sufian *et al.* (2009b). Além disso, os resultados de Ely (2014), que estudou misturas com 70% de fresado, mostram esta mesma tendência quando comparados

aos resultados obtidos no presente estudo. Os valores de RCS obtidos por Trichês *et al.* (2013) situaram-se bastante abaixo da RCS obtida pelos outros pesquisadores para misturas com teor de fresado semelhante.

Quando misturas com quantidades de fresado bastante próximas são comparadas, também se percebe o efeito do teor de cimento na RCS. Observa-se que as misturas com teor de cimento mais elevado têm maior RCS que misturas semelhantes com menor teor de cimento. Uma exceção é a mistura 2-50-MOD, que possui RCS superior à mistura 3-50-MOD, a partir dos 7 dias de cura.

Por fim, a RCS de algumas misturas estudadas por Sufian *et al.* (2009b), assim como a estudada por Ely (2014), tendem a se estabilizar aos 7 dias de cura. Fato que também foi observado no presente estudo (item 5.3).

### 5.11.2 Resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 48 apresenta-se a comparação entre os valores de RCD obtidos neste e em outros estudos (SUFIAN *et al.*, 2009b; TRICHÊS *et al.*, 2013; ELY, 2014).

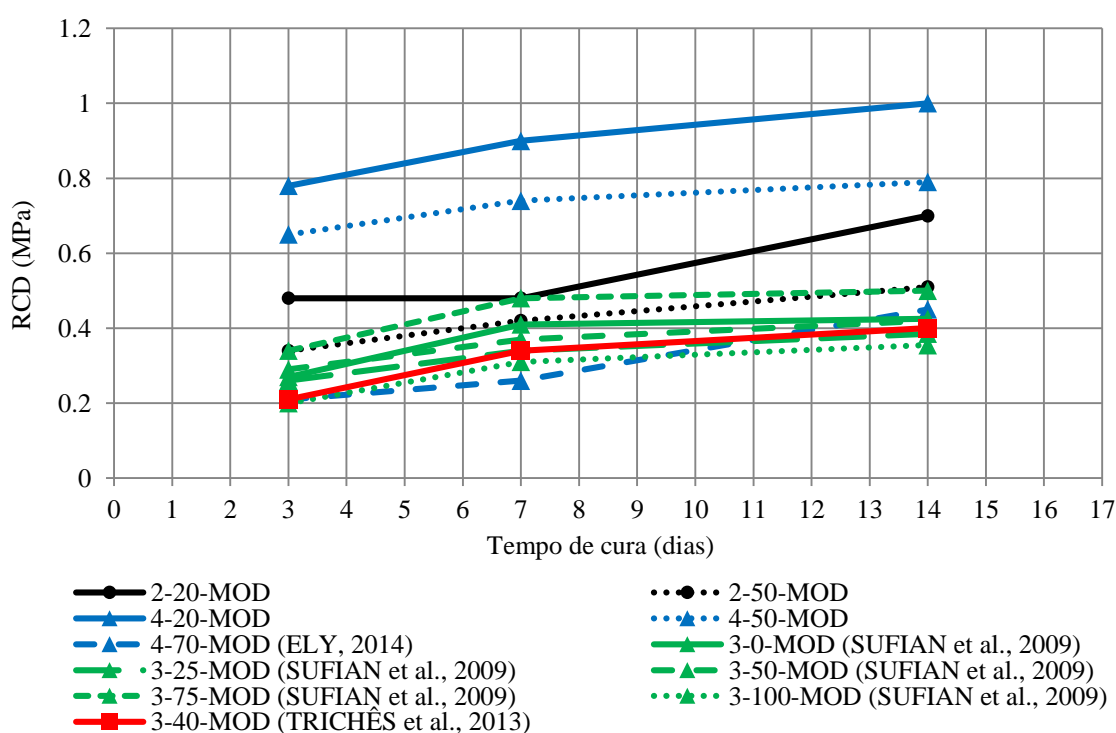


Figura 48: Comparação entre os valores de RCD obtidos neste e em outros estudos

Os resultados apresentados na Figura 48 demonstram que, do mesmo modo que para a RCS (item 5.11.1), a porcentagem de fresado reduz a RCD, fato já discutido no item 5.4. Este fato é evidenciado quando as misturas com 4% de cimento são comparadas entre si, atentando-se para a grande redução de RCD quando da utilização de 70% de fresado. Entretanto, os resultados obtidos por Sufian *et al.* (2009b) apresentam uma exceção, a mistura com 75% de fresado alcança valores de RCD maiores que as outras misturas, o que acontece para todas as idades de cura.

Com relação ao teor de cimento, quando se compara as misturas estudadas por Sufian *et al.* (2009b) com as misturas do presente estudo contendo adição de 2% de cimento, percebe-se que as primeiras possuem RCD bastante inferior. Este fato é controverso, já que o acréscimo de cimento deveria gerar aumento de resistência.

Também se pode observar que a RCD das misturas estudadas por Sufian *et al.* (2009b) e Trichês *et al.* (2013) pouco evolui a partir dos 7 dias de cura, diferentemente do que acontece com os resultados obtidos por Ely (2014) e pelo presente estudo. Além disso, verifica-se que os valores de RCD obtidos pelos pesquisadores citados são bastante inferiores aos obtidos nesta pesquisa.

### 5.11.3 Módulo de resiliência

A comparação entre os resultados de MRD obtidos nesta e em outras pesquisas (SUFIAN *et al.*, 2009b; ELY, 2014) é apresentada na Figura 49. Os resultados apresentados na Figura 49 demonstram que o módulo de resiliência das misturas estudadas por Sufian *et al.* (2009b) e Ely (2014) parece evoluir com o tempo de forma bastante similar, praticamente estabilizando-se aos 7 dias de cura. Os resultados de MRD obtidos nesta pesquisa apresentam comportamento diferente, já que esta característica aumenta de forma significativa mesmo após o sétimo dia de cura.

Ainda, verifica-se claramente que o acréscimo de fresado na mistura reduz o valor do módulo de resiliência, justificando os comentários tecidos no item 5.5. Entretanto, assim como verificado na comparação entre os valores de RCD (item 5.11.2), observa-se que, mesmo com teor de cimento superior, as misturas pesquisadas por Sufian *et al.* (2009b) apresentam MRD inferior às misturas com adição de 2% de cimento estudadas nesta pesquisa.

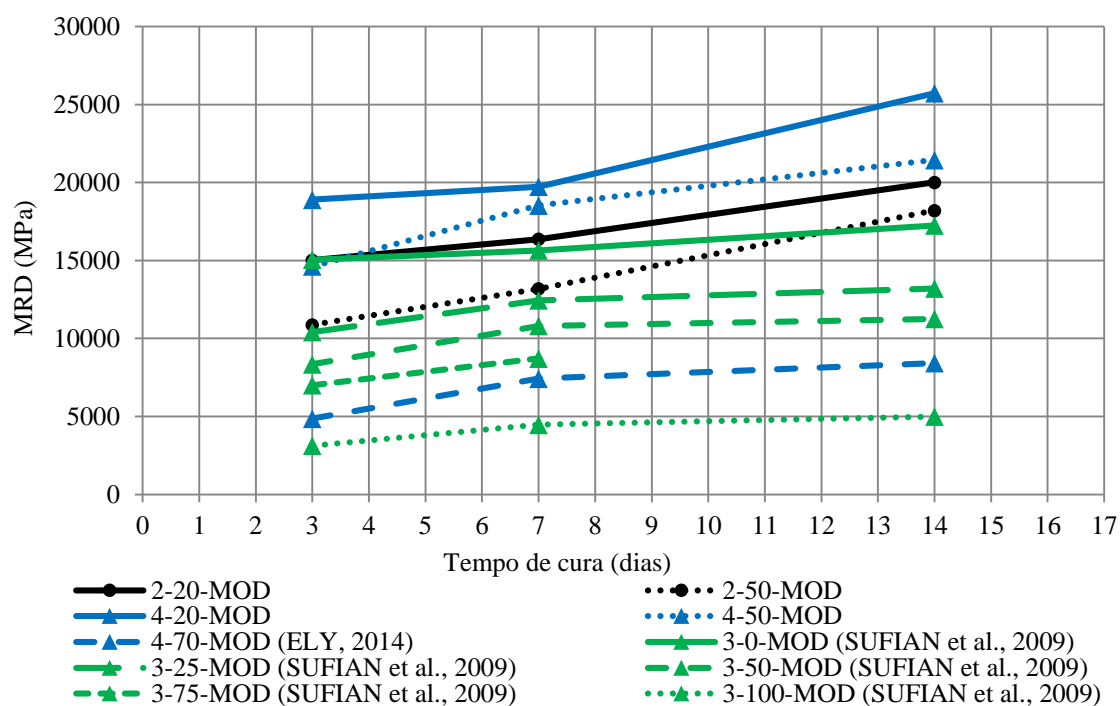


Figura 49: Comparação entre os valores de MRD obtidos neste e em outros estudos



## 6 SUGESTÃO DE MÉTODO DE DOSAGEM PARA RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO

Neste capítulo apresenta-se uma sugestão de método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento, 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. O método sugerido é apresentado na Figura 50; 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;
- 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;
- 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;

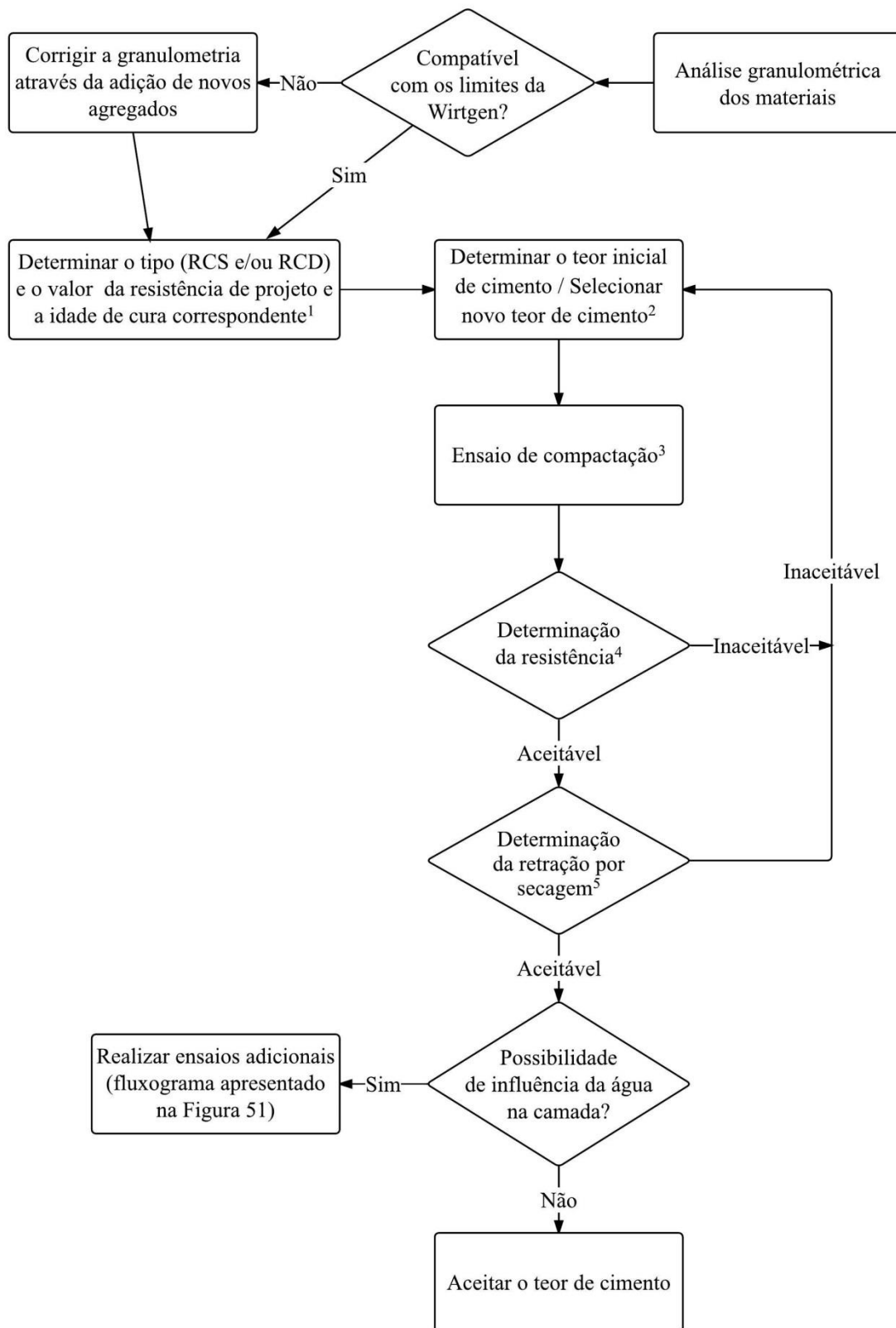


Figura 50: Sugestão de método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento

- 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;
  - para fins de controle de moldagem, sugere-se tolerância de aceitação para o teor de umidade da mistura de  $\pm 0,5\%$  e para o valor de peso específico aparente seco do corpo de prova de  $\pm 0,2 \text{ kN/m}^3$ , 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  $23^\circ\text{C}$  e a umidade relativa maior que 90%;
  - a resistência da mistura será considerada a média das três resistências individuais obtidas, lembrando-se que as resistências individuais devem estar compreendidas no intervalo da média  $\pm 1$  desvio padrão;
  - 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) Embora as misturas estudadas nesta pesquisa não tenham apresentado elevada retração, a realização de tal ensaio é imprescindível, visto que tais efeitos podem se agravar consideravelmente quando do emprego de materiais que possuam maior fração de finos que a BGS. Sugere-se a utilização da norma AS 1289.3.4.1 (STANDARDS AUSTRALIA, 2008) para misturas recicladas contendo materiais com partículas mais finas e da norma AS 1012.13 (STANDARDS AUSTRALIA, 1992) para misturas contendo materiais mais graúdos. A Austroads (2002) sugere que para misturas estabilizadas com cimento, o limite de retração seja igual a 200  $\mu\text{m}$  aos 7 dias de cura.

Os ensaios apresentados no fluxograma da Figura 51 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).

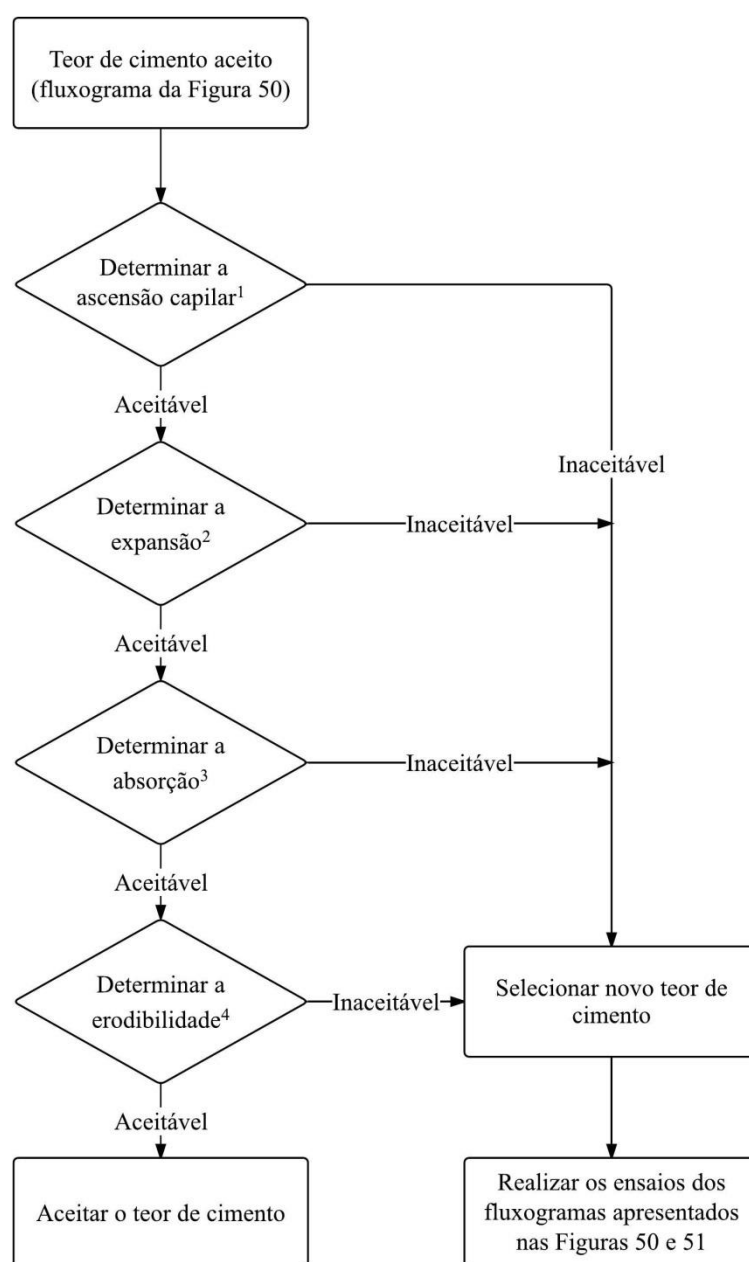


Figura 51: Ensaio adicionais imprescindíveis quando da possibilidade de influência da água na camada reciclada

Abaixo são apresentadas notas referentes aos ensaios apresentados na Figura 51 (tais notas estão relacionadas com as etapas do fluxograma através da legenda que apresentam):

- 1) Ascensão capilar: Sugere-se a utilização da norma australiana AS1141.53 (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;
- 2) Expansão: Sugere-se a utilização da norma australiana AS1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996). 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, 1994b), 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 AS1141.53 (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.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões inferidas a partir dos resultados obtidos neste estudo. Além disso, também são apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras.

### 7.1 CONCLUSÕES

A principal conclusão desta pesquisa é que o método de dosagem de materiais estabilizados com cimento da Austroads (2002) pode ser usado como modelo para o desenvolvimento de um método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento, sendo necessárias pequenas complementações ou adaptações. O método de dosagem sugerido nesta dissertação é, ao mesmo tempo, simples o suficiente para ser empregado em laboratórios de canteiros de obra e amplo o bastante para identificar as propriedades mecânicas e volumétricas que devem ser avaliadas ao elaborar-se um projeto de mistura reciclada com cimento.

A seguir são apresentadas as conclusões relativas aos resultados obtidos para cada um dos ensaios experimentais citados no capítulo 5, considerando-se as variáveis investigadas e as análises estatísticas realizadas.

Quanto à resistência à compressão simples:

- Os valores de resistência à compressão simples se mostraram bastante elevados (1,61 MPa a 6,08 MPa). Aos 7 dias de cura, grande parte destes valores foi superior aos limites determinados pelas normas nacionais (DER-PR, 2005; DNIT, 2013a); Ainda, quando comparadas com os valores de referência de RCS propostos pela Austroads (2002), as misturas foram classificadas como levemente e fortemente cimentadas, nenhuma delas apresentou comportamento de material modificado;
- Todas as variáveis analisadas apresentaram influência na RCS. Dentre estas, apenas o teor de fresado ocasionou redução na RCS. O teor de cimento foi a

variável que gerou maior ganho de RCS, seguido pela energia de compactação e pela idade de cura; fatos que foram comprovados pela realização da análise estatística dos resultados;

- Em média, misturas compactadas na energia Intermediária apresentaram RCS próxima a 60% da RCS de misturas compactadas na energia Modificada; esse aumento de energia também parece compensar a utilização de teores de cimento mais baixos, fato que se mostra interessante quando da busca pela redução de problemas de retração e pela redução de custos;
- Os ensaios de RCS com imersão prévia dos corpos de prova apresentaram resultados bastante semelhantes aos ensaios convencionais. Por este motivo, verificou-se que tal procedimento parece ser desnecessário, considerando-se misturas com materiais semelhantes aos empregados nesta pesquisa;
- Os estudos paralelos com aplicação de variadas taxas de carregamento também apresentaram resultados bastante próximos. Aconselhando-se a utilização de taxas iguais ou inferiores a 0,25 MPa/s, para presas hidráulicas, e iguais a 1 mm/min, para prensas não hidráulicas.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral:

- Os valores de RCD obtidos foram bastante elevados, variando de 0,29 MPa a 1,11 MPa. Estes se mostraram muito superiores aos valores limites propostos pelo DNIT (2013a) para 7 dias de cura. Destaca-se que valores elevados de resistência à tração são importantes para que se evitem rupturas frágeis;
- A relação média obtida entre a RCD e a RCS foi igual a 0,18. Tal valor é superior ao comumente encontrado para solos estabilizados com cimento. Entretanto, Trichês *et al.* (2013) também encontraram relação elevada para misturas recicladas com cimento;
- Todas as variáveis analisadas apresentaram influência na RCD. O teor de fresado ocasionou redução e o teor de cimento foi a variável que gerou maior ganho. A energia de compactação e a idade de cura aparentaram ocasionar

acréscimo bastante semelhante na RCD. A análise estatística serviu para corroborar tais fatos;

- Novamente verificou-se que uma energia de compactação maior pode contrabalançar a utilização de um reduzido teor de cimento, alcançando-se resistências semelhantes às obtidas por misturas com teores elevados.

Quanto ao módulo de resiliência:

- Os valores de módulo de resiliência encontrados foram bastante elevados (10390 MPa a 25719 MPa), sendo superiores aos encontrados por outros pesquisadores que estudaram misturas semelhantes. Destaca-se que rigidezes elevadas tornam as misturas cimentadas bastante frágeis, fato que pode acarretar em rupturas a baixos níveis de deformação;
- Assim como para as resistências, todas as variáveis analisadas apresentaram efeito significativo no MRD. O teor de fresado mostrou-se prejudicial, reduzindo o MRD; o teor de cimento foi a variável que ocasionou o maior aumento. Desta vez, diferentemente do que aconteceu para as resistências, a idade de cura ocasionou ganho mais elevado que a energia de compactação. Tais fatos são comprovados pela análise estatística;
- Verificou-se que, igualmente às resistências, o uso combinado de baixo teor de cimento e maior energia de compactação pode gerar valores de MRD tão elevados quanto à situação inversa.

Quanto à retração por secagem:

- Os valores de retração variaram de 38,40  $\mu\text{m}$  a 171,50  $\mu\text{m}$ , sendo inferiores ao limite proposto pela Austroads (2002) para 7 dias de cura (200  $\mu\text{m}$ );
- A porcentagem de fresado apresentou uma tendência variável, por vezes aumentando e em outras oportunidades diminuindo o valor da retração. O restante das variáveis pareceu ocasionar aumento na retração, entretanto, a



análise estatística não comprovou a significância da variável “energia de compactação”. Através desta, também se pôde verificar que o tempo de cura ocasiona maior aumento na retração que o teor de cimento.

Quanto à ascensão capilar:

- Os valores de ascensão capilar obtidos variaram de 12,78% a 100% e basicamente se dividiram em dois grupos. As misturas que alcançaram maiores resistências e módulos (fortemente cimentadas) apresentaram valores baixos de ascensão capilar, já as misturas com menores resistências e módulos (levemente cimentadas) mostraram-se bastante suscetíveis à ascensão capilar, apresentando valores superiores ao limite proposto pela Austroads (2002) para 24 horas de exposição à água (25% da altura do corpo de prova);
- A variável “teor de fresado” pareceu influenciar a ascensão capilar de forma aleatória, não demonstrando uma tendência definida. O aumento do teor de cimento e da energia de compactação reduzem significativamente os valores de ascensão capilar, devido ao fato de reduzirem a porosidade da mistura, sendo a primeira variável a que possuiu maior influência. Já o tempo de exposição à água aumentou os valores de ascensão capilar. A análise estatística confirmou estas tendências, excluindo a variável “teor de fresado” do modelo.

Quanto à expansão:

- Os valores de expansão livre obtidos para as misturas estudadas foram baixos (0,01% a 0,85%), sendo sempre inferiores a 1%. Como não são citados limites pela norma utilizada ou pela Austroads (2002), sugere-se que, quando a expansão medida pelo ensaio australiano for superior a 1%, esta seja determinada pelo método empregado no ensaio de ISC (DNIT, 1994b), considerando-se como limite um valor igual a 0,5%;
- O teor de cimento e a energia de compactação não apresentaram efeito significativo na expansão. Tais fatos se mostram interessantes, já que o

aumento no teor de cimento deveria reduzir a expansão (pela liberação de calor devido à hidratação do cimento) e o aumento da energia de compactação deveria deixar a expansão mais evidente (devido à redução dos vazios de ar). O tempo de exposição à água elevou esta característica, como era esperado. Por fim, a análise estatística indicou que a expansão é afetada pelo teor de fresado; quanto maior este teor, mais elevada é a expansão, podendo indicar a presença de finos expansivos em tal material.

Quanto à absorção:

- Os valores de absorção variaram de 0,89% a 4,02%. As misturas podem ser divididas em dois grupos; os maiores valores de absorção foram apresentados pelas misturas que apresentaram resistências e módulos menores, ou seja, as misturas classificadas como levemente cimentada. Assim, considerando-se o limite para absorção igual a 2%, sugerido pela HA (2006) para misturas de agregados utilizados na fabricação de concreto para pavimentos, apenas as misturas consideradas fortemente cimentadas apresentariam valores de absorção aceitáveis;
- Observa-se que o teor de fresado não afeta a absorção, sendo considerada uma variável não significativa pela análise estatística. O tempo de exposição à água aumenta a absorção; já o teor de cimento e a energia de compactação a reduzem de forma significativa conforme são aumentados, devido à redução da porosidade da mistura. Estas observações são comprovadas pela análise estatística; sendo o teor de cimento a variável com maior influência na absorção.

Quanto à erodibilidade:

- Os valores de erodibilidade variaram entre 0,31 g/min e 4,82 g/min. As misturas podem ser divididas em dois grupos quanto à erodibilidade; as compactadas na energia Modificada são as que apresentam menores valores de

erodibilidade, já as compactadas na energia Intermediária apresentam valores bastante superiores. Quando se compara as misturas com 4% de cimento compactadas nas duas energias, verifica-se um aumento de cerca de 10 vezes na erodibilidade quando da utilização da energia Intermediária;

- Todas as variáveis analisadas (teor de cimento, energia de compactação e teor de fresado) apresentaram efeito benéfico, reduzindo a erodibilidade, quando aumentadas. Entretanto, a análise estatística demonstrou que a variável “teor de fresado” não era significativa, sendo excluída do modelo obtido. Dentre as variáveis, a energia de compactação é a que possui maior influência na erodibilidade, concordando com as observações da Austroads (2002) acerca da erodibilidade depender fortemente do grau de compactação.

Com base nas conclusões específicas para cada ensaio experimental tecidas acima, a seguir são apresentadas as conclusões gerais inferidas:

- Os ensaios do método de dosagem da Austroads (2002) somados aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência se mostraram eficientes para a caracterização mecânica e volumétrica das misturas estudadas nesta pesquisa;
- Os ensaios evidenciaram que são obtidos elevados valores de resistências à compressão simples (1,61 MPa a 6,08 MPa) e à tração por compressão diametral (0,29 MPa a 1,00 MPa) e de módulo de resiliência (10390 MPa a 25719 MPa) com teores baixo (2%) e médio (4%) de cimento, sendo desnecessário e arriscado, pela elevada retração associada e elevado custo, o emprego de teor mais elevado (6%);
- Ainda, observou-se que o aumento da energia de compactação permite compensar a utilização de teores mais baixos de cimento no que se refere a resistências (à compressão, à tração e à erosão) e módulos obtidos. Fato bastante interessante quando da necessidade de reduzirem-se os efeitos da retração por secagem e os custos da obra;

- Em contrapartida à conclusão anterior, as misturas com baixo teor de cimento (2%) compactadas na energia Modificada foram as que apresentaram maiores valores de ascensão capilar (73,80% a 89,31%) e absorção (2,37% a 3,00%), juntamente com as misturas com médio teor de cimento (4%) compactadas na energia Intermediária;
- Quando da análise de todas as propriedades mecânicas e volumétricas, verifica-se que o melhor desempenho foi apresentado pelas misturas com teor médio de cimento (4%) compactadas na energia Modificada, pois tais misturas atenderam a todos os critérios analisados. Entretanto, as misturas com 6% de cimento foram compactadas somente na energia Intermediária, o que pode ter prejudicado seu comportamento. Além disso, lembra-se que a escolha da melhor mistura é bastante subjetiva, dependendo muito do tipo de material que se deseja obter e do local de emprego, por exemplo, verifica-se que todas as misturas poderiam ser utilizadas em locais onde não houvesse influência da umidade na camada reciclada, já que apresentam elevadas resistências e rigidezes;
- Por fim, os resultados dos ensaios e a análise estatística mostraram que todas as variáveis analisadas (teor de cimento, do teor de fresado asfáltico, da energia de compactação e do tempo de cura) afetam significativamente as resistências à compressão simples, à tração por compressão diametral e o módulo de resiliência das misturas, enquanto que a retração por secagem, a erodibilidade, a absorção, a expansão e a ascensão capilar são afetadas por algumas das variáveis independentes.

## 7.2 SUGESTÕES

Com o objetivo de complementar o estudo desta dissertação e contribuir para o conhecimento da técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Nesta dissertação foi utilizado apenas um material de base usualmente empregado no país (brita graduada simples), como já previsto na Figura 1 (item 1.1), sugere-se a realização de estudos empregando-se métodos semelhantes para outros materiais comumente empregados em bases e sub-bases de pavimentos, visando conhecer as propriedades mecânicas e volumétricas de misturas recicladas com cimento contendo tais materiais;
- O fresado asfáltico utilizado na presente pesquisa possui ligante asfáltico convencional em sua constituição. Devido à crescente utilização de ligantes asfálticos modificados, sugere-se a realização de estudos que empreguem fresados oriundos de revestimentos com ligantes modificados por polímeros e/ou por borracha de pneus, possibilitando a comparação com os resultados obtidos nesta pesquisa e verificando-se a influência de tais materiais nas misturas recicladas com cimento;
- Um dos principais esforços experimentado por um pavimento é a tração na flexão. Por este motivo, sugere-se a realização de ensaios para determinação de tal parâmetro. A realização deste ensaio, devidamente instrumentado, também possibilitaria a obtenção de outros parâmetros importantes para fins de dimensionamento, como o módulo de elasticidade e a deformação na ruptura;
- Dentre as lacunas deixadas pela documentação técnica nacional acerca da reciclagem com cimento (além da falta de um método de dosagem adequado), destaca-se a inexistência de um procedimento para dimensionamento de pavimentos com camadas constituídas por tais misturas. Deste modo, fica evidente a necessidade de realizarem-se estudos para determinação da vida de fadiga de misturas recicladas com cimento envolvendo os principais materiais utilizados em pavimentos, fato que auxiliaria na definição de parâmetros para dimensionamento;
- Também visando definir parâmetros para dimensionamento de pavimentos contendo camadas recicladas com cimento, sugere-se a execução e monitoramento de pistas experimentais com emprego de ensaios acelerados e/ou trechos experimentais em rodovias para avaliar o seu desempenho e analisar seus mecanismos de degradação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. H. F. Reciclagem a frio com adição de cimento. In: 4º ENCONTRO TÉCNICO DER/PR – **Anais...** Curitiba, 2007. 54 p.

ARANHA, A. L. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. 2013. 127 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – USP, São Paulo.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **Basic Asphalt Recycling Manual**. Annapolis, Maryland, 2001.

ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE. **Recyclage des chaussées (guides): AIPCR 78.02.BFR**. Paris, 160p. 2003.

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

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA, 2008.

COLLINGS, D. C. Experiences gained from ten years of pavement rehabilitation by in situ recycling with cement and combinations of cement / bituminous stabilising agents. In: 1<sup>er</sup> SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADO IN SITU DE FIRMES CON CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 89 – 103.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2014: Relatório gerencial**. Brasília, 389p. 2014.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 128 p. Tese (Doutorado em engenharia) – UnB, Brasília, DF.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação do teor de asfalto de misturas betuminosas utilizando o extrator por refluxo: DAER/RS EL 213/01**. Rio Grande do Sul, 7 p. 2001.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Reciclagem de pavimento asfáltico in situ com cimento e brita: ET-DE-P00/035**. São Paulo, 22 p. 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ.  
**Pavimentação: Reciclagem de pavimento in situ com adição de cimento:** DER/PR ES-P 33/05. Curitiba, 13 p. 2005.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos:** DNER-EM 035/95. Rio de Janeiro, 6 p. 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**Agregados – Análise Granulométrica:** DNER-ME 083/98. Rio de Janeiro, 5 p. 1998a.

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.  
**Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio:** DNIT 135/2010 – ME. Rio de Janeiro, 6 p. 2010b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço:** DNIT 167/2013 – ES. Rio de Janeiro, 11 p. 2013a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio:** DNIT 164/2013 – ME. Rio de Janeiro, 7 p. 2013b.

ELY, V. **Influência da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura reciclada com cimento e com elevado teor de fresado.** 2014. 59 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia civil) – UFRGS, Porto Alegre.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Pavement recycling guidelines for state and local governments**: Technical Report No. FHWA-AS-98-042. Washington, 301 p. 1997.

GUSMÃO, C. B. **Evolução temporal da resistência mecânica em laboratório, de misturas simulando a reciclagem de pavimento asfáltico com adição de cimento Portland**. 2008. 167 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – UNICAMP, Campinas.

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

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES. **Reciclado de firmes in situ con cemento**: Guías técnicas. Madrid, 12 p. 2013.

JASIENSKI, A.; RENS, L. In situ recycling with cement: The Belgian experience. In: 1<sup>er</sup> SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADO IN SITU DE FIRMES CON CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 918 – 930.

JOFRÉ, C. La Técnica del Reciclado de Firmes con Cemento. In: 1<sup>er</sup> SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADO IN SITU DE FIRMES CON CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 61 – 88.

LEE P. Y.; SUEDEKAMP, R. J. Characterization of irregularly shaped compaction curves of soils. **Highway Research Record**, Vol. 381, p. 1 – 9, 1972.

MARÍN, C. B.; ÁLVAREZ, M. G. Reciclado in situ con cemento. Futuras prescripciones técnicas de la dirección general de carreteras del Ministerio de Fomento de España. In: 1<sup>er</sup> SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADO IN SITU DE FIRMES CON CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 581 – 591.

MINGUELA, J. D. **El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ con cemento**. 2011. 572 p. Tese (Doutorado em engenharia) – UBU, Burgos.

OLIVEIRA, P. C. A. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis**. 2003. 177 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – UNICAMP, Campinas.

OLIVEIRA, P. C. A.; SANT'ANNA, F. M. G.; SOUZA, F. S. V. Pavement rehabilitation through recycling with the addition of Portland cement on highway SP-351. In: 2005 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT RECYCLING – **Anais...** São Paulo, 2005. 15 p.



PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. Reciclagem de pavimentos: Estudo da influência do tipo de cimento Portland na resistência à compressão simples do material reciclado. In: IV SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS E PROJETOS DE REFORÇO – **Anais...** Fortaleza, 2009. 12 p.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. A importância do controle de compactação no desempenho da camada reciclada com cimento Portland. In: CONINFRA 2010 – 4º CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – **Anais...** São Paulo, 2010. 16 p.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. Análise das propriedades da base de solo-cimento deteriorada para fins de reciclagem profunda de pavimentos. In: 7º CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS – **Anais...** Lisboa, 2013. 10 p.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A.; BONFIM, V. As perspectivas de reabilitação de pavimentos no estado de São Paulo – Brasil: Enquadramento e técnicas usuais. **Construção Magazine**, Vol. 53, Porto, p. 34 – 38, 2013.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Guide to Full Depth Reclamation (FDR) with Cement**. Illinois, E.U.A, 2005.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Full-depth reclamation: Recycling roads saves money and natural resources**: Publication SR995.02. Skokie, 6 p. 2005.

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.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Full-depth reclamation with cement. In: 2012 JOINT ENGINEERS CONFERENCE – **Anais...** Helena, 2012. 48 p.

RENS, L. **Le retraitement en place des chaussées au moyen de ciment**. Bruxelles: FEBELCEM, 2003. Bulletin Dossier Ciment n. 30.

SEGARRA, J. M. B. Reciclado del firme em varios tramos de la carretera estatal N-630 em la provincia de Cáceres (España). In: 1º SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADO IN SITU DE FIRMES CON CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 875 – 889.

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

SILVA, C. A. R.; MIRANDA JR., J. Reciclagem de camada betuminosa como sub-base estabilizada com cimento na BR-381: Uma experiência. In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – **Anais...** Brasília, 2000. 16 p.

STEHLIK, D.; VARAUS, M.; KUDRNA, J. The experience with cold recycling in the Czech Republic. In: 1<sup>er</sup> SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADO IN SITU DE FIRMES CON CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 1015 – 1022.

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.

STANDARDS AUSTRALIA. **Method of testing soils for engineering purposes: method 3.4.1: Soil classification testes – Determination of the linear shrinkage of a soil – Standard method:** AS 1289.3.4.1-2008. Standards Australia, Strathfield, New South Wales, 4p. 2008.

SUFIAN, Z. *et al.* Construction of cold in place recycling method in Malaysia. In: 13<sup>th</sup> CONFERENCE OF ROAD ENGINEERING ASSOCIATION OF ASIA AND AUSTRALASIA – **Anais...** Incheon, 2009a. 12 p.

SUFIAN, Z. *et al.* Full depth reclaimed pavements using cement and hydrated lime as stabilizing agents. In: 13th CONFERENCE OF ROAD ENGINEERING ASSOCIATION OF ASIA AND AUSTRALASIA – **Anais...** Incheon, 2009b. 10 p.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. Avaliação do desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC-303. In: 7<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS & CONCESSÕES – **Anais...** Foz do Iguaçu, 2011. 15 p.

TRICHÊS, G. *et al.* Caracterização do comportamento mecânico de misturas recicladas com adição de cimento. In: 42<sup>a</sup> REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – **Anais...** Gramado, 2013. 13 p.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. Desempenho da reciclagem com adição de cimento da rodovia SC-150. In: 42<sup>a</sup> REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – **Anais...** Gramado, 2013. 13 p.

VOROBIEFF, G.; WILMOT, T. Australian experience on subgrade stabilization and pavement recycling. In: 1<sup>er</sup> SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADO IN SITU DE FIRMES CON CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 104 – 132.

WIRTGEN. **Tecnologia inovadora que conquistou o mundo: O mundo das estabilizadoras de solos e recicladoras a frio da Wirtgen.** Windhagen, Alemanha, 2007.

**WIRTGEN. Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen.** Windhagen, Alemanha, 2012.