

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

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS COM
ADIÇÃO DE CIMENTO: CONTRIBUIÇÃO AO
DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM**

Thaís Radünz Kleinert

Porto Alegre
2016

THAÍS RADÜNZ KLEINERT

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS COM
ADIÇÃO DE CIMENTO: CONTRIBUIÇÃO AO
DESENVOLVIMENTO DE 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 Mestra em
Engenharia

Porto Alegre
2016

Ficha Catalográfica

- K64r Kleinert, Thaís Radünz
Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento :
contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem / Thaís Radünz
Kleinert. – 2016.
177 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, 2016.
Orientadores: Washington Peres Núñez e Jorge Augusto Pereira Ceratti.
1. Cimento. 2. Reciclagem. 3. Pavimentos. 4. Ensaio de materiais.
I. Núñez, Washington Peres, orient. II. Ceratti, Jorge Augusto Pereira, orient.
III. Título.

CDU: 691.54(043)

THAÍS RADÜNZ KLEINERT

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS COM
ADIÇÃO DE CIMENTO: CONTRIBUIÇÃO AO
DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM**

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

Porto Alegre, 30 de Março de 2016

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

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

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Cassio Eduardo Lima de Paiva (UNICAMP)
Dr. pela Universidade de São Paulo, Brasil

Prof. Luiz Antonio Bressani (UFRGS)
PhD. pela University of London, Inglaterra

Prof.^a Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD. pela University of Sheffield, Inglaterra

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

Dedico este trabalho aos meus pais, que não pouparam esforços para que essa conquista se concretizasse.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo a Deus, pois sempre foi muito generoso comigo e em suas palavras busquei conforto nos momentos de ansiedade e aflição.

Ao amigo, professor e orientador Washington Peres Núñez faltam-me palavras para agradecer-lo. Sempre esteve disposto a ensinar e auxiliar no que fosse preciso com muita educação, cordialidade e sabedoria.

Da mesma maneira, agradeço ao professor e orientador Jorge Augusto Pereira Ceratti, pela oportunidade de desenvolver a dissertação dentro do projeto de pesquisa do qual é coordenador e pela disponibilidade do Laboratório de Pavimentação (LPAV) para realização de ensaios.

Sou muito agradecida ao William Fedrigo, que foi meu guia durante todo o trabalho realizado. Seus ensinamentos e sua disposição para ajudar foram de grande importância para o desenvolvimento desta dissertação. Do mesmo modo, agradeço aos demais parceiros do projeto de pesquisa, Mario Alexander Castañeda López, Lucas Marin Malabarba, Vinicius Eich D'Avila e Gabriel Symanski Zilio, pelo auxílio na realização de ensaios.

Sou grata a todos da equipe do LPAV: André Bock, Bruna Werle, Camila Kern, Camilo Andrés Muñoz Rodriguez, Cynthia Milech Blank, Daniel Pinheiro Fernandes, Dionísio Döering, Douglas Engelke, Douglas Martins Mocelin, Fábio Conterato, Felipe do Canto Pivetta, Filipe Pereira dos Reis, Gracieli Bordin Colpo, Gustavo Fermino, Ivo de Azevedo, Jefferson Niewierowski, Junior Vicenzi, Kethelin Klagenberg, Larissa Montagner de Barros, Lélío Brito, Luiza Carbunck Godoi, Maria Bernadette Bado Corrêa, Marlova Johnston, Mateus Felipe, Mateus Freitas, Maximiliano Cavalcanti, Natália Mensch, Rodrigo Santos da Silva e Vinicius Alves. Agradeço pela força (em ambos os sentidos), disponibilidade, auxílio nos ensaios, assim como pelo transporte de materiais entre os laboratórios.

Igualmente, agradeço à equipe do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), em especial aos professores Ângela Gaio Graeff e Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, aos doutorandos Lucas Alexandre Reginato e Luciane Fonseca Caetano, aos bolsistas de iniciação científica Ângelo Simonetto Pessutto e Victor Ivan Dal Bosco, aos técnicos Edgar Wallace Pereira Lucas e Eurípedes Martins Fontes, e ao funcionário José Orvandır.

Do mesmo modo, agradeço aos amigos do Laboratório de Geotecnologia (LAGEOTEC): Guilherme Ceolin, Jair Silva, Lucas Delongui, Marina Reska, Matheus Ferreira Matuella, Mattheus Porto e Wai Gehling.

Gostaria de demonstrar minha gratidão à professora Carla Schwengber ten Caten, pelo auxílio na elaboração do planejamento estatístico dos ensaios e pelas valiosíssimas contribuições para o aperfeiçoamento do trabalho.

Agradeço aos professores: Ângela Gaio Graeff, Cassio Eduardo Lima de Paiva, Lucas Delongui, Luiz Antonio Bressani e Luiz Carlos Pinto da Silva Filho pela participação e contribuição nas bancas de seminário e/ou defesa de dissertação. Sou grata pela disponibilidade e por compartilharem seus conhecimentos com o intuito de aprimorar o presente trabalho.

Aos professores, colegas e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), agradeço pelos ensinamentos, comprometimento e amizade. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sou agradecida pelo auxílio financeiro durante o período de realização do mestrado.

Agradeço 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.

Sou grata aos amigos que estiveram sempre presentes, independente da distância física, e são essenciais em minha vida. Especialmente ao Guilherme Panta Teixeira, meu namorado, por ter feito o possível para estar ao meu lado, nem que fosse para escutar minhas lamúrias.

Faltam palavras para agradecer à minha família, essa que sempre me apoiou e ensinou a lutar pelos meus objetivos. Ao meu irmão Gustavo, agradeço por ter sido meu exemplo de dedicação e comprometimento e por ter me mostrado, desde pequena, o caminho das letras e dos números. Ao meu pai Clairton, sou grata pela educação a mim concebida e por ter proporcionado as condições necessárias para conclusão de mais essa etapa. À minha mãe Rejane, exemplo de força e de sensibilidade, sou eternamente agradecida por ter me ensinado o verdadeiro sentido da palavra amor e por estar sempre ao meu lado, independente das circunstâncias.

No que pensamos ou no que acreditamos não tem muita importância. A única coisa relevante é o que fazemos.

John Ruskin

RESUMO

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

O final da vida útil de pavimentos com bases rígidas se caracteriza pelo aparecimento de trincas de blocos e de fadiga. Neste cenário, a reciclagem das camadas de base e revestimento asfáltico, com adição de cimento, surge como técnica importante para reabilitação dessas estruturas. Além de se tratar de uma solução vantajosa do ponto de vista técnico, é competitiva em termos econômicos, além de sustentável. Entretanto, a escassa normatização nacional dificulta sua aplicação, destacando-se a falta de um procedimento de dosagem. Objetivando contribuir para o desenvolvimento de um método de dosagem de camadas recicladas com cimento, desenvolveu-se um programa experimental, contemplando a caracterização mecânica (resistência e rigidez), a variação volumétrica e a erodibilidade de misturas contendo fresado asfáltico, materiais de bases rígidas (brita graduada tratada com cimento e solo-cimento) e cimento Portland. Foram analisados os efeitos da porcentagem de fresado, do teor de cimento e do tempo de cura, compactando-se os corpos de prova na energia Modificada. Com auxílio de um *software* estatístico, foi elaborado um planejamento experimental para definição das misturas analisadas, contemplando-se diversos níveis para as variáveis independentes (teores de cimento entre 1% e 7%, e porcentagens de fresado variando entre 8% e 92%, aproximadamente). Os tempos de cura considerados foram extrínsecos ao planejamento e variaram de acordo com o ensaio, sendo de 3, 7 e 14 dias para os ensaios de comportamento mecânico e de 7 dias para os demais ensaios. Obtiveram-se modelos com efeitos estatisticamente significativos, com exceção da expansão. Os demais modelos apresentaram coeficientes de determinação de médios a elevados, tendo em vista a heterogeneidade dos materiais estudados, além do tamanho amostral considerável. Foi verificado que todas as variáveis afetam as propriedades analisadas, sendo que o teor de cimento demonstrou maior efeito, sendo que sua adição melhora consideravelmente o comportamento das misturas empregadas, frente à ação do tráfego e da água. Foram alcançados resultados bastante elevados de resistência à compressão simples (1,00 MPa a 6,49 MPa) e resistência à tração na compressão diametral (0,17 MPa a 1,22 MPa); já a rigidez das misturas apresentou uma ampla variação de resultados (484 MPa a 20.031 MPa). Com relação aos materiais de base empregados (brita graduada tratada com cimento e solo-cimento), não se observou uma tendência única; as misturas com solo-cimento apresentaram maior resistência, entretanto, com comportamento ligeiramente inferior quanto à variação volumétrica e à erodibilidade. Na análise da rigidez, os materiais de base mostraram comportamento bastante similar. Para concluir, foi verificado que o procedimento proposto por Fedrigo (2015) também é satisfatório para a dosagem de misturas recicladas constituídas por antigas bases cimentadas e fresado asfáltico, restando ainda quantificar a possível retração por secagem das misturas estudadas.

Palavras-chave: *pavimento semirrígido; reciclagem com cimento; dosagem; comportamento mecânico; variação volumétrica; erodibilidade.*

ABSTRACT

KLEINERT, T. R. Full-depth reclamation of semi-rigid pavements with cement: contribution for the development of a mix design method. 2016. MSc Dissertation – Post-Graduation Program in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

The end of the useful life of pavements with rigid bases characterizes by the appearance of block and fatigue cracking. The full-depth reclamation with cement (FDR-C) of this layer combined with the asphalt layer seem to be a good choice for the rehabilitation of the pavement structure. Besides being an advantageous solution from a technical point of view, it is competitive in economic terms, besides being sustainable. However, the Brazilian standards are scarce thus limiting its application, highlighting the lack of an appropriated mix design method to this technique. In order to contribute for the development of an FDR-C mix design method, an experimental program was developed aiming to test the mechanical characterization (strength and stiffness), volumetric variation and the erodibility of mixtures made of reclaimed asphalt pavement (RAP), rigid base materials (cement treated crushed stone and soil-cement) and Portland cement. There were analyzed the effects of the RAP percentage, the cement content and the curing time of the specimens. For that, the compaction effort used was the Brazilian Modified one. Through a statistic software, an experimental planning was prepared for mixtures determination, with several levels for the independent variables (cement content between 1% and 7%, and RAP percentage varying by 8% up to 92%, approximately). The curing time analyzed was outward of experimental planning and it varied according to the kind of test. The specimens of mechanical performance were cured for 3, 7 and 14 days, and the other tests were examined at the 7th day of curing time. Models with statically significant effects were obtained, except the swell one. The others had medium and high coefficients of determination, given the heterogeneity of the studied materials, in addition to considerable sample size. It was found that all variables affect the analyzed properties, and the cement content proved to be with the greatest effect among the analyzed factors. Cement addition improves considerably the behavior of the mixtures for the traffic and water actions. Moreover, higher results were achieved for UCS (1.00 MPa up to 6.49 MPa) and ITS (0.17 MPa up to 1.22 MPa) tests. While the mixtures stiffness presented a wide range of results (484 MPa up to 20,031 MPa). Regarding the studied materials, it was observed that they do not have a single trend. The mixtures with soil-cement presented stronger, but with slightly lower behavior for volumetric variation and erodibility. At the stiffness analysis, different materials showed very similar behavior. All in all, it was found that the mix design method proposed by Fedrigo (2015) is also suitable for employment in semi-rigid FDR-C, still remaining to measure the possible drying shrinkage of specimens.

Key-words: *semi-rigid pavement; FDR-C; mix design; mechanical behavior; volumetric variation; erodibility.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	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
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	27
2.1.1 Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland.....	29
2.1.2 Reciclagem de pavimentos semirrígidos.....	30
2.1.2.1 Base de brita graduada tratada com cimento	30
2.1.2.2 Base de solo-cimento	31
2.1.3 Compatibilidade do pavimento para aplicação da técnica de reciclagem .	32
2.1.4 Normas técnicas nacionais sobre reciclagem com cimento.....	33
2.1.5 Vantagens e desvantagens da técnica de reciclagem com cimento	35
2.2 DOSAGEM DE MISTURAS RECICLADAS COM CIMENTO.....	37
2.2.1 Normatização Nacional.....	37
2.2.2 Experiência Internacional.....	37
2.2.2.1 Método de dosagem da Portland Cement Association	38
2.2.2.2 Método de dosagem do Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones	38
2.2.2.3 Método de dosagem da Wirtgen	39

2.2.2.4	Método de dosagem da Asphalt Recycling and Reclaiming Association	40
2.2.2.5	Método de dosagem da Austroads	41
2.2.2.6	Método de dimensionamento Francês.....	42
2.2.2.7	Comparação entre os métodos	43
2.3	PESQUISAS RECENTES SOBRE A RECICLAGEM COM CIMENTO..	45
2.3.1	Pesquisas realizadas nacionalmente.....	46
2.3.2	Pesquisas realizadas no exterior.....	48
2.3.3	Resultados parciais da pesquisa “Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland”	51
2.3.3.1	Pesquisa de Fedrigo (2015).....	51
2.3.3.2	Pesquisa de Ely (2014).....	55
2.3.3.3	Pesquisa de D’Avila (2015)	56
3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	57
3.1	DEFINIÇÃO E OBJETIVOS DE UM EXPERIMENTO	57
3.2	JUSTIFICATIVA E VANTAGENS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	58
3.3	DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA MATRIZ EXPERIMENTAL	59
3.4	VARIÁVEIS E COMPOSIÇÕES ESTUDADAS.....	60
3.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	62
3.5.1	Verificação da existência de valores atípicos	62
3.5.2	Reconhecimento dos termos significativos.....	63
3.5.3	Utilização dos resultados.....	63
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	65

4.1 MATERIAIS	65
4.1.1 BGTC e fresado asfáltico com adição de polímero	65
4.1.2 Solo-cimento e fresado asfáltico convencional.....	66
4.1.3 Cimento	66
4.2 MÉTODOS DE ENSAIO	66
4.2.1 Caracterização dos materiais e das misturas	67
4.2.1.1 Análise granulométrica	67
4.2.1.2 Distribuição granulométrica das misturas.....	68
4.2.1.3 Determinação do teor de ligante asfáltico do material fresado.....	68
4.2.1.4 Compactação	68
4.2.2 Moldagem dos corpos de prova	70
4.2.3 Comportamento mecânico	72
4.2.3.1 Resistência à compressão simples.....	73
4.2.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	74
4.2.3.3 Determinação do coeficiente de Poisson	76
4.2.3.4 Módulo de resiliência.....	77
4.2.4 Variação volumétrica	79
4.2.4.1 Ascensão capilar, expansão e absorção.....	80
4.2.5 Erodibilidade	82
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	85
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	85
5.1.1 Análise granulométrica	85
5.1.2 Teor de ligante asfáltico do material fresado	86

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS	86
5.2.1 Distribuição Granulométrica	86
5.2.2 Compactação	88
5.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO	92
5.3.1 Resistência à compressão simples.....	92
5.3.1.1 Análise da RCS à longo prazo	102
5.3.1.2 Comparação com resultados obtidos por outros pesquisadores.....	104
5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	107
5.3.2.1 Correlação entre RCD e RCS.....	114
5.3.2.2 Comparação com resultados obtidos por outros pesquisadores.....	116
5.3.3 Determinação do coeficiente de Poisson	119
5.3.4 Módulo de resiliência.....	120
5.3.4.1 Comparação com resultados obtidos por outros pesquisadores.....	125
5.4 VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA.....	127
5.4.1 Ascensão capilar.....	127
5.4.1.1 Comparação com resultados obtidos por Fedrigo (2015).....	134
5.4.2 Expansão	135
5.4.3 Absorção.....	135
5.4.3.1 Comparação com resultados obtidos por Fedrigo (2015).....	142
5.5 ERODIBILIDADE.....	143
5.5.1.1 Comparação com resultados obtidos por Fedrigo (2015).....	149
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	150

6.1 CONCLUSÕES.....	150
6.2 SUGESTÕES	157
REFERÊNCIAS	158
APÊNDICE A – Gráficos de contorno	164

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas da pesquisa global com destaque para o enfoque deste estudo (adaptado de: FEDRIGO, 2015)	25
Figura 2: Sugestão de método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento	53
Figura 3: Ensaio adicionais para situações em que a camada reciclada pode vir a sofrer influência da água.....	54
Figura 4: Representação em 2D das variáveis analisadas	61
Figura 5: Materiais empregados nas misturas contendo BGTC	65
Figura 6: Materiais empregados nas misturas contendo solo-cimento.....	66
Figura 7: Realização da mistura dos materiais (a) antes e (b) depois de acrescentar água (SC 6-20)	69
Figura 8: Procedimento para (a) compactação de uma das camadas e (b) aparência da mistura após ensaio de compactação com teor de umidade ótimo (BGTC 6,83-50)	70
Figura 9: Acondicionamento dos corpos de prova (a) antes e (b) depois da desmoldagem.....	72
Figura 10: Corpos de prova antes do ensaio de RCS	73
Figura 11: Ensaio de resistência à compressão simples em andamento.....	74
Figura 12: Corpos de prova rompidos à RCS - (a) BGTC 4-50 com 3 dias de cura e (b) SC 1,17-50 com 7 dias de cura.....	74
Figura 13: Ensaio de RCD - (a) posicionamento do corpo de prova na prensa (SC) e (b) corpo de prova depois de ensaiado (BGTC).....	75
Figura 14: Ensaio para determinação do coeficiente de Poisson - (a) preparação do CP (BGTC) e (b) realização do ensaio (SC)	76

Figura 15: Ensaio de MR - (a) andamento do ensaio com detalhamento do sistema computacional (SC) e (b) realização do ensaio (BGTC).....	78
Figura 16: Ensaio de ascensão capilar, expansão e absorção - (a) secagem dos CPs em estufa a 60°C e (b) colocação dos CPs em lâmina d'água de 1 cm	80
Figura 17: Ensaio de ascensão capilar, expansão e absorção - exposição à água dos CPs pelo período de (a) 24 horas e (b) 72 horas	81
Figura 18: Procedimento de cura acelerada para os CPs de erodibilidade - (a) estufa a 60°C e (b) detalhe do material utilizado para envolver o CP	83
Figura 19: Ensaio de erodibilidade - (a) CPs expostos à lâmina d'água de 2,5 cm e (b) realização do ensaio.....	83
Figura 20: Aparência do material desprendido durante ensaio de erodibilidade	84
Figura 21: Curvas granulométricas dos materiais de base empregados	85
Figura 22: Curvas granulométricas dos fresados asfálticos empregados	86
Figura 23: Curvas granulométricas das misturas com BGTC (a) e solo-cimento (b) enquadradas na faixa proposta pela Wirtgen.....	87
Figura 24: Curvas de compactação obtidas para as misturas contendo BGTC.....	89
Figura 25: Curvas de compactação obtidas para as misturas contendo solo-cimento.....	90
Figura 26: Gráfico de efeitos principais para RCS - avaliação da influência da porcentagem de fresado e teor de cimento (a) e do tempo de cura e material (b)	96
Figura 27: Gráfico de contorno de RCS com 7 dias de cura para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b)	97
Figura 28: Gráficos de contorno de RCS simultâneos para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b).....	99
Figura 29: Gráfico de contorno de RCS considerando um intervalo específico de resistência para as misturas de (a) BGTC e (b) solo-cimento	100

Figura 30: Exemplo de otimização dos resultados de RCS para misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b).....	102
Figura 31: RCS das misturas ao longo do tempo de cura.....	103
Figura 32: Comparação entre a RCS de misturas idênticas considerando a reciclagem de bases compostas de BGS, BGTC e SC	106
Figura 33: Gráfico de efeitos principais para RCD - avaliação da influência da porcentagem de fresado e teor de cimento (a) e do tempo de cura e material (b).....	110
Figura 34: Gráfico de contorno de RCD com 7 dias de cura para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b)	111
Figura 35: Gráficos de contorno de RCD simultâneos para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b).....	112
Figura 36: Gráfico de contorno de RCD considerando um intervalo específico de resistência para as misturas de (a) BGTC e (b) solo-cimento	113
Figura 37: Correlação entre RCD e RCS	114
Figura 38: Correlação entre RCD e RCS para as misturas contendo (a) BGTC e (b) solo-cimento	115
Figura 39: Comparação entre a RCD de misturas idênticas considerando a reciclagem de bases compostas de BGS, BGTC e SC.....	118
Figura 40: Gráfico de efeitos principais para MRD: avaliação da influência da porcentagem de fresado e teor de cimento (a) e do tempo de cura e material (b)	122
Figura 41: Gráficos de contorno de MRD simultâneos para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b).....	125
Figura 42: Comparação entre o MRD de misturas idênticas considerando a reciclagem de bases compostas de BGS, BGTC e SC.....	126

Figura 43: Gráfico de efeitos principais para ascensão capilar: avaliação da influência da porcentagem de fresado e teor de cimento (a) e do tempo de cura e material (b).....	130
Figura 44: Influência do material na ascensão capilar	131
Figura 45: Gráficos de contorno de ascensão capilar simultâneos para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b).....	132
Figura 46: Gráfico de contorno de ascensão capilar considerando um intervalo específico de resistência para as misturas de (a) BGTC e (b) solo-cimento	133
Figura 47: Gráfico de efeitos principais para ascensão capilar: avaliação da influência da porcentagem de fresado e teor de cimento (a) e do tempo de cura e material (b).....	138
Figura 48: Influência do material na absorção	139
Figura 49: Gráficos de contorno de absorção simultâneos para as misturas contendo solo-cimento	140
Figura 50: Gráfico de contorno de absorção considerando um intervalo específico de resistência para as misturas de (a) BGTC e (b) solo-cimento	141
Figura 51: Gráfico de efeitos principais para erodibilidade	146
Figura 52: Gráfico de efeitos principais para erodibilidade considerando a interação das variáveis.....	147
Figura 53: Gráfico de contorno de erodibilidade para as misturas contendo (a) BGTC e (b) solo-cimento	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre as especificações de serviço nacionais sobre reciclagem com cimento	34
Tabela 2: Limites das faixas granulométricas propostas pelas especificações de serviço nacionais	35
Tabela 3: Classificação dos materiais de acordo com a RCS aos 7 dias de cura	40
Tabela 4: Materiais gerados pela estabilização com cimento.....	41
Tabela 5: Comparação entre os métodos de dosagem internacionais citados	44
Tabela 6: Limites granulométricos citados pelos métodos de dosagem internacionais citados	45
Tabela 7: Descrição das misturas analisadas nesta pesquisa.....	61
Tabela 8: Tempos de cura empregados para cada ensaio	62
Tabela 9: Características da moldagem e quantidade de corpos de prova para cada ensaio realizado.....	71
Tabela 10: Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compactação	91
Tabela 11: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para RCS	93
Tabela 12: Resultados de RCS das misturas analisadas	94
Tabela 13: Resultados de RCS aos 168 dias de cura.....	102
Tabela 14: Comparação entre os resultados de RCS aos 7 dias desta dissertação com valores obtidos pelos demais pesquisadores	105
Tabela 15: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para RCD.....	108
Tabela 16: Resultados de RCD.....	109

Tabela 17: Comparação entre os resultados de RCD aos 7 dias desta dissertação com valores obtidos pelos demais pesquisadores	117
Tabela 18: Resultados dos ensaios para determinação do coeficiente de Poisson	119
Tabela 19: Valores de coeficiente de Poisson encontrados na literatura.....	120
Tabela 20: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para MRD.....	121
Tabela 21: Resultados de MRD.....	123
Tabela 22: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para ascensão capilar.....	128
Tabela 23: Resultados de ascensão capilar.....	128
Tabela 24: Comparação entre os resultados de ascensão capilar para os diferentes materiais de base (BGS, BGTC e SC)	134
Tabela 25: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para absorção.....	136
Tabela 26: Resultados de absorção.....	137
Tabela 27: Comparação entre os resultados de absorção para os diferentes materiais de base	142
Tabela 28: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para erodibilidade.....	144
Tabela 29: Resultados de erodibilidade.....	144
Tabela 30: Comparação entre os resultados de erodibilidade para os diferentes materiais de base	149

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

2D: Duas Dimensões

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIPCR: *Association mondiale de la Route*

ARRA: *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*

BGTC: Brita Graduada Tratada com Cimento

BGS: Brita Graduada Simples

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CCR: Concreto Compactado com Rolo

CIPR: *Cold In Place Recycling*

CO₂: Dióxido de carbono

CP: Corpo de prova

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DEINFRA-SC: Departamento Estadual de Infra-Estrutura do Estado de Santa Catarina

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

FDR-C: *Full-depth reclamation with cement*

FHWA: *Federal Highway Administration*

GC: Grau de compactação

$\gamma_{sm\acute{a}x}$: massa específica aparente seca máxima

IECA: *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones*

IP: Índice de Plasticidade

ISC: Índice de Suporte Califórnia

LAGEOTEC: Laboratório de Geotecnologia – UFRGS

LAPAV: Laboratório de Pavimentação – UFRGS

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – UFRGS

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

μ – Coeficiente de Poisson

MR: Módulo de resiliência

MRD: Módulo de resiliência diametral

PCA: *Portland Cement Association*

PCSO: Projeto composto de segunda ordem

RAP: *Reclaimed asphalt pavement*

RCD: Resistência à tração por compressão diametral

RCS: Resistência à compressão simples

RTA: *Roads and Traffic Authority*

RTF: Resistência à tração na flexão

SC: Solo-cimento

SMC: Solo melhorado com cimento

SP: Rodovia do Estado de São Paulo

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ω_{ot} : Teor de umidade ótimo

1 INTRODUÇÃO

Estão detalhados neste capítulo: o problema de pesquisa e os motivos que justificaram seu desenvolvimento, assim como os objetivos que orientaram a realização do estudo. Para melhor compreensão dos assuntos abordados, também estão relacionados os capítulos que compreendem a dissertação, assim como o que está discutido em cada um desses.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

O transporte rodoviário de cargas no Brasil tem-se intensificado ao longo do tempo, especialmente nos períodos de maior desenvolvimento econômico experimentado nos últimos anos. Com isso, aumentam-se as solicitações impostas às estruturas de pavimentação e, conseqüentemente, as espessuras das camadas asfálticas dos pavimentos obtidas através de dimensionamentos mecanístico-empíricos.

Ao utilizar espessuras mais robustas nessas camadas de revestimento, é possível assegurar ao pavimento uma elevada vida de fadiga, porém ocorre um aumento do risco de rupturas por cisalhamento (afundamentos nas trilhas de roda e trincamentos originados na superfície ou nas proximidades e que se propagam para baixo). Além disso, deve-se atentar à elevação dos custos de construção do pavimento e ao emprego dessa prática rodoviária, a qual não é considerada sustentável, devido à utilização de recursos naturais não renováveis e à geração de emissões prejudiciais ao meio ambiente.

A fim de se evitar essa conjunção de desvantagens técnicas, econômicas e ambientais, e visando proporcionar aos usuários tráfego com conforto e segurança, na restauração de pavimentos degradados é conveniente estudar-se a inclusão de camadas artificialmente cimentadas, a partir da reciclagem profunda de pavimentos, prática usual em países com avançada tecnologia em pavimentação.

A reciclagem profunda com adição de cimento é um processo de reconstrução parcial do pavimento no qual os materiais de camadas existentes (geralmente, o revestimento e a base) são reutilizados, a partir de sua mistura com cimento Portland e água.

Visando propor um método de dosagem, abrangendo os materiais de base comumente empregados no Brasil, está sendo desenvolvido no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) o projeto de pesquisa “Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland”, do qual esta dissertação é parte integrante. Essa contempla a reciclagem, com adição de cimento, de materiais cimentados (solo-cimento e brita graduada tratada com cimento) empregados na base de pavimentos. Também participa desta investigação o Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS.

A importância do estudo desses materiais está relacionada a dois fatores principais, seu emprego e os mecanismos de degradação atuantes no pavimento após a reciclagem. Devido à alternância de ciclos de carga e descarga, a nova camada reciclada com cimento fica sujeita a trincamento por fadiga, que, em estágio avançado, caracteriza o final da vida útil. As trincas surgidas na camada cimentada acabam refletindo na nova capa asfáltica, reduzindo a vida útil da restauração. Portanto, para ter-se sucesso na implantação dessa técnica restauradora, é de vital importância se conhecer a resistência e a rigidez das camadas recicladas com cimento e identificar os fatores que afetam seu comportamento mecânico.

No Brasil, a reciclagem profunda de pavimentos com adição de cimento já vem sendo aplicada há algumas décadas, porém a documentação nacional sobre essa técnica é escassa e por vezes omissa ou contraditória, o que dificulta sua utilização, representando uma limitação para seu emprego pleno. Permanecem dúvidas a respeito do procedimento de dosagem a ser adotado, das propriedades mecânicas de camadas recicladas com cimento, dos aspectos construtivos e da metodologia para dimensionamento de pavimentos com camadas recicladas com cimento. Esses motivos remetem à importância do desenvolvimento de pesquisas.

A pesquisa em desenvolvimento na UFRGS, que teve início com a dissertação de Fedrigo (2015), contempla basicamente quatro eixos indicados na segunda linha da Figura 1. A presente dissertação fornece subsídios para a definição de um método de dosagem, considerando bases antigas tratadas com cimento, como indicam as linhas contínuas.

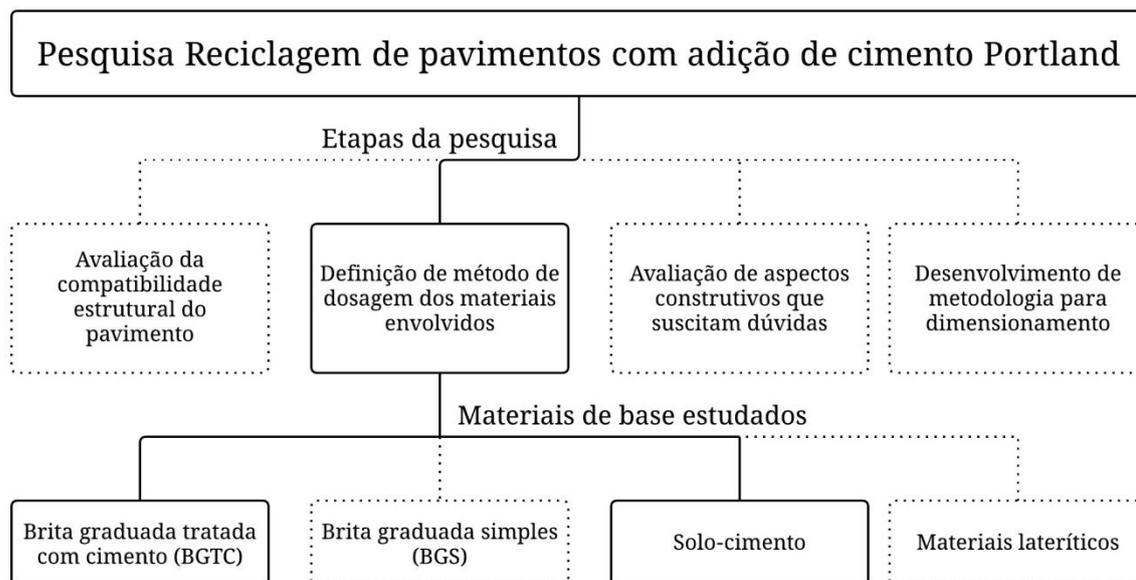


Figura 1: Etapas da pesquisa global com destaque para o enfoque deste estudo (adaptado de: FEDRIGO, 2015)

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa relatada nesta dissertação foi analisar o comportamento de misturas geradas pela reciclagem de bases rígidas e fresados asfálticos, com adição de cimento, a fim de contribuir para o desenvolvimento de um método de dosagem.

1.2.2 Objetivos específicos

Com o propósito de se alcançar o objetivo geral supracitado, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar fisicamente os materiais de base e revestimento asfáltico empregados;
- b) Analisar o comportamento mecânico das misturas estudadas e os fatores que o afetam;
- c) Estudar o comportamento quanto à variação volumétrica das composições;
- d) Verificar a erodibilidade das misturas ensaiadas.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, sendo que neste primeiro capítulo o tema de pesquisa foi apresentado, discutindo-se sua relevância. Também foram explicitados os objetivos geral e específicos.

O embasamento teórico necessário para a realização da pesquisa é sintetizado e discutido no capítulo 2, abrangendo três grandes temas: a reciclagem de pavimentos, os procedimentos para dosagem de misturas recicladas com cimento e pesquisas recentes acerca dessa prática de reabilitação rodoviária. Buscou-se, a partir da revisão bibliográfica, a compreensão de experiências e especificações, em âmbito nacional e internacional, assim como verificar a viabilidade de aplicação da técnica.

No capítulo 3 da presente dissertação está exposto o planejamento experimental, sendo explicados os motivos que suscitaram o desenvolvimento de um planejamento estatístico diferenciado, descritas as composições analisadas e, por fim, a forma com que foram avaliados os resultados.

Os materiais que foram empregados na pesquisa são apresentados detalhadamente no capítulo 4. Além disso, nesse capítulo descrevem-se os métodos de ensaios, dando ênfase aos documentos utilizados, parâmetros adotados e limitações encontradas.

Os resultados dos ensaios, as análises realizadas, assim como as comparações com resultados obtidos por demais pesquisadores, estão apresentadas no capítulo 5. Para finalizar, no capítulo 6 são feitas algumas considerações finais a respeito da pesquisa, explicitando as conclusões obtidas e expondo sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo aborda três temas centrais referentes à dissertação, os quais correspondem à técnica de reciclagem de pavimentos, à dosagem de misturas recicladas com cimento, além de descrever de forma resumida algumas pesquisas já realizadas a respeito do assunto.

Primeiramente sintetiza-se a reciclagem em âmbito geral, dando sequência à técnica com adição de cimento Portland e como o trabalho engloba bases cimentadas, optou-se por descrever resumidamente cada material. Além disso, abordam-se assuntos como a compatibilidade para aplicação, normas nacionais e vantagens e desvantagens da reciclagem de pavimentos.

Na segunda parte, são expostas as normatizações nacionais e experiências internacionais sobre os procedimentos de dosagem de misturas recicladas com cimento, realizando-se então, uma comparação entre os métodos internacionais.

Conclui-se a revisão bibliográfica com resumos de experiências relatadas por outros pesquisadores sobre a reciclagem de pavimentos com cimento. Ainda, foram descritos, de forma abreviada, os estudos realizados e os resultados obtidos pelos demais pesquisadores do projeto de pesquisa “Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland”.

2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Segundo a *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 2001), a reciclagem profunda de pavimentos é uma técnica de reabilitação na qual toda a espessura do revestimento asfáltico e determinada porção dos materiais subjacentes são pulverizados e misturados para proporcionar um material melhorado e homogêneo. Técnica que consiste em triturar os materiais existentes, adicionar outros materiais quando necessário, misturar, compactar e depois de pronta, aplicar uma nova camada de revestimento.

Além da fresagem do revestimento asfáltico, existem outras alternativas que podem ser aplicadas na reciclagem de pavimentos degradados, as quais são realizadas a partir da

incorporação de materiais como resíduo de construção e demolição ou resíduo sólido urbano (DIAS *et al.*, 2015). Balbo (2007) indica que também podem ser empregados materiais como a borracha triturada proveniente de pneus inservíveis ou do descarte das indústrias de pneus, além de escórias granuladas resultantes de processos siderúrgicos, porém, ressalta que os volumes devem ser bastante elevados.

A partir dos anos 80, alternativas que contemplam a reciclagem de pavimentos têm se mostrado favoráveis para os órgãos de gestão e comunidade internacional, já que se trata de uma técnica economicamente viável e também politicamente correta, pois faz uso de materiais existentes, propiciando menor pressão sobre recursos naturais. Além disso, o gasto energético é minimizado tanto com relação à produção como para o transporte dos materiais, o que reduz consideravelmente as emissões de dióxido de carbono (CO₂) (TRICHÊS *et al.*, 2013).

A *Federal Highway Administration* (FHWA, 1997) relata que a reciclagem possui algumas vantagens que não são possíveis de alcançar a partir de outras técnicas de reabilitação. Além de evitar o desperdício de materiais, como já citado, a reciclagem consegue manter a geometria e espessura do pavimento e normalmente reduz o tempo de interrupção do tráfego.

A presença de material fresado asfáltico na base ou sub-base reduz a capacidade de suporte do pavimento e dificulta o alcance da resistência exigida pelas autoridades rodoviárias (ISOLA *et al.*, 2013). Dellabianca (2004) estudou o comportamento da incorporação de fresado (com e sem ligante) em um cascalho laterítico para utilização em base de pavimentos e confirmou a influência da película de betume na redução das características mecânicas das misturas.

Foi observado por Dellabianca (2004) que a presença de ligante asfáltico dificulta o arranjo dos grãos, o que reduz o atrito entre esses, afetando assim, a compactabilidade do material fresado e faz com que a presença do material betuminoso reduza a resistência à compressão simples (RCS) e a rigidez do material. Portanto surge a necessidade de aplicação de algum agente estabilizador para elevar a resistência da mistura.

De acordo com o manual de reciclagem a frio da Wirtgen (2012), existem diversos agentes estabilizadores usados mundialmente, como: agentes úmidos, sais higroscópicos, polímeros naturais e sintéticos, ceras modificadas, resinas de petróleo, betume e estabilizadores cimentados. Sua escolha deve ser realizada considerando fatores como preço, disponibilidade, características dos materiais, durabilidade e política.

Dentre os estabilizadores existentes, o cimento é o que fornece o melhor resultado no aumento da resistência, além de ser o mais empregado na reciclagem de pavimentos, fatores que comprovam a importância do estudo a partir da sua incorporação.

2.1.1 Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland

A especificação de serviço 167/2013 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2013a) define a reciclagem profunda de pavimentos com adição de cimento como sendo um processo de reconstrução parcial da estrutura do pavimento a partir da utilização de equipamentos apropriados para esta finalidade. Para isso, utilizam-se materiais existentes na sua estrutura, cimento Portland, agregados adicionais (se necessário) e água, em proporções definidas previamente no projeto de dosagem, sendo que para a pintura de proteção emprega-se emulsão asfáltica.

De acordo com a *Portland Cement Association* (PCA, 2010), a reciclagem profunda de pavimentos com adição de cimento permite que os pavimentos asfálticos rompidos sejam reciclados e estabilizados, criando uma nova base que fornece uma fundação apropriada para que os pavimentos apresentem um bom desempenho a longo prazo.

A principal função do cimento é elevar a resistência, incremento que é obtido a partir do aumento significativo da resistência à tração e compressão do material ou pelo meio da redução da sua plasticidade. Ao majorar a resistência da camada estabilizada, ocorre também o aumento da fragilidade, reduzindo então sua flexibilidade. Quanto maior a resistência da camada, mais elevadas são as tensões da carga gerada pelo tráfego, o que pode provocar uma aceleração de rachaduras mediante cargas repetidas, reduzindo então seu desempenho estrutural (WIRTGEN, 2012).

Geralmente, opta-se pelo emprego de baixos teores de cimento a fim de se obter uma camada estabilizada granulometricamente e de comportamento flexível, já que o objetivo da reciclagem não é atingir valores elevados de módulo de resiliência, tendo em vista que podem ocorrer problemas no desempenho do pavimento devido à retração do cimento e efeitos nocivos da rigidez em excesso (PAIVA e OLIVEIRA, 2009).

Segundo Bonfim (1999 apud GUSMÃO, 2008) existem diferentes métodos que podem ser aplicados com relação ao tipo de reciclagem. O processamento pode ser no local (*in situ*) ou

em usina, fator que não interfere nos procedimentos de dosagem. Porém, outros parâmetros influenciam na reciclagem, como fresagem do material (a frio ou a quente), profundidade do corte (superficial ou profunda), mistura reciclada (a frio ou a quente), utilização da mistura (base, camada de ligação ou revestimento) e adição de materiais (agregados, cimento Portland, emulsão asfáltica, CAP, polímeros e/ou mistura asfáltica).

Na presente pesquisa trabalha-se com reciclagem profunda a frio, buscando o estudo e aplicação do novo material na camada de base do pavimento, adicionando-se cimento Portland e fresado asfáltico em diferentes teores e porcentagens, além de agregado, quando necessária a realização da correção granulométrica.

2.1.2 Reciclagem de pavimentos semirrígidos

As estruturas de pavimentação semirrígidas são caracterizadas por possuírem material cimentado quimicamente na camada de base, os quais possuem rigidez elevada, fazendo com que a camada trabalhe como uma placa ao responder às solicitações do tráfego. Esses funcionam em regime crítico de tração na flexão durante sua fase íntegra, porém, ao ocorrer processos de fratura, esses passam a responder como um conjunto de blocos modulares (BALBO, 2007).

Pavimentos degradados, nos quais as bases cimentadas se encontram em intenso processo de fadiga, colocam os profissionais e pesquisadores da área em uma situação difícil, já que existem apenas duas alternativas cabíveis, que é a remoção da base degradada ou a procura de alternativas para evitar que as fissuras nas bases cimentadas sejam propagadas para as novas camadas asfálticas de reforço (BALBO, 2006). Essa limitação sugere a busca de soluções a fim de resolver tal problema, sendo uma delas a reciclagem dessas camadas.

Como já exposto, a presente dissertação aborda o estudo de dois materiais de base, brita graduada tratada com cimento (BGTC) e solo-cimento (SC), os quais são modificados pela adição de cimento. Buscou-se então, definir os materiais, identificar suas características e verificar seu histórico de aplicação na reciclagem de pavimentos.

2.1.2.1 Base de brita graduada tratada com cimento

A BGTC consiste na brita graduada simples (BGS) com adição de 3 a 5% de cimento e para que alcance a resistência e durabilidade almejada, é importante que a camada seja compactada

no mínimo em 95% da energia modificada. Seu emprego é indicado principalmente em pavimentos de vias de alto volume de tráfego e seu uso no país passou a ser mais acentuado no final da década de 1970 (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Balbo (2006), por sua vez, acredita que a inclusão de BGTC nas estruturas de pavimentos para vias de tráfego pesado é antiquada e inconsistente, devido à heterogeneidade na sua matriz, responsável pela geração de poros e descontinuidades em sua estrutura interna, a brita graduada tratada com cimento oferece baixíssima resistência à fratura, tornando-se bastante suscetível ao fenômeno de fadiga.

Paiva *et al.* (2013) descrevem que a reciclagem de pavimentos com base de BGTC necessita de um elevado tempo de cura da nova camada reciclada, o que prejudica a operação da via, fazendo-se necessária a pesquisa por técnicas alternativas. Esses ainda sugerem a aplicação um método de restauração no qual emprega a espuma de asfalto na mistura reciclada, o qual evita o problema descrito, porém pode reduzir a vida útil do pavimento, já que ocorre a alteração da estrutura do pavimento, ao substituir a base rígida por flexível.

Verificou-se que a reciclagem de pavimentos com adição de cimento em camadas de BGTC é uma técnica pouco estudada até então, o que incentiva a análise do método para averiguar se seu emprego é satisfatório. Além disso, atribui-se à importância do seu estudo, o fato de se tratar de um material bastante empregado em bases de pavimentos.

2.1.2.2 Base de solo-cimento

Bernucci *et al.* (2008) relatam que o consumo de cimento deve ser entre 5 e 9% com relação à massa total de solo e que sua compactação deve ser realizada imediatamente após a mistura e disposição em pista em virtude da velocidade de hidratação do cimento. Seu emprego foi amplamente realizado na década de 1960, quando obras de pavimentação foram executadas em locais com ausência de pedreiras. Ressaltam ainda que o solo-cimento tem se mostrado novamente como um material competitivo frente às bases granulares de BGS.

De acordo com Paiva e Oliveira (2013), é comum os pavimentos com base em solo-cimento atingirem um estágio de deterioração bastante avançado, fazendo com que a restauração a partir de processos convencionais seja ineficaz. Esses ressaltam que a reciclagem profunda é efetiva já que opera no mesmo horizonte do solo-cimento deteriorado, pulverizando e

estabilizando o material da camada com cimento. Recomendam também a utilização de baixos teores de cimento para minimizar o aparecimento de trincas por retração e futuras trincas por fadiga.

Oliveira (2003) realizou estudos de reciclagem de pavimentos com adição de cimento em bases de solo-cimento, nos quais verificaram a resistência à compressão simples de misturas com 30% de fresado. Na pesquisa realizada por Paiva e Oliveira (2013), os quais estudaram o comportamento do solo-cimento nessa técnica de reabilitação rodoviária, foi observada que as análises se continham no comportamento mecânico dessas misturas. Motivos que demonstram a importância da realização de ensaios que caracterizam a reciclagem de materiais cimentados com adição de cimento frente ao comportamento volumétrico e de erodibilidade.

2.1.3 Compatibilidade do pavimento para aplicação da técnica de reciclagem

Existem algumas situações em que a técnica de reciclagem com cimento é indicada, sendo que a *Portland Cement Association* (PCA, 2010) faz referência a algumas delas: quando o recapeamento já não é alternativa, devido a elevada degradação do pavimento; existe problema na base ou sub-base da estrutura; são necessários remendos profundos em mais de 20% da área do pavimento e nos casos em que a estrutura não está adequada para o tráfego.

A Austroads (2002) indica um fluxograma para avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem, a qual se deve ser realizada seguindo os seguintes passos:

1. Avaliação da uniformidade da espessura do pavimento – ocorrência e qual a frequência e tipo de remendo, se existem cortes ou preenchimentos. É necessário verificar se os ensaios de laboratório podem ser realizados no prazo para então selecionar os locais de investigação do pavimento;
2. Realização de ensaios de investigação do pavimento – são considerados de maior importância a análise granulométrica, o índice de plasticidade e o Índice de Suporte Califórnia (ISC);
3. Verificação da profundidade de material disponível – se é suficiente para a estabilização, sendo possível empregar o material de sub-base em conjunto, caso a base seja insuficiente;

4. Análise da uniformidade de distribuição dos materiais – caso essa esteja de acordo, é preciso avaliar a resistência do subleito. Se isso não ocorrer, verifica-se a possibilidade do local poder ser separado em zonas com homogeneidade razoável, se sim, passa-se para a etapa de avaliação da resistência do subleito, caso contrário, é necessário analisar se é possível adicionar outro material. Sendo essa etapa exequível, verifica-se novamente a homogeneidade dos materiais no local e se dá prosseguimento às etapas;
5. Avaliação da resistência do subleito – essa pode ser adequada ou inadequada, se essa se enquadrar na segunda opção, provavelmente deve-se optar por outro método de restauração. Caso ela se adequa é necessário verificar se o local é bem drenado e se o nível freático é longe da superfície. Com isso, pode-se analisar a colocação de sistemas de drenagem, porém se a água continuar sendo um problema é melhor optar por outro método de reabilitação do pavimento, mas caso essa não interfira, deve-se analisar uma amostra representativa do material, partindo para pesquisas no laboratório e elaboração do orçamento do projeto.

O manual da Wirtgen (2012) estabelece três fatores que devem ser considerados para determinar o método de reciclagem mais adequado: tipo de deterioração do pavimento; qualidade do material da camada a ser reciclada e resultado pretendido (expectativa de vida útil). Quanto ao processo de reciclagem a frio, o manual estabelece outros pontos importantes que devem ser abordados para verificar se a reciclagem é adequada, como: tipo de obra (ambiente local); ambiente físico (topografia local e clima) e disponibilidade de materiais.

2.1.4 Normas técnicas nacionais sobre reciclagem com cimento

No país, o que contemplam as normas técnicas a respeito da reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland são especificações de serviço, as quais são listadas na sequência:

- DER-PR ES-P 33/05 – Pavimentação: Reciclagem de pavimento *in situ* com adição de cimento (DER-PR, 2005);
- DER-SP ET-DE-P00/035 – Reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com cimento e brita (DER-SP, 2006);

- DEINFRA-SC ES-P-09/12 – Reciclagem profunda de pavimento com adição de cimento Portland (DEINFRA-SC, 2012);
- DNIT 167/2013-ES – Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço (DNIT, 2013a).

Tais especificações apresentam divergências em itens importantes no processo de reciclagem do pavimento, sendo que os componentes analisados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre as especificações de serviço nacionais sobre reciclagem com cimento

Item analisado	Especificação de serviço			
	DER-PR ES- P 33/05	DER-SP ET- DE-P00/035	DEINFRA-SC- ES-P-09/12	DNIT 167/2013- ES
Profundidade de corte mínima atingida pela recicladora (cm)	Não estabelece	12	30	30
Teor máximo de material fresado do revestimento asfáltico (%)	Não estabelece	Não estabelece	50	50
Energia de compactação	Intermediária	Intermediária	Modificada	Modificada
Grau de compactação mínimo em campo (%)	100	100	98	98
Tolerância para o teor de umidade ótima em campo (%)	± 1	- 2 e + 1	Não estabelece	Não estabelece
Resistência à compressão simples aos 7 dias de cura (MPa)	3,5 a 8	Não estabelece	2,1 a 2,5	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	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 as solicitações impostas	Período de 3 a 7 dias, para que eventuais deficiências possam ser verificadas e sanadas	Após salgamento, durante 3 a 7 dias, para que eventuais deficiências possam ser verificadas e sanadas

(Fonte: adaptado de FEDRIGO, 2015)

Observa-se que os Departamentos de Estradas de Rodagem do Paraná e São Paulo se assemelham em alguns aspectos, assim como os parâmetros propostos pelo DEINFRA de Santa Catarina são semelhantes aos do DNIT. O mesmo se repete nas faixas granulométricas estipuladas pelos departamentos, já que são iguais para o DNIT e o DEINFRA-SC, assim como para os Departamentos de Estradas de Rodagem do Paraná e de São Paulo, apresentados na Tabela 2. Essas representam o enquadramento em que os materiais reciclados devem estar de acordo para ser possível a realização da técnica de reciclagem de pavimentos.

Tabela 2: Limites das faixas granulométricas propostas pelas especificações de serviço nacionais

Peneira (mm)	Limites DNIT e DEINFRA-SC (%)				Limites DER-SP e DER-PR (%)	
	Faixa I (II)		Faixa II (III)		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

(Fonte: adaptado de FEDRIGO, 2015)

2.1.5 Vantagens e desvantagens da técnica de reciclagem com cimento

Existem diversas vantagens que o emprego da reciclagem na reabilitação de pavimentos proporciona, essas podem ser classificadas como técnicas, econômicas e ambientais. Como muitas dessas se enquadram em mais de uma categoria, optou-se por realizar um apanhado geral, descrevendo somente as principais a seguir:

- Reaproveitamento de materiais, o que reduz custos com extração e transporte. Ao evitar o emprego de novos agregados se priva da necessidade de criação de novas jazidas ou utilização das reservas em excesso e também da existência de bota-foras (MINGUELA, 2011; WIRTGEN, 2012);
- Reabilitação de um pavimento degradado a partir do melhoramento da camada tratada, o que torna essa mais homogênea, aprimora suas

características mecânicas e resulta em uma camada com melhor capacidade de suporte (IECA, 2013);

- Redução das tensões no topo do subleito e no revestimento asfáltico e elevação da resistência (IECA, 2013);
- Atenuação do tempo de construção, reduzindo os custos da obra e beneficiando os usuários da via (WIRTGEN, 2012). Correspondente redução do risco de exposição das camadas inferiores do pavimento ao tempo e ao tráfego durante a construção (ELLIS, 2002);
- Possibilita segurança ao trânsito, já que a operação de reciclagem pode ser realizada dentro da largura de uma faixa (WIRTGEN, 2012).

Ao aplicar a técnica são encontradas algumas limitações e desvantagens, as quais devem ser analisadas para verificar se é realmente viável reciclar o pavimento. Dentre essas, destaca-se:

- Ao elevar a resistência da camada mediante a adição de cimento, mais tensões da carga de roda são geradas, ocorrendo então a proliferação acelerada de trincas a partir da aplicação de cargas repetidas de trânsito pesado, o que reduz o desempenho estrutural do pavimento (WIRTGEN, 2012);
- Surgimento de situações inesperadas, as quais são suscetíveis em quaisquer serviços, porém quando se trata de reciclagem, essas são mais propícias de ocorrer, podendo interferir na qualidade do trabalho final, já que os materiais empregados fazem parte da obra (ELLIS, 2002);
- Necessidade de realizar ensaios de laboratório no estágio inicial, a fim de assegurar a viabilidade da técnica (JANIENSKI e RENS, 2002);
- Caso o pavimento apresente uma estrutura bastante heterogênea ao longo da via, provavelmente a reciclagem desse material acarretará em uma estrutura mais heterogênea do que a construção de uma nova camada (MINGUELA, 2011).

2.2 DOSAGEM DE MISTURAS RECICLADAS COM CIMENTO

Os procedimentos de dosagem de misturas recicladas com adição de cimento estão especificados neste item. Busca-se sintetizar os métodos abordados nacionalmente e internacionalmente a fim de verificar as condicionantes sobre as quais estão fundamentados tais procedimentos.

2.2.1 Normatização Nacional

Atualmente, é inexistente no país um procedimento de dosagem a respeito da reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland, porém como já abordado, existem especificações de serviço que apresentam alguns parâmetros que devem ser satisfeitos pelas misturas recicladas, todavia essas se diferem umas das outras em alguns aspectos.

Com relação às orientações para a dosagem da mistura reciclada, as especificações de serviço do DEINFRA-SC (2012), DER-PR (2005) e DNIT (2013) estabelecem de maneira reduzida, as seguintes indicações:

- A coleta de amostras deve ser efetuada com o auxílio da recicladora utilizada nos serviços, sendo que essa deve ser feita para cada segmento homogêneo encontrado na rodovia, elaborando-se então, um projeto de dosagem específico para cada variabilidade encontrada;
- Deve-se apresentar um projeto de dosagem, o qual deve conter no mínimo as seguintes informações: composição granulométrica da mistura e enquadramento na faixa de trabalho, umidade ótima e massa específica aparente seca máxima da mistura reciclada, energia de compactação empregada e resistência à compressão simples aos 7 dias.

2.2.2 Experiência Internacional

Existem diversos procedimentos de dosagem de misturas recicladas com cimento em âmbito internacional. Por isso, foram selecionados os mesmos abordados por Fedrigo (2015) e optou-se por acrescentar o método Francês. Cabe ressaltar que é realizada apenas uma síntese de como as organizações internacionais procedem com relação à reciclagem de pavimentos.

2.2.2.1 Método de dosagem da Portland Cement Association

A PCA (2005) acredita que duas características devem ser analisadas para dosagem de misturas recicladas com cimento. A primeira trata da análise granulométrica, que deve estar enquadrada na faixa especificada pela organização e a segunda é a resistência à compressão simples das composições. Ainda, admite-se que a porcentagem de fresado asfáltico não deve ultrapassar 50% da massa da mistura.

Verificada a granulometria, deve-se realizar ensaios de compactação na energia Normal com a mistura reciclada e um teor estimado de cimento. A partir dos parâmetros obtidos, realiza-se a moldagem de dois corpos de prova (CPs) para três teores de cimento e posterior à cura de 7 dias, realiza-se o ensaio de resistência à compressão simples.

Com os resultados de resistência à compressão simples, deve-se definir o teor de cimento ideal para alcançar a resistência de projeto, a qual deve se enquadrar dentro dos limites propostos pela PCA (2005), os quais variam entre 2,1 e 2,8 MPa. Realiza-se novamente a compactação da mistura para determinação dos parâmetros que serão utilizados como fatores de controle no procedimento de campo.

2.2.2.2 Método de dosagem do Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones

O método proposto pelo IECA (2013) pode ser dividido em cinco etapas, as quais estão descritas a seguir:

1. Divisão em segmentos homogêneos para realização de diferentes projetos de dosagem – deve ser feita considerando o tráfego, o tipo e o estado do pavimento, dentre outros fatores;
2. Caracterização da mistura – análise granulométrica da mistura (correção pelo meio da adição de agregados, caso necessário) e determinação dos limites de Atterberg dos materiais, visando à verificação da compatibilidade da estabilização com cimento;
3. Comportamento mecânico da mistura – realizam-se ensaios de resistência à compressão simples na energia Modificada com três teores de cimento, os quais devem ser iguais ou superiores a 4%. Os corpos de prova devem alcançar um grau de compactação (GC) mínimo de 97% e a RCS de projeto desejada varia de acordo com o nível do tráfego e da resistência do

subleito. O valor mínimo é de 2,5 MPa, porém esse é elevado de acordo com a redução da espessura da camada reciclada, podendo alcançar 3,5 MPa;

4. Análise de sensibilidade de acordo com a variação do grau de compactação – devem ser realizados ensaios com GC de 95 e 96% para verificação;
5. Determinação do prazo de trabalhabilidade do material reciclado – verificação do período de tempo entre o final da homogeneização da mistura e o início da pega do cimento.

2.2.2.3 Método de dosagem da Wirtgen

O Manual de reciclagem a frio da Wirtgen (2012), empresa produtora de recicladoras, propõe um procedimento de dosagem bastante minucioso, o qual recomenda a extração de no mínimo 100 kg de cada material em campo para análise desses individualmente e como mistura.

Devem ser realizados ensaios de análise granulométrica para verificar se a composição se enquadra nos limites estabelecidos pela empresa, dispostos na Tabela 6. Quando isso não ocorrer, materiais virgens devem ser adicionados para corrigir a granulometria da mistura. Realizam-se também, ensaios de limites de Atterberg visando à determinação do Índice de Plasticidade (IP) dos materiais.

Não é estabelecida uma porcentagem máxima de fresado asfáltico, sendo que a proporção de cada material é definida a partir da espessura das camadas e massa específica *in situ* dos materiais. Realiza-se então a compactação das misturas na energia Modificada, sendo que o teor de cimento deve ser coerente com o material coletado, conforme especificado pela Wirtgen (2012). Ressalta-se que, depois de misturados os materiais, deve-se esperar uma hora para realizar a compactação, visando reproduzir possíveis atrasos que podem ocorrer em campo.

Com os parâmetros obtidos na compactação, moldam-se três corpos de prova para cada teor de cimento (no mínimo três), devendo ser ensaiados dois CPs à resistência à compressão simples e um à resistência à tração por compressão diametral (RCD) aos 7 dias de cura. Antes de romper à RCS, esses devem ser imersos por 4 horas.

Depois de obtidos os resultados, correlaciona-se a RCS com o teor de cimento por meio de um gráfico e a partir da resistência de projeto, deve-se definir o teor de cimento a ser adotado. Na Tabela 3 estão expostas as categorias que o manual propõe para materiais reciclados com cimento as quais estão relacionadas com a RCS aos 7 dias de cura.

Tabela 3: Classificação dos materiais de acordo com a RCS aos 7 dias de cura

Tipo de material	RCS _{7dias} (MPa)
Levemente cimentado	< 4
Cimentado	4 a 10

(fonte: WIRTGEN, 2012)

2.2.2.4 Método de dosagem da Asphalt Recycling and Reclaiming Association

O procedimento de dosagem proposto pela ARRA (2001) é mais simples e não estabelece valores como teor de cimento e resistência de projeto. Esse indica os seguintes passos:

1. Determinação das propriedades do material reciclado – essa é realizada a partir da análise granulométrica e da determinação do IP dos materiais com o objetivo de verificar a necessidade de adição de agregados virgens e certificar a eficiência do cimento como agente estabilizador;
2. Definição das proporções de material reciclado e cimento e do teor de umidade – a caracterização das misturas é realizada a partir de ensaios de compactação. Para verificar diferentes taxas de aplicação, sugere-se a variação de no mínimo 1% entre essas. Ainda, a Associação propõe a reprodução de possíveis atrasos que podem ocorrer em campo a partir do repouso da amostra homogeneizada entre duas e quatro horas antes da compactação;
3. Avaliação do comportamento mecânico das misturas recicladas – o mínimo exigido pela Associação é a realização de ensaios de resistência à compressão simples em triplicata com tempo de cura igual a 7 dias. Esses devem ser desenvolvidos na umidade ótima e curados em ambiente com umidade relativa de 95 a 100% e temperatura entre 22 e 25°C. Porém, podem ser empregadas outras temperaturas e avaliados diferentes tempos de cura. As amostras podem ser removidas do molde assim que cessada a

moldagem ou em alguns casos, essas devem permanecer por 24 horas a fim de adquirir resistência suficiente. Depois do término da cura dos CPs, esses são ensaiados e são analisados os resultados para os diferentes teores estudados. O teor de cimento escolhido é o que apresentou a resistência mínima de projeto.

A realização do ensaio de resistência à compressão simples é obrigatória, porém podem ser realizados ensaios adicionais para comprovação do comportamento mecânico, assim como da verificação quanto à durabilidade e sensibilidade à umidade das misturas.

2.2.2.5 Método de dosagem da Austroads

A Austroads (2002), principal órgão rodoviário da Austrália e da Nova Zelândia, desenvolveu um método de dosagem de materiais estabilizados com cimento para aplicação em pavimentos, o qual foi utilizado como referência para o trabalho realizado por Fedrigo (2015), sendo então a base desta pesquisa.

Trata-se de um método bastante completo, o qual tem início na análise granulométrica com o objetivo de verificar a necessidade de fazer a correção granulométrica, caso não esteja dentro dos limites propostos na Tabela 6. Deve-se determinar também, o índice de plasticidade com intuito de verificar se é indicada a estabilização com cimento.

A próxima etapa compreende a caracterização das misturas a partir da realização do ensaio de compactação na energia Normal ou Modificada sem adição de cimento. Com os parâmetros definidos realiza-se a análise do comportamento mecânico, verificando-se a resistência à compressão simples dos corpos de prova com 28 dias de cura (Tabela 4). Ainda, deve-se averiguar a taxa de ganho da RCS entre os 7 e 28 dias de cura.

Tabela 4: 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)

São sugeridos ensaios adicionais, visando à redução do risco de danos à camada reciclada, provocados pela umidade e as trincas indesejáveis, assim como a erosão, os quais estão descritos a seguir:

- Ascensão capilar, expansão e absorção – os ensaios devem ser realizados de acordo com a norma australiana AS 1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996), a qual não especifica o nível máximo de ascensão capilar admitido. Já a Austroads (2002) sugere o limite de 25% de ascensão capilar em 24 horas, mas não estabelece valores limites para expansão e absorção;
- Retração por secagem – o presente ensaio pode estar baseado em duas normas distintas, AS 1289.3.4.1 (STANDARDS AUSTRALIA, 2008) para solos e AS 1012.13 (STANDARDS AUSTRALIA, 1992) para concreto, sendo que os limites de retração propostos pela Austroads (2002) variam de 200 µm a 4500 µm, de acordo com o material empregado;
- Erodibilidade – o ensaio é baseado na norma TM-T186 (RTA, 1994), porém não são propostos limites para a erosão do material, mas sugere-se que seja a menor possível. Deve-se evitar a utilização elevada de teores de cimento, já que aumenta a probabilidade de trincas de retração, provocando maior infiltração e como consequência, eleva o potencial de erodibilidade.

2.2.2.6 Método de dimensionamento Francês

Visando compreender o procedimento de dosagem de misturas recicladas aplicado na França, Núñez *et al.* (2015) elaboraram um roteiro de dimensionamento desenvolvido para um pavimento reciclado, o qual possui a seguinte sequência:

1. Determinação do volume de tráfego – esse deve ser quantificado considerando a agressividade dos meios de transporte e a partir de fatores multiplicadores, responsáveis por estimar danos provocados pelos veículos e circulação dos mesmos, visando à definição da classe de tráfego;
2. Escolha da camada de rolamento – definida a partir da classe de tráfego da rodovia, a qual indica a natureza e a espessura mínima do revestimento,

porém essa pode ser ajustada em função da experiência regional ou para satisfazer objetivos do contratante;

3. Determinação da capacidade de suporte do subleito e das camadas remanescentes do antigo pavimento – a capacidade de suporte do solo de subleito pode ser determinada pelo meio de ensaios de placa ou por retroanálises de bacias deflectométricas, já a análise das demais camadas pode ser realizada a partir da extração de corpos de prova, quando se tratar de materiais artificialmente cimentados, ou, caso existam camadas granulares, o módulo de elasticidade dessas é considerado como quatro vezes o módulo do subleito, não devendo ultrapassar o limite de 320 MPa;
4. Determinação da classe de resistência do material reciclado – os materiais reciclados são classificados em zonas de desempenho em função da resistência à tração e do módulo de deformação aos 360 dias de cura;
5. Cálculo das tensões admissíveis – o dimensionamento de estruturas com materiais reciclados é realizado a partir da comparação entre a tensão de tração na fibra inferior da camada reciclada e a tensão admissível do material;
6. Dimensionamento simplificado da estrutura – se o projeto for realizado para uma rodovia de baixo volume de tráfego e o material a ser reciclado for limpo e pouco argiloso, pode-se optar por um dimensionamento simplificado da estrutura que é realizado a partir de valores estimados;
7. Verificação ao congelamento e degelo – tal análise deve ser realizada com o material reciclado.

2.2.2.7 Comparação entre os métodos

Os procedimentos de dosagem anteriormente abordados estão sintetizados na Tabela 5, porém optou-se por não incluir o Método Francês por esse se tratar do dimensionamento de pavimentos reciclados e não avaliar os principais parâmetros abordados pelos demais.

Na Tabela 6, são apresentados os limites granulométricos exigidos em alguns dos métodos de dosagem descritos. Acrescenta-se que foram respeitados na pesquisa, os limites estabelecidos pela Wirtgen (2012).

Tabela 5: Comparação entre os métodos de dosagem internacionais citados

Característica	Método de dosagem				
	PCA (2005)	IECA (2013)	Wirtgen (2012)	ARRA (2001)	Austrroads (2002)
Ensaio 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 6	Não estabelece	Tabela 6	Não estabelece	Tabela 6
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 3	Não estabelece	Tabela 4
Ensaio 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

(Fonte: adaptado de FEDRIGO, 2015)

Tabela 6: Limites granulométricos citados pelos métodos de dosagem internacionais citados

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	-

(Fonte: adaptado de FEDRIGO, 2015)

2.3 PESQUISAS RECENTES SOBRE A RECICLAGEM COM CIMENTO

A fim de verificar o comportamento de materiais reciclados com cimento e também para servir de comparação com os resultados da presente dissertação, procurou-se descrever, de forma resumida, algumas pesquisas já realizadas a respeito da reciclagem de pavimentos com adição de cimento. É importante ressaltar que se optou por dedicar-se aos ensaios e verificações relacionados com esta dissertação.

Primeiramente, estão expostos os resultados alcançados a partir de pesquisas realizadas nacionalmente, sendo que os estudos elaborados em outros países estão dispostos na sequência. São apresentados também os resultados já obtidos acerca da pesquisa global “Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland”, da qual a presente dissertação é parte integrante.

2.3.1 Pesquisas realizadas nacionalmente

Oliveira (2003) verificou a influência do prazo de trabalhabilidade do cimento Portland na resistência à compressão simples aos 7 dias de cura de misturas de fresado asfáltico e materiais de base (solo-cimento e cascalho laterítico). A energia de compactação empregada foi a Normal do ensaio de Proctor e foi adicionado cimento em diferentes teores (3%, 4% e 5%). A partir dos resultados, observou-se que ocorre uma redução na RCS quando a compactação é retardada em 2, 4 e 6 horas com relação à resistência alcançada em condições normais de compactação.

Dentre os ensaios realizados por Dellabianca (2004), destaca-se a verificação da resistência à compressão simples e do ISC de misturas compostas de fresado asfáltico (16%, 20%, 25% e 35%) e cascalho laterítico com e sem adição de 2% de cal ou cimento. As composições foram moldadas na energia Proctor Intermediária, sendo que os resultados obtidos para o ensaio de RCS demonstraram que a mistura ideal seria com a adição de 25% de material fresado. A partir do ensaio de ISC, verificou-se que esse não é o ideal para previsão do comportamento de misturas com incorporação de fresado asfáltico. Além disso, foram realizadas análises econômicas do uso da reciclagem, que indicaram a viabilidade da reutilização do revestimento asfáltico e da base para formação de uma nova camada.

O estudo realizado por Gusmão (2008) compreende a verificação da resistência (RCS e RCD) de misturas recicladas com cimento, tendo a BGS como material de base. Foram verificados fatores como tempo de cura, teor de cimento e porcentagem de material fresado. A partir dos resultados, observou-se que o teor de cimento apresentou ganhos de resistência, assim como o emprego de maiores tempo de cura. Já a adição de material fresado reduziu a resistência das misturas.

Paiva e Oliveira (2010) desenvolveram um estudo a fim de verificar a influência da compactação e do teor de umidade ótimo no comportamento de misturas recicladas com cimento Portland. Para isso, realizaram ensaios de RCS e RCD aos 7 dias de cura com GC entre 90 e 100%, na umidade ótima e com variação de $\pm 1\%$ desta. As misturas analisadas eram compostas de 77% de fresado asfáltico, 20% de agregado e 3% de cimento e foram ensaiadas na energia Proctor Modificada.

Os resultados alcançados por Paiva e Oliveira (2010) demonstraram que a resistência (compressão e tração) é diretamente proporcional ao grau de compactação e que o emprego de maiores GCs acarretam em maiores resistências. Quanto à variação da umidade, obtiveram-se melhores resultados com 1% de umidade acima da ótima. Os autores indicam ainda que a adição de cimento pode não apresentar melhora no comportamento das misturas, caso essas não sejam compactadas o suficiente para promover o arranjo dos grãos, de forma a reduzir o volume de vazios das misturas.

Nunes *et al.* (2013) estudaram o comportamento de materiais da região de Passo Fundo (RS), com misturas constituídas por 78% de fresado asfáltico e 22% de agregado virgem proveniente de uma rocha basáltica. Foram empregados quatro teores de cimento Portland CP V ARI (1%, 2%, 4% e 8%) e as amostras foram ensaiadas a RCS aos 7 dias de cura a partir do emprego da energia Modificada do ensaio Proctor. Os resultados variaram de 0,69 MPa até 5,66 MPa, sendo que a adição de cimento elevou a resistência das misturas. Os autores concluíram que, considerando os materiais analisados, para alcançar uma resistência mínima de 2,1 MPa aos 7 dias de cura, é necessário o emprego do cimento em quantidade superior a 3,5%.

A pesquisa desenvolvida por Trichês *et al.* (2013) é bastante ampla e compreende o estudo em três etapas distintas. Com relação à avaliação do comportamento mecânico de misturas recicladas com cimento, verificou-se, de maneira geral, que a adição do agente estabilizador gera ganhos de resistência e rigidez nas composições estudadas. Além disso, o emprego de maiores tempos de cura também apresentou melhoras no comportamento mecânico, considerando as misturas avaliadas nas três etapas.

O estudo realizado por Paiva e Oliveira (2013) analisou o comportamento de misturas compostas por 30% de fresado, 70% de solo-cimento e 3% de cimento Portland CP II E 32. Foram realizados ensaios de RCS e RCD na energia Proctor Modificada aos 7 dias de cura. Os resultados foram bastante satisfatórios, alcançando RCS igual a 2,47 MPa e RCD de 0,22 MPa, o que evidencia a possibilidade do emprego de teores de cimentos reduzidos, a fim de evitar problemas de rigidez em excesso.

Aranha (2013) avaliou o comportamento mecânico da reciclagem de solo-agregado com cimento a partir de estudos de campo e laboratório. No estudo laboratorial foram realizados

ensaios de RCS, RCD e módulo de resiliência triaxial, sendo analisados diferentes fatores, como tipo de material reciclado, teor de cimento, energia de compactação e tempo de cura. A partir dos resultados, foi possível verificar que todas as variáveis estudadas se mostraram significativas e que os ensaios realizados foram passíveis de avaliar o comportamento mecânico das misturas, como exceção do ensaio de módulo de resiliência (MR), o qual apresentou grande variabilidade nos resultados.

2.3.2 Pesquisas realizadas no exterior

Taha *et al.* (2002) desenvolveram um estudo a partir da análise da RCS de misturas de fresado asfáltico (de 0 a 100%), agregado virgem e cimento Portland Tipo I (de 0 a 7%) aos 2, 7 e 28 dias de cura. Observaram que a resistência das composições aumentou com a adição de agregado virgem e cimento, assim como da elevação do tempo de cura. Além disso, eles realizaram uma análise de projeto de pavimentos e concluíram que podem ser empregadas bases recicladas com 100% de fresado, desde que esse seja estabilizado com cimento. Verificaram também que a influência da adição de cimento é mais significativa do que a inclusão de agregado virgem.

Um estudo elaborado por Moreira *et al.* (2006) a respeito de misturas de fresado, pó de pedra e cimento em diferentes quantidades verificou que para cumprir os requisitos exigidos pelo Macopav, manual de concepção de pavimentos da Espanha (RCS $\geq 2,5$ MPa e RCD $\geq 0,3$ MPa), seria necessário o emprego de misturas com 70% de fresado, 30% de pó de pedra e 6% de cimento. Eles ressaltam também que o emprego de misturas com 100% de fresado apresentam variabilidade no comportamento, a qual pode ser explicada por diferentes fatores: volume de vazios considerável (redução da superfície de contato dos agregados de maiores dimensões), superfície de contato com o ligante não permite aderência adequada entre o fresado e o cimento, e ausência de material fino pode favorecer o desenvolvimento de microfissuras (redução da resistência).

Sufian *et al.* (2009) estudaram a influência da adição de fresado e da variação da umidade em misturas recicladas com cimento e cal hidratada. O material de base utilizado foi a BGS e o teor de agente estabilizador empregado foi igual a 3%. Os ensaios realizados em laboratório verificaram o comportamento mecânico das misturas (RCS, RCD e módulo de resiliência diametral - MRD) com diferentes idades de cura, a partir da aplicação da energia Modificada.

Foi verificado por Sufian *et al.* (2009) que o comportamento mecânico das misturas com cimento é superior às composições com cal e que o tempo de cura contribui com o ganho de resistência e rigidez. Com relação aos materiais, foi observada uma variação dependendo do ensaio e da idade de cura empregada. Os parâmetros de aceitação exigidos na Malásia são de 2 MPa para RCS, de 0,2 MPa para RCD e de 1.350 MPa para MRD, sendo que o período de abertura ao tráfego é relacionado com o tempo de cura necessário para que a camada adquira o desempenho mínimo exigido. Com relação à umidade, verificou-se que as misturas com mais fresado são menos sensíveis à água e que o melhor comportamento mecânico foi obtido com umidade inferior à ótima.

O estudo desenvolvido por Ma *et al.* (2011) compreendeu ensaios de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura, com e sem imersão prévia de 24 horas. Os materiais empregados foram fresado asfáltico, solo argiloso e cimento, em diferentes quantidades. Sendo que o teor de cimento variou entre 2 e 6% e as misturas foram compostas pela relação entre fresado e solo em diferentes proporções. A partir dos resultados observou-se que o cimento associado a maiores quantidades de solo, gera misturas mais resistentes. Quanto à imersão, observou-se que essa reduz a RCS, porém quanto maior a quantidade de fresado e cimento, melhor a estabilidade da mistura frente à ação da água.

As composições estudadas por Isola *et al.* (2013) compreendem materiais reciclados de pavimento com as seguintes proporções: mistura 1 (70% de agregado fino e 30% de agregado graúdo), mistura 2 (50% agregado fino, 20% de agregado graúdo e 30% de fresado) e mistura 3 (10% de agregado fino, 20% de agregado graúdo e 70% de fresado). Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral para verificar o teor de cimento ideal para obter os parâmetros exigidos pela norma italiana ($2,5 \text{ MPa} \leq \text{RCS} \leq 4,5 \text{ MPa}$ e $\text{RCD} > 0,25 \text{ MPa}$ aos 7 dias de cura). O teor de cimento definido foi aquele que obteve RCS de 3 MPa aos 7 dias de cura, sendo que os resultados obtidos demonstraram que a quantidade necessária de cimento aumenta de acordo com a elevação da porcentagem de material fresado.

Yang e Wu (2014) avaliaram a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura de materiais coletados de uma rodovia (base e fresado) com adição de agregado virgem para correção granulométrica, sendo esses estabilizados com cimento. Foram empregados cinco

porcentagens de fresado (entre 0 e 100%) e cinco teores de cimento (de 0,5 à 2,5%). Os resultados obtidos variaram entre 0,36 MPa (para misturas com 100% de fresado e 0,5% de cimento) e 5,15 MPa (composições com 100% de base e 2,5% de cimento). O objetivo do estudo era verificar qual a mistura ideal de acordo com os limites expostos pela PCA (2,1 a 2,8 MPa).

Foi verificado por Yang e Wu (2014) que para teores de cimento abaixo de 1,5%, dificilmente seriam alcançados os limites desejados, sendo que para o presente estudo, a mistura ideal definida compreendia 2% de cimento e 50% de fresado. Os autores atestam ainda que ao acrescentar maiores teores de cimento aumenta a probabilidade de ocorrer retração por secagem e por temperatura.

Na segunda fase da pesquisa de Jones *et al.* (2015) foi realizado o monitoramento de projetos de campo com diferentes estruturas de reciclagem, a partir de ensaios laboratoriais e de campo (ensaio de carga acelerada) em uma pista de testes instrumentada. Os resultados demonstraram que os valores de rigidez medidos e calculados a partir de retro análises foram maiores na seção com adição de cimento se comparada àquela sem emprego de agente estabilizador. Com relação à rigidez da estrutura estabilizada, essa permaneceu mais elevada mesmo depois do tráfego. Além disso, ambas as seções não apresentaram trincamento.

Ji *et al.* (2015) estudaram o comportamento mecânico (RCS, RCD e MR) de misturas contendo fresado asfáltico, BGTC, agregado virgem e cimento, em diferentes proporções. O método de compactação empregado foi através da vibração vertical e os tempos de cura analisados foram entre 7 e 90 dias. As composições obtiveram adição de cimento de 3 e 4%, além de três relações distintas entre base e fresado (0:1, 1:1 e 7:3) e três teores de agregado virgem adicional (0%, 20% e 40%).

A partir dos resultados obtidos por Ji *et al.* (2015), observou-se que a adição de cimento e agregado virgem acarreta ganho no comportamento mecânico, assim como a adição de fresado reduz a resistência e rigidez das misturas. Quanto ao tempo de cura, esse eleva o comportamento das amostras, porém é observada uma desaceleração na elevação dos parâmetros depois dos 28 dias para a avaliação de RCS e após os 60 dias no caso dos ensaios de RCD e MR. Esses verificaram ainda que a RCD obtida é em torno de 0,10 da RCS das mesmas composições.

2.3.3 Resultados parciais da pesquisa “Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland”

A presente dissertação é parte integrante de uma pesquisa global a respeito da reciclagem de pavimentos com adição de cimento, como relatado no item 1.1. Para fins de comparação e contextualização, estão expostos na sequência, os parâmetros adotados e os resultados alcançados pelos demais pesquisadores do projeto.

2.3.3.1 Pesquisa de Fedrigo (2015)

Fedrigo (2015) iniciou os estudos da pesquisa a partir de ensaios para determinação do comportamento mecânico e volumétrico de misturas recicladas com cimento, compreendidas por BGS, fresado asfáltico e cimento. Esse verificou a influência da taxa de incorporação de cimento (2, 4 e 6%), da adição de material fresado (20 e 50%) e da variação da energia de compactação (Intermediária e Modificada). Ainda, os ensaios para constatação do comportamento mecânico levaram em consideração o tempo de cura, além das demais variáveis estudadas.

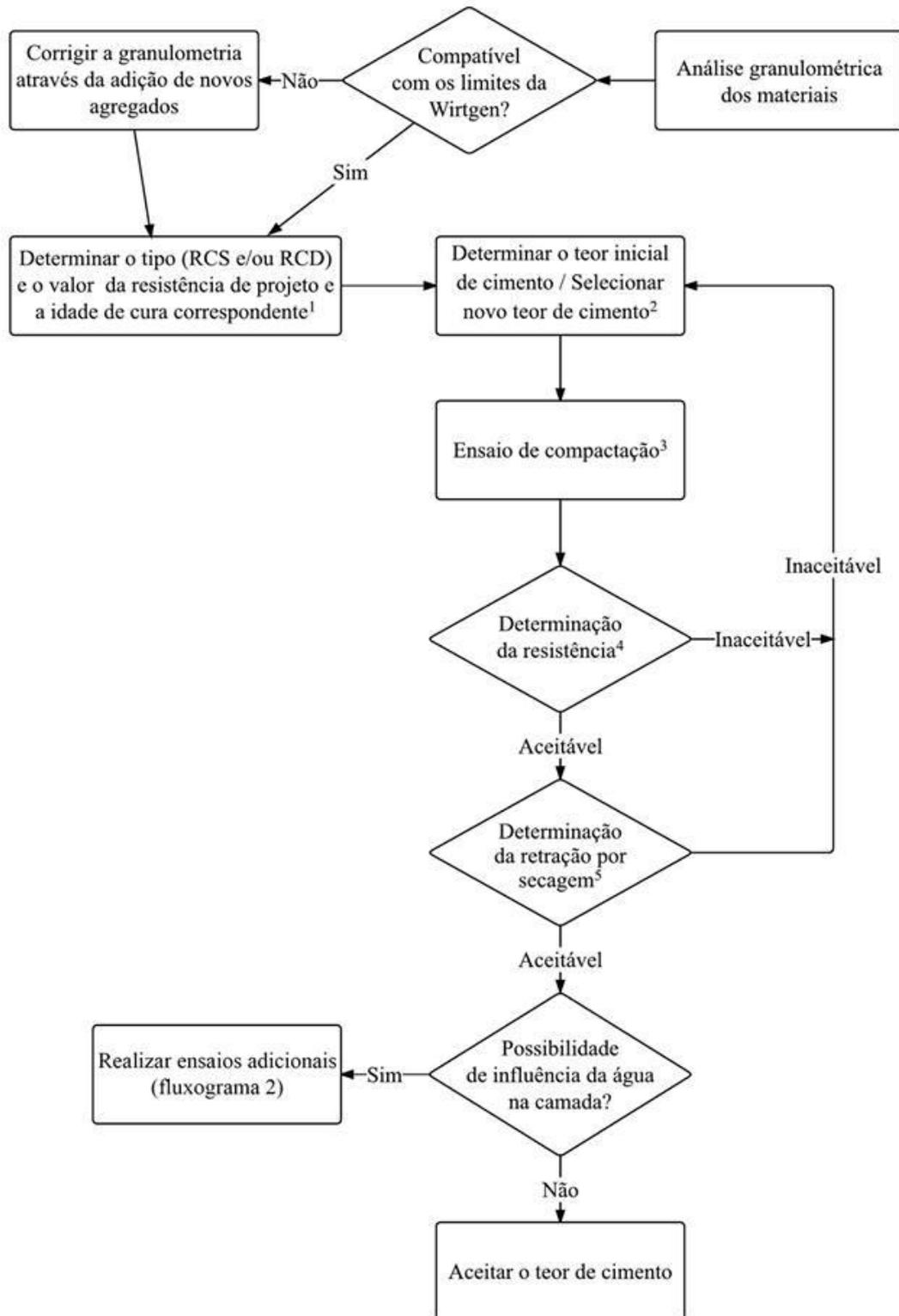
Os resultados obtidos por Fedrigo (2015) demonstraram que as misturas recicladas com cimento são bastante resistentes (RCS entre 1,61 e 6,08 MPa e RCD entre 0,29 e 1,11 MPa) e rígidas (variação de MRD entre 10.390 e 25.719 MPa), sendo que a relação média entre RCD e RCS foi igual a 0,18. Essas apresentaram um bom comportamento frente à ação da água (erodibilidade, ascensão capilar, expansão e absorção) e não demonstraram ter problemas de retração por secagem.

Para a maior parte dos ensaios, o teor de cimento se mostrou a variável mais importante considerando os materiais estudados. Além do mais, a utilização da energia Modificada apresentou resultados superiores àqueles obtidos a partir da compactação na energia Intermediária em grande parte dos ensaios, o que parece compensar o emprego de menores teores de cimento, fato que é bastante interessante já que auxilia na redução de problemas de retração e também minimiza os custos.

Com base no método de dosagem de materiais estabilizados com cimento da Austroads (2002) e nos resultados obtidos em sua pesquisa, Fedrigo (2015) propôs um procedimento de dosagem que pode ser empregado para misturas semelhantes às analisadas em sua dissertação.

O fluxograma está disposto na Figura 2 e as considerações que estão enumeradas são esclarecidas na sequência:

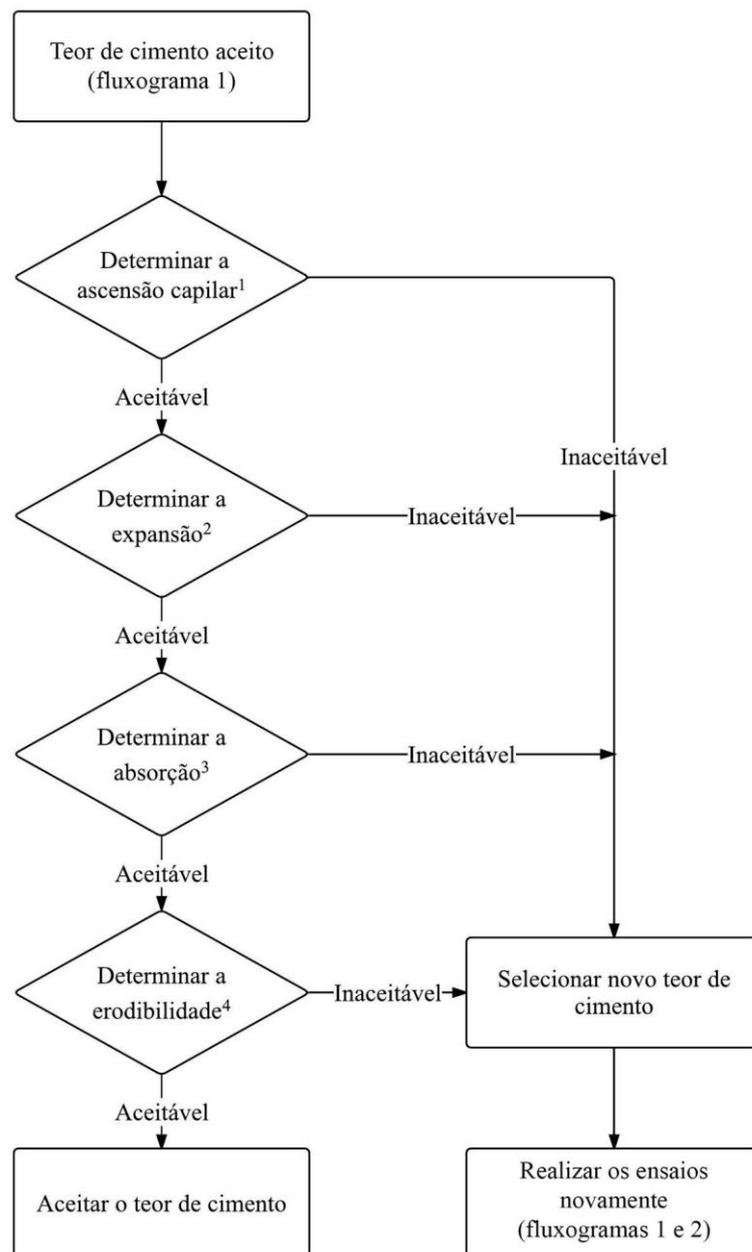
- 1) Fedrigo (2015) sugere valores mínimos de RCS igual a 2,5 MPa e RCD igual a 0,40 MPa, ambos para 7 dias de cura;
- 2) A inclusão de teores de cimento de até 4% é recomendada por Fedrigo (2015), pois quantidades mais elevadas podem acentuar a retração por secagem e aumentar o custo da obra;
- 3) Com relação à energia de compactação, Fedrigo (2015) sugere o emprego da energia Modificada do ensaio de Proctor, já que essa gera grande acréscimo na resistência e rigidez da mistura, sendo possível reduzir o teor de cimento. Além disso, tal energia reduz a porosidade da camada, o que melhora o comportamento perante à água;
- 4) Fedrigo (2015) faz referência a algumas considerações a respeito dos ensaios de RCS e RCD, os quais devem ser moldados em triplicata, sendo que os moldes sugeridos para ensaios de RCS são cilíndricos (10 x 20 cm) e para os ensaios de RCD são do tipo Marshall (10,2 x 6,5 cm). São indicados limites de $\pm 0,5\%$ com relação à umidade ótima e de $\pm 0,2 \text{ kN/m}^3$ para o peso específico aparente seco, para fins de aceitação do CP. A cura das amostras deve ser realizada preferencialmente em câmara úmida com temperatura próxima à 23°C e a umidade relativa maior que 90%. A resistência da mistura é a média de três amostras, porém as resistências individuais devem estar compreendidas no intervalo da média ± 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 e a taxa de carregamento aplicada no ensaio de RCD deve ser igual a 0,80 mm/s;
- 5) A realização do ensaio de retração por secagem é considerado essencial para Fedrigo (2015). Esse sugere o emprego 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. O limite de retração proposto pela Austroads (2002) é igual a 200 μm aos 7 dias de cura.



(Fonte: adaptado de FEDRIGO, 2015)

Figura 2: Sugestão de método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento

Quando a aplicação da técnica mencionada ocorrer em locais em que a água pode influenciar a camada reciclada, Fedrigo (2015) sugere a realização de ensaios adicionais para verificação do comportamento volumétrico e de erodibilidade, os quais estão disponíveis na Figura 3.



(Fonte: adaptado de FEDRIGO, 2015)

Figura 3: Ensaios adicionais para situações em que a camada reciclada pode vir a sofrer influência da água

A indicação numérica na Figura 3 refere-se às notas elaboradas por Fedrigo (2015) com relação a cada ensaio, as quais estão resumidas na sequência:

- 1) Ascensão capilar: Fedrigo (2015) sugere o emprego da norma australiana AS1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996), sendo que 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: é recomendada por Fedrigo (2015) a utilização da norma australiana AS1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996). Como a camada reciclada deve ser empregada como base do pavimento, Fedrigo (2015) sugere que a expansão seja limitada em 0,5% após 72 horas de exposição à lâmina d'água de 1 cm de altura;
- 3) Absorção: Fedrigo (2015) propõe o emprego da norma australiana AS1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996) e sugere a adoção de um valor igual a 2% como limite de absorção;
- 4) Erodibilidade: a norma australiana TM-T186 (RTA, 1994) preconiza a realização do ensaio, entretanto não sugere valores limites. A Austroads (2002) define que se deve reduzir o máximo possível os problemas de erosão, objetivando a obtenção de um material que apresente erosão nula, entretanto, Fedrigo (2015) relata ser bastante difícil alcançar tal condição.

2.3.3.2 Pesquisa de Ely (2014)

Ely (2014) realizou uma pesquisa complementar à de Fedrigo (2015) a partir da análise do comportamento mecânico dos mesmos materiais, porém com elevado teor de fresado (70%). A principal variável analisada foi a energia de compactação, sendo empregadas as energias Intermediária e Modificada. O teor de cimento utilizado foi igual a 4% e os ensaios foram realizados a 3, 7 e 14 dias de cura.

Os resultados de RCS apresentaram variação entre 1,29 MPa e 2,72 MPa, assim como a RCD variou de 0,19 a 0,45 MPa e o MRD entre 3.825 e 8.420 MPa, valores considerados bons, em decorrência da quantidade elevada de fresado. Como era de se esperar, os resultados foram afetados de maneira positiva pelo tempo de cura e energia de compactação.

2.3.3.3 Pesquisa de D'Avila (2015)

A pesquisa realizada por D'Avila (2015) englobou a análise da resistência à tração na flexão (RTF) e deformação à tração na ruptura de misturas compostas por BGTC e fresado asfáltico com adição de polímero, mesmos materiais empregados na presente pesquisa. D'Avila (2015) verificou a influência da taxa de incorporação de cimento (2, 4 e 6%) e da adição de material fresado (20, 50 e 70%). O tempo de cura empregado nos ensaios foi de 28 dias e a energia de compactação utilizada foi a Modificada.

Os resultados de RTF variaram entre 0,32 e 1,34 MPa e a deformação na ruptura apresentou uma ampla variação de resultados, que foram de 165 a 1200 $\mu\epsilon$. D'Avila (2015) observou que o aumento da porcentagem de fresado não interferiu no ganho de resistência à flexão das misturas para qualquer teor de cimento utilizado, apresentando resultados muito próximos entre si. Já o teor de cimento influenciou nos resultados obtidos, pois sua adição aumentou significativamente a resistência à flexão.

Quanto aos resultados de deformação na ruptura, foi constatado que elevadas quantidades de fresado, que é o caso das misturas compostas por 70% desse material, apresentaram resultados bem consideráveis. Com relação à incorporação de cimento, verificou-se que o acréscimo em sua utilização não influenciou na deformação na ruptura em misturas com porcentagem de fresado baixa. Porém, com a elevação da quantidade do material fresado, foram verificadas variações significativas.

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Foi realizado um planejamento experimental desta pesquisa para definição das misturas a serem analisadas, assim como para simplificação da análise dos resultados e maior confiabilidade desses. Nesse capítulo estão descritos os itens referentes ao planejamento da pesquisa, como definição e objetivos de um experimento, justificativa e vantagens obtidas a partir da sua utilização, breve descrição do método empregado, variáveis analisadas e composições estudadas, finalizando com a exposição do modo de análise dos resultados.

3.1 DEFINIÇÃO E OBJETIVOS DE UM EXPERIMENTO

Montgomery (2001) define um experimento como um ensaio ou uma série de ensaios, nos quais são realizadas variações propositais nos dados de entrada de um processo ou sistema, sendo possível observar e identificar as razões das mudanças a partir dos dados de saída. Na engenharia, a experimentação é de grande valia, sendo bastante empregada em projetos de novos produtos, no desenvolvimento de processos industriais e na melhoria de processos, sendo a última, a categoria em que está enquadrada a presente pesquisa.

Segundo Montgomery (2001), os objetivos de um experimento podem incluir:

- Determinar quais variáveis influenciam de maneira significativa a resposta;
- Definir o ajuste das variáveis controláveis para que os dados de saída sejam o mais perto quanto possível do valor nominal desejado;
- Indicar o ajuste das variáveis controláveis, gerando menor variabilidade nos dados de saída;
- Determinar o ajuste das variáveis controláveis para que os efeitos das variáveis incontroláveis sejam minimizados.

3.2 JUSTIFICATIVA E VANTAGENS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Como o objetivo principal da pesquisa é contribuir para a proposição um procedimento de dosagem, estabelecendo valores de referência para resistência e outras propriedades, válidos para misturas recicladas semelhantes, é necessário que a maior quantidade de variáveis e níveis seja analisada para garantir a confiabilidade dos resultados. Entretanto, encontram-se diversas dificuldades e limitações ao elevar a quantidade de ensaios e reproduções sendo que as mais importantes estão diretamente relacionadas ao tempo e à quantidade de material. Portanto, optou-se pelo desenvolvimento de um planejamento experimental para os ensaios realizados na presente dissertação.

Existem diversos benefícios gerados ao empregar técnicas estatísticas no planejamento de experimentos, Button (2012) cita alguns: redução da quantidade de ensaios sem danos à qualidade da pesquisa, estudo de diversas variáveis simultaneamente, identificando os efeitos individuais; definição da confiabilidade dos resultados; possibilidade de realização da pesquisa em etapas, sendo viável o acréscimo de novos ensaios de maneira iterativa; representação do processo analisado a partir de modelos matemáticos; elaboração de conclusões com base em dados qualitativos.

Além dos motivos supracitados, outros fatores foram determinantes para a realização de um planejamento experimental para a presente dissertação, como: prazo restrito, quantidade insuficiente de material (BGTC e solo-cimento), verificação do comportamento com níveis extremos das variáveis analisadas (quantidade de cimento e material fresado) e por ser uma ferramenta essencial para alcançar o objetivo principal da pesquisa, que era a contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem.

Outra razão para sua utilização está relacionada com os resultados obtidos a partir do emprego e execução de um planejamento adequado, já que costumam ser bastante satisfatórios, com menor variabilidade dos mesmos, redução do tempo dedicado às análises, assim como dos custos envolvidos (BUTTON, 2012).

3.3 DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA MATRIZ EXPERIMENTAL

Segundo Button (2012), quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis, o planejamento fatorial é indicado. Um caso particular é o planejamento fatorial 2^k , que possui k fatores e dois níveis, porém como o objetivo da pesquisa é estudar uma quantidade de níveis superior a dois e também realizar o ajuste de modelos quadráticos, Ribeiro e Caten (2014) recomendam a utilização de um Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO).

O PCSO é a soma de um experimento 2^k , mais uma estrela ($2*k$), mais pontos centrais. Sendo que os pontos da parte fatorial (2^k) possibilitam a estimativa de termos lineares e interações e os pontos da estrela permitem a estimativa de efeitos quadráticos puros.

Em um projeto de experimentos existem parâmetros do processo, os quais podem ser alterados durante a execução, podendo afetar as características de qualidade resultantes do processo. Esses estão subdivididos em: controláveis – são aqueles parâmetros do processo que foram escolhidos para serem analisados a diferentes níveis no experimento (teor de cimento e porcentagem de fresado); constantes – referem-se aos parâmetros que são mantidos constantes durante o experimento (energia de compactação); não controláveis (ruído) – contemplam as variáveis que não podem ser controladas pela equipe técnica e são responsáveis pelo erro experimental, variabilidade residual ou variância do erro (temperatura e umidade do dia, desgaste das ferramentas, habilidade e cansaço do operador, entre outros) (RIBEIRO e CATEN, 2014).

Outra vantagem do PCSO é que esse demanda um pequeno número de ensaios e pode abranger blocagem, rotacionalidade e ortogonalidade. O primeiro caso refere-se à divisão em dois blocos, um contendo a parte fatorial e o outro com a parte em estrela, sendo que o ponto central é utilizado para assegurar o mesmo número de ensaios em cada bloco. Um projeto rotacional garante a mesma precisão na estimativa de alguma variável dependente para todos os pontos do espaço amostral. Já a ortogonalidade ocorre quando as estimativas dos coeficientes de termos lineares e quadráticos resultam independentes, de modo que essas estimativas não se alteram quando um termo é retirado do modelo (RIBEIRO e CATEN, 2014).

O ponto central, quando repetido, garante maior confiabilidade aos resultados, a partir da elevação dos graus de liberdade do termo de erro, possibilitando, então, uma avaliação mais precisa da variância experimental (RIBEIRO e CATEN, 2014).

3.4 VARIÁVEIS E COMPOSIÇÕES ESTUDADAS

O seguinte passo realizado foi a definição das variáveis, assim como os respectivos níveis. Então, de acordo com os resultados obtidos por Fedrigo (2015), verificou-se que seria mais importante analisar a variação da porcentagem de fresado e do teor de cimento e fixar a energia de compactação (Modificada). Outro elemento que foi considerado é o tipo de material de base e como esse possui níveis qualitativos, trata-se de um fator categórico.

A matriz experimental definida foi um Projeto Composto de Segunda Ordem composto por três fatores, sendo dois deles quantitativos (A: porcentagem de fresado e B: teor de cimento) e um terceiro fator qualitativo, sendo este último o fator C: material.

O intervalo de investigação do primeiro fator (porcentagem de fresado) considerando a parte fatorial (-1 e +1) foi de 20 a 80%, sendo que a parte da estrela (-1,41 e +1,41) foi extrapolada para 7,57 e 92,43%. Da mesma maneira, para o segundo fator (teor de cimento), considerou-se como parte fatorial (-1 e +1) o intervalo de 2 a 6% e a parte da estrela (-1,41 e +1,41) foi extrapolada para 1,17 e 6,83%. O terceiro fator (material) é qualitativo e o intervalo de investigação contemplou apenas dois níveis (-1 e +1), sendo eles os materiais de base empregados: BGTC e solo-cimento.

Na Figura 4 pode ser verificada a representação das variáveis considerando apenas um material, sendo que as misturas analisadas correspondem aos pontos em vermelho. Os níveis utilizados para os três fatores são apresentados de maneira codificada e real na Tabela 7, sendo possível identificar todas as composições empregadas, assim como a nomenclatura utilizada para cada uma dessas.

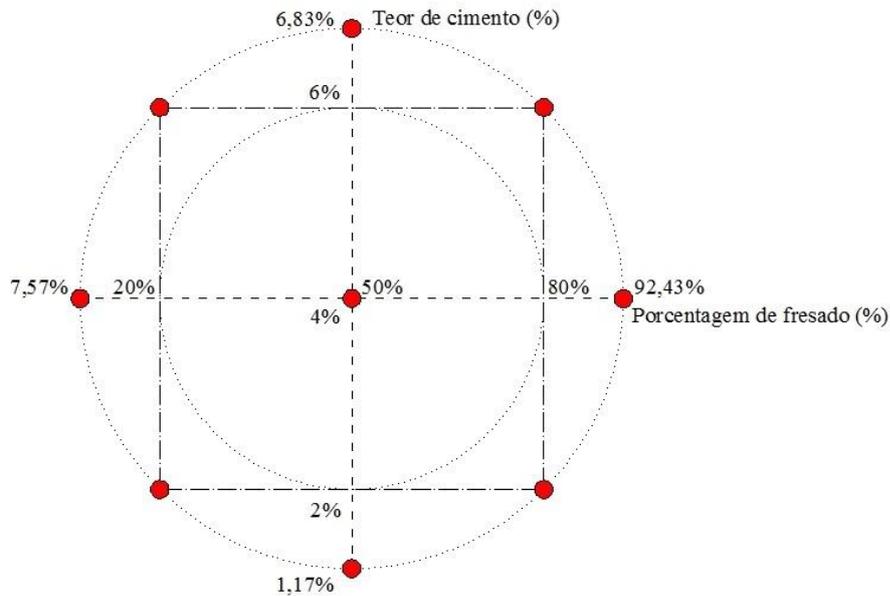


Figura 4: Representação em 2D das variáveis analisadas

Tabela 7: Descrição das misturas analisadas nesta pesquisa

Níveis codificados			Níveis reais			Material	Nomenclatura
A	B	C	Porcentagem de fresado (%)	Teor de cimento (%)			
0	-1,41	-1	50	1,17	BGTC	BGTC 1,17-50	
-1	-1	-1	20	2	BGTC	BGTC 2-20	
+1	-1	-1	80	2	BGTC	BGTC 2-80	
-1,41	0	-1	7,57	4	BGTC	BGTC 4-7,57	
0	0	-1	50	4	BGTC	BGTC 4-50	
+1,41	0	-1	92,43	4	BGTC	BGTC 4-92,43	
-1	+1	-1	20	6	BGTC	BGTC 6-20	
+1	+1	-1	80	6	BGTC	BGTC 6-80	
0	+1,41	-1	50	6,83	BGTC	BGTC 6,83-50	
0	-1,41	+1	50	1,17	SC	SC 1,17-50	
-1	-1	+1	20	2	SC	SC 2-20	
+1	-1	+1	80	2	SC	SC 2-80	
-1,41	0	+1	7,57	4	SC	SC 4-7,57	
0	0	+1	50	4	SC	SC 4-50	
+1,41	0	+1	92,43	4	SC	SC 4-92,43	
-1	+1	+1	20	6	SC	SC 6-20	
+1	+1	+1	80	6	SC	SC 6-80	
0	+1,41	+1	50	6,83	SC	SC 6,83-50	

Sobre a Figura 4, é importante ressaltar que no centro, as amostras são analisadas seis vezes e nos demais pontos apenas uma vez. Isso se deve ao método de planejamento empregado, o qual utiliza a parte central como parâmetro de confiabilidade, como descrito anteriormente.

Na Tabela 7 é apresentada apenas a porcentagem de fresado utilizada em cada mistura, sendo que a quantidade de material de base empregada é complementar a essa, isto é, a soma dos dois materiais é 100%.

Nesta dissertação, as misturas são identificadas conforme a nomenclatura exposta na Tabela 7, sendo que o primeiro termo refere-se ao material de base empregado (fator C), o segundo ao teor de cimento (fator B) e o terceiro à porcentagem de fresado adicionada (fator A).

Com relação ao tempo de cura, esse varia de acordo com o ensaio analisado, conforme Tabela 8. Nos ensaios em que os corpos de prova são moldados para diferentes tempos de cura, os blocos fornecidos pelo programa são triplicados e identificados com o valor da variável analisada.

Tabela 8: Tempos de cura empregados para cada ensaio

Ensaio	Tempo de cura (dias)
Resistências à compressão e à tração; módulo de resiliência	3, 7, 14
Erodibilidade; ascensão capilar, expansão e absorção	7

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir do modelo elaborado no planejamento estatístico, são disponibilizados no *software* os resultados obtidos para cada ensaio e, com isso, o programa fornece a influência de cada variável analisada pelo meio de parâmetros numéricos, modelos e gráficos.

3.5.1 Verificação da existência de valores atípicos

Um valor é considerado atípico quando o resíduo padronizado for maior que 1,96 considerando um nível de confiança de 95%. Alguns dados coletados podem estar fortemente influenciados por fatores externos ao estudo, ou ser provenientes de erros de leitura, além da possibilidade de ocorrência de erros de digitação. Quando existe desconfiança da presença destes dados, deve ser verificada a procedência dos mesmos e caso seja confirmada a hipótese

de serem atípicos, esses são retirados e é feita uma nova regressão (RIBEIRO e CATEN, 2014).

Para a presente pesquisa, optou-se por retirar do modelo apenas as amostras sobre as quais se tinha certeza da ocorrência de algum problema durante a realização do ensaio, ou no caso de valores representativos do ponto central, já que esses possuem outros resultados. Então, para esses episódios, realizou-se o cálculo da média das amostras representativas e com esse resultado, substituía-se o valor atípico.

3.5.2 Reconhecimento dos termos significativos

Após verificar os valores considerados atípicos para o modelo, devem-se determinar quais efeitos principais, quadráticos e interações entre dois fatores, que possuem influência significativa nos resultados para poder excluir aqueles que não interferem nos resultados. Essa análise é determinada pelo valor-p, que é a probabilidade de erros na conclusão.

Segundo Ribeiro e Caten (2014), a probabilidade de errar na afirmação de que o fator controlável tem efeito significativo quando na verdade não tem é representada pelo valor-p. O efeito para ser significativo precisa ter um valor-p inferior a 0,05, isto é, 5%. Sendo que os termos que não são significativos não devem permanecer no modelo. Então, deve-se retirar um termo por vez e rodar novamente a rotina de regressão até definir um modelo com apenas termos significativos. Casos particulares quanto ao valor-p estão citados no capítulo 5, sendo descritos os motivos da sua permanência.

3.5.3 Utilização dos resultados

Depois de verificar a representatividade das amostras e a influência dos termos analisados, alcança-se o resultado final, que é disponibilizado a partir da equação de regressão. A partir dessa, verifica-se a interferência de cada variável analisada, sendo possível determinar qualquer parâmetro ou resultado, desde que se conheça os demais dados.

O *software* fornece o coeficiente de determinação R^2 , que é uma medida da qualidade da equação de regressão em relação ao ajuste dos dados amostrais (RIBEIRO e CATEN, 2014). Quanto mais próximo de 1 (ou 100%), indica que o resultado fornecido pela equação é mais propínquo daquele alcançado a partir de ensaios.

No relatório gerado pelo *Minitab* são apresentados os resultados obtidos para cada ensaio, indicando a análise de variância, o sumário do modelo, os coeficientes codificados, a equação de regressão em unidades não codificadas e as indicações sobre os valores atípicos. A partir dos coeficientes codificados, foi possível verificar os efeitos principais, dos termos quadráticos e das interações entre dois fatores a fim de quantificar a influência das variáveis analisadas.

O *Minitab* fornece ainda, a opção de representação gráfica dos resultados de diferentes maneiras. Com isso, foram verificados os gráficos que representavam melhor os resultados para cada ensaio, de maneira a facilitar a análise dos mesmos. Esses, por sua vez, são apresentados e explicados no capítulo 5.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo descrevem-se as diferentes etapas realizadas para alcançar os resultados ansiados na pesquisa. Para isso, são apresentados a seguir, os materiais empregados (materiais de bases cimentadas, fresados asfálticos e cimento), assim como os métodos adotados na execução de cada ensaio.

4.1 MATERIAIS

A presente pesquisa buscou estudar o comportamento de duas estruturas (base e revestimento asfáltico) empregadas usualmente em pavimentos semirrígidos quanto à reciclagem dessas camadas e incorporação de cimento. Os materiais de base (BGTC e solo-cimento) foram coletados pela concessionária responsável pela rodovia, assim como a fresagem do revestimento asfáltico e recolhimento desse material. Ambos são especificados neste item, o qual expõe sua proveniência. Está detalhado também, o cimento empregado em todas as composições analisadas.

4.1.1 BGTC e fresado asfáltico com adição de polímero

Os materiais estudados (BGTC e fresado asfáltico) são provenientes da rodovia Ayrton Senna (SP-070) e foram coletados no km 32 da Pista Oeste, Figura 5. Ressalta-se que o asfalto presente no revestimento era modificado pela adição de polímero.



Figura 5: Materiais empregados nas misturas contendo BGTC

4.1.2 Solo-cimento e fresado asfáltico convencional

Tanto o solo-cimento quanto o concreto asfáltico com ligante convencional CAP-50/70 foram coletados na rodovia SP-425, no município de Barretos. Como o solo-cimento é com maior presença de finos, em algumas misturas foi necessária a adição de uma brita na fração 3/8”, visando a correção granulométrica. Na Figura 6 podem ser identificados os materiais empregados nessas misturas.



Figura 6: Materiais empregados nas misturas contendo solo-cimento

4.1.3 Cimento

As classes de cimento CP II E, CP II F e CP II Z são indicadas para obras de reciclagem por apresentarem as seguintes características: prazo de trabalhabilidade compatível com o método construtivo, resistência mecânica intermediária e calor de hidratação moderado, importante para apaziguar o aparecimento de trincas por retração (PAIVA *et al.*, 2013).

O cimento utilizado no programa experimental foi o CP II E 32, pois se trata de um cimento composto e de classe de resistência intermediária, segundo a NBR 11578 (ABNT, 1991), sendo recomendado para obras de reciclagem de pavimentos pela *Association mondiale de la Route* (AIPCR, 2003).

4.2 MÉTODOS DE ENSAIO

O programa experimental desta dissertação foi elaborado conforme método de dosagem proposto por Fedrigo (2015), conforme item 2.3.3.1. Esse se baseia em normas australianas

para os ensaios de variação volumétrica e de erodibilidade e de normas nacionais para avaliação do comportamento mecânico.

Além dos ensaios realizados por Fedrigo (2015), julgou-se necessária a verificação do coeficiente de Poisson dos materiais empregados na pesquisa para posterior utilização na determinação do módulo de resiliência das misturas estudadas. O que motivou sua realização foi a escassez de informação de valores deste parâmetro para materiais reciclados.

Nesta dissertação os ensaios estão divididos em quatro grupos: caracterização dos materiais e misturas (análise granulométrica, determinação do teor de ligante asfáltico do material fresado e compactação), comportamento mecânico (resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, determinação do coeficiente de Poisson e módulo de resiliência na compressão diametral), variação volumétrica (ascensão capilar, expansão e absorção) e erodibilidade. Esses são apresentados na sequência.

4.2.1 Caracterização dos materiais e das misturas

Enquadram-se na caracterização dos materiais, os ensaios de análise granulométrica e determinação do teor de ligante asfáltico do material fresado. A caracterização das misturas compreende o ensaio de compactação e granulometria das composições. Esses foram realizados de acordo com seus respectivos métodos de ensaios e estão descritos a seguir.

4.2.1.1 Análise granulométrica

Foi realizada a análise granulométrica dos materiais fresados e das bases (BGTC e SC) por meio do peneiramento de duas ou três amostras do material (dependendo do resultado obtido a partir dos dois primeiros ensaios), adotando as recomendações e instrumentos propostos pelo método de ensaio DNER-ME 083 (DNIT, 1998a). A especificação de material DNER-EM 035 (DNIT, 1995) foi utilizada como referência para definição das peneiras usadas no ensaio. Porém foram excluídas as peneiras com abertura de 50 e 75 mm e adicionada a peneira com 6,38 mm em função da dimensão dos agregados.

Antes do peneiramento, as amostras de base foram secas em estufa, porém os materiais fresados foram apenas secos ao ar, caso contrário ocorreria a queima do ligante asfáltico. Cabe ressaltar que foi realizado o peneiramento manual até a peneira com abertura de 1,2 mm.

A partir daí, passou-se a realizar o peneiramento mecânico do material. O tamanho das amostras foi determinado de acordo com a dimensão máxima característica do agregado, sendo então de 10 kg para os fresados asfálticos e BGTC e 5 kg para o solo-cimento.

4.2.1.2 Distribuição granulométrica das misturas

A partir dos resultados obtidos por meio da análise granulométrica dos materiais, foi estimada a granulometria das misturas. Com isso, foi verificado se essas estavam dentro da faixa proposta para a reciclagem com cimento pelo manual de reciclagem a frio da Wirtgen (2012), adotado por ser referência no assunto. Para aquelas misturas que não se enquadraram na faixa granulométrica estipulada foi necessária a adição de brita 3/8” em porcentagem compatível, a qual foi definida a partir da massa seca da mistura (fresado e base).

4.2.1.3 Determinação do teor de ligante asfáltico do material fresado

A extração do ligante e determinação do teor desse no material fresado foi realizada a partir do extrator por refluxo, seguindo os procedimentos contidos no método de ensaios DAER/RS EL 213/01 (DAER, 2001).

As amostras de material foram de aproximadamente 250 g, obtidas por quarteamento de uma porção de 1000 g. O ensaio deve ser realizado no mínimo com duas amostras, que devem ser previamente aquecidas em estufa com temperatura entre 105 e 110°C, sendo posteriormente acondicionadas no interior de cones de papel filtro para subsequente colocação dentro dos cones metálicos do extrator por refluxo. Ressalta-se que a massa seca dos cones de papel foi aferida anteriormente ao ensaio.

Depois de posicionados os cones na estrutura do aparelho, o ensaio foi realizado a partir da passagem de solvente, que no presente caso foi o tricloroetileno, sendo finalizado quando esse adquiriu coloração transparente. O teor de ligante do fresado asfáltico foi determinado a partir das massas inicial e final de cada amostra, calculando-se então a média dos valores obtidos para cada material.

4.2.1.4 Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados seguindo a metodologia prescrita no método de ensaio DNIT-ME 164 (DNIT, 2013b), obtendo-se como resultado, valores de massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{sm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótimo ($\omega_{ót}$) das misturas.

Como o material fresado não pode sofrer aquecimento por causa da queima do ligante, optou-se por determinar a umidade de cada material primeiro (base e fresado) e a partir desses resultados, calcular a quantidade de base e fresado asfáltico necessária para o ensaio. Os materiais foram separados e colocados em uma bandeja, acrescentando-se o cimento (estimado a partir da massa seca da mistura), e realizando-se a misturas desses (Figura 7 - a).

Adicionou-se uma quantidade inicial de água para a realização do primeiro ponto do ensaio e após a homogeneização da mistura (Figura 7 - b), moldou-se o corpo de prova em cinco camadas, aplicando-se o número de golpes necessário (Figura 8 – a), que para o presente caso foram 55 golpes por camada, equivalente a energia Modificada.



Figura 7: Realização da mistura dos materiais (a) antes e (b) depois de acrescentar água (SC 6-20)

O molde foi pesado vazio e após o término de cada moldagem para possibilitar a definição dos parâmetros. O CP foi extraído do molde com auxílio de um macaco hidráulico (Figura 8 – b) e foram retiradas duas amostras de material da camada intermediária, que foram colocadas em cápsulas (com massa conhecida), pesadas e acondicionadas em estufa com temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, sendo determinada a massa novamente quando as amostras estivessem completamente secas.

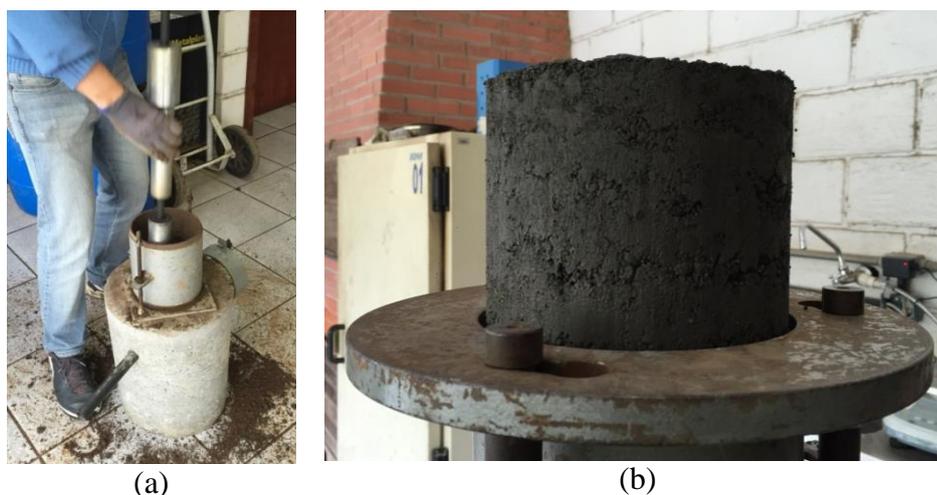


Figura 8: Procedimento para (a) compactação de uma das camadas e (b) aparência da mistura após ensaio de compactação com teor de umidade ótimo (BGTC 6,83-50)

Esse procedimento foi realizado no mínimo cinco vezes, para que resultasse em uma curva de compactação, sendo que para cada ponto adicionou-se uma quantidade de água superior à anterior.

Quando finalizadas todas as etapas, determinou-se a umidade de cada ponto, bem como as massas específicas (úmida e seca) a partir da massa de material e das dimensões do cilindro, sendo que foi utilizado o grande, assim como o soquete da mesma dimensão, ambos do ensaio de Proctor. A partir dos resultados, traçou-se a curva de compactação para obtenção dos parâmetros de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo, os quais foram utilizados para a realização dos demais ensaios.

4.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Igualmente aos ensaios de compactação, anterior à separação de material para moldagem dos corpos de prova, determinou-se a umidade dos materiais empregados para que a quantidade estivesse coerente com a necessária. Após isso, realizou-se a pesagem e separação desses, os quais foram acondicionados em sacos plásticos, devidamente identificados, até a realização da moldagem dos CPs.

Quando os corpos de prova foram moldados, os materiais foram retirados dos sacos plásticos, realizando-se a mistura manual da amostra. O cimento foi acrescentado assim que essa estivesse homogênea, sendo que sua quantidade é relacionada sobre o peso de material seco. Por último, adicionava-se água, que foi calculada para alcançar a umidade ótima.

Com a mistura pronta, aferiu-se a quantidade de material necessária para cada camada e compactou-se até alcançar a altura desejada, sendo que o número de golpes foi ajustado para reproduzir a massa específica aparente seca máxima obtida a partir dos ensaios de compactação. As particularidades da moldagem de cada ensaio estão especificadas na Tabela 9, descrevendo o soquete e os moldes empregados, o número de camadas por corpo de prova e quantidade de corpos de prova por ensaio, totalizando em 314 CPs.

Tabela 9: Características da moldagem e quantidade de corpos de prova para cada ensaio realizado

Ensaio	Soquete	Molde	Número de camadas	CPs por ensaio
Resistência à compressão simples	Proctor grande	Cilíndrico / Proctor pequeno (10 x 20 cm)	5	84
Resistência à tração por compressão diametral	Marshall	Cilíndrico / Marshall (10,2 x 6,5 cm)	1	168*
Módulo de resiliência diametral	Marshall	Cilíndrico / Marshall (10,2 x 6,5 cm)	1	84
Coefficiente de Poisson	Proctor grande	Cilíndrico / Proctor pequeno (10 x 20 cm)	5	6
Ascensão capilar, expansão e absorção	Proctor grande	Cilíndrico / Proctor pequeno (10 x 12 cm)	3	28
Erodibilidade	Proctor grande	Cilíndrico / Proctor grande (15,24 x 11,43 cm)	5	28

*Os corpos de prova ensaiados a módulo de resiliência foram reaproveitados para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Nas moldagens com número de camadas superior a um, realizou-se a escarificação de maneira a garantir aderência entre as camadas. Para executar a última camada, foi necessária a colocação de um cilindro complementar, visando o completo preenchimento do molde. Quando finalizada a compactação do corpo de prova, retirava-se o cilindro complementar e com auxílio de material específico, aplanava-se o corpo de prova.

Depois de finalizada a moldagem de cada CP, coletava-se uma amostra da mistura para posterior verificação da umidade. Nos corpos de prova de resistência à compressão simples e de determinação do coeficiente de Poisson, realizou-se uma espécie de remate com pasta de cimento, o qual é responsável pela regularização da superfície.

Após o término da moldagem dos corpos de prova, esses eram cobertos com sacos plásticos para que não houvesse contato com umidade externa, onde permaneciam por 24 horas, conforme Figura 9 (a). Depois do período, eram desmoldados e colocados dentro do mesmo

saco plástico, porém imersos em água, em local com temperatura constante até o término do tempo de cura, o que pode ser visualizado na Figura 9 (b).



Figura 9: Acondicionamento dos corpos de prova (a) antes e (b) depois da desmoldagem

Tal procedimento de desmoldagem não foi realizado para os CPs de resistência à tração na compressão diametral e de módulo de resiliência, sendo que esses eram desmoldados ao término da moldagem com auxílio de um extrator. Já a cura a partir da imersão dos corpos de prova (dentro de sacos plásticos) foi realizada para todos os ensaios com exceção do de erodibilidade, já que para tais CPs realizou-se a cura acelerada em estufa.

4.2.3 Comportamento mecânico

Para que um pavimento suporte as cargas a ele solicitadas, é necessário que esse esteja com boas condições estruturais, sendo que existem diferentes parâmetros que indicam o estado da estrutura de pavimentação, os quais podem ser avaliados a partir de diferentes ensaios mecânicos.

O presente programa experimental conta com os principais ensaios que podem ser realizados para análise de comportamento mecânico de um pavimento, visando à utilização de materiais cimentados. Como é necessário definir o coeficiente de Poisson para posterior utilização no ensaio de módulo de resiliência, optou-se por explicar a metodologia empregada em tal ensaio neste tópico da dissertação. A seguir, encontra-se a discriminação individual dos ensaios realizados, assim como a metodologia utilizada e as principais características a respeito da sua realização.

4.2.3.1 Resistência à compressão simples

Quando se trata de materiais para reciclagem com cimento, é imprescindível o desenvolvimento de ensaio de resistência à compressão simples, pois além de sua realização ser fácil, esse é executado com frequência e está presente em grande parte das pesquisas relacionadas ao tema, fazendo com que seja de fácil comparação.

Com relação ao rompimento dos corpos de prova, foi utilizada uma prensa hidráulica digital e os ensaios foram realizados conforme DNER-ME 091 (DNIT, 1998b). É possível observar na Figura 10, os CPs logo após serem retirados da cura e prontos para realização do ensaio de RCS.



Figura 10: Corpos de prova antes do ensaio de RCS

Anterior ao ensaio aferiu-se as medidas do diâmetro e da altura de cada corpo de prova com auxílio de um paquímetro com precisão de centésimo de milímetro. Efetuadas as medidas, o corpo de prova era posicionado sobre e sob discos de neoprene, aplicando-se a carga de forma contínua, com aumento de tensão média sobre o corpo de prova de 0,25 MPa/s (Figura 11). O ensaio era finalizado assim que ocorresse a ruptura do corpo de prova (Figura 12), então se realizava o registro da máxima carga alcançada para posterior determinação da resistência à compressão simples de cada amostra.



Figura 11: Ensaio de resistência à compressão simples em andamento



(a)



(b)

Figura 12: Corpos de prova rompidos à RCS - (a) BGTC 4-50 com 3 dias de cura e (b) SC 1,17-50 com 7 dias de cura

4.2.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

O pavimento, quando solicitado ao tráfego, sofre diversos tipos de carregamentos em diferentes posições das camadas que compreendem sua estrutura. Um deles gera tração por flexão da parte inferior da camada, a qual deve resistir com coesão ou cimentação, por isso, deve-se à importância da realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Esse, por sua vez, determina a máxima tensão de tração que o corpo de prova pode ser submetido, quando sujeito à carregamento por compressão diametral. Optou-se por relacionar os resultados de RCD com o de RCS, a fim de verificar uma possível correlação entre esses.

O ensaio foi realizado com base no método de ensaio DNIT-ME 136 (DNIT, 2010a), desenvolvido para misturas asfálticas. Precedente à sua realização aferiu-se o diâmetro e a altura de cada corpo de prova com um paquímetro com precisão de centésimo de milímetro.

Para realizar o ensaio, posicionava-se o corpo de prova na prensa com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos curvos e na face inferior era aplicada a carga progressivamente, com velocidade de deformação de 0,8 mm/s (Figura 13 – a). O ensaio cessa assim que ocorre a ruptura (Figura 13 – b), então se anotava o valor da carga e a partir desse resultado e das medidas de diâmetro e altura do corpo de prova, determinou-se a resistência à tração de cada amostra através da Equação 1.



Figura 13: Ensaio de RCD - (a) posicionamento do corpo de prova na prensa (SC) e (b) corpo de prova depois de ensaiado (BGTC)

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

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.

4.2.3.3 Determinação do coeficiente de Poisson

Com o objetivo de aperfeiçoar os resultados obtidos a partir do ensaio de módulo de resiliência, optou-se pelo desenvolvimento do ensaio de determinação do coeficiente de Poisson. Para isso, utilizou-se como referência a norma ASTM C469/469M - 14 (ASTM, 2014), a qual é empregada para determinação do módulo de elasticidade estático e coeficiente de Poisson do concreto na compressão. O motivo de sua utilização é a insuficiência de aparelhagem para realização do ensaio na compressão diametral, assim como a inexistência de normas empregadas para a presente avaliação em materiais cimentados.

Para a realização do presente ensaio, optou-se pela avaliação apenas das misturas centrais (4-50) em triplicata, pelo fato da disponibilidade de materiais ser insuficiente. A escolha dessa combinação se fez por dois motivos: por ser o ponto central, contendo então as variações médias dos parâmetros analisados e pela representatividade da amostra, já que para todos os ensaios essa mistura é a única que é replicada.

A moldagem dos corpos de prova seguiu os parâmetros empregados no ensaio de resistência à compressão simples, os quais foram ensaiados com tempo de cura de 14 dias. A prensa utilizada para a realização do presente ensaio é a mesma empregada nos ensaios de RCS, porém com aparelhagem adicional para leitura dos deslocamentos (transversal e longitudinal), conforme Figura 14.

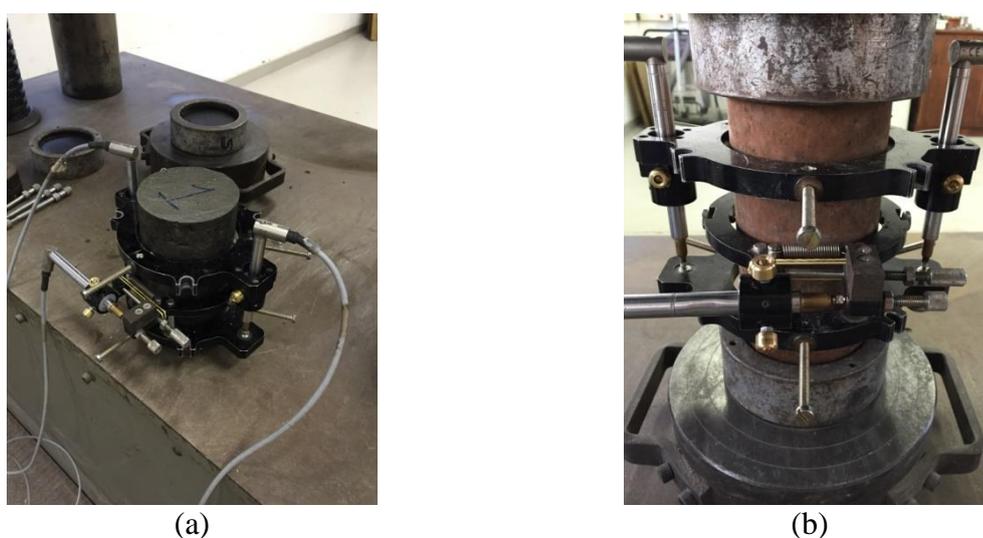


Figura 14: Ensaio para determinação do coeficiente de Poisson - (a) preparação do CP (BGTC) e (b) realização do ensaio (SC)

Em virtude da aplicação de 40% da resistência de pico, a norma indica o ensaio de no mínimo dois CPs à RCS previamente ao ensaio de coeficiente de Poisson. Para determinação da resistência, utilizou-se a média dos seis CPs ensaiados para cada material aos 14 dias de cura.

O ensaio consiste na aplicação de uma carga contínua com taxa de aplicação de 250 ± 50 kPa/s, porém como a tensão de ruptura das misturas é bastante baixa, se comparada com CPs de concreto, o equipamento alcança de maneira bruta a tensão desejada, sem conseguir detectar o comportamento do material detalhadamente. Portanto, o ensaio foi realizado de maneira manual, carregando-se o CP até alcançar 40% da RCS (permanência por 30 segundos) e após isso, descarregar até obter uma deformação longitudinal equivalente a 50 microstrain. O procedimento foi realizado três vezes para cada CP, considerando-se apenas o terceiro ciclo de carregamento.

Os resultados obtidos foram disponibilizados em arquivo de *excel*, os quais foram analisados, sendo possível determinar o coeficiente de Poisson pela Equação 2.

$$\mu = \frac{(\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1})}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (2)$$

Onde:

- μ – coeficiente de Poisson;
- ε_{t1} – deformação transversal na metade da altura da amostra produzida pela tensão correspondente a uma deformação longitudinal de 50 microstrain;
- ε_{t2} – deformação transversal na metade da altura da amostra produzida pela tensão correspondente a 40% da RCS;
- ε_1 – deformação longitudinal mais próxima de 50 microstrain;
- ε_2 – deformação longitudinal produzida pela tensão correspondente a 40% da RCS.

4.2.3.4 Módulo de resiliência

Resiliência é conhecida como energia armazenada num corpo deformado elasticamente, retornando sem dano assim que as tensões param de ser aplicadas. Já o módulo de resiliência é um método aceito internacionalmente para caracterizar materiais tanto para o projeto de

pavimentos como para sua avaliação de desempenho. Como ele indica uma propriedade básica do material, a qual pode ser empregada na análise mecânica de estruturas de pavimentos, é imprescindível sua avaliação (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Na presente pesquisa, o MR foi determinado pela compressão diametral dos CPs, com base no método de ensaio DNIT-ME 135 (DNIT, 2010b), que é específico para misturas asfálticas. Para realização do ensaio é necessário conhecer duas características do material a ser ensaiado: resistência à tração (item 4.2.3.2) e coeficiente de Poisson (item 4.2.3.3).

O ensaio necessita de um programa computacional, responsável por verificar o comportamento do corpo de prova e fornecer os resultados (Figura 15 - a), neste caso foi empregado o *software Seepav*. Depois de configurados os dados no *software*, posicionava-se CP, e dispunha o transdutor de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) e sobre o conjunto assentava-se o pistão de carga (Figura 15 - b). O ensaio foi realizado aplicando-se 1 ciclo de carga por segundo (1 Hz) com carga equivalente a 30% da tensão de ruptura obtida no ensaio de RCD.

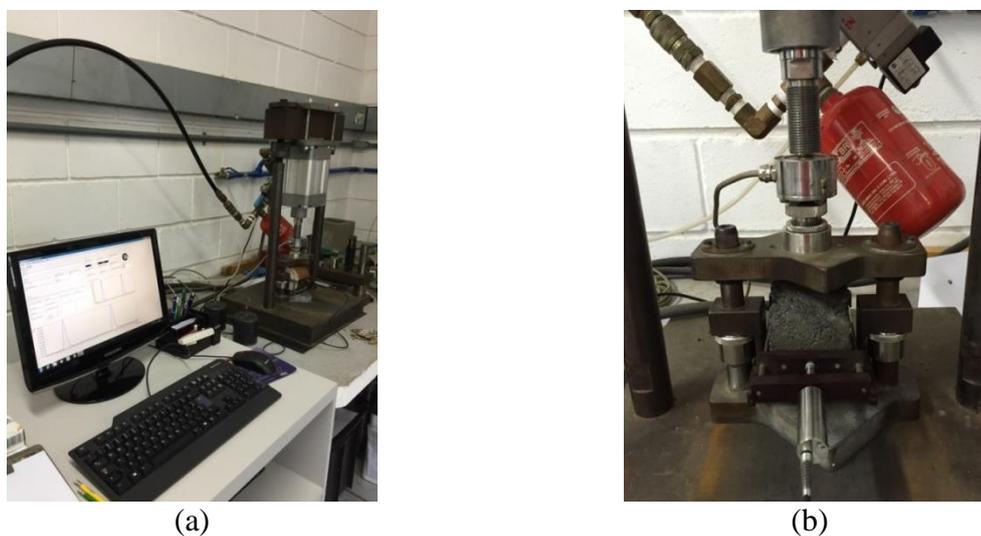


Figura 15: Ensaio de MR - (a) andamento do ensaio com detalhamento do sistema computacional (SC) e (b) realização do ensaio (BGTC)

O módulo de resiliência consiste em uma relação entre a carga aplicada diametralmente no corpo de prova e a deformação resiliente registrada pelo *software Seepav*, assim como a altura do CP, conforme Equação 3.

$$MRD = \frac{Fd}{100\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (3)$$

Onde:

- MRD – módulo de resiliência diametral, em MPa;
- F_d – carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, em N;
- Δ – deslocamento resiliente para aplicações de carga (F), em cm;
- H – altura do corpo de prova, em cm;
- μ – coeficiente de Poisson.

Cada ensaio realiza três leituras de deslocamento, resultando em três valores de módulo de resiliência. Para a presente pesquisa, optou-se por ensaiar cada CP no mínimo duas vezes, alterando a posição do LVDT, já que pode ocorrer bastante variação para cada ensaio. Desta maneira, a tendência do módulo de resiliência foi verificada a partir dos resultados obtidos, e dentre aqueles que caracterizavam melhor o CP, utilizava-se o resultado com menor desvio padrão entre as três leituras.

Como se trata de um ensaio não destrutivo, depois de ser ensaiados a módulo de resiliência, os CPs foram rompidos diametralmente, a fim de se obter mais um valor de resistência à tração na compressão diametral.

4.2.4 Variação volumétrica

Um pavimento não deve sofrer alterações em excesso em sua forma, já que podem ocasionar deformações, trincas e até a ruptura da estrutura, provocando danos à segurança da rodovia. Quando se trata de estruturas que contenham materiais cimentados, a avaliação do comportamento volumétrico se torna mais importante, já que o cimento é responsável pela retração do material.

Nesta dissertação, optou-se por desenvolver o ensaio que verifica a ascensão capilar, expansão e absorção de materiais cimentados, conforme indicado pelo método da Austroads (2002).

4.2.4.1 Ascensão capilar, expansão e absorção

É muito importante avaliar a estrutura do pavimento quando esse está em contato com a água, por isso buscou-se analisar nessa pesquisa o comportamento volumétrico frente à ação freática a partir da norma australiana AS 1141.53 (STANDARDS AUSTRALIA, 1996).

Em relação aos procedimentos de preparação e cura da amostra, esses foram similares aos outros ensaios realizados, em virtude da uniformização dos mesmos. Ao finalizar a cura dos corpos de prova, esses foram dispostos em estufa com temperatura entre 50 e 60°C, até constância de massa (Figura 16 - a). Depois de retirá-los da estufa, foram realizadas as verificações quanto à massa desses, assim como foram aferidas as dimensões da base de cada um. Em seguida, esses foram dispostos em recipientes com lâmina d'água de 1 cm (Figura 16 - b), onde permaneceram por 72 horas.



Figura 16: Ensaio de ascensão capilar, expansão e absorção - (a) secagem dos CPs em estufa a 60°C e (b) colocação dos CPs em lâmina d'água de 1 cm

A cada 24 horas de exposição à água, foram verificadas as dimensões do diâmetro e da altura do corpo de prova, assim como da ascensão sofrida por esse e a massa da amostra. Na Figura 17 é possível verificar o comportamento das amostras frente à ação da água com diferentes tempos de exposição.



Figura 17: Ensaio de ascensão capilar, expansão e absorção - exposição à água dos CPs pelo período de (a) 24 horas e (b) 72 horas

Ao empregar os dados obtidos durante o ensaio nas Equações 4, 5 e 6, determinaram-se a ascensão capilar, a expansão e a absorção das amostras para os diferentes tempos de exposição à água.

$$AC = \left(\frac{h}{H} \right) 100 \quad (4)$$

$$E = \left(\frac{(D_2)^2}{(D_1)^2} - 1 \right) 100 \quad (5)$$

$$A = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_3} \right) 100 \quad (6)$$

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;
- D₁ – diâmetro da base do corpo de prova após seco em estufa, em cm;

- D_2 – diâmetro da base do corpo de prova após período na lâmina d'água, em cm;
- m_1 – massa do corpo de prova após seco em estufa, em g;
- m_2 – massa do corpo de prova após período na lâmina d'água, em g;
- m_3 – massa do corpo de prova após a moldagem, desconsiderando a umidade adicionada, em g.

4.2.5 Erodibilidade

A durabilidade está relacionada com o que o pavimento pode suportar até que se encerre a vida útil do mesmo, podendo-se considerar as cargas provenientes do tráfego, as ações climáticas entre outras adversidades. Fatores como esses podem ser analisados através de ensaios, sendo que nesta dissertação, verificou-se a erodibilidade das misturas recicladas com cimento, a qual representa a erosão de finos sofrida pela ação do tráfego.

A erodibilidade está relacionada com o processo de erosão acelerada, a qual é provocada por diferentes fatores e varia muito dependendo do material empregado na composição da estrutura, fato importante para verificação desse fator. A referência empregada na realização do presente ensaio é a norma australiana TM-T186 (RTA, 1994).

Depois de moldados os corpos de prova, realizou-se a cura acelerada desses por um período de 7 dias, devidamente protegidos para prevenir a secagem (envoltos por jornal úmido e papel alumínio), garantindo a umidade necessária para hidratação do cimento (Figura 18).

Finalizada a cura, esses foram retirados da estufa, descobertos dos materiais que asseguraram a cura e colocados dentro de um recipiente com lâmina d'água de 2,5 cm por uma hora. Então, durante esse período, prendeu-se um suporte para as sobrecargas (Figura 19 - a).

Ao término da uma hora, o CP foi colocado em um recipiente cilíndrico metálico com 20 cm de diâmetro contendo 200 ml de água, posicionaram-se as sobrecargas com 6,75 kg e o conjunto foi disposto em uma mesa vibratória, a qual permanecia ligada durante aproximadamente 15 minutos (Figura 19 – b).



(a)



(b)

Figura 18: Procedimento de cura acelerada para os CPs de erodibilidade - (a) estufa a 60°C e (b) detalhe do material utilizado para envolver o CP



(a)



(b)

Figura 19: Ensaio de erodibilidade - (a) CPs expostos à lâmina d'água de 2,5 cm e (b) realização do ensaio

O material desprendido do corpo de prova foi lavado e peneirado em peneira com abertura de 2,36 mm. O material passante foi seco em estufa com temperatura de 110°C e foi aferida sua massa. Na Figura 20 pode ser visualizada a aparência do material depois de seco.



Figura 20: Aparência do material desprendido durante ensaio de erodibilidade

A erodibilidade foi determinada a partir da relação entre a quantidade passante na peneira 2,36 mm e do tempo que permaneceu vibrando, conforme Equação 7.

$$ER = \frac{M_F}{15} \quad (7)$$

Onde:

- ER – erodibilidade, em g/min;
- M_F – massa de finos erodidos, em g.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na pesquisa, os quais são analisados, discutidos e comparados com os alcançados por outros autores. A apresentação dos resultados segue a mesma ordem dos procedimentos metodológicos.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A fase inicial incluiu a caracterização dos materiais, através da análise granulométrica e do ensaio de determinação do percentual de ligante asfáltico do material fresado. Os resultados obtidos estão dispostos e comentados na sequência.

5.1.1 Análise granulométrica

As granulometrias dos materiais utilizados em camadas de base de pavimentos e que estão sendo empregados na pesquisa são apresentados na Figura 21, sendo possível verificar a grande diferença entre eles. Como o solo-cimento é um material predominantemente fino, foi necessária a adição de brita na fração 3/8" para enquadrá-lo na faixa granulométrica da Wirtgen, adotada na pesquisa de Fedrigo (2015). Ao contrário do solo-cimento, a BGTC é bem graduada, o que faz com que seja de fácil mistura, enquadrando-se nos limites propostos pela Wirtgen (2012).

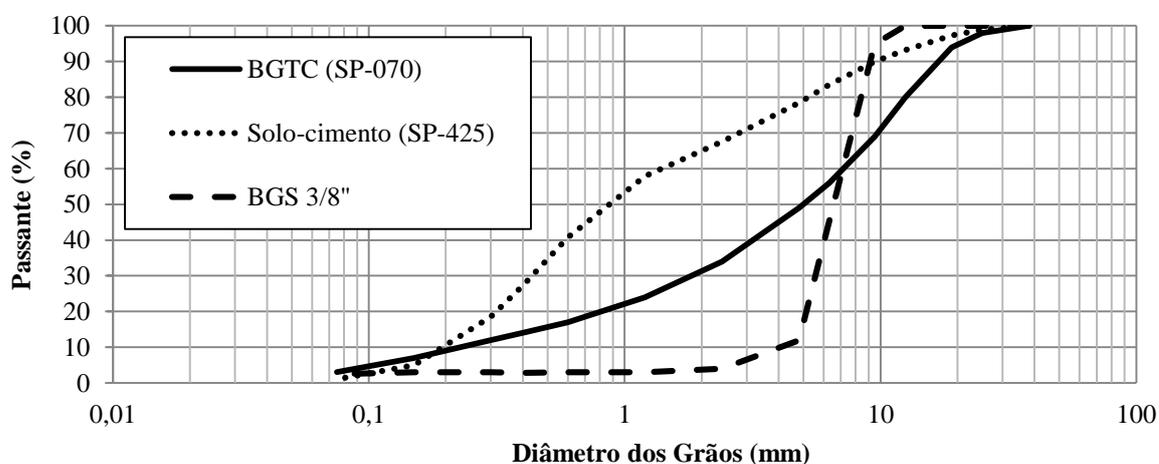


Figura 21: Curvas granulométricas dos materiais de base empregados

Na Figura 22 são mostradas as distribuições granulométricas dos materiais fresados, sendo possível verificar o fresado com ligante polimerizado (SP-070) apresenta granulometria mais grosseira se comparado com o fresado com ligante convencional (SP-425).

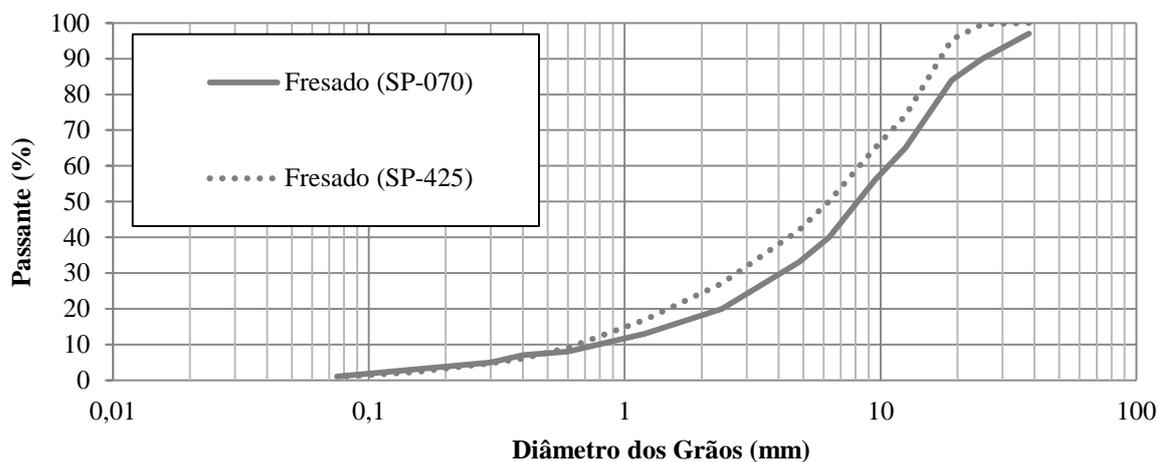


Figura 22: Curvas granulométricas dos fresados asfálticos empregados

5.1.2 Teor de ligante asfáltico do material fresado

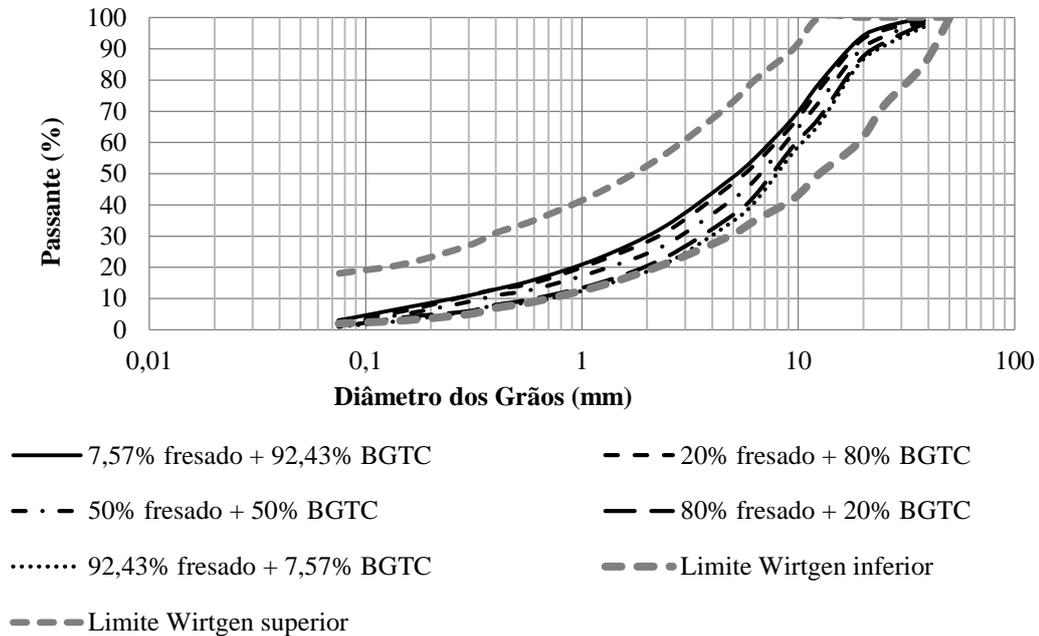
A partir da realização do ensaio, constatou-se que o fresado com adição de polímero (coletado na rodovia SP-070) apresentou 4,83% de ligante asfáltico, valor similar ao encontrado no fresado convencional (obtido na rodovia SP-425), igual a 4,91%.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS

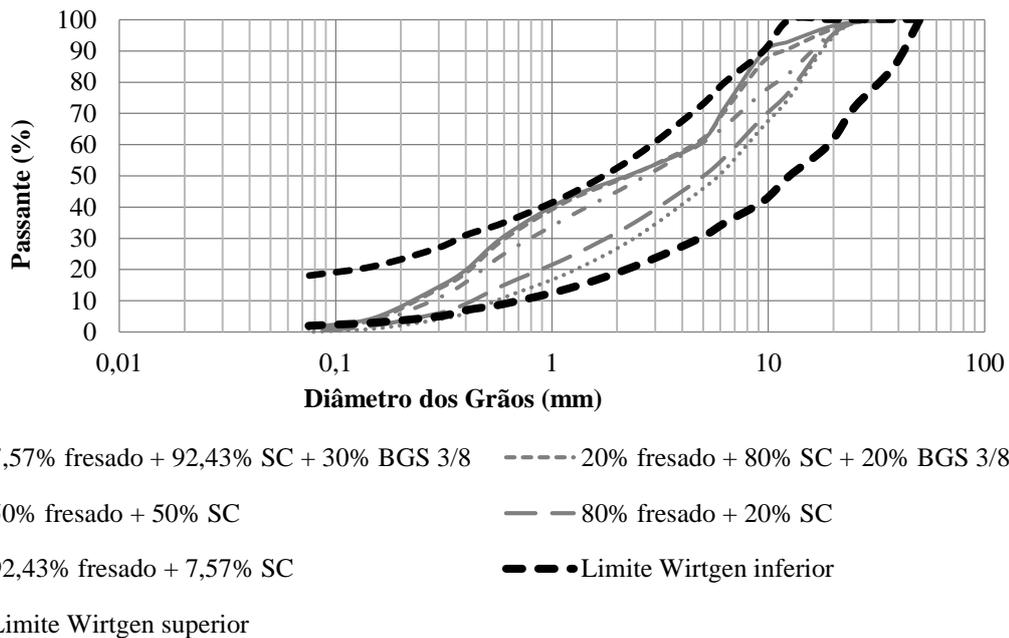
A caracterização das misturas abrange a granulometria das composições, assim como os resultados dos ensaios de compactação. Neste item, expõe-se e discute-se o que foi obtido a partir da sua realização.

5.2.1 Distribuição Granulométrica

Os resultados das análises granulométricas das misturas com BGTC e solo-cimento são apresentados na Figura 23.



(a)



(b)

Figura 23: Curvas granulométricas das misturas com BGTC (a) e solo-cimento (b) enquadradas na faixa proposta pela Wirtgen

A faixa granulométrica proposta pela Wirtgen (2012) é incluída em ambas as figuras, evidenciando que todas as misturas se enquadraram nos limites propostos. Entretanto, foi necessária a correção granulométrica das composições com porcentagens elevadas (92,43% e 80%) de solo-cimento, para o enquadramento nessa faixa. Para tal, foi adicionada brita 3/8”

nas quantidades de 30% e 20%, respectivamente. É importante ressaltar que a adição de agregado foi realizada sobre a massa total de fresado e base.

Outro aspecto que deve ser considerado é a heterogeneidade dos materiais, principalmente do fresado asfáltico, que é formado por grumos e com boa parcela dos finos envolvida pelo ligante asfáltico. Quando o material é compactado, as partículas mais grosseiras ficam sujeitas ao esmagamento, gerando possíveis alterações nas curvas granulométricas das misturas.

5.2.2 Compactação

Para a presente pesquisa foram realizados 18 ensaios de compactação, sendo nove em misturas com BGTC e outras tantos em misturas com solo-cimento. Embora Fedrigo (2015) não tenha encontrado diferença significativa entre os parâmetros de compactação (umidade ótima e massa específica aparente seco máximo) de misturas com diferentes teores de cimento e porcentagens de fresado iguais, na pesquisa relatada nesta dissertação optou-se por fazer ensaios de compactação em cada mistura estudada.

Antes da definição do planejamento experimental tinham sido feitos ensaios de compactação em algumas misturas; inclusive na que contém 2% de cimento e 50% de fresado. Como esse teor de cimento é próximo a 1,17%, e levando em conta a escassez dos materiais de base (BGTC e solo-cimento), optou-se por adotar-se para este último teor de cimento os parâmetros de compactação da mistura com 2%. Posteriormente, ao realizar os ensaios de resistência, observou-se que essa medida não influenciou significativamente os resultados, uma vez que esses teores de cimento são muito baixos.

Para melhor visualização dos resultados obtidos, optou-se por dividi-los em função dos teores de cimento (baixo, médio e alto). Assim, as curvas de compactação das misturas com BGTC são apresentadas na Figura 24 e aquelas com solo-cimento podem ser vistas na Figura 25.

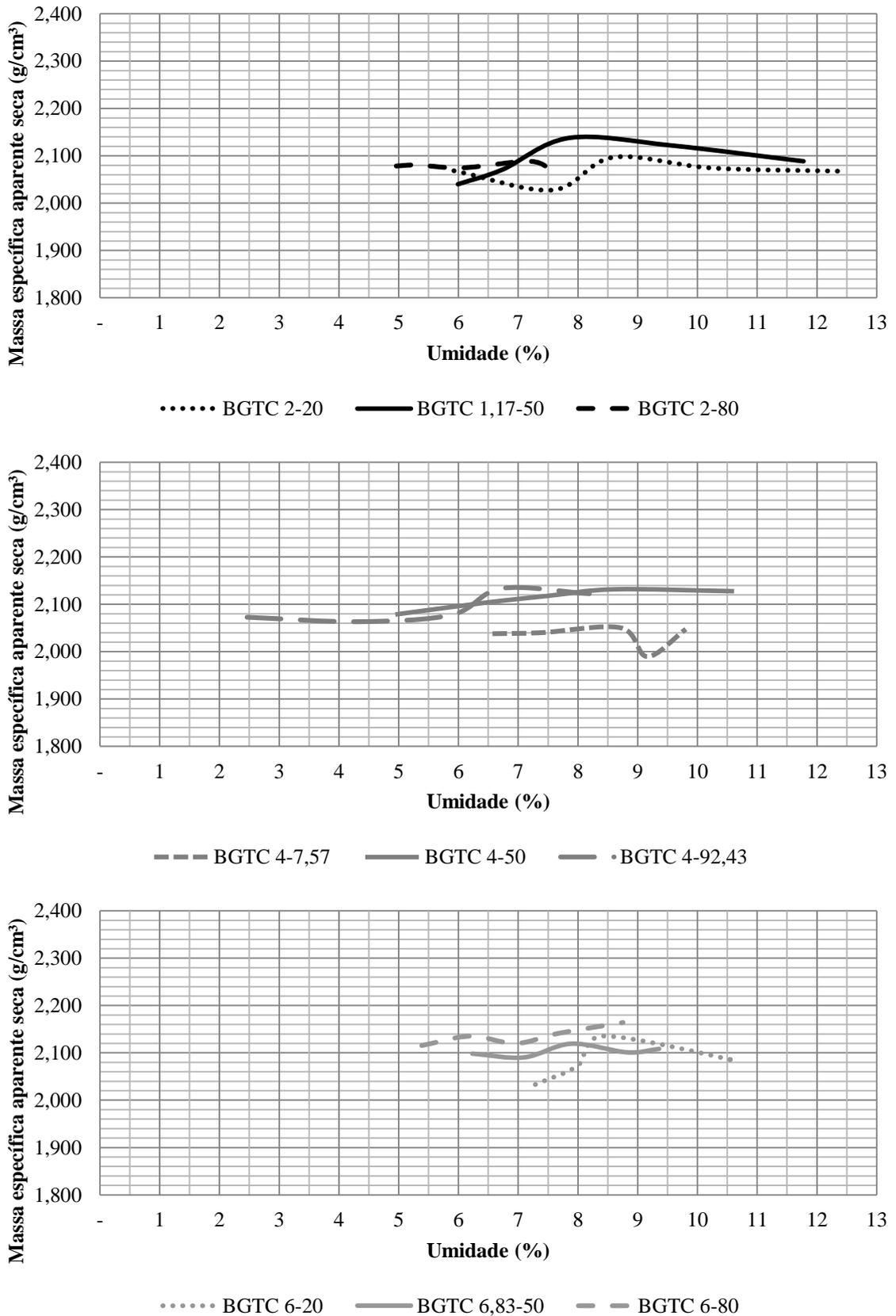


Figura 24: Curvas de compactação obtidas para as misturas contendo BGTC

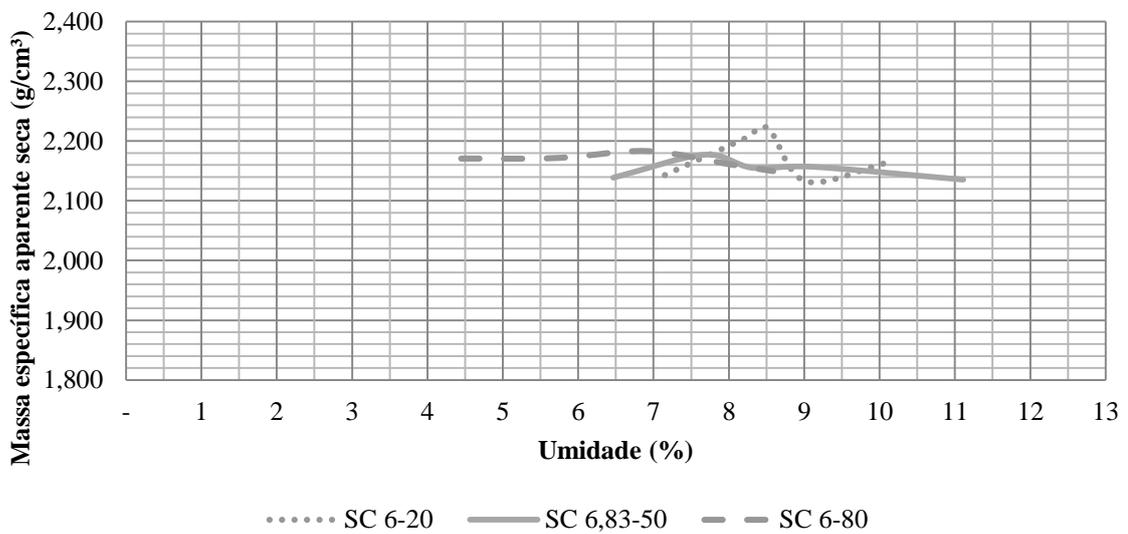
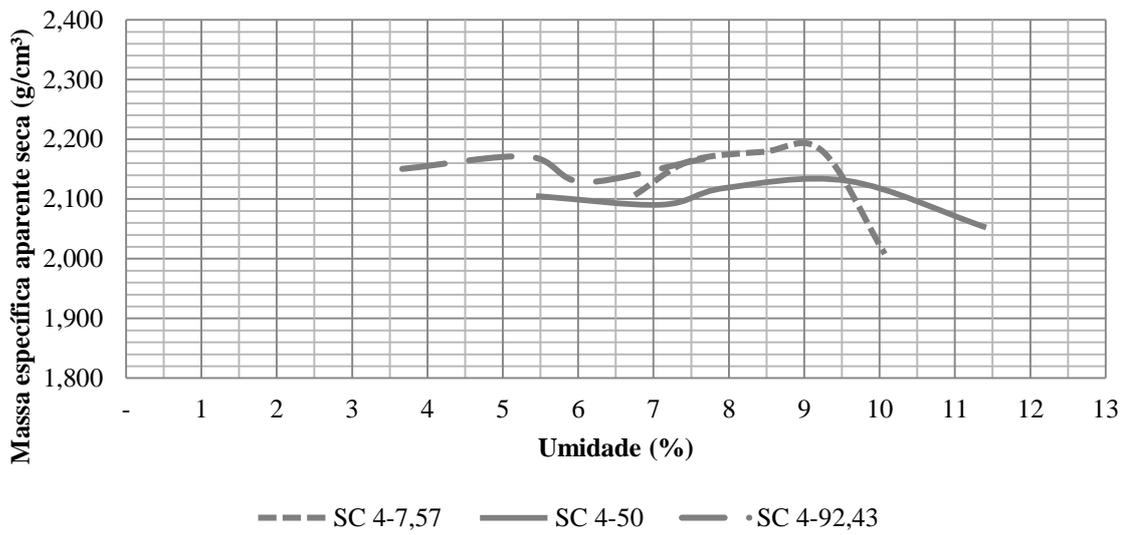
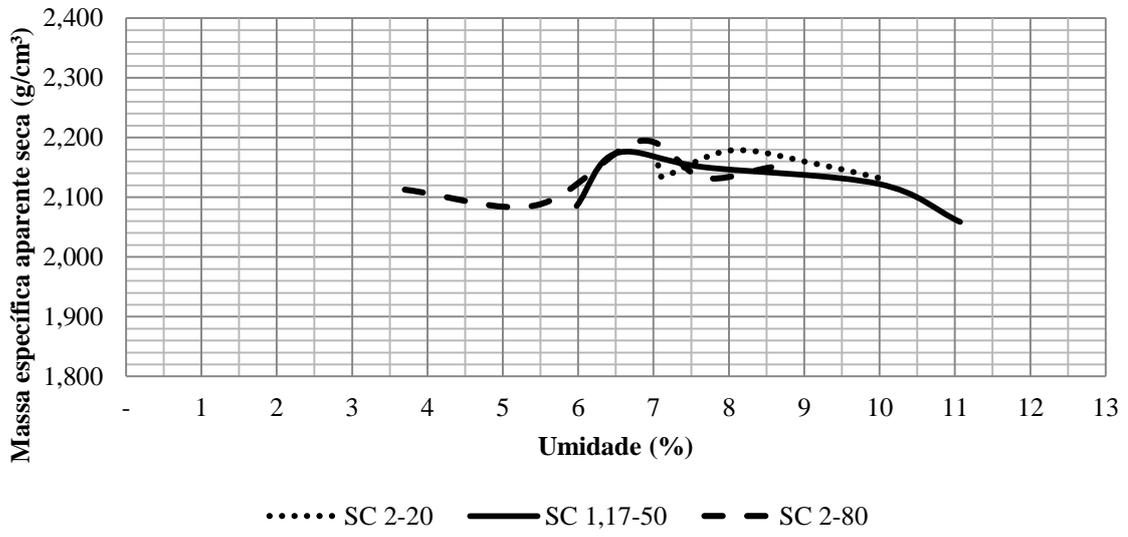


Figura 25: Curvas de compactação obtidas para as misturas contendo solo-cimento

Nas Figuras 24 e 25 é possível observar que as misturas contendo maiores quantidade de material fresado (80 e 92,43%) apresentam menor teor de umidade ótimo. Tal resultado está relacionado com a capacidade de absorção de cada material, que é mais elevada para os materiais de base, como observado por Sufian *et al.* (2009) e Ji *et al.* (2015).

Ainda, constata-se que para teores de cimento superiores a 4%, as curvas de compactação com porcentagem de fresado de 50% exibiram tendência mais linear; isto é, apresentam menor variação de massa específica aparente seca máxima. Esse comportamento indica que a incorporação de água exerce pouca influência na compactabilidade dessas misturas, considerando os intervalos estudados, quanto ao teor de cimento e porcentagem de fresado.

Verifica-se também que duas curvas apresentaram dois picos (SC 4-92,43 e SC 6,83-50) e algumas manifestaram um pico e meio (BGTC 2-20, BGTC 4-7,57, BGTC 6-80, SC 2-20 e SC 6-20). Lee e Suedkamp (1972) evidenciaram que isso pode ocorrer para materiais com baixo Limite de Liquidez (inferior a 30%) e Índice de Plasticidade nulo (não plástico).

Para a definição dos parâmetros de compactação, o segundo pico foi desprezado, já que ocorria exsudação da água adicionada à mistura quando os golpes eram aplicados, não representando a condição de umidade ótima.

Com o intuito de facilitar a apresentação e análise dos parâmetros de compactação obtidos, esses são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compactação

Mistura	$\omega_{ót}$ (%)	$\gamma_{smáx}$ (kN/m ³)	Mistura	$\omega_{ót}$ (%)	$\gamma_{smáx}$ (kN/m ³)
BGTC 1,17-50	7,9	21,38	SC 1,17-50	6,5	21,74
BGTC 2-20	8,6	20,97	SC 2-20	8,0	21,79
BGTC 2-80	7,2	20,88	SC 2-80	6,8	21,94
BGTC 4-7,57	8,7	20,50	SC 4-7,57	9,2	21,81
BGTC 4-50	8,6	21,32	SC 4-50	9,6	21,30
BGTC 4-92,43	6,7	21,34	SC 4-92,43	5,3	21,71
BGTC 6-20	8,4	21,36	SC 6-20	8,5	22,22
BGTC 6-80	6,2	21,35	SC 6-80	6,9	21,83
BGTC 6,83-50	7,9	21,19	SC 6,83-50	7,7	21,77

Na Tabela 10 observa-se que a variabilidade da massa específica aparente seca máxima é pequena (variação entre 20,50 e 22,22 kN/m³), mas não é possível identificar efeitos da porcentagem de fresado e do teor de cimento nos parâmetros de compactação obtidos.

Observa-se ainda que as misturas com BGTC apresentaram menores variações no teor de umidade ótimo (6,2 a 8,7%) do que as misturas com solo-cimento (5,3 a 9,6%), resultado que pode estar relacionado com a porosidade do material de base, alcançando-se umidades ótimas mais elevadas com misturas com maiores quantidades de solo-cimento.

Menores variações foram verificadas nos valores de massa específica aparente seca máxima das composições com BGTC (20,50 a 21,38 kN/m³) e SC (21,30 a 22,22 kN/m³), sendo possível constatar que, de forma geral, as misturas com solo-cimento apresentaram maior massa específica aparente seca máxima. Esse resultado pode ser relacionado com a elevada superfície específica do solo-cimento.

5.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO

A seguir são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de comportamento mecânico das misturas analisadas.

5.3.1 Resistência à compressão simples

Os ensaios de RCS foram realizados na ordem sugerida pelo *Minitab*, tomando-se os cuidados necessários com a moldagem, a cura e realização do próprio ensaio. Os resultados foram fornecidos ao programa para a análise estatística, que originou o modelo de regressão com unidades não codificadas, além de identificar os fatores significativos e valores espúrios.

Primeiramente foi realizada uma análise do resultado obtido, excluindo-se os fatores (variáveis e interações) não significativos e corrigindo-se valores apontados como atípicos, quando necessário. Ao final dessa análise, chegou-se a um modelo, composto de duas equações (uma para cada material de base empregado), para previsão da resistência à compressão simples das misturas estudadas e outras semelhantes. As equações 8 e 9 representam matematicamente tal modelo em unidades não codificadas para as misturas com BGTC e SC, respectivamente.

$$BGTC\ RCS = 1,410 - 0,0424 * fr + 0,079 * ci + 0,2787 * tc + 0,000417 * fr * fr + 0,0888 * ci * ci - 0,01227 * tc * tc - 0,00304 * fr * ci \quad (8)$$

$$SC\ RCS = 1,810 - 0,0424 * fr + 0,079 * ci + 0,2787 * tc + 0,000417 * fr * fr + 0,0888 * ci * ci - 0,01227 * tc * tc - 0,00304 * fr * ci \quad (9)$$

Onde:

- RCS – resistência à compressão simples (MPa);
- ci – teor de cimento (%);
- fr – porcentagem de fresado (%);
- tc – tempo de cura (dias).

O coeficiente de determinação R^2 fornecido pelo *software Minitab* é uma medida da significância estatística da regressão em relação ao ajuste dos dados amostrais (RIBEIRO e CATEN, 2014). Para o modelo de RCS alcançou-se um R^2 igual a 0,88 e um $R^2_{ajustado}$ de 0,86, valores próximos a 1, o que demonstra o alto grau de confiabilidade dos resultados.

A Tabela 11 apresenta os coeficientes do modelo de regressão considerando os níveis codificados e seus respectivos valores-p. Os coeficientes codificados são comparáveis entre si e permitem verificar o tamanho do efeito de cada fator controlável sobre a variável de resposta e o valor-p permite constatar se o efeito é considerado significativo quando este for menor do que o nível de significância de 5%.

Tabela 11: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para RCS

Termo	Coeficiente	Valor-p
Constante	3,1450	0,000
Porcentagem de fresado (%)	-0,5442	0,000
Teor de cimento (%)	1,8022	0,000
Tempo de cura (dias)	0,3853	0,000
Material (BGTC)	-0,1997	0,000
Porcentagem de fresado (%) * Porcentagem de fresado (%)	0,7510	0,000
Teor de cimento (%) * Teor de cimento (%)	0,7100	0,000
Tempo de cura (dias) * Tempo de cura (dias)	-0,3710	0,002
Porcentagem de fresado (%) * Teor de cimento (%)	-0,3650	0,053

Na Tabela 11 observa-se que o valor-p referente à interação entre a porcentagem de fresado e o teor de cimento resultou em 0,053, porém optou-se por não retirá-la do modelo, uma vez que esse valor é muito próximo do máximo permitido (0,05).

Ao considerar um tempo de cura igual a 7 dias, período indicado pelas especificações nacionais, e realizando sua substituição nas Equações 8 e 9, obtém-se outro modelo, apresentado nas Equações 10 (BGTC) e 11 (SC).

$$BGTC\ RCS\ (7\ dias) = 2,760 - 0,0424 * fr + 0,079 * ci + 0,000417 * fr * fr + 0,0888 * ci * ci - 0,00304 * fr * ci \quad (10)$$

$$SC\ RCS\ (7\ dias) = 3,160 - 0,0424 * fr + 0,079 * ci + 0,000417 * fr * fr + 0,0888 * ci * ci - 0,00304 * fr * ci \quad (11)$$

Onde:

- RCS – resistência à compressão simples (MPa);
- ci – teor de cimento (%);
- fr – porcentagem de fresado (%).

São apresentados na Tabela 12 os valores observados de resistência à compressão simples utilizados na análise, sendo que os valores nos pontos centrais (4-50) representam a média dos seis resultados.

Tabela 12: Resultados de RCS das misturas analisadas

Mistura	RCS (MPa)			Mistura	RCS (MPa)		
	3 dias	7 dias	14 dias		3 dias	7 dias	14 dias
BGTC 1,17-50	1,73	1,69	1,40	SC 1,17-50	1,89	2,01	1,93
BGTC 2-20	1,33	2,47	2,51	SC 2-20	2,41	2,91	3,17
BGTC 2-80	1,00	1,92	1,58	SC 2-80	2,17	3,00	3,02
BGTC 4-7,57	3,12	4,26	3,76	SC 4-7,57	3,87	4,87	5,35
BGTC 4-50	2,62	3,18	3,09	SC 4-50	2,07	2,64	3,52
BGTC 4-92,43	2,46	2,75	3,49	SC 4-92,43	2,99	3,04	3,53
BGTC 6-20	4,30	5,20	5,57	SC 6-20	5,57	6,08	5,53
BGTC 6-80	3,23	3,81	4,06	SC 6-80	4,54	5,27	4,85
BGTC 6,83-50	4,13	5,32	4,51	SC 6,83-50	5,67	6,49	6,23

Na Tabela 12 observa-se que os resultados obtidos para as misturas com BGTC variaram entre 1,00 MPa (BGTC 2-80 – 3 dias) e 5,57 MPa (BGTC 6-20 – 14 dias), enquanto que os correspondentes às misturas com solo-cimento variaram entre 1,89 MPa (SC 1,17-50 – 3 dias) e 6,49 MPa (SC 6,83-50 – 7 dias). Observa-se que apenas as misturas com baixos teores de cimento (BGTC 1,17-50, BGTC 2-20, BGTC 2-80 e SC 1,17-50) não alcançaram a RCS de 2,5 MPa aos sete dias de cura, como proposto por Fedrigo (2015).

Além de verificar que as misturas com solo-cimento são ligeiramente mais resistentes do que as que têm BGTC, observa-se que os materiais existentes em cada mistura reagem de maneira diferente, já que aparentemente o fresado asfáltico afeta de maneira mais significativa nas misturas de BGTC e o cimento se mostra mais importante nas composições de solo-cimento. Entretanto, essa diferença de comportamento pode estar relacionada com a inclusão de agregado adicional nas misturas com solo-cimento.

Através das equações fornecidas (modelo matemático) pelo *Minitab*, é possível determinar o valor de qualquer variável para se atingir uma determinada resistência, nos limites de validade do modelo. Inversamente, pode-se determinar a resistência a partir de níveis das variáveis independentes.

Mais ainda, o *software* fornece uma gama de gráficos que facilitam a interpretação dos resultados. Na Figura 26 mostram-se os efeitos de cada variável independente na RCS. Observa-se que os gráficos que avaliam o comportamento da porcentagem de fresado, do teor de cimento e do tempo de cura, correspondem às médias ajustadas de ambos os materiais (BGTC e solo-cimento), sendo que apenas no último gráfico é possível identificar a influência do tipo de material na RCS.

Nos gráficos de efeitos principais, uma curva descendente evidencia que a resistência diminui com o aumento do nível de determinada variável. Na Figura 26, esse comportamento se manifesta com o aumento da porcentagem de fresado. Além disso, observa-se que o teor de cimento é a variável mais importante na RCS, seguida pela porcentagem de fresado, o tempo de cura e por último pelo material de base empregado, o que foi comprovado na Tabela 11.

Observa-se também que as misturas apresentam uma rápida elevação inicial da resistência, o que é indicado pela diferença nos resultados de resistência entre os 3 e 7 dias de cura. Para

tempos maiores de cura essa taxa de acréscimo é reduzida, apresentando uma tendência à estabilidade após 14 dias de cura. Comportamento similar foi obtido nos ensaios realizados por Fedrigo (2015) ao empregar BGS como material de base. Deve-se observar, contudo, que os ensaios foram realizados em corpos de prova curados por 3, 7 e 14 dias e que as análises aqui feitas são válidas apenas nesses tempos. Resultados diferentes podem ser obtidos ao realizar ensaios com maiores idades de cura, o que foi constatado pontualmente no presente estudo, como mostrado na Figura 31.

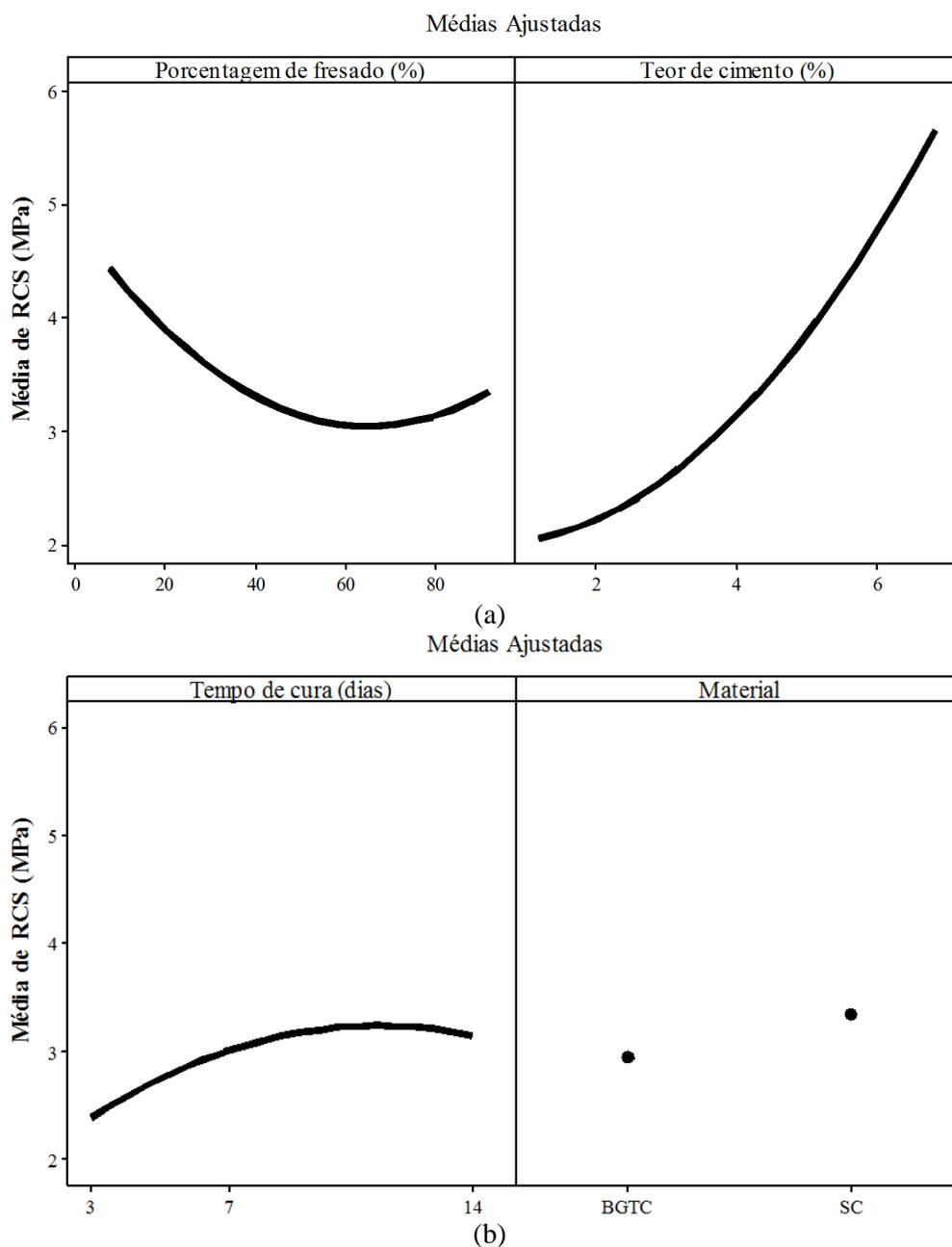


Figura 26: Gráfico de efeitos principais para RCS - avaliação da influência da porcentagem de fresado e teor de cimento (a) e do tempo de cura e material (b)

A redução da RCS com o aumento da porcentagem de fresado pode ser atribuída à resistência inferior das partículas envoltas por asfalto (em relação às que constituem a camada de base) e ao aumento do volume de vazios nas misturas com maiores porcentagens de fresado.

Uma maneira interessante de observar o efeito de duas variáveis é através de gráficos de contorno, como o mostrado na Figura 27, na qual se variam o teor de cimento e a porcentagem de fresado, para misturas ensaiadas após 7 dias de cura.

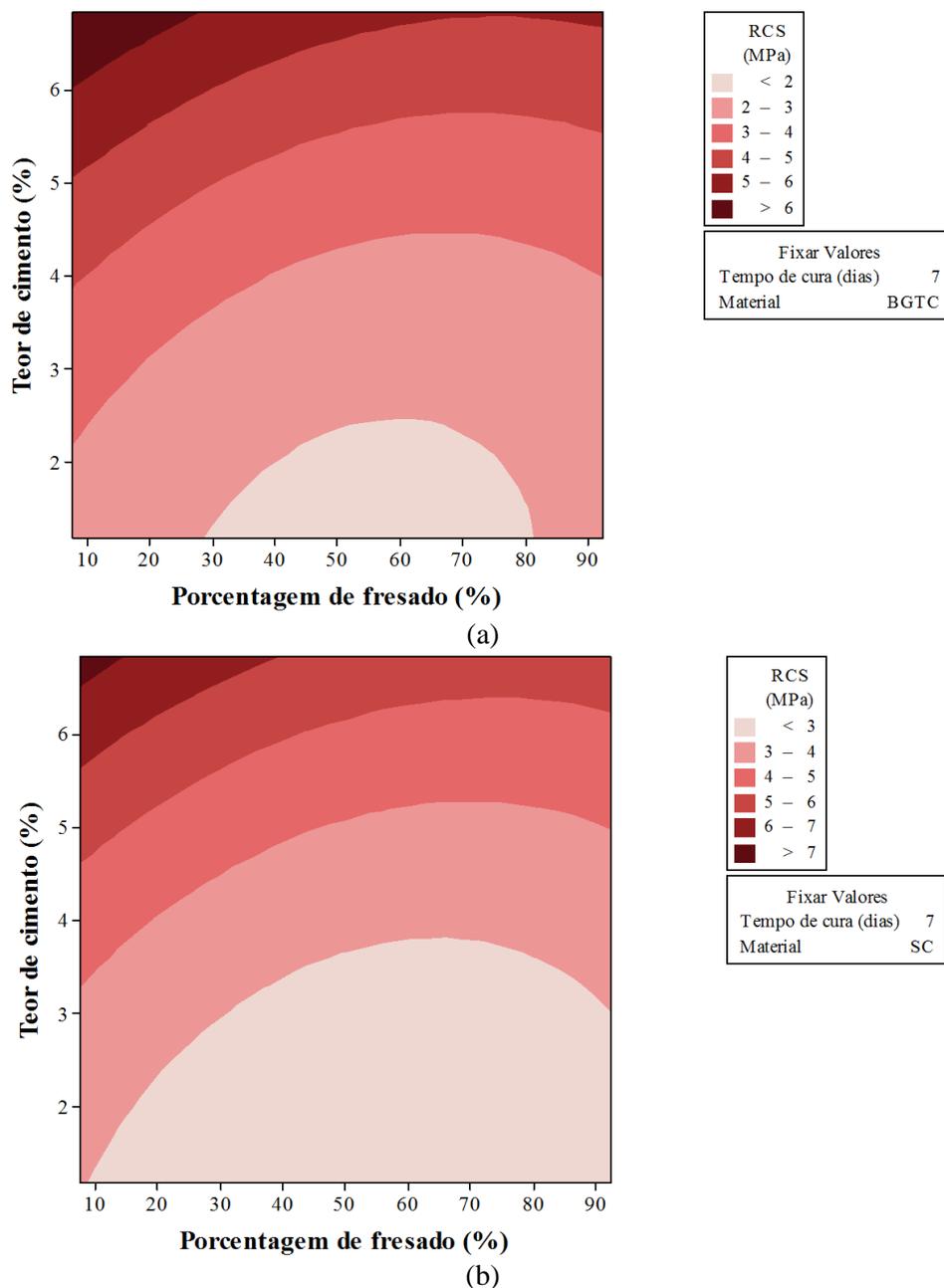


Figura 27: Gráfico de contorno de RCS com 7 dias de cura para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b)

Na Figura 27 é possível confirmar que as resistências alcançadas nas misturas com solo-cimento são superiores às obtidas com BGTC. Além disso, pode-se relacionar uma determinada porcentagem de fresado com um dado teor de cimento para verificar a resistência aproximada que a mistura pode atingir. Cabe ressaltar que esses gráficos podem ser obtidos para qualquer tempo de cura entre 3 e 14 dias, considerados no planejamento experimental. Os gráficos correspondentes a 3 e 14 dias de cura estão apresentados no Apêndice A desta dissertação.

O programa computacional fornece também a interação entre mais variáveis simultâneas, como teor de cimento, porcentagem de fresado e tempo de cura. Porém, para isso, é necessário definir parâmetros de entrada para que a cada análise “dupla”, um desses parâmetros deve permanecer fixo. Os resultados para as misturas contendo BGTC e solo-cimento podem ser visualizados na Figura 28.

Para exemplificar a relação entre os parâmetros de entrada e os resultados, verifica-se a partir da Figura 28 que: no gráfico superior à esquerda, analisou-se a interação entre teor de cimento (na vertical) e a porcentagem de fresado (na horizontal), fixando-se o tempo de cura em 7 dias; no gráfico superior à direita, foram verificados os resultados obtidos da combinação entre tempo de cura (na vertical) e porcentagem de fresado (na horizontal), permanecendo fixo o teor de cimento em 4%; no gráfico inferior à esquerda, foi realizada a análise entre o tempo de cura (na vertical) e teor de cimento (na horizontal), de modo que essa interação é válida para misturas com 50% de fresado. Os intervalos de valores estão representados por faixas de cores e podem ser verificados à direita dos gráficos, assim como os parâmetros de entrada definidos previamente.

Observa-se que na adoção dos parâmetros fixos se optou pelo ponto central do planejamento experimental (4-50) e tempo de cura de 7 dias (especificado nacionalmente). A partir da Figura 28 é possível verificar que a interação que se mostrou significativa dentre as analisadas foi teor de cimento versus porcentagem de fresado. Esse fato foi confirmado durante a análise dos resultados (Tabela 11), pois as demais interações obtiveram valor-p superior a 0,05, sendo então retiradas do modelo de regressão.

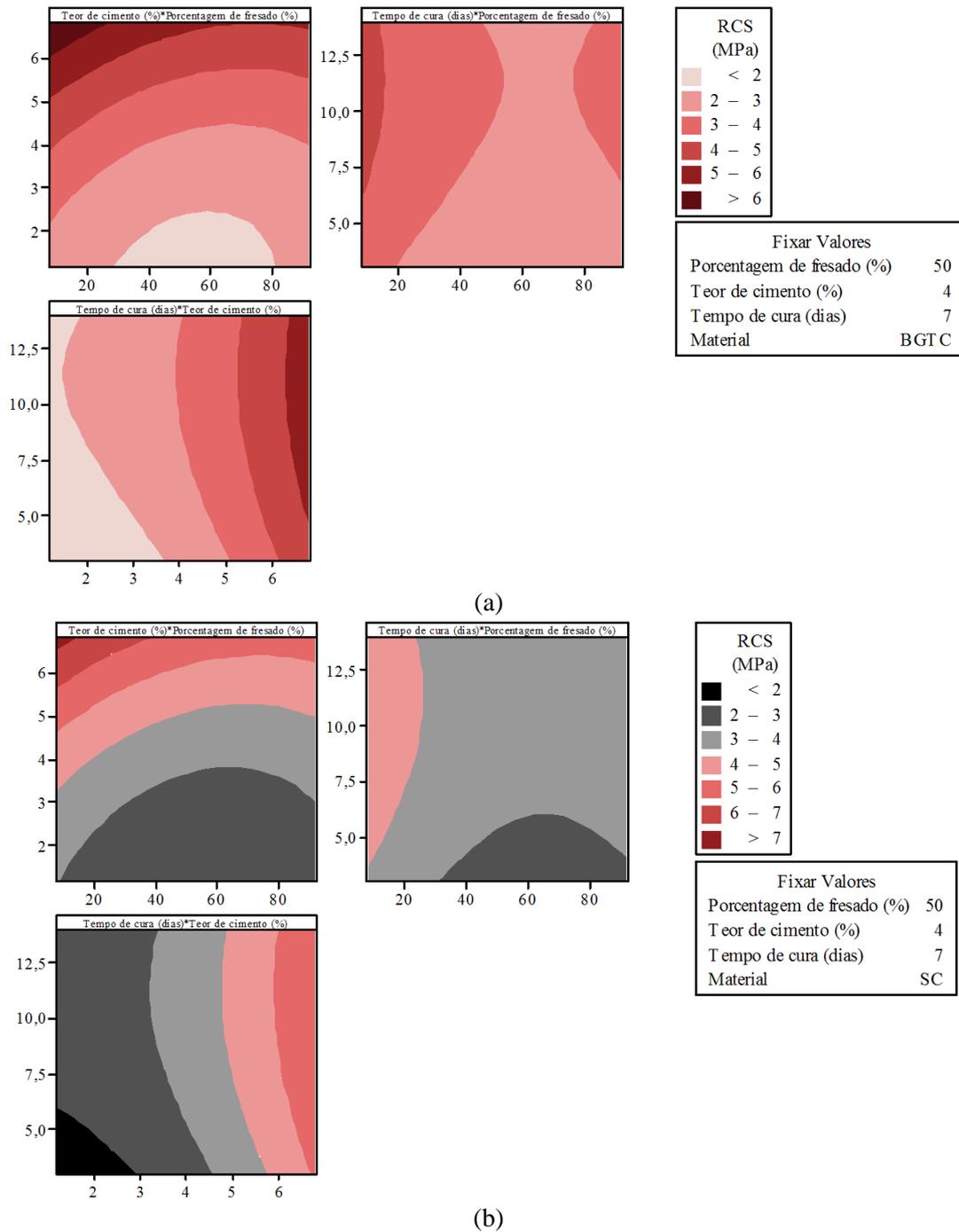


Figura 28: Gráficos de contorno de RCS simultâneos para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b)

Outro aspecto interessante que o *Minitab* oferece é a possibilidade de definir um intervalo de resultados a fim de verificar quais os valores das variáveis analisadas podem ser seleccionados para atingir um valor dentro desse intervalo admissível.

Para exemplificar, optou-se pelo intervalo definido pelas especificações do DEINFRA-SC (2012) e do DNIT (2013a) que é de 2,1 a 2,5 MPa aos 7 dias de cura. Na Figura 29 (a) encontra-se o resultado para as misturas com BGTC e na Figura 29 (b) está apresentado o gráfico para as misturas com solo-cimento.

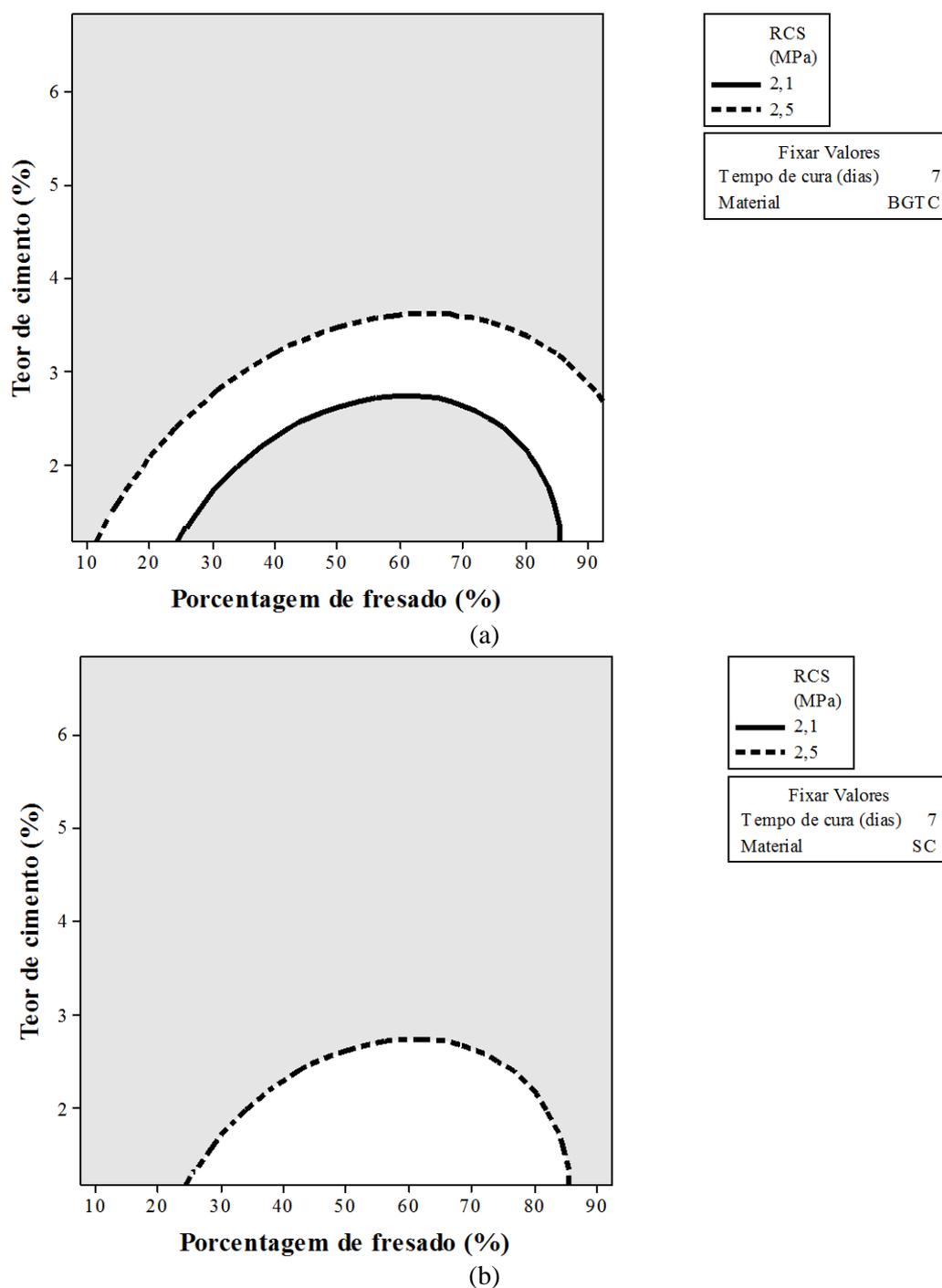


Figura 29: Gráfico de contorno de RCS considerando um intervalo específico de resistência para as misturas de (a) BGTC e (b) solo-cimento

Gráficos como os da Figura 29 permitem definir faixas de variação da porcentagem de fresado e do teor de cimento que conduzem a valores desejados de resistência. Na Figura 29 (a) verifica-se que para a obtenção de determinada faixa de RCS é mais viável nas misturas com BGTC do que nas misturas com solo-cimento. Isso significa que conhecendo as espessuras das camadas de base cimentada e revestimento asfáltico, ou seja, a porcentagem de fresado, é fácil ajustar o teor de cimento necessário para atingir a resistência visada.

O mesmo procedimento pode ser aplicado com as misturas com solo-cimento, Figura 29 (b). Observa-se, entretanto, que para se obter RCS entre 2,1 e 2,5 MPa, apenas poderão empregar-se porcentagens de fresado entre 25 e 85%. Além disso, observa-se que independente da quantidade de fresado, o teor de cimento será inferior a 3%, o que pode comprometer o desempenho da camada, em termos de durabilidade.

Conclui-se então que o intervalo de resistência sugerido pelo DEINFRA-SC (2012) e DNIT (2013a) é bastante restrito e não é recomendado para reciclagem de bases cimentadas, já que reduz consideravelmente o leque de misturas a serem empregadas.

O *Minitab* fornece um mecanismo de otimização dos resultados, que possibilita maximizar, minimizar ou definir um alvo como resultado. Primeiramente determina-se qual é a ação almejada (maximizar, minimizar ou definir um alvo), podendo-se fornecer as características desejáveis (por exemplo: um valor específico de porcentagem de fresado de acordo com as características do pavimento a ser restaurado), para que logo após o *software* empregado indique qual é a combinação mais interessante. Buscando exemplificar essa técnica, optou-se por definir o alvo como 3,5 MPa aos 7 dias de cura, que é o valor mínimo referenciado pelo DER-PR (2005), dispondo os resultados na Figura 30.

Para os exemplos mostrados na Figura 30 foi fixada também a porcentagem de fresado em 50%, a fim de diferenciar o comportamento dos dois materiais analisados. Com isso, observa-se que nas mesmas condições, as composições com BGTC necessitam cerca de 0,5% a mais de cimento do que aquelas com solo-cimento, para alcançar a mesma resistência.

Com isso, verifica-se que essa ferramenta é bastante útil para ser aplicada na dosagem de uma mistura reciclada, já que a partir dos dados fornecidos por uma análise em campo, é possível constatar qual o teor de cimento necessário para obter o resultado desejado.

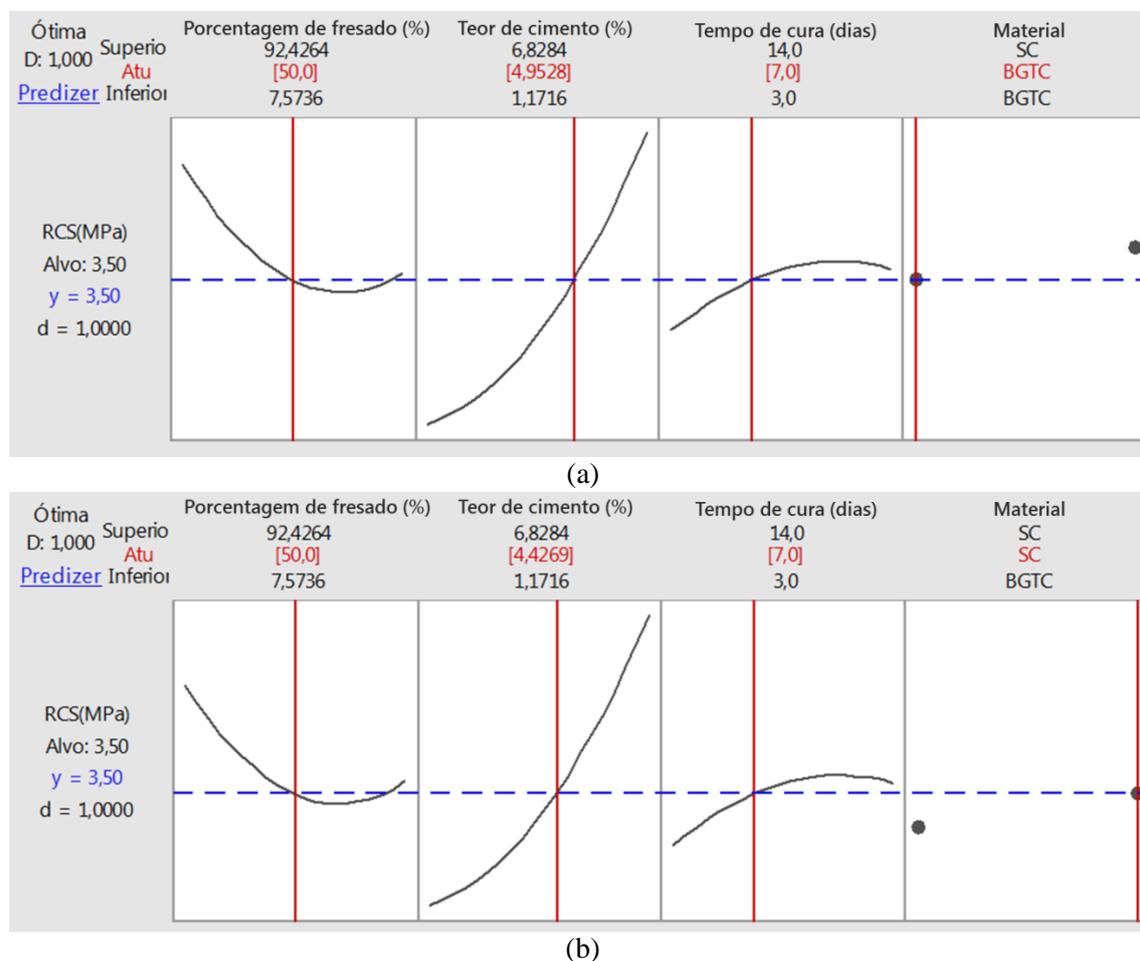


Figura 30: Exemplo de otimização dos resultados de RCS para misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b)

5.3.1.1 Análise da RCS à longo prazo

Como o ensaio para determinação do coeficiente de Poisson é não-destrutivo, optou-se por determinar a resistência à compressão simples dos corpos de prova aos 168 dias de cura (correspondente a seis meses). Os resultados alcançados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados de RCS aos 168 dias de cura

Mistura	CP	RCS (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)	RCS média (MPa)
BGTC 4-50	1	4,23	0,16	3,71%	4,36
	2	4,54			
	3	4,30			
SC 4-50	4	6,68	0,23	3,53%	6,50
	5	6,59			
	6	6,24			

É possível observar que os resultados apresentados na Tabela 13 são coerentes, já que o desvio padrão e o coeficiente de variação alcançados foram pequenos. Além disso, as resistências obtidas para as misturas com solo-cimento superaram novamente os resultados encontrados para as composições de BGTC.

Na Figura 31 pode ser verificada a evolução da RCS das amostras do ponto central com relação aos tempos de cura ensaiados (3, 7, 14 e 168 dias).

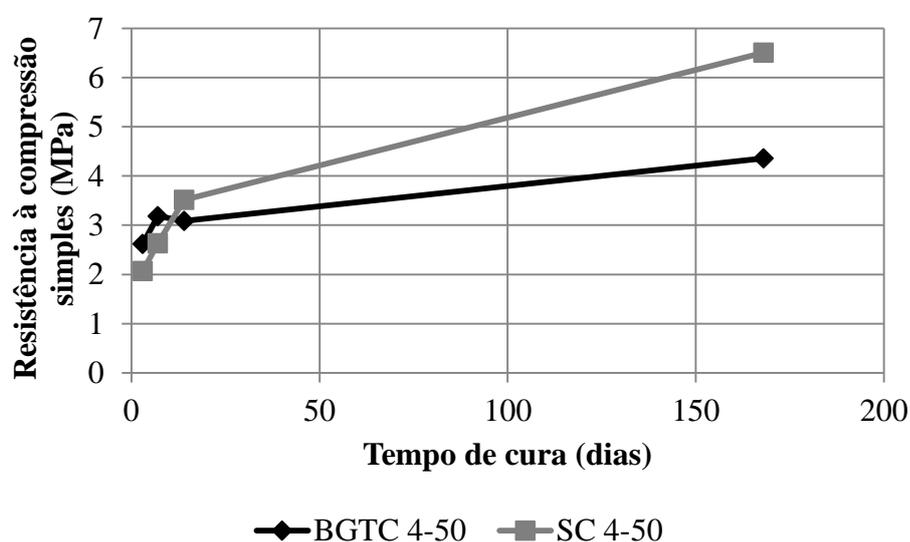


Figura 31: RCS das misturas ao longo do tempo de cura

Com os resultados mostrados na Figura 31 pode-se verificar a diferença de comportamento entre os dois materiais, já que as misturas com BGTC apresentaram RCS mais elevadas do que as com solo-cimento aos 3 e 7 dias de cura, o que indica que esse material apresenta maior resistência inicial, mas para tempos de cura superiores a 14 dias a tendência se inverte. Conclui-se que a longo prazo as misturas com solo-cimento atingiram maiores resistências.

Com isso, pode-se relacionar os resultados mostrados na Figura 26, que sugere uma tendência à estabilização da RCS aos 14 dias de cura, para as misturas com BGTC, já que a elevação da resistência para tempos maiores do que 14 dias foi bastante inferior a das misturas com solo-cimento. Para essas, ficou evidenciado que podem ser alcançados níveis bastante elevados de resistência a longo prazo, o que pode ser atribuído a reações pozolânicas entre a cal liberada durante a hidratação do cimento e a sílica e alumina ainda amorfas presentes no solo laterítico

empregado. Esta possibilidade deverá ser analisada mais criteriosamente em pesquisas futuras.

5.3.1.2 Comparação com resultados obtidos por outros pesquisadores

É possível verificar, a partir do item 2.3, que a RCS é o ensaio mais realizado quando se quer prever o comportamento de materiais reciclados com cimento. Para fins comparativos, organizou-se os resultados obtidos por outros pesquisadores a respeito da RCS aos 7 dias de cura (idade requerida em grande parte das especificações), fazendo correlação com os resultados esperados a partir do método de previsão do *Minitab* ou pelos valores obtidos experimentalmente, quando de misturas semelhantes.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados, assim como os dados correspondentes às análises. Os valores em **negrito** correspondem a resultados desta dissertação, os quais são comparados com resistências obtidas pelos demais autores. Optou-se por incluir nas tabelas apenas as misturas passíveis de comparação (teores de cimento entre 1 e 7% e porcentagens de fresado entre 8 e 92%). Ainda, ressalta-se que foram utilizadas como referência apenas aquelas em que os autores expressaram os resultados numericamente.

Na Tabela 14 observa-se que as resistências obtidas aos 7 dias de cura nesta dissertação se assemelham com aquelas alcançadas por outros pesquisadores ao fazer uso da mesma energia de compactação e mesmo tempo de cura.

Foi possível verificar que as misturas com BGTC e solo-cimento se mostraram mais resistentes do que as composições contendo agregado virgem estudadas por Paiva e Oliveira (2010) e por Nunes *et al.* (2013). Com relação às misturas analisadas por Isola *et al.* (2013), percebe-se que as compostas por agregado virgem se mostraram levemente mais resistentes do que aquelas com BGTC, e que o solo-cimento continuou sendo o material, que ao ser incorporado ao fresado asfáltico, apresentou maiores valores de RCS.

Com relação ao resultado apresentado por Paiva e Oliveira (2013) a partir da análise de misturas contendo solo-cimento através da compactação pela energia Modificada, verificou-se que o resultado obtido para a dissertação desta pesquisa alcançou maior resistência, já que para essa avaliação, o valor admitido pelo modelo é cerca de 0,5 MPa mais resistente do que o adquirido pelos pesquisadores.

Ji *et al.* (2015) empregaram o método de vibração vertical na compactação das amostras, que, segundo os autores, se assemelha à técnica utilizada em campo. Pode-se observar que os resultados obtidos por eles para diferentes misturas com BGTC foram ligeiramente superiores aos alcançados a partir da compactação na energia Proctor Modificada para as misturas com o mesmo material. A variação entre os resultados foi pequena, sendo que o comportamento observado pela adição de cimento e de material fresado foi semelhante em ambas as pesquisas.

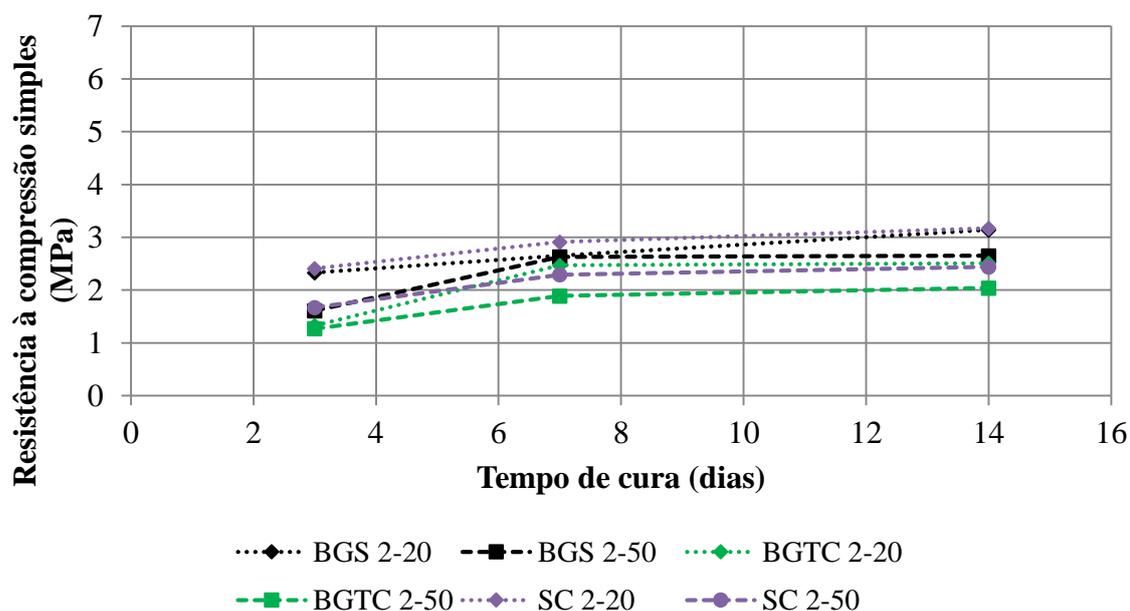
Tabela 14: Comparação entre os resultados de RCS aos 7 dias desta dissertação com valores obtidos pelos demais pesquisadores

Referência	Material da base	Teor de cimento (%)	Porcentagem de fresado (%)	RCS _{7dias} (MPa)	RCS _{7dias} (MPa) BGTC	RCS _{7dias} (MPa) SC
PAIVA e OLIVEIRA, 2010	Agregado virgem	3,00	77,00	1,70**	2,30	2,70
ISOLA <i>et al.</i> , 2013	Agregado virgem	3,56	30,00	3,00	2,95	3,35
		3,97	70,00	3,00	2,71	3,10
NUNES <i>et al.</i> , 2013	Agregado virgem	2,00	78,00	0,97	2,03	2,43
		4,00		2,48	2,78	3,18
PAIVA e OLIVEIRA, 2013	Solo-cimento	3,00	30,00	2,47	2,63	3,03
ELY, 2014	BGS	4,00	70,00	2,55	2,72	3,12
		2,00	20,00	2,65	2,47*	2,91*
FEDRIGO, 2015	BGS	4,00	50,00	4,77	3,57	3,97
		2,00		2,63	1,89	2,29
		4,00		4,43	3,18*	2,64*
JI <i>et al.</i> , 2015	BGTC	3,00	30,00	3,10***	2,63	3,03
		4,00	50,00	4,00***	3,24	3,64
		3,00		2,70***	2,26	2,66
		4,00		3,60***	3,18*	2,64*

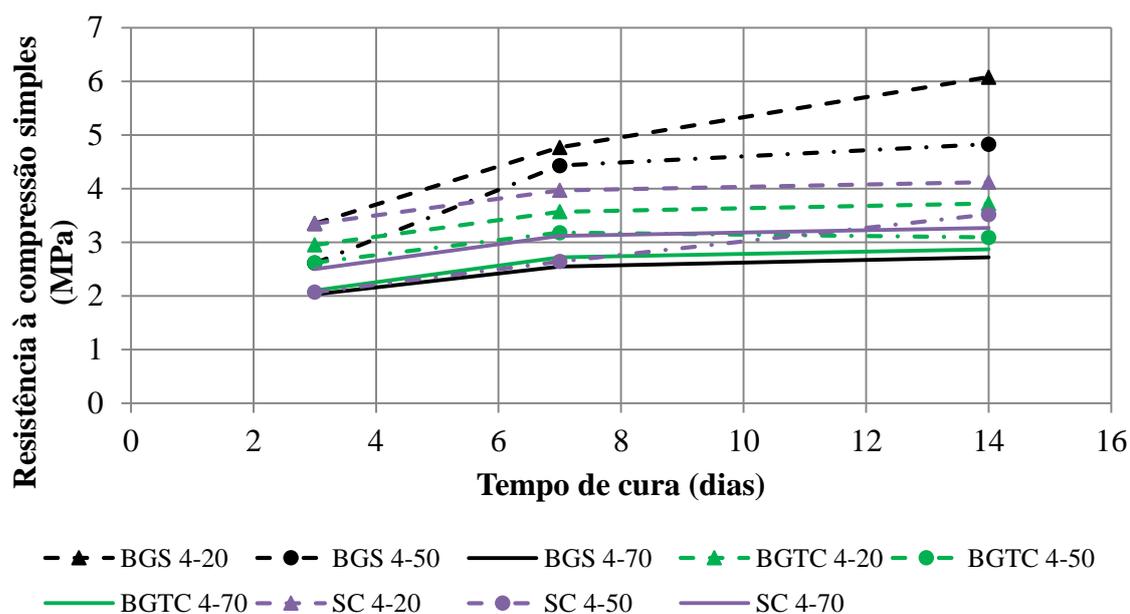
*Resultados alcançados experimentalmente, sem a necessidade de predizer pelo *software*. **Resultado obtido para as misturas sem agregado adicional e a partir do método de compactação por vibração vertical.

***Resultado obtido para as misturas compactadas na umidade ótima e com GC igual a 100%.

A fim de verificar o comportamento dos diferentes materiais já estudados na pesquisa, são apresentados na Figura 32, os resultados obtidos por Fedrigo (2015) e Ely (2014), assim como os valores encontrados experimentalmente ou por meio de modelos gerados pelo *Minitab* nesta dissertação. Optou-se por separar as misturas com 2 e 4% para melhor visualização dos resultados.



(a)



(b)

Figura 32: Comparação entre a RCS de misturas idênticas considerando a reciclagem de bases compostas de BGS, BGTC e SC

Na Figura 32 e na Tabela 14, considerando o tempo de cura de sete dias, verifica-se para as misturas 2-50, 4-20 e 4-50 que as maiores resistências correspondem às composições com BGS como material de base (2,63 MPa, 4,77 MPa e 4,43 MPa) e para as misturas 2-20 e 4-70, as composições com solo-cimento se mostraram mais resistentes (2,91 e 3,12 MPa). Já as

misturas com BGTC como material de base apresentaram resistências inferiores aos demais materiais analisados (BGS e solo-cimento), com exceção das misturas 4-50 e 4-70.

Excluindo a mistura BGTC 2-20, todas as composições alcançaram RCS de 2,5 MPa aos 7 dias, valor proposto por Fedrigo (2015) como mínimo para efeito de dosagem.

A partir dos resultados de RCS, não é possível indicar qual é o material de base que apresenta maior resistência, já que esses interagem de diferentes maneiras com o fresado asfáltico e também com o cimento empregado. Porém, pode-se concluir que os resultados obtidos para RCS são bastante semelhantes aos encontrados por outros autores, em condições similares de ensaio, o que comprova a confiabilidade dos resultados.

5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

A sequência e os procedimentos de análise dos resultados de resistência à tração por compressão diametral foram idênticos aos realizados para avaliação da resistência à compressão simples, tornando-se dispensável a descrição detalhada para o presente ensaio, sendo necessária a inclusão apenas das peculiaridades de cada análise.

Como havia dois resultados para cada amostra, optou-se por utilizar todos na análise, totalizando em 168 dados. Deste modo, os valores atípicos foram substituídos pelo segundo valor da amostra. O modelo de regressão em unidades não codificadas das misturas ensaiadas é apresentado nas Equações 12 (BGTC) e 13 (SC).

$$BGTC\ RCD = -0,2495 - 0,00335 * fr + 0,1174 * ci + 0,0649 * tc - 0,002049 * tc * tc - 0,000764 * fr * ci - 0,000357 * fr * tc + 0,00215 * ci * tc \quad (12)$$

$$SC\ RCD = -0,3182 - 0,00495 * fr + 0,1174 * ci + 0,0764 * tc - 0,002049 * tc * tc - 0,000764 * fr * ci - 0,000357 * fr * tc + 0,00215 * ci * tc \quad (13)$$

Onde:

- RCD – resistência à tração por compressão diametral (MPa);
- ci – teor de cimento (%);
- fr – porcentagem de fresado (%);

- t_c – tempo de cura (dias).

Para a amostra analisada, obteve-se um R^2 de 83% e um R^2_{ajustado} de 82%, o que comprova a significância estatística do modelo obtido, especialmente levando em consideração o tamanho da amostra. Os coeficientes do modelo de regressão considerando os níveis codificados e seus respectivos valores-p são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para RCD

Termo	Coefficiente	Valor-p
Constante	0,6139	0,000
Porcentagem de fresado (%)	-0,0825	0,000
Teor de cimento (%)	0,2756	0,000
Tempo de cura (dias)	0,1459	0,000
Material (BGTC)	-0,0544	0,000
Tempo de cura (dias) * Tempo de cura (dias)	-0,0620	0,000
Porcentagem de fresado (%) * Teor de cimento (%)	-0,0917	0,001
Porcentagem de fresado (%) * Tempo de cura (dias)	-0,0834	0,000
Porcentagem de fresado (%) * Material (BGTC)	-0,0340	0,016
Teor de cimento (%) * Tempo de cura (dias)	0,0334	0,050
Tempo de cura (dias) * Material (BGTC)	-0,0315	0,001

Observa-se na Tabela 15 que todas as interações entre dois fatores se mostraram significativas, porém o único efeito quadrático que apresentou significância foi o tempo de cura.

Do mesmo modo como foi realizado para os resultados de resistência à compressão simples, optou-se por indicar o modelo de regressão considerando um tempo de cura de 7 dias. Para tanto, é apresentado nas Equações 14 e 15, o modelo gerado, a partir da substituição de tal fator, para cada material de base estudado.

$$BGTC\ RCD = 0,104399 + 0,000851 * fr + 0,13245 * ci - 0,000764 * fr * ci \quad (14)$$

$$SC\ RCD = 0,116199 + 0,002451 * fr + 0,13245 * ci - 0,000764 * fr * ci \quad (15)$$

Onde:

- RCD – resistência à tração por compressão diametral (MPa);

- ci – teor de cimento (%);
- fr – porcentagem de fresado (%).

Na Tabela 16 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, os quais foram obtidos a partir da média de doze amostras para os pontos centrais e de dois valores para as demais misturas estudadas.

Tabela 16: Resultados de RCD

Mistura	RCD (MPa)			Mistura	RCD (MPa)		
	3 dias	7 dias	14 dias		3 dias	7 dias	14 dias
BGTC 1,17-50	0,19	0,25	0,23	SC 1,17-50	0,30	0,21	0,33
BGTC 2-20	0,29	0,33	0,51	SC 2-20	0,22	0,33	0,58
BGTC 2-80	0,17	0,23	0,33	SC 2-80	0,34	0,47	0,63
BGTC 4-7,57	0,38	0,80	0,73	SC 4-7,57	0,35	0,66	0,96
BGTC 4-50	0,32	0,54	0,59	SC 4-50	0,45	0,63	0,83
BGTC 4-92,43	0,37	0,67	0,51	SC 4-92,43	0,31	0,67	0,63
BGTC 6-20	0,63	0,75	1,18	SC 6-20	0,64	0,82	1,22
BGTC 6-80	0,64	0,67	0,58	SC 6-80	0,58	0,83	0,77
BGTC 6,83-50	0,58	0,86	0,86	SC 6,83-50	0,75	0,60	0,95

Na Tabela 16 observa-se que os resultados de RCD para BGTC variaram de 0,17 MPa (BGTC 2-80 – 3 dias) a 1,18 MPa (BGTC 6-20 – 14 dias) e entre 0,21 MPa (SC 1,17-50 – 7 dias) e 1,22 MPa (SC 6-20 – 14 dias) para as misturas com solo-cimento, o que indica que existe pouca diferença no comportamento à tração por compressão diametral entre os materiais analisados. Apenas misturas com baixos teores de cimento (BGTC 1,17-50, BGTC 2-20, BGTC 2-80, SC 1,17-50 e SC 2-20) apresentaram resistências inferiores a 0,40 MPa, como proposto por Fedrigo (2015) como RCD mínimo aos 7 dias de cura.

Os resultados obtidos graficamente estão dispostos na sequência do trabalho, iniciando-se pelo gráfico de efeitos principais, apresentado na Figura 33.

Na Figura 33, confirma-se a grande influência que o teor de cimento exerce na resistência à tração por compressão diametral. Além disso, pode-se verificar que diferentemente dos resultados de RCS, nos quais a porcentagem de fresado e o teor de cimento demonstraram

uma função polinomial, a RCD foi influenciada linearmente pela incorporação de fresado e de cimento, de maneira negativa e positiva, respectivamente.

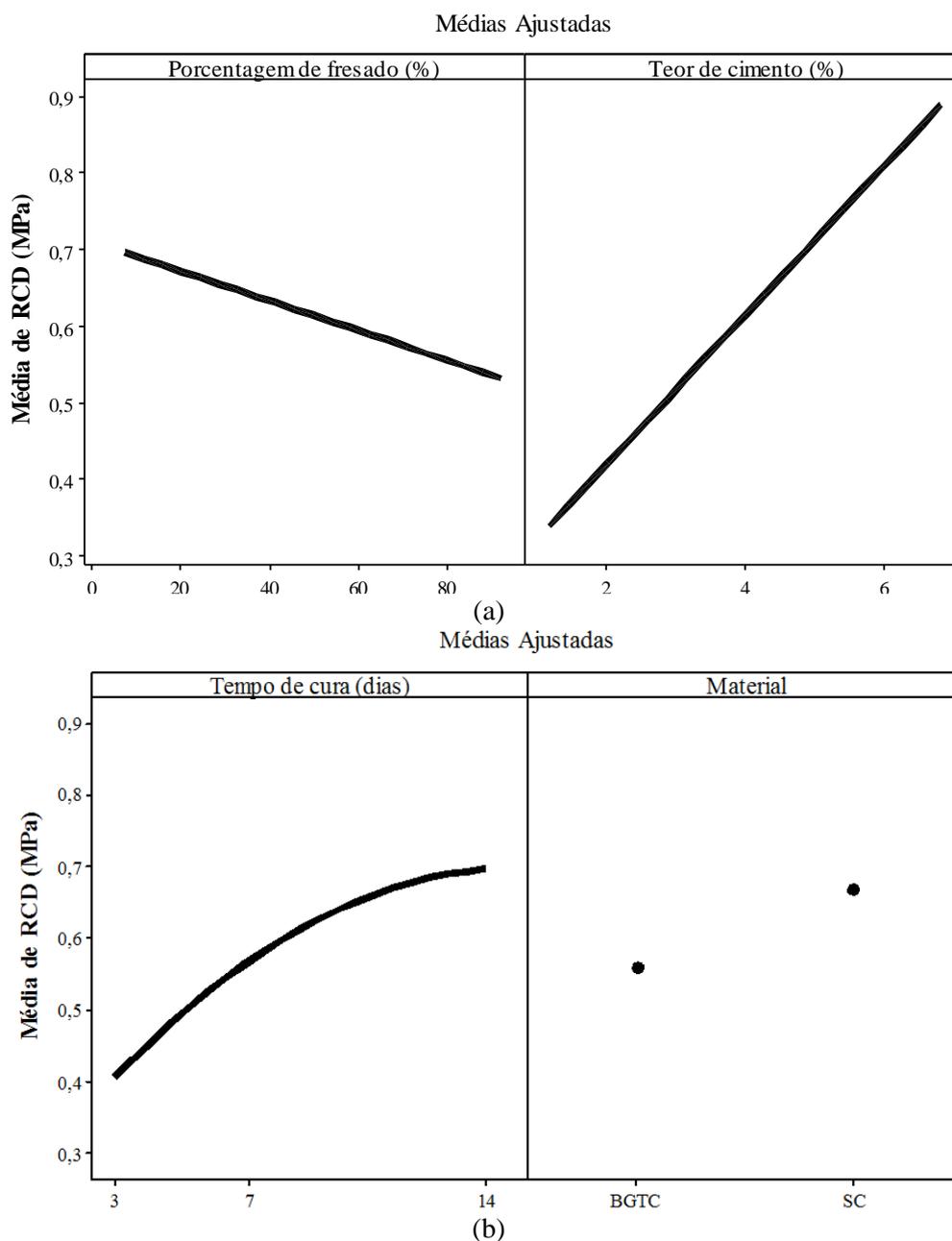


Figura 33: Gráfico de efeitos principais para RCD - avaliação da influência da porcentagem de fresado e teor de cimento (a) e do tempo de cura e material (b)

Tal desempenho indica que ao empregar um teor de cimento acima de 6,83%, a tendência é que a mistura alcance RCD superior à obtida para tal condição. Diferente do tempo de cura, que apresenta uma tendência à estabilidade (menos pronunciada do que para os ensaios de RCS), sendo que ao aumentar o intervalo de cura, a elevação da resistência não é garantida.

Para verificar o comportamento da interação entre duas variáveis, foram desenvolvidos gráficos de contorno considerando a relação entre a porcentagem de fresado e o teor de cimento aos 7 dias de cura, sendo expostos na Figura 34. Para as demais idades de cura (3 e 14 dias), as interações são apresentadas nos gráficos do Apêndice A.

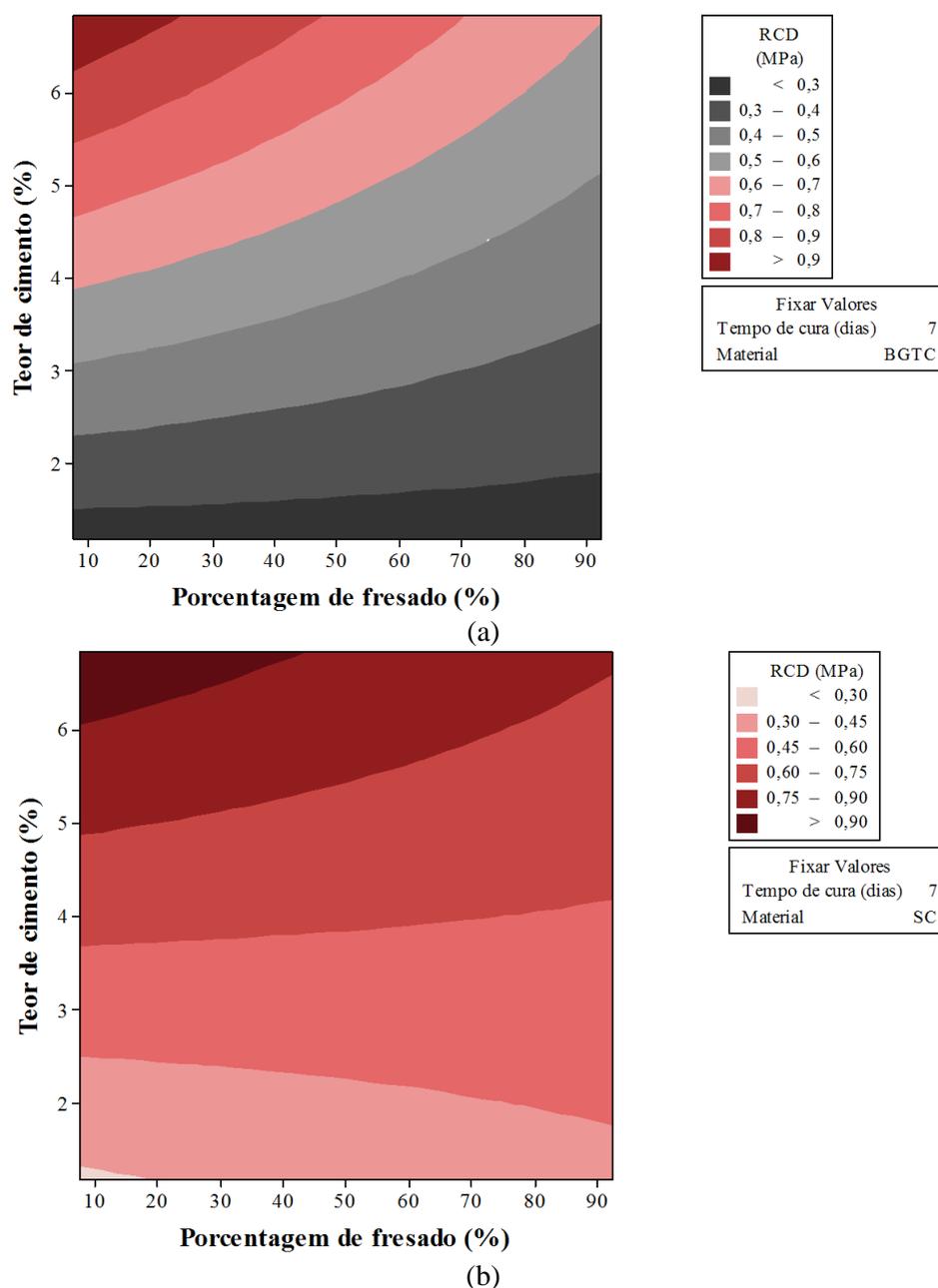


Figura 34: Gráfico de contorno de RCD com 7 dias de cura para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b)

A partir da Figura 34, observa-se que o efeito da porcentagem de fresado é menor para menores teores de cimento, além disso, há maior influência dos fatores analisados nos

parâmetros de resistência à tração por compressão diametral das misturas com BGTC, pois o intervalo de valores é o mesmo, porém existem mais níveis dentro desse (8 níveis para misturas com BGTC e 6 níveis para SC). A fim de verificar a influência da interação entre outras variáveis, a Figura 35 apresenta o comportamento a partir de gráficos de contorno simultâneos das misturas com BGTC e solo-cimento.

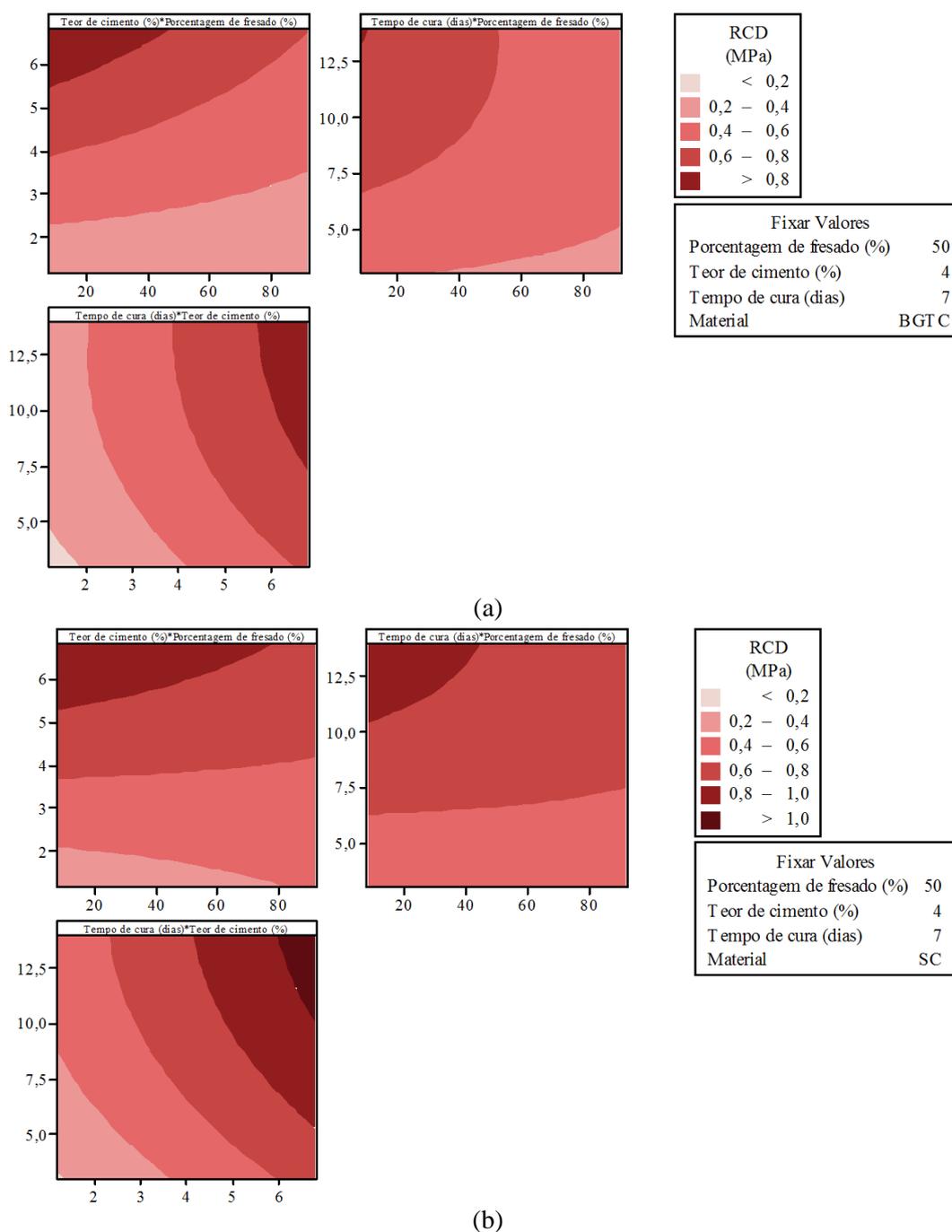


Figura 35: Gráficos de contorno de RCD simultâneos para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b)

Para desenvolver os gráficos da Figura 35 fixaram-se o teor de cimento em 4%, a porcentagem de fresado em 50% e o tempo de cura em 7 dias. Observa-se que todas as interações com dois fatores se mostraram significativas, conforme indicado na Tabela 15.

Como o DNIT (2013a) sugere valores de resistência entre 0,25 e 0,35 MPa aos 7 dias de cura, optou-se por verificar quais misturas se enquadrariam nesse intervalo, Figura 36.

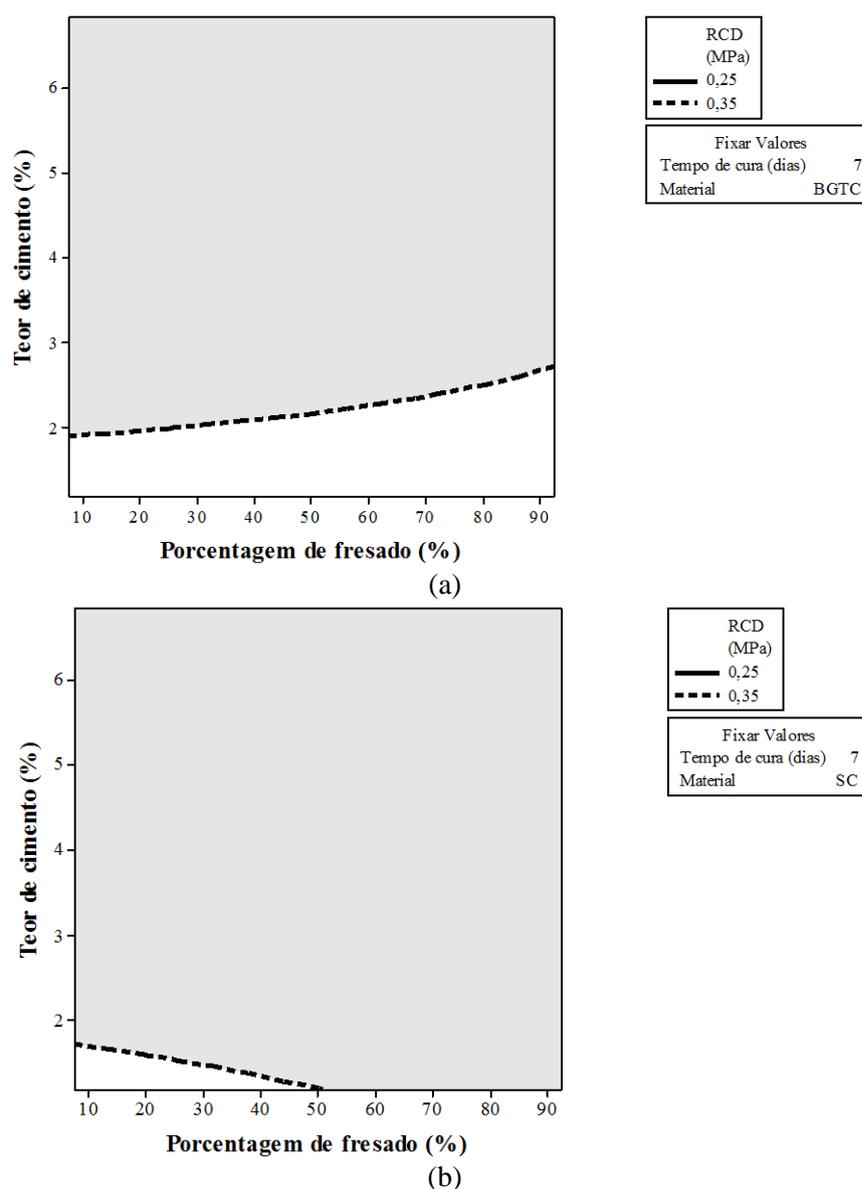


Figura 36: Gráfico de contorno de RCD considerando um intervalo específico de resistência para as misturas de (a) BGTC e (b) solo-cimento

Na Figura 36 (a), observa-se que para as misturas com BGTC, é possível executar uma mistura com qualquer porcentagem de fresado, desde que a quantidade de cimento seja

compatível com o estabelecido nacionalmente. Todavia, conforme Figura 36 (b), o mesmo não ocorre com as composições com solo-cimento, já que a RCD dessas misturas se mostrou superior a esse intervalo, sendo somente possível empregar misturas com quantidade de fresado inferior a 50% e com níveis bastante baixos de cimentação (abaixo de 2% de cimento), resultando em pouquíssimas possibilidades para restauração do pavimento.

Essa tendência (maiores opções de porcentagem de fresado e teor de cimento) foi verificada anteriormente na análise dos resultados de RCS, indicando que o emprego de BGTC na reciclagem de pavimentos com adição de cimento se enquadra melhor nas faixas estabelecidas pelo DNIT (2013a) do que o solo-cimento.

5.3.2.1 Correlação entre RCD e RCS

Na Figura 37 foi realizada a relação entre os valores de RCD e RCS a fim verificar a existência de uma correlação significativa.

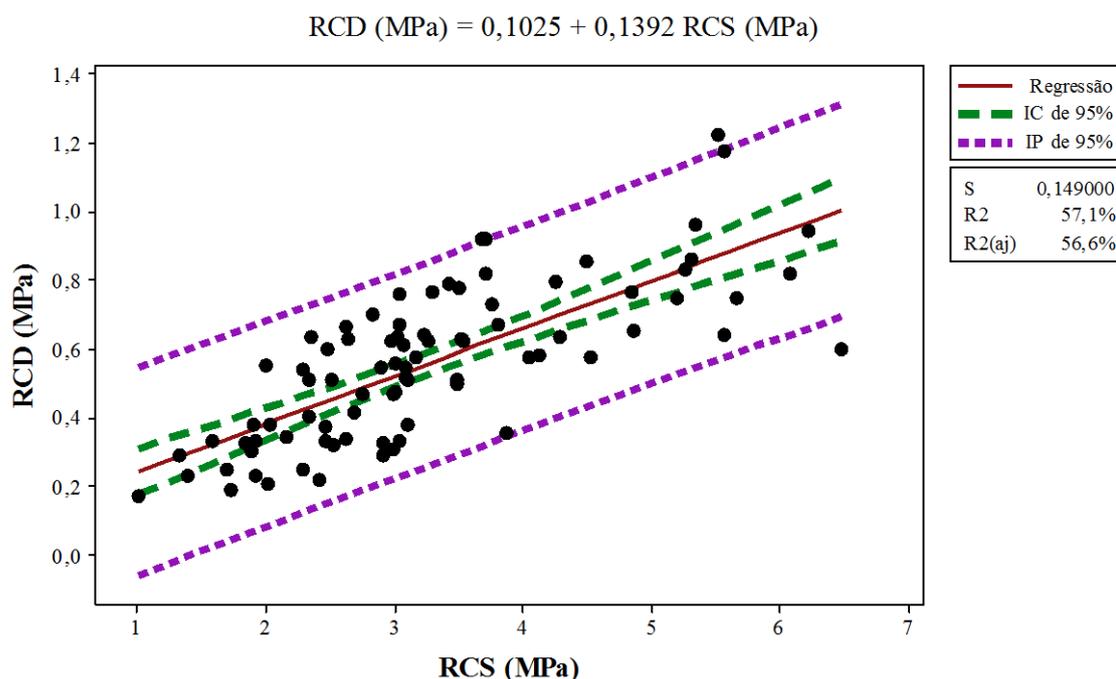


Figura 37: Correlação entre RCD e RCS

A partir da Figura 37 é possível observar que a correlação entre as resistências analisadas é pouco significativa, já que o R^2 é igual a 57%. Por isso, optou-se por separar os resultados de acordo com o material a fim de verificar uma possível correlação para os diferentes materiais estudados. Os resultados são apresentados na Figura 38.

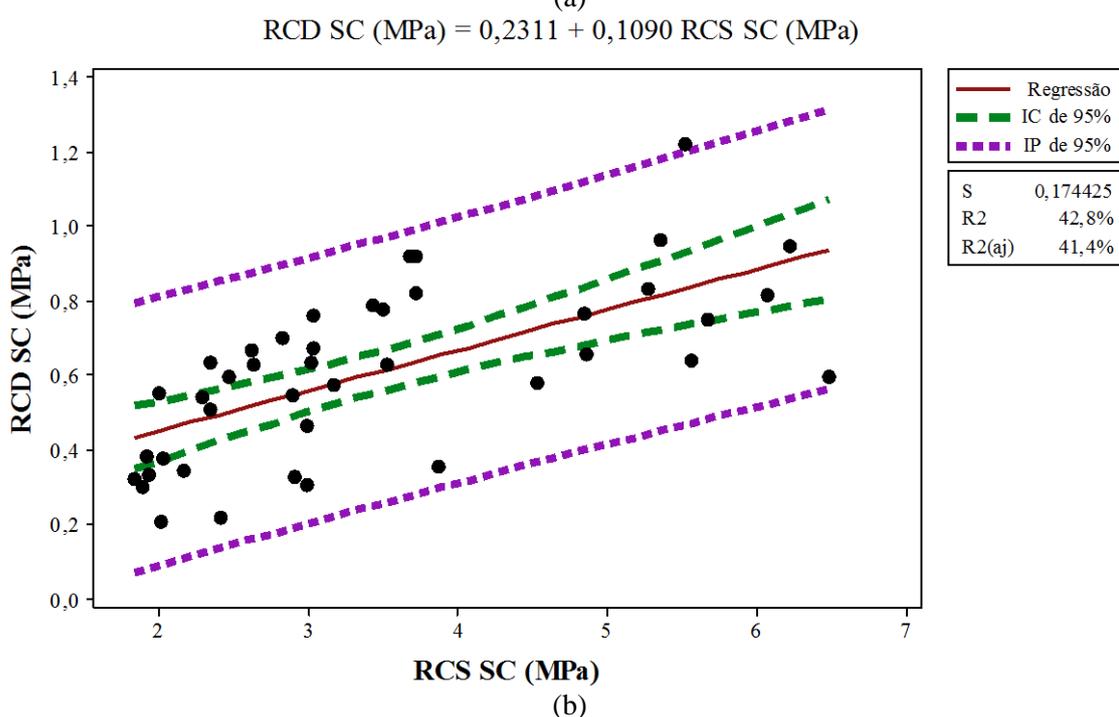
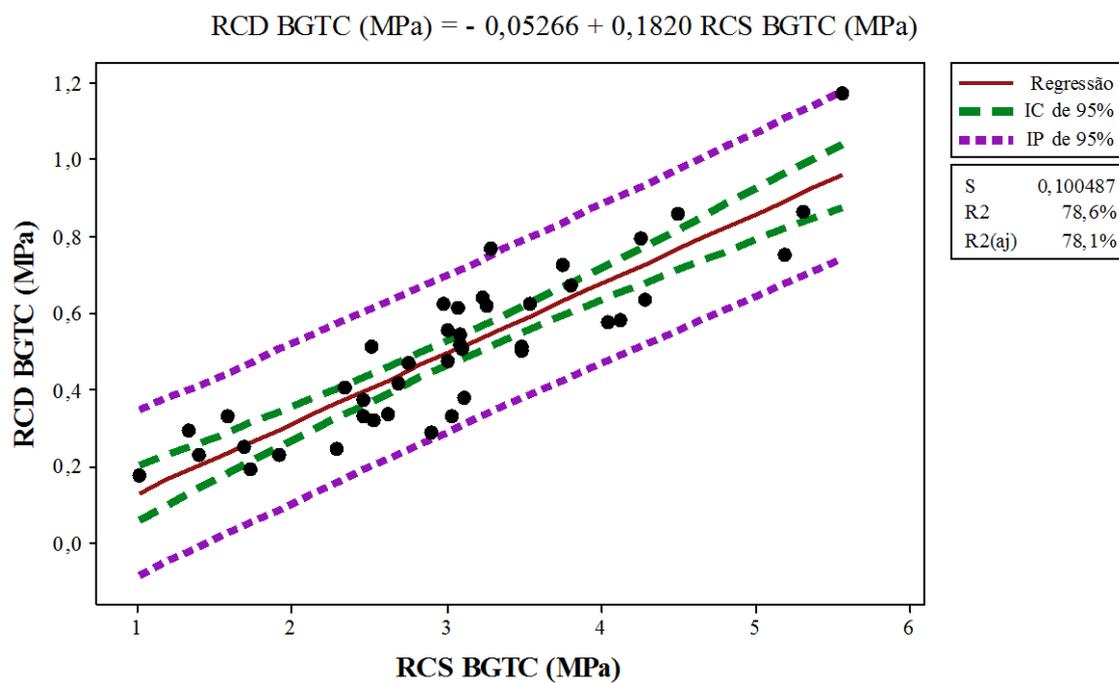


Figura 38: Correlação entre RCD e RCS para as misturas contendo (a) BGTC e (b) solo-cimento

A Figura 38 (b) demonstra que a correlação entre os resultados de RCD e RCS para misturas com solo-cimento é pouco expressiva, já que o R^2 obtido foi de 43%. Porém, para a análise realizada com as composições de BGTC, os resultados foram mais satisfatórios, pois o R^2 foi igual a 79%, como pode ser visualizado na Figura 38 (a).

Desta maneira, o modelo numérico que representa a relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples está disponibilizado na Figura 38 (a). Verificou-se também que a relação RCD/RCS variou de 0,10 a 0,23 para as misturas compostas de BGTC, sendo que a valor médio obtido foi igual a 0,16. Resultado semelhante foi obtido por Fedrigo (2015) (0,18 para misturas com BGS). Todavia, Ji *et al.* (2015) indicaram uma relação de 0,10 entre a RCD e a RCS para composições com BGTC, a qual é consideravelmente inferior a obtida.

5.3.2.2 Comparação com resultados obtidos por outros pesquisadores

Da mesma maneira como foi realizado para os ensaios de RCS, estão disponíveis na Tabela 17, os resultados correspondentes às análises quanto à RCD aos 7 dias de cura.

Os resultados da Tabela 17 demonstraram que assim como a RCS, a RCD é um parâmetro bastante avaliado por outros pesquisadores. Pode se verificar também que os resultados obtidos nesta dissertação apresentaram comportamento similar aos demais, com exceção dos resultados obtidos por Isola *et al.* (2013), que demonstraram resistências bastante elevadas.

A partir da análise das composições com agregado virgem, observou-se que Paiva e Oliveira (2010) obtiveram resistência ligeiramente inferior do que a mistura com BGTC, sendo que a RCD da composição com solo-cimento pareceu ser mais resistente à tração. Porém, Isola *et al.* (2013) alcançaram elevados valores para as misturas estudadas com agregado virgem, com resultados superiores ao dobro das resistências obtidas para os demais materiais (BGTC e solo-cimento).

O resultado obtido por Paiva e Oliveira (2013) para uma mistura com solo-cimento foi novamente bastante diferente do valor estimado pelo *Minitab* a partir das análises realizadas nesta dissertação. Já as composições analisadas por Ji *et al.* (2015) envolvendo misturas com BGTC foram um pouco inferiores das obtidas nesta pesquisa, sendo que, para a RCS verificou-se o oposto. Porém, percebe-se novamente a concordância entre os valores, pois em ambos os casos, o cimento melhora o comportamento à tração, da mesma maneira que o fresado reduz a resistência.

Tabela 17: Comparação entre os resultados de RCD aos 7 dias desta dissertação com valores obtidos pelos demais pesquisadores

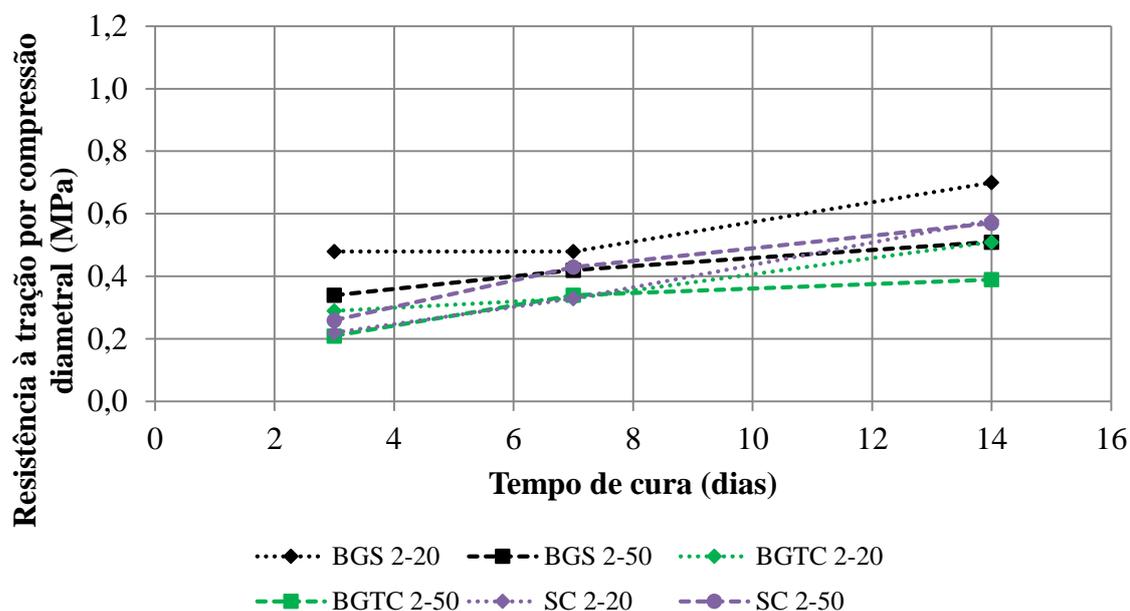
Referência	Material da base	Teor de cimento (%)	Porcentagem de fresado (%)	RCD _{7dias} (MPa)	RCD _{7dias} (MPa) BGTC	RCD _{7dias} (MPa) SC
PAIVA e OLIVEIRA, 2010	Agregado virgem	3,00	77,00	0,31**	0,39	0,53
ISOLA <i>et al.</i> , 2013	Agregado virgem	3,56	30,00	1,20	0,52	0,58
		3,97	70,00	1,40	0,48	0,60
PAIVA e OLIVEIRA, 2013	Solo-cimento	3,00	30,00	0,22	0,46	0,52
ELY, 2014	BGS	4,00	70,00	0,26	0,48	0,60
		2,00	20,00	0,48	0,33*	0,33*
FEDRIGO, 2015	BGS	4,00	50,00	0,90	0,59	0,63
		2,00		0,34	0,34	0,43
		4,00	30,00	0,65	0,54*	0,63*
		3,00		0,35***	0,46	0,52
JI <i>et al.</i> , 2015	BGTC	4,00	50,00	0,42***	0,57	0,63
		3,00		0,28***	0,43	0,52
		4,00	0,39***	0,54*	0,63*	

*Resultados alcançados experimentalmente, sem a necessidade de prever pelo *software*. **Resultado obtido para as misturas compactadas na umidade ótima e com GC igual a 100%. ***Resultados relacionados às misturas sem agregado adicional.

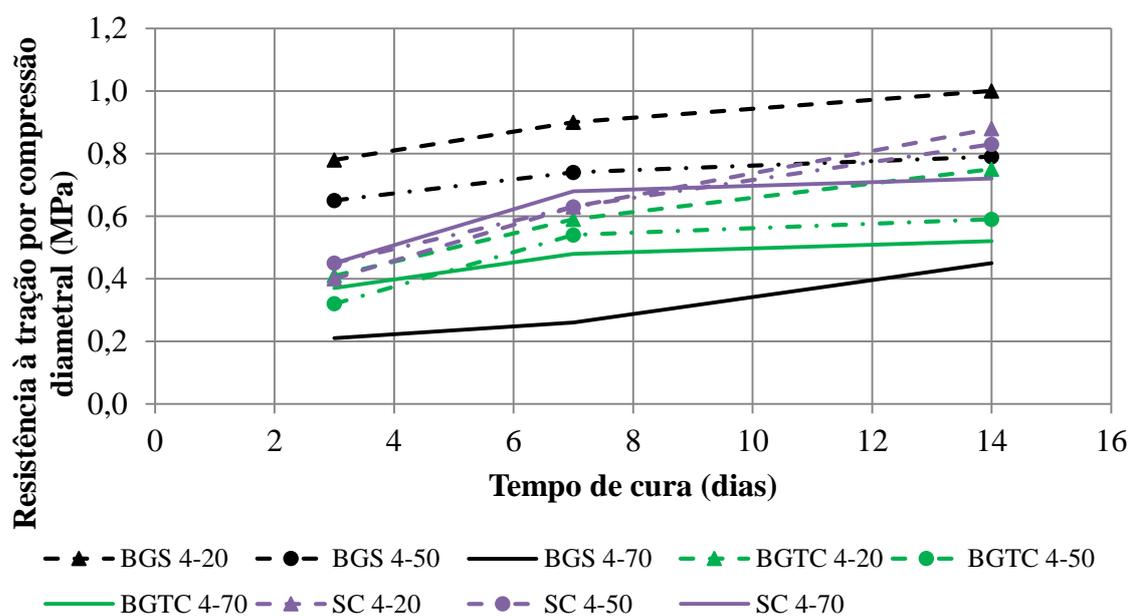
Para fins comparativos, estão expressos na Figura 39, os resultados obtidos por Fedrigo (2015) e Ely (2014) a partir da aplicação da energia Modificada, assim como os resultados alcançados nesta dissertação.

Na Figura 39, observa-se que para as misturas com 2% de cimento, a RCD é similar entre os materiais de base empregados aos 7 dias de cura (variando entre 0,33 e 0,48 MPa). Todavia, a variação entre a RCD aos 7 dias de cura para misturas com 4% de cimento é mais elevada (de 0,26 até 0,90 MPa), sendo que essa variação se refere às composições com BGS.

Na Figura 39 e na Tabela 17 foi verificado que apenas as misturas SC 2-20, BGTC 2-20 e BGTC 2-50 alcançaram resultados de RCD inferiores a 0,40 MPa aos sete dias de cura. Tal valor foi proposto por Fedrigo (2015) como limite inferior de RCD para misturas recicladas com cimento e bases de BGS.



(a)



(b)

Figura 39: Comparação entre a RCD de misturas idênticas considerando a reciclagem de bases compostas de BGS, BGTC e SC

5.3.3 Determinação do coeficiente de Poisson

Conforme explicado no item 4.2.3.3, o ensaio para determinação do coeficiente de Poisson foi o único em que não foi empregado o planejamento experimental, sendo realizada a verificação, em triplicatas, para as misturas 4-50 aos 14 dias de cura.

A partir dos resultados disponibilizados em arquivo de *excel* foi necessário selecionar os intervalos de dados de interesse para posterior cálculo do coeficiente de Poisson, a partir da média dos valores correspondentes. Na Tabela 18 são apresentados os resultados, assim como a média dos dados obtidos no ensaio.

Tabela 18: Resultados dos ensaios para determinação do coeficiente de Poisson

Mat.	CP	Pto.	Tensão (MPa)	Def. Long (mm/mm)	LVDT Transversal (mm)	Def. Transversal (mm/mm)	μ	$\mu_{\text{médio}}$	Desvio padrão
BGTC	1	S1	0,26	0,00005	0,0036	1,79E-05	0,28	0,26	0,04
		S2	1,36	0,00083	0,0476	2,38E-04			
	2	S1	0,24	0,00005	0,0008	4,04E-06	0,22		
		S2	1,36	0,00071	0,0299	1,49E-04			
	3	S1	0,35	0,00005	0,0008	3,92E-06	0,29		
		S2	1,37	0,00187	0,1058	5,29E-04			
Solo-cimento	4	S1	0,24	0,00005	0,0009	4,64E-06	0,21		
		S2	1,42	0,00045	0,0178	8,91E-05			
	5	S1	0,29	0,00005	0,0001	6,28E-07	0,13	0,17	0,05
		S2	1,42	0,00041	0,0093	4,65E-05			
	6	S1	0,32	0,00005	0,0005	2,43E-06	0,11		
		S2	1,41	0,00038	0,0078	3,90E-05			

A partir da Tabela 18, pode-se observar a variabilidade nos resultados obtidos para o coeficiente de Poisson, especialmente nas misturas com solo-cimento. Além de se tratarem de materiais bastante heterogêneos, a forma de realização do ensaio, com controle manual de tensão aplicada, pode ter contribuído para a variabilidade dos resultados. Quanto à forma de realização do ensaio, esclarece-se que se seguiu a norma para determinação de coeficiente de Poisson de concreto. Essa norma determina uma taxa de aplicação de carga muito elevada, que não permitiria a medição das deformações em materiais bem menos rígidos, como são as misturas recicladas.

Por mais que o desvio padrão tenha sido elevado, especialmente no caso do solo-cimento, constata-se que o coeficiente de Poisson das misturas com solo-cimento é menor que o correspondente às misturas com BGTC.

Na Tabela 19 apresentam-se os coeficientes de Poisson sugeridos por outros autores.

Tabela 19: Valores de coeficiente de Poisson encontrados na literatura

Material	Intervalo de valores	$\mu_{\text{recomendado}}$	Referência
Materiais tratados com cimento		0,25	MINGUELA, 2011
Materiais estabilizados com cimento	0,15 - 0,30	0,20	WEN <i>et al.</i> , 2014
BGTC	0,20 - 0,25	0,20	DER-SP, 2006
CCR, BGTC	0,15 - 0,20		IP - 08, 2004
SC, SMC	0,20 - 0,30		BALBO, 2007
Solo-cimento		0,17	CERATTI, 1991
Bases recicladas		0,20	TRICHÊS e SANTOS, 2011
		0,25	OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2010

Com base nos valores da Tabela 19, é possível verificar que os resultados obtidos estão de acordo com o que está disposto na literatura, já que se aproximam dos coeficientes de Poisson empregados para diferentes materiais cimentados. Ainda, deve-se lembrar de que os CPs analisados possuem 50% de material fresado, tornando a estrutura um pouco diferente das demais analisadas.

5.3.4 Módulo de resiliência

Para realizar a análise do referido ensaio, optou-se por empregar os valores correspondentes às três leituras representativas. Portanto, foram analisados 252 valores, sendo que a partir desses obteve-se o modelo disponível nas Equações 16 e 17.

$$BGTC MRD = -771 - 104,6 fr + 1931 ci + 1018 tc + 0,433 fr * fr - 24,4 tc * tc \quad (16)$$

$$SC MRD = -431 - 63,0 fr + 1098 ci + 1018 tc + 0,433 fr * fr - 24,4 tc * tc \quad (17)$$

Onde:

- MRD – módulo de resiliência diametral (MPa);
- ci – teor de cimento (%);
- fr – porcentagem de fresado (%);
- tc – tempo de cura (dias).

Tal modelo alcançou um R^2 de 74% e $R^2_{ajustado}$ igual a 73%, resultados considerados aceitáveis em decorrência do tamanho da amostra e da variabilidade de dados encontrados nesse tipo de ensaio, principalmente para casos em que o CP ensaiado é bastante rígido, já que quanto mais elevada a rigidez do material, maior a possibilidade de erro na leitura de deformação. Além disso, optou-se por não retirar os valores considerados atípicos do modelo, o que interfere no ajuste do mesmo.

Na Tabela 20 são apresentados os coeficientes do modelo de regressão em nível codificado, assim como o valor-p referente a cada efeito analisado.

Tabela 20: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para MRD

Termo	Coeficiente	Valor-p
Constante	9669	0,000
Porcentagem de fresado (%)	-1719	0,000
Teor de cimento (%)	4284	0,000
Tempo de cura (dias)	3317	0,000
Material (BGTC)	24	0,866
Porcentagem de fresado (%) * Porcentagem de fresado (%)	779	0,049
Tempo de cura (dias) * Tempo de cura (dias)	-738	0,028
Porcentagem de fresado (%) * Material (BGTC)	-882	0,001
Teor de cimento (%) * Material (BGTC)	1177	0,000

A partir da Tabela 20, verificou-se que o termo linear material não é considerado significativo, porém como se trata de uma variável de entrada e de duas interações com dois fatores, em que um deles era o material, terem se mostrado significativas, optou-se por não retirá-lo do modelo.

Dentre as variáveis analisadas, verificou-se que o teor de cimento demonstrou ser o fator que mais afeta os resultados de módulo de resiliência, seguido do tempo de cura e da porcentagem de fresado, tais condições podem ser verificadas na Figura 40.

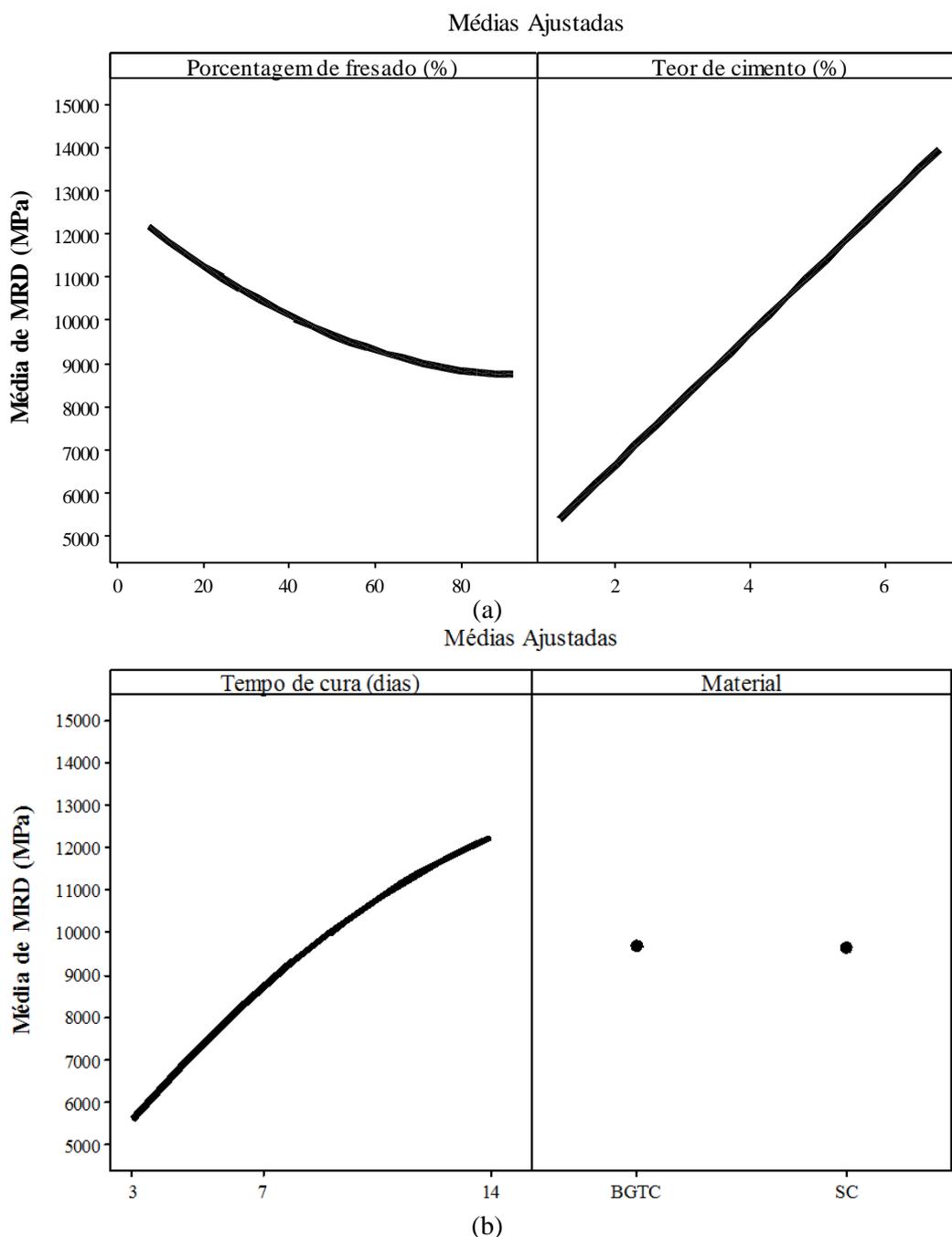


Figura 40: Gráfico de efeitos principais para MRD: avaliação da influência da porcentagem de fresado e teor de cimento (a) e do tempo de cura e material (b)

Na Figura 40 verifica-se que o módulo de resiliência se mostrou similar para ambos os materiais estudados, ao contrário do que ocorreu nos ensaios de avaliação da resistência. Tal

comportamento está diretamente relacionado com o coeficiente de Poisson, já que esse é parâmetro de entrada, interferindo de maneira significativa no MRD a partir da redução dos módulos de resiliência para as misturas de solo-cimento em comparação com as de BGTC.

Outra condição observada é que o tempo de cura demonstrou grande influência nos resultados, alcançando valores extremos. Verificou-se também que o MRD cresce linearmente com o teor de cimento, podendo alcançar módulos ainda maiores ao adicionar teores de cimento mais elevados. Desempenho esse que também foi observado para os resultados de RCD (item 5.3.2).

Para fins de quantificação, os resultados para o ensaio de módulo de resiliência estão expostos na Tabela 21. Ressalta-se que os valores correspondem à média das três leituras para o CP ensaiado, com exceção dos pontos centrais, os quais correspondem à média de seis CPs.

Tabela 21: Resultados de MRD

Mistura	MRD (MPa)			Mistura	MRD (MPa)		
	3 dias	7 dias	14 dias		3 dias	7 dias	14 dias
BGTC 1,17-50	484	7109	4779	SC 1,17-50	3832	2199	5855
BGTC 2-20	1910	8563	15793	SC 2-20	2571	7586	11233
BGTC 2-80	1858	3091	7130	SC 2-80	3377	6362	11139
BGTC 4-7,57	8292	10056	13574	SC 4-7,57	7515	9653	12848
BGTC 4-50	4605	8268	11061	SC 4-50	6737	9915	12674
BGTC 4-92,43	5804	9108	14123	SC 4-92,43	3104	6285	8505
BGTC 6-20	14296	16309	20031	SC 6-20	8680	11148	18182
BGTC 6-80	2759	7116	14887	SC 6-80	8241	13866	19357
BGTC 6,83-50	16025	16767	18917	SC 6,83-50	6624	5795	10435

Na Tabela 21, observa-se que os resultados obtidos apresentaram uma amplitude de variação bastante elevada. As misturas com BGTC em sua composição apresentaram módulos de resiliência entre 484 MPa (BGTC 1,17-50 – 3 dias) e 20.031 MPa (BGTC 6-20 – 14 dias), e as composições com solo-cimento obtiveram resultados que variaram de 2.199 MPa (SC 1,17-50 – 7 dias) até 19.357 MPa (SC 6-80 – 14 dias).

Observa-se que o maior intervalo de variação de módulo de resiliência foi obtido para as misturas com BGTC, o que está associado ao coeficiente de Poisson empregado, por se tratar

de um dado de entrada, conforme Equação 3. Isto é, para grandes deformações, o módulo resultante é pequeno, e o coeficiente de Poisson não afeta significativamente o resultado, porém para pequenas deformações, a influência do parâmetro passa a ser notável, alterando o módulo de resiliência de maneira considerável.

A partir dos resultados da Tabela 21, verifica-se também, que a tendência é de que o módulo aumente com o tempo de cura, com exceção das misturas BGTC 1,17-50, SC 1,17-50 e SC 6,83-50, que apresentaram maior ou menor MRD aos 7 dias de cura. Um dos problemas de ensaiar apenas um CP por ponto amostral está relacionado com a representatividade dos resultados, já que nesses casos, não é possível definir o erro sem realizar a análise estatística dos experimentos.

Mesmo que o modelo não tenha apresentado significância na interação de dois fatores, optou-se por expressar tais relações graficamente, as quais se encontram expostas na Figura 41.

Para que fosse possível realizar a análise simultânea da interação de dois fatores, foi necessário fixar um valor para cada variável, de modo que um ficasse fixo enquanto as outras variáveis eram analisadas, como já foi realizado nas análises quanto à RCS e RCD.

A partir da Figura 41, verifica-se que mesmo com valor-p superior a 5%, foi possível identificar uma tendência bem definida nas interações analisadas. Também foram expressos graficamente os resultados da interação teor de cimento e porcentagem de fresado para todos os tempos de cura analisados (3, 7 e 14 dias). Esses, por sua vez, são apresentados no Apêndice A.

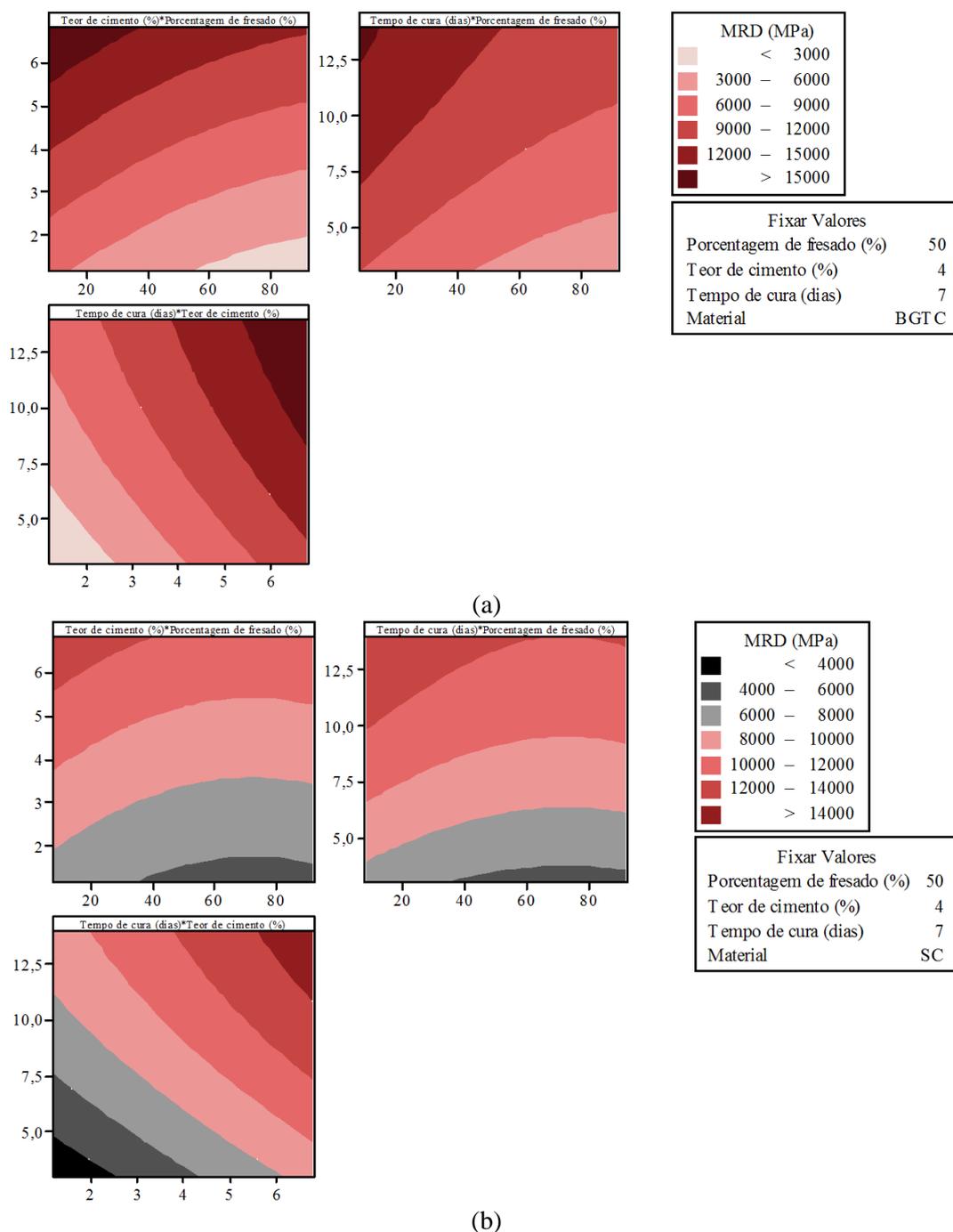
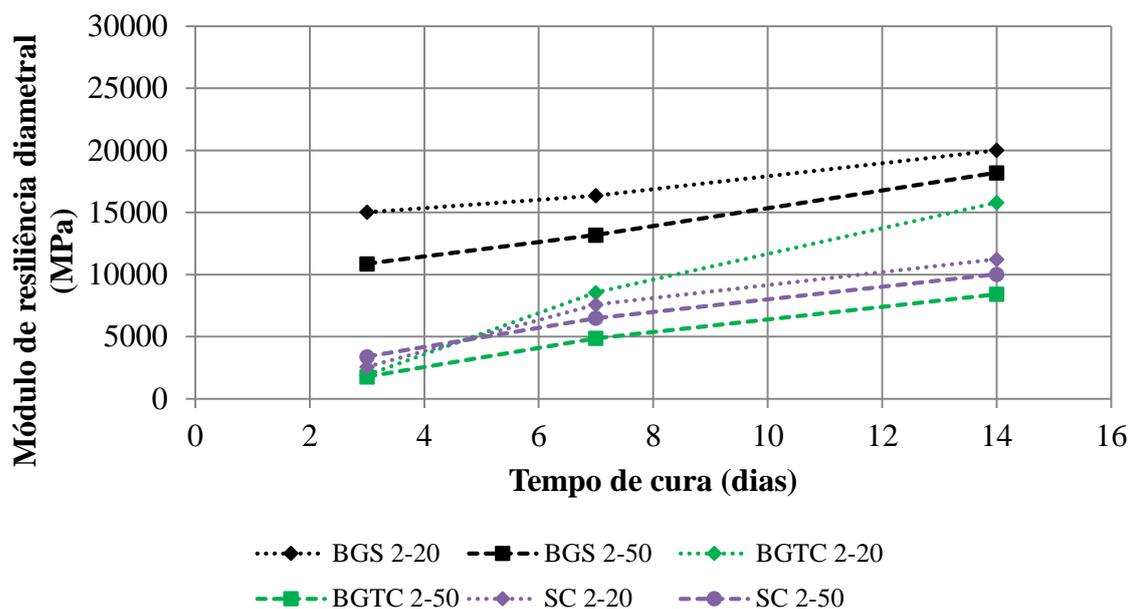


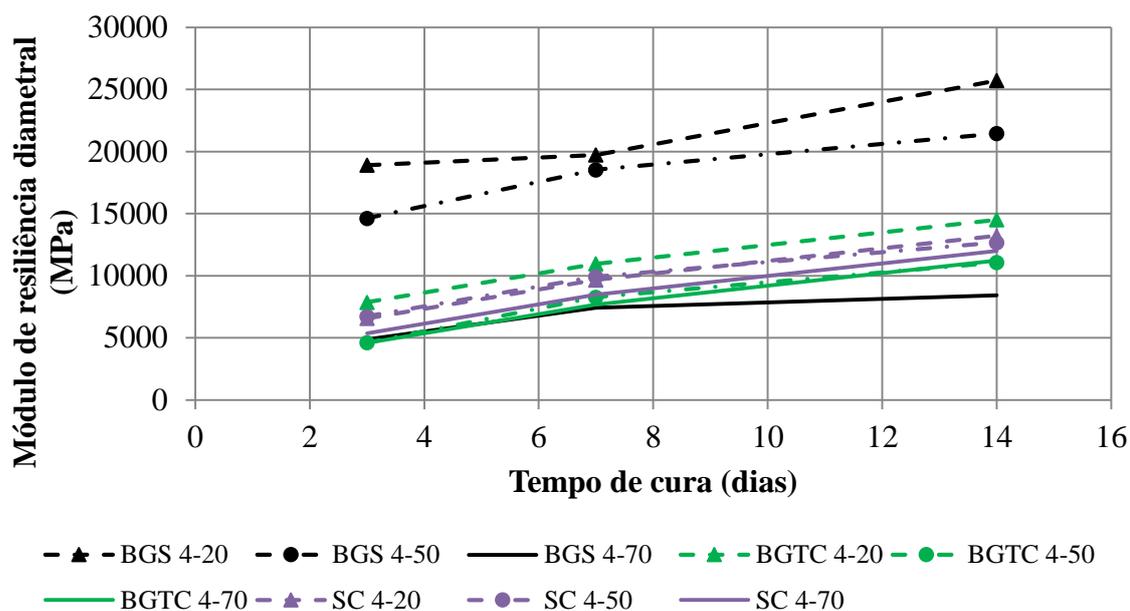
Figura 41: Gráficos de contorno de MRD simultâneos para as misturas contendo BGTC (a) e solo-cimento (b)

5.3.4.1 Comparação com resultados obtidos por outros pesquisadores

Na Figura 42, são apresentados os resultados obtidos por Fedrigo (2015) e Ely (2014) ao fazer uso da energia Modificada.



(a)



(b)

Figura 42: Comparação entre o MRD de misturas idênticas considerando a reciclagem de bases compostas de BGS, BGTC e SC

Os resultados da Figura 42 demonstram que o módulo de resiliência das misturas com BGS são superiores aos materiais estudados nesta dissertação, com exceção da composição analisada por Ely (2014), que apresentou MRD semelhante à BGTC. Acredita-se que essa diferença no comportamento está relacionada com o formato das partículas, já que a BGS, por

se tratar de um material granular, não necessita de equipamentos específicos para sua remoção (diferentemente dos materiais cimentados) e então não sofre alteração no formato e na granulometria, o que facilita a compactação, reduz o volume de vazios e enrijece a mistura.

5.4 VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA

Os resultados referentes aos ensaios que analisam o comportamento volumétrico das misturas recicladas encontram-se descritos e analisados na sequência.

5.4.1 Ascensão capilar

Como descrito no item 4.2.4.2, foram realizadas leituras referente à ascensão capilar das amostras com 24, 48 e 72 horas de exposição à água. Foram ensaiados 28 CPs, resultando em um total de 84 leituras, o que gerou um modelo de regressão para cada material de base ensaiado e encontra-se nas Equações 18 e 19.

$$BGTC AC = 89,04 + 0,396 fr - 11,129 ci + 0,3104 ta + 0,00451 fr * fr \quad (18)$$

$$SC AC = 122,51 - 0,169 fr - 11,129 ci + 0,3104 ta + 0,00451 fr * fr \quad (19)$$

Onde:

- AC– ascensão capilar (%);
- ci – teor de cimento (%);
- fr – porcentagem de fresado (%);
- ta – tempo de exposição à água (horas).

Tal modelo de regressão obteve um R^2 de 76% e um $R^2_{ajustado}$ de 74%, resultado considerado satisfatório em decorrência das condições do ensaio (leitura manual) e por ter optado por manter os valores atípicos no modelo. Porém, ao contrário dos ensaios de comportamento mecânico, o modelo matemático fornecido para esse ensaio deve ser empregado apenas para questões comparativas, já que cada mistura apresenta comportamento bastante particular, o que dificulta sua “extrapolação”.

São apresentados na Tabela 22 os coeficientes obtidos para cada variável e interação a partir do modelo de regressão linear em nível codificado, assim como os respectivos valores-p.

Tabela 22: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para ascensão capilar

Termo	Coeficiente	Valor-p
Constante	70,56	0,000
Porcentagem de fresado (%)	-14,32	0,000
Teor de cimento (%)	-31,48	0,000
Tempo de exposição à água (horas)	7,45	0,000
Material (BGTC)	-2,61	0,057
Porcentagem de fresado (%) * Porcentagem de fresado (%)	-8,11	0,032
Porcentagem de fresado (%) * Material (BGTC)	11,99	0,000

É possível verificar na Tabela 22 que o termo linear material apresentou valor-p ligeiramente superior a 5%, então se optou pela permanência desse no modelo. Além disso, esse é uma variável de entrada e apresentou significância na interação com a porcentagem de fresado.

Os resultados de ascensão capilar obtidos são apresentados na Tabela 23, sendo que para as misturas referentes aos pontos centrais, o resultado satisfaz à média das seis amostras e as demais composições apresentam o valor correspondente a um CP.

Tabela 23: Resultados de ascensão capilar

Mistura	Ascensão capilar (%)			Mistura	Ascensão capilar (%)		
	24 horas	48 horas	72 horas		24 horas	48 horas	72 horas
BGTC 1,17-50	90,98	100,00	100,00	SC 1,17-50	100,00	100,00	100,00
BGTC 2-20	67,80	100,00	100,00	SC 2-20	100,00	100,00	100,00
BGTC 2-80	84,32	100,00	100,00	SC 2-80	57,85	66,06	82,58
BGTC 4-7,57	67,07	67,07	67,07	SC 4-7,57	70,95	81,80	91,90
BGTC 4-50	53,46	65,97	77,46	SC 4-50	70,54	80,35	86,52
BGTC 4-92,43	58,14	66,33	70,54	SC 4-92,43	24,71	24,71	24,71
BGTC 6-20	33,39	50,13	58,38	SC 6-20	70,48	78,90	91,21
BGTC 6-80	28,74	32,95	32,95	SC 6-80	42,96	42,96	42,96
BGTC 6,83-50	24,81	37,19	37,19	SC 6,83-50	18,79	18,79	18,79

A partir dos dados apresentados na Tabela 23, observa-se que cinco das seis misturas com baixos teores de cimento (BGTC 1,17-50, BGTC 2-20, BGTC 2-80, SC 1,17-50 e SC 2-20)

obtiveram o limite da ascensão capilar, sendo que duas delas alcançaram os 100% dentro das primeiras 24 horas de exposição à água.

Verifica-se também que o solo-cimento não apresenta um bom comportamento quando em contato com a água, já que a capilaridade nas misturas com predominância do material (SC 4-7,57 e SC 6-20) alcançou nível mais elevado do que as composições com o mesmo teor de cimento, mas com predominância de material fresado (SC 4-92,43 e SC 6-80). Tal comportamento se deve à estrutura das partículas de solo-cimento, que são bastante porosas, o que eleva a capacidade de absorção.

Observa-se que as misturas com BGTC e teores de cimento superiores a 6% apresentaram estabilidade na ascensão capilar a partir do primeiro (SC 6-80 e SC 6,83-50) ou do segundo dia (BGTC 6-80 e BGTC 6,83-50) de exposição à água. Porém, essa estabilidade não ocorreu nas composições com predominância da base cimentada (BGTC 6-20 e SC 6-20), as quais apresentaram elevação da ascensão capilar, o que indica que a BGTC é mais porosa do que o material fresado.

A Austroads (2002) sugere ascensão capilar igual ou inferior a 25% após 24 horas de exposição à água, sendo que dentre as 18 misturas analisadas, apenas três ficaram abaixo desse limite (BGTC 6,83-50, SC 4-92,43 e SC 6,83-50). Na Figura 43 estão expostos os efeitos principais observados a partir dos resultados, sendo possível verificar a influência de cada variável na ascensão capilar.

Na Figura 43, verifica-se que o fresado e o cimento influenciam positivamente na ascensão capilar, já que sua incorporação reduz os valores obtidos. O tempo de exposição ao meio aquoso, como esperado, eleva a capilaridade da água no material. Porém, é perceptível que os demais fatores afetam de maneira mais eficiente a propriedade analisada. Com relação ao material, observa-se que a BGTC se comporta melhor frente à ação da água, provavelmente por se tratar de um material bem graduado (menor volume de vazios).

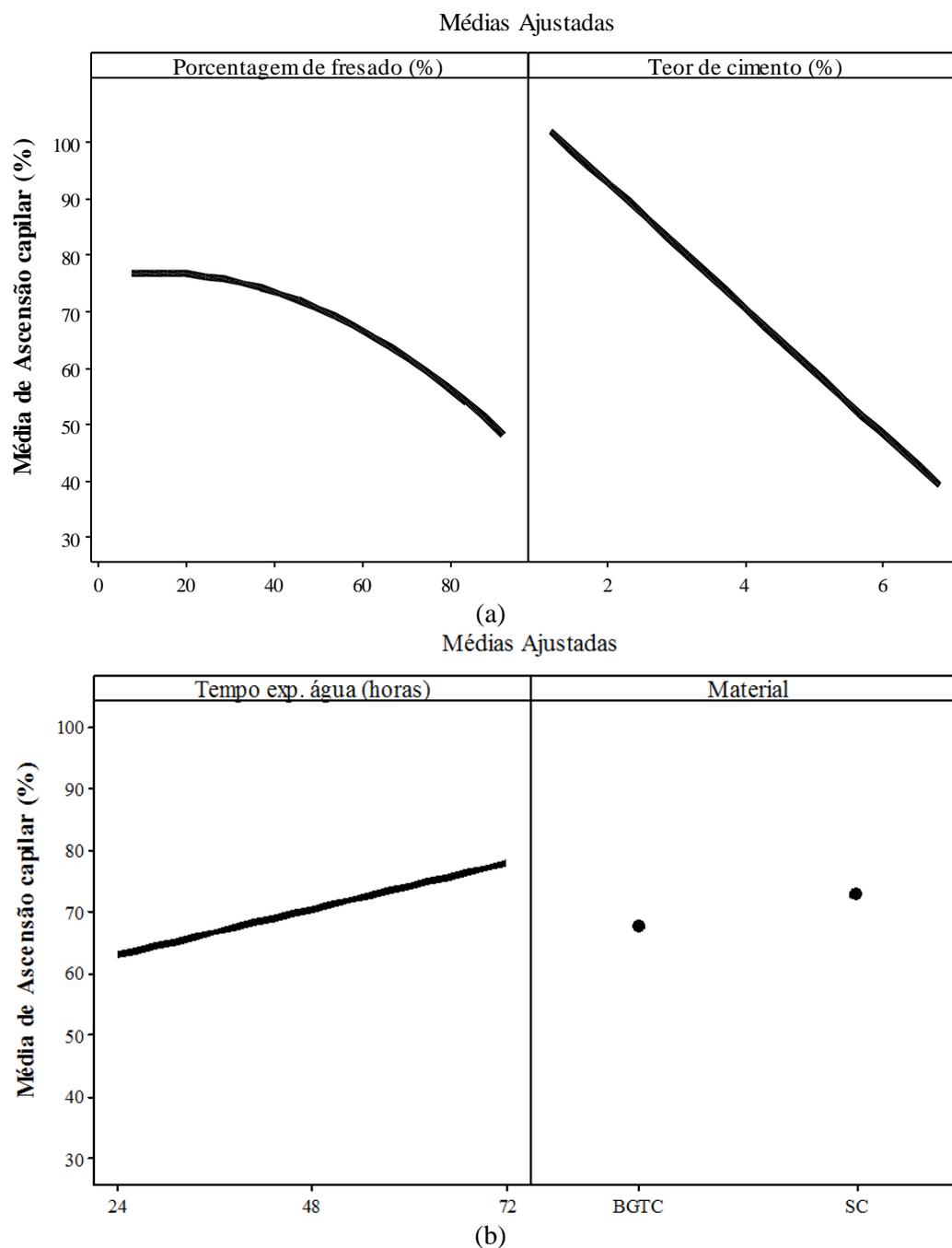


Figura 43: Gráfico de efeitos principais para ascensão capilar: avaliação da influência da porcentagem de fresado e teor de cimento (a) e do tempo de cura e material (b)

Para melhor visualizar a influência do material na ascensão capilar, na Figura 44 é apresentado o gráfico que demonstra o comportamento da BGTC e do solo-cimento.

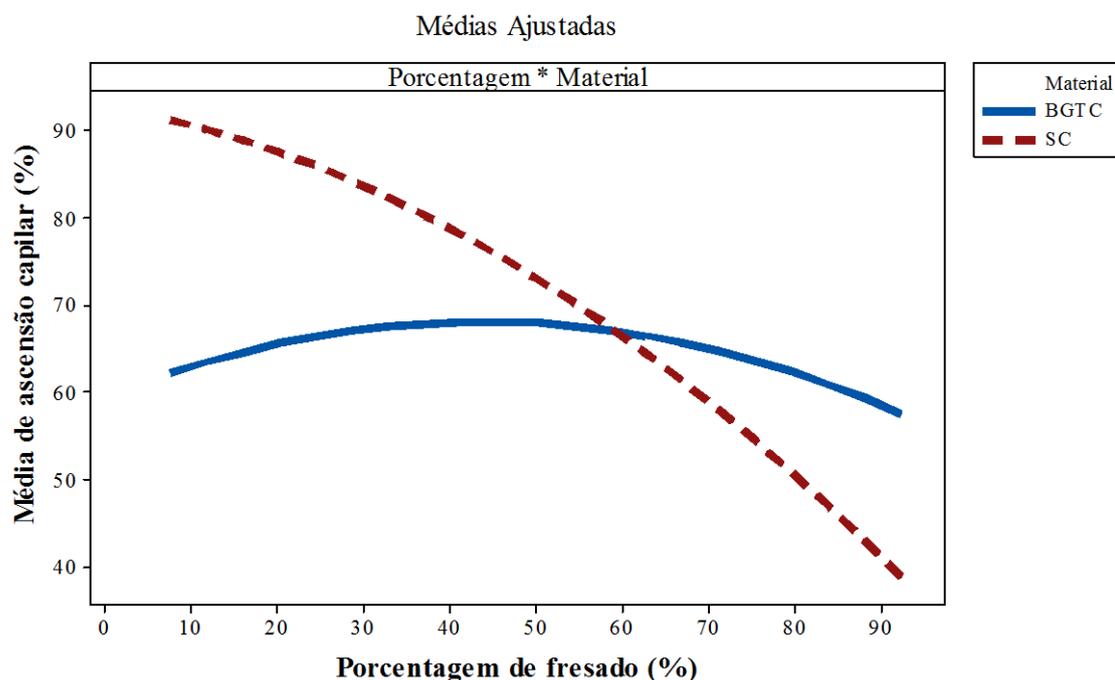


Figura 44: Influência do material na ascensão capilar

O que havia sido estimado durante a análise dos resultados da Tabela 23, é possível visualizar na Figura 44, pois se verifica que a adição de solo-cimento interfere negativamente na ascensão capilar, já que ao acrescentar fresado, ocorre a redução dos valores de saída. Da mesma maneira, observa-se que a BGTC e o fresado com polímero trabalham de modo semelhante, fazendo com que essa variável analisada (porcentagem de fresado) não influencie consideravelmente nos resultados.

A partir dos dados da Tabela 22, verifica-se que nenhuma interação com dois fatores se mostrou significativa. Porém, com intuito de observar possíveis tendências, optou-se por expressar graficamente a relação entre as variáveis para as misturas com BGTC e solo-cimento, as quais estão expostas na Figura 45 (a) e (b), respectivamente.

Na Figura 45, é possível observar que a tendência entre ambos os materiais é semelhante para todas as interações examinadas. Verifica-se também, que dentre essas, a que apresenta maior influência é a interação entre o teor de cimento e a porcentagem de fresado, portanto, optou-se por expor graficamente as relações para os diferentes tempos de exposição à água (24, 48 e 72 horas), os quais estão dispostos no Apêndice A desta dissertação.

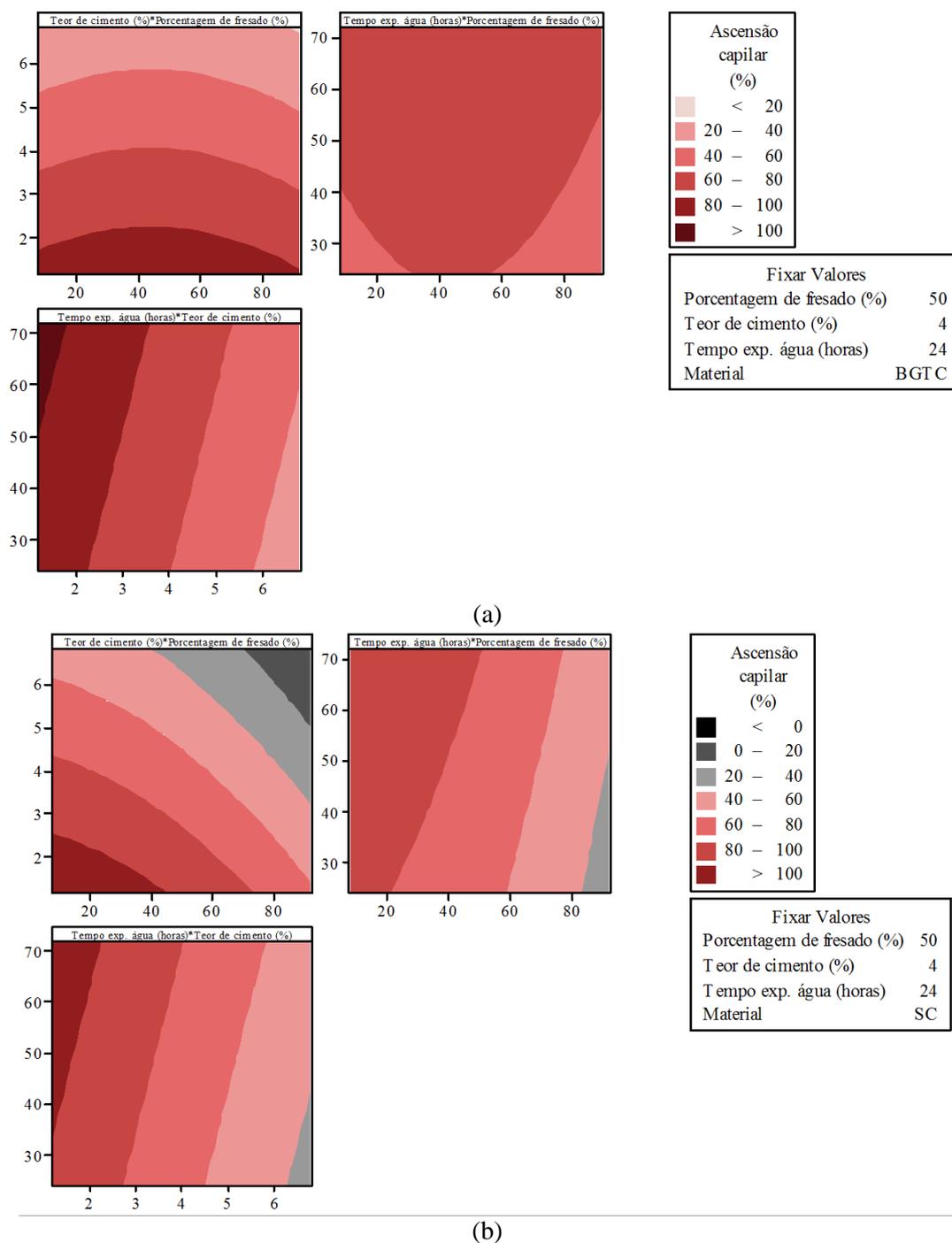


Figura 45: Gráficos de contorno de ascensão capilar simultâneos para as misturas contendo BGT C (a) e solo-cimento (b)

Como observado anteriormente, apenas três misturas se enquadraram dentro do limite sugerido pela Austroads (2002) para ascensão capilar que é de 25% após 24 horas de exposição à água. Portanto, optou-se por verificar quais outras misturas poderiam ser

realizadas para se enquadrar nos parâmetros propostos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 46.

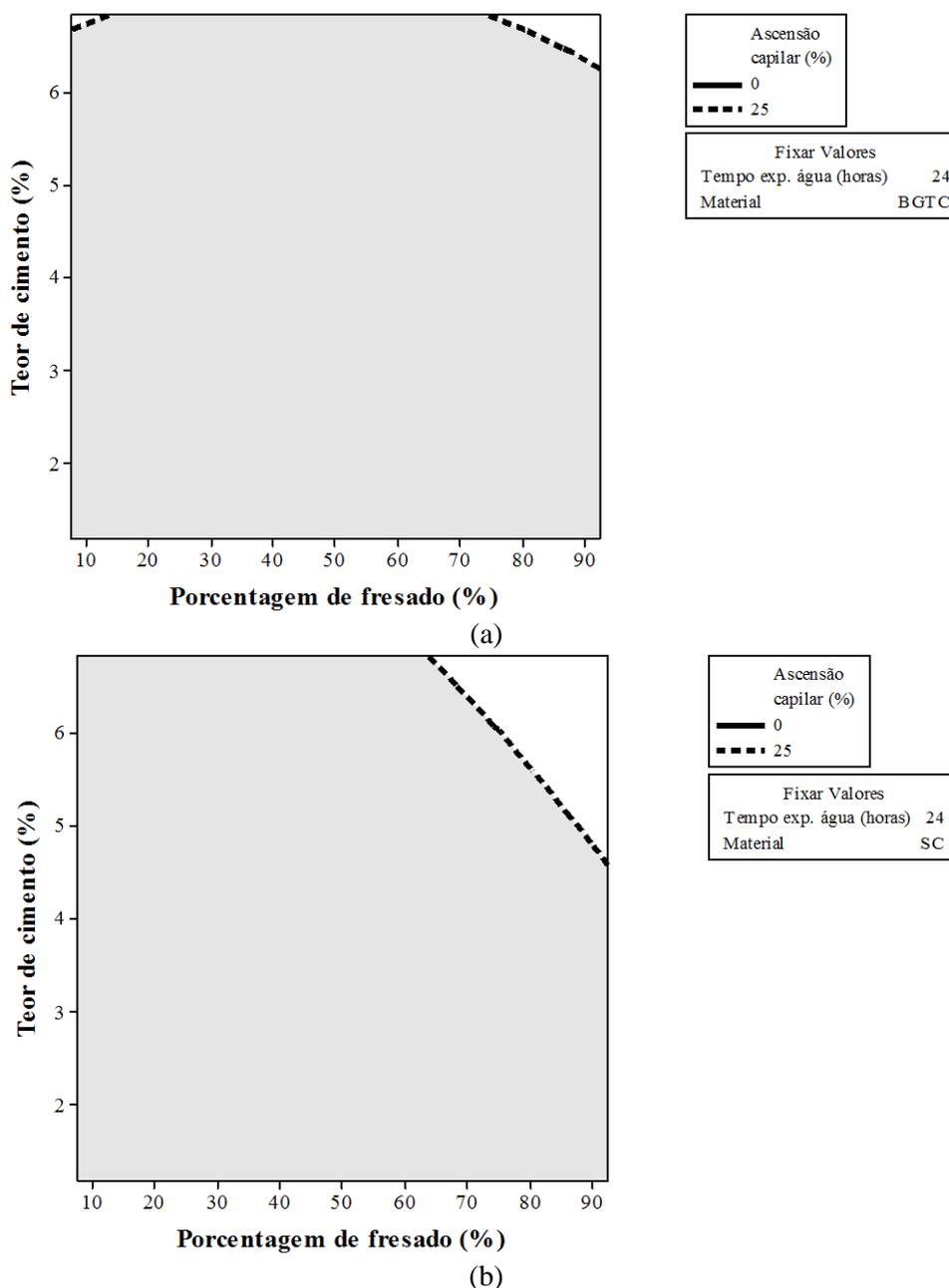


Figura 46: Gráfico de contorno de ascensão capilar considerando um intervalo específico de resistência para as misturas de (a) BGTC e (b) solo-cimento

É possível verificar que o limite sugerido pela Austroads (2002) é bastante baixo para os materiais empregados nesta dissertação. Na Figura 46, verifica-se que uma pequena faixa de combinação das variáveis se encaixa dentro do valor estipulado.

Com base nos resultados de ascensão capilar, observa-se que os materiais empregados nos ensaios são ótimos condutores de água, já que precisam de uma quantidade bastante elevada de cimento para que ocorra a vedação da estrutura e a passagem da água seja impedida. Porém, em contraponto, sabe-se que a adição de cimento em excesso pode gerar sérios problemas de retração do material e, além disso, estruturas muito rígidas apresentam problemas quanto à fragilidade.

Então, deve-se evitar o emprego da reciclagem em casos de bases cimentadas (BGTC e SC) ou verificar até que ponto a influência da água é danosa à base do pavimento para que a camada seja dimensionada considerando todos os eventuais percalços que podem vir a ocorrer.

5.4.1.1 Comparação com resultados obtidos por Fedrigo (2015)

Na Tabela 24 são comparados os resultados obtidos para as misturas de BGTC e solo-cimento com as composições com BGS analisadas por Fedrigo (2015) com emprego da energia Proctor Modificada.

Tabela 24: Comparação entre os resultados de ascensão capilar para os diferentes materiais de base (BGS, BGTC e SC)

Teor de cimento (%)	Porcentagem de fresado (%)	AC _{24h} (%) BGS	AC _{24h} (%) BGTC	AC _{24h} (%) SC	AC _{72h} (%) BGS	AC _{72h} (%) BGTC	AC _{72h} (%) SC
2,00	20,00	79,42	67,80*	100,00*	89,31	100,00*	100,00*
4,00		15,71	68,90	73,52	17,94	83,20	88,42
2,00	50,00	73,80	80,44	85,65	82,83	95,34	100,00
4,00		18,60	53,46*	70,54*	21,70	77,46*	86,52*

*Resultados alcançados experimentalmente, sem a necessidade de predizer pelo *software*.

Verifica-se, na Tabela 24, que as composições com BGS se comportam melhor frente à ação da água, sendo que as misturas com 4% de cimento apresentaram valores de ascensão capilar bastante inferiores aos obtidos com emprego de BGTC e solo-cimento. Tal comportamento está relacionado com a angularidade das partículas de BGS, que permitem uma melhor compactabilidade das misturas, interagindo de modo mais eficiente com o cimento adicionado, resultando em uma estrutura mais rígida, de maneira a bloquear parcialmente a passagem da água.

5.4.2 Expansão

A expansão dos corpos de prova foi medida a partir da alteração do diâmetro da base de acordo com o tempo de exposição à água, como explicado anteriormente no item 4.2.4.2. O modelo obtido está disposto nas Equações 20 (BGTC) e 21 (SC).

$$BGTC E = 0,755 + 0,1496 fr - 0,231 ci + 0,00297 ta + 0,00528 fr * ci \quad (20)$$

$$SC E = 0,994 + 0,1496 fr - 0,231 ci + 0,00297 ta + 0,00528 fr * ci \quad (21)$$

Onde:

- E – expansão (%);
- ci – teor de cimento (%);
- fr – porcentagem de fresado (%);
- ta – tempo de exposição à água (horas).

O modelo apresentou R^2 de 15% e $R^2_{ajustado}$ igual a 9%, o que indica que esse não é significativo. Além disso, as variáveis “teor de cimento” e “tempo de exposição à água” não se mostraram expressivas, já que o valor-p encontrado foi superior a 5%, porém optou-se por deixá-las no modelo por se tratarem de fatores primários.

Materiais cimentados liberam calor durante a hidratação do cimento e por isso tendem a retrair, ao contrário do que o ensaio está verificando. Como parte do material já é cimentado (BGTC e solo-cimento), esses por si só já tendem a sofrer retração. Ao incorporar cimento, a probabilidade é que não seja verificada expansão.

Como o ensaio não apresentou resultados significativos e que contribuíssem para a avaliação dos materiais estudados, optou-se por não apresentá-los.

5.4.3 Absorção

Além da determinação da ascensão capilar e da expansão, realizou-se a verificação quanto à capacidade de absorção do material. Essa foi determinada através da variação da massa do corpo de prova a partir do contato com a água. Tal parâmetro apresentou um modelo de

regressão dividido em duas equações, uma para as misturas com BGTC (Equação 22) e outra para as composições contendo solo-cimento (Equação 23).

$$BGTC A = 5,181 - 0,01186 fr - 1,157 ci + 0,01295 ta + 0,0793 ci * ci \quad (22)$$

$$SC A = 7,039 - 0,03852 fr - 1,157 ci + 0,01295 ta + 0,0793 ci * ci \quad (23)$$

Onde:

- A – absorção (%);
- ci – teor de cimento (%);
- fr – porcentagem de fresado (%);
- ta – tempo de exposição à água (horas).

O modelo em questão apresentou R² de 74% e R²_{ajustado} igual a 72%, resultados considerados satisfatórios, sendo que os valores atípicos foram mantidos na análise. Tais equações devem ser empregadas apenas para fins comparativos, pois o comportamento volumétrico é bastante específico para cada amostra ensaiada.

Os coeficientes codificados obtidos para cada termo representativo do modelo são apresentados na Tabela 25, bem como seus respectivos valores-p.

Tabela 25: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para absorção

Termo	Coeficiente	Valor-p
Constante	2,1122	0,000
Porcentagem de fresado (%)	-1,0690	0,000
Teor de cimento (%)	-1,4790	0,000
Tempo de exposição à água (horas)	0,3107	0,001
Material (BGTC)	-0,2627	0,001
Teor de cimento (%) * Teor de cimento (%)	0,6340	0,003
Porcentagem de fresado (%) * Material (BGTC)	0,5660	0,000

Observa-se, na Tabela 25, que todos os termos lineares foram significativos, assim como a interação entre a porcentagem de fresado e o material de base empregado; e o teor de cimento quando elevado ao quadrado.

Na Tabela 26 são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de absorção.

Tabela 26: Resultados de absorção

Mistura	Absorção (%)			Mistura	Absorção (%)		
	24 horas	48 horas	72 horas		24 horas	48 horas	72 horas
BGTC 1,17-50	2,43	2,83	3,24	SC 1,17-50	5,57	6,09	6,16
BGTC 2-20	3,52	4,28	4,52	SC 2-20	4,61	5,00	5,17
BGTC 2-80	2,40	3,02	3,30	SC 2-80	1,23	1,59	1,85
BGTC 4-7,57	1,55	1,77	1,98	SC 4-7,57	2,64	3,28	3,73
BGTC 4-50	1,61	1,98	2,30	SC 4-50	2,07	2,48	2,83
BGTC 4-92,43	1,36	1,41	1,62	SC 4-92,43	0,60	0,64	0,68
BGTC 6-20	1,60	1,88	2,12	SC 6-20	2,48	3,07	3,50
BGTC 6-80	0,60	0,66	0,69	SC 6-80	0,72	0,77	0,85
BGTC 6,83-50	0,96	1,05	1,22	SC 6,83-50	0,82	0,95	1,08

Na Tabela 26, observa-se que para todos os casos, a absorção aumentou conforme a elevação do tempo de exposição à água. Verifica-se também que, quanto maior o teor de cimento, menor é a absorção sofrida pelo CP, condição que pode ser explicada pelos pontos extremos, já que as misturas com baixos teores de cimento apresentaram absorção considerável, alcançando retenção de água de 6,16% depois de 72 horas de exposição à água (SC 1,17-50). Ao contrário das misturas com elevados teores de cimento (com exceção da composição SC 6-20), que apresentaram teores bastante baixos de absorção. Conclui-se que o cimento tem papel fundamental na ascensão capilar, pois auxilia parcialmente no bloqueio da entrada de água nas misturas.

Quanto ao material fresado, verifica-se que esse também é favorável na redução da absorção, já que sua adição reduz a quantidade de água que se infiltra na mistura. Esse comportamento é semelhante para ambos os materiais de base, porém, ocorre com mais intensidade para as misturas com solo-cimento.

A *Highways Agency* (HA, 2006), agência de transportes do Reino Unido, desenvolveu um manual com documentos de contrato para trabalhos em rodovias onde estão especificadas as condições que os pavimentos devem apresentar para possibilitar o tráfego. Com relação à absorção, essa estabelece um limite de 2% para misturas de agregados utilizados na fabricação de concreto para pavimentos.

A partir da referência britânica (HA, 2006), verifica-se que as seguintes misturas se enquadrariam na especificação depois das 72 horas de exposição à água: BGTC 4-7,57, BGTC 4-92,43, BGTC 6-80, BGTC 6,83-50, SC 2-80, SC 4-92,43, SC 6-80 e SC 6,83-50. É possível observar que não há uma tendência bem identificada quanto à intensidade dos fatores que interferem na absorção, já que se enquadram nesse limite, misturas com diferentes teores de cimento (baixo, médio e alto) e com diferentes porcentagens de fresado. Com o intuito de verificar o comportamento das diferentes variáveis na absorção, estão plotados na Figura 47, os efeitos principais observados.

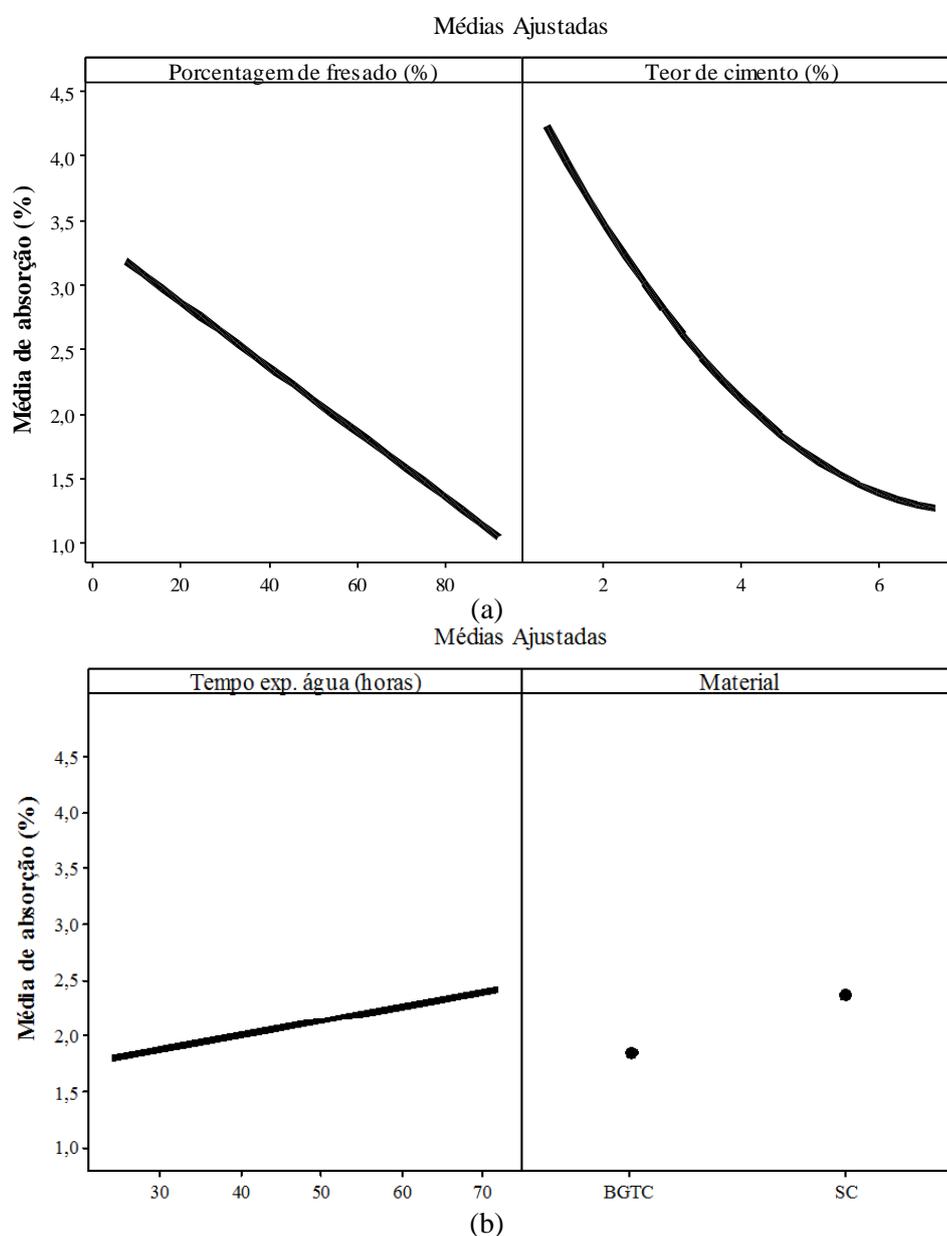


Figura 47: Gráfico de efeitos principais para ascensão capilar: avaliação da influência da porcentagem de fresado e teor de cimento (a) e do tempo de cura e material (b)

Na Figura 47, verifica-se que tanto o fresado quanto o cimento ajudam na redução da absorção, comportamento já observado a partir dos resultados da Tabela 26. Com relação ao tempo de exposição à água, esse auxilia na elevação da absorção, porém em menor magnitude. Igualmente ao ensaio de ascensão capilar, a BGTC se comporta melhor com relação à ação da água, já que apresentou menores valores de absorção do que as misturas com solo-cimento. Essa tendência pode ser verificada também a partir da Figura 48.

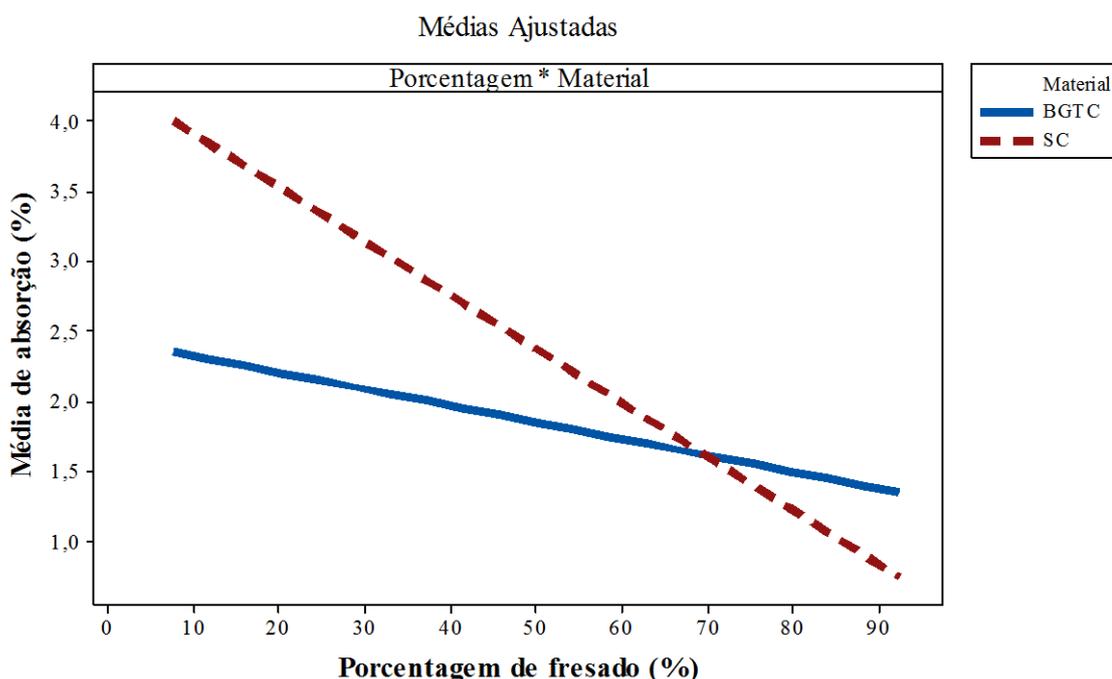


Figura 48: Influência do material na absorção

Na Figura 48, é possível verificar que ambos os materiais de base influenciam na absorção. Todavia, ao adicionar o fresado nas misturas com solo-cimento, ocorre uma redução mais acentuada da absorção, o que possibilita concluir que dentre os materiais estudados, o que apresenta maior absorção é o solo-cimento, seguido da BGTC e por último o fresado asfáltico, sendo que essa absorção está diretamente relacionada com a porosidade dos mesmos.

Verifica-se, na Tabela 25, que as interações entre dois fatores analisadas não se mostraram significativas. Porém, optou-se por averiguar alguma tendência em potencial entre as variáveis estudadas, por isso, estão expostos na Figura 49, os gráficos com as relações entre os fatores.

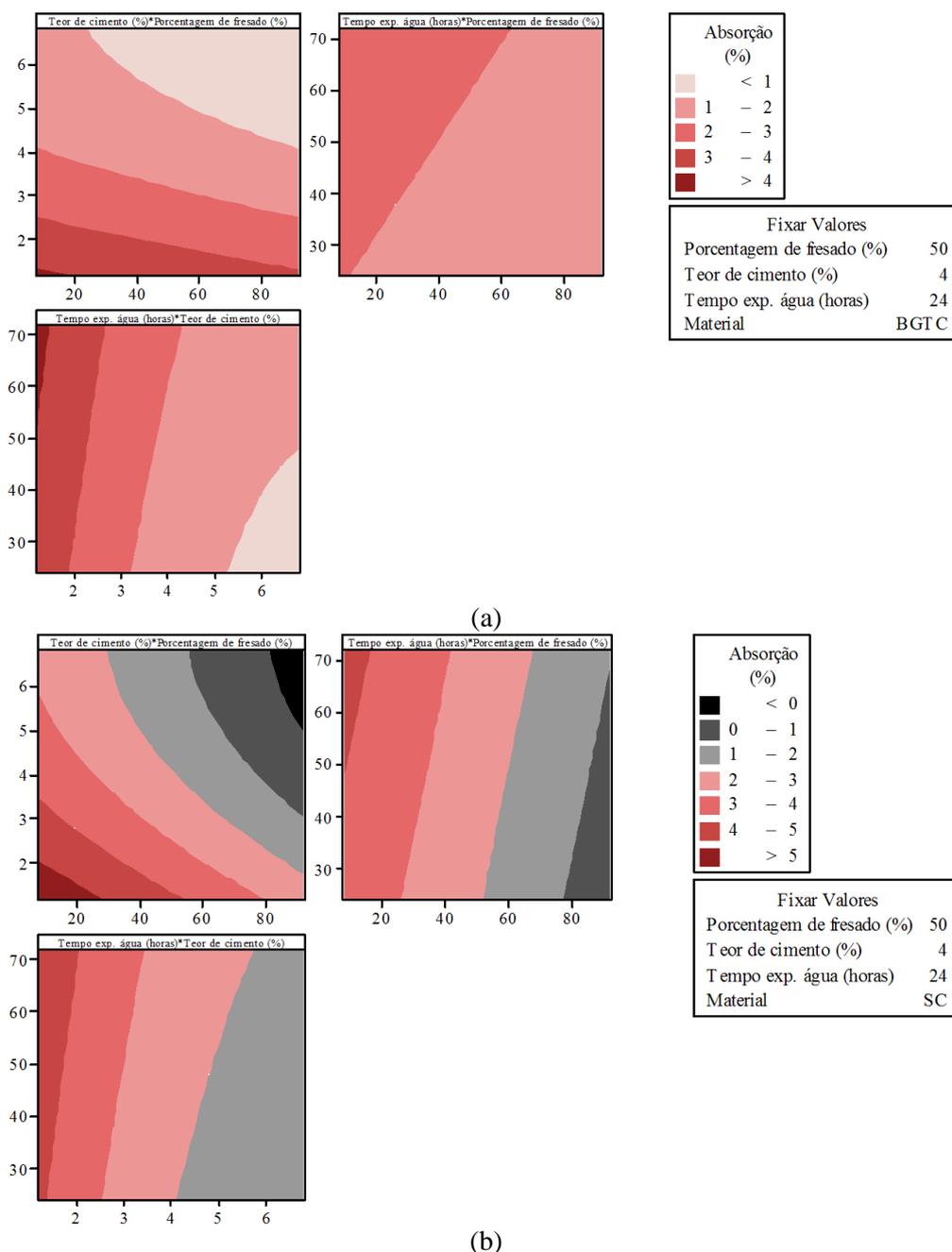


Figura 49: Gráficos de contorno de absorção simultâneos para as misturas contendo solo-cimento

É possível observar que se optou pelo ponto central do planejamento experimental (4-50) e tempo de exposição à água de 24 horas. A partir da Figura 49 verifica-se que para ambos os materiais, a tendência entre as interações de dois fatores foi similar. Dentre as interações analisadas, a que se mostrou mais significativa foi entre o teor de cimento e a porcentagem de fresado, já que apresenta maior número de níveis de resultados, o que indica que esses fatores, ao serem interpolados, interferem mais do que os demais. Desta maneira, optou-se por

apresentar os resultados da interação entre teor de cimento e porcentagem de fresado para todos os tempos de exposição à água no Apêndice A desta dissertação.

Como verificado anteriormente, oito misturas se enquadraram no limite proposto pela *Highways Agency* (HA, 2006), considerando tempo de exposição à água de 72 horas. Em vista disso, se optou por verificar quais outras composições poderiam ser realizadas para se enquadrar nos parâmetros propostos. Para isso, foram desenvolvidos gráficos para as misturas de BGTC e solo-cimento que são apresentados na Figura 50.

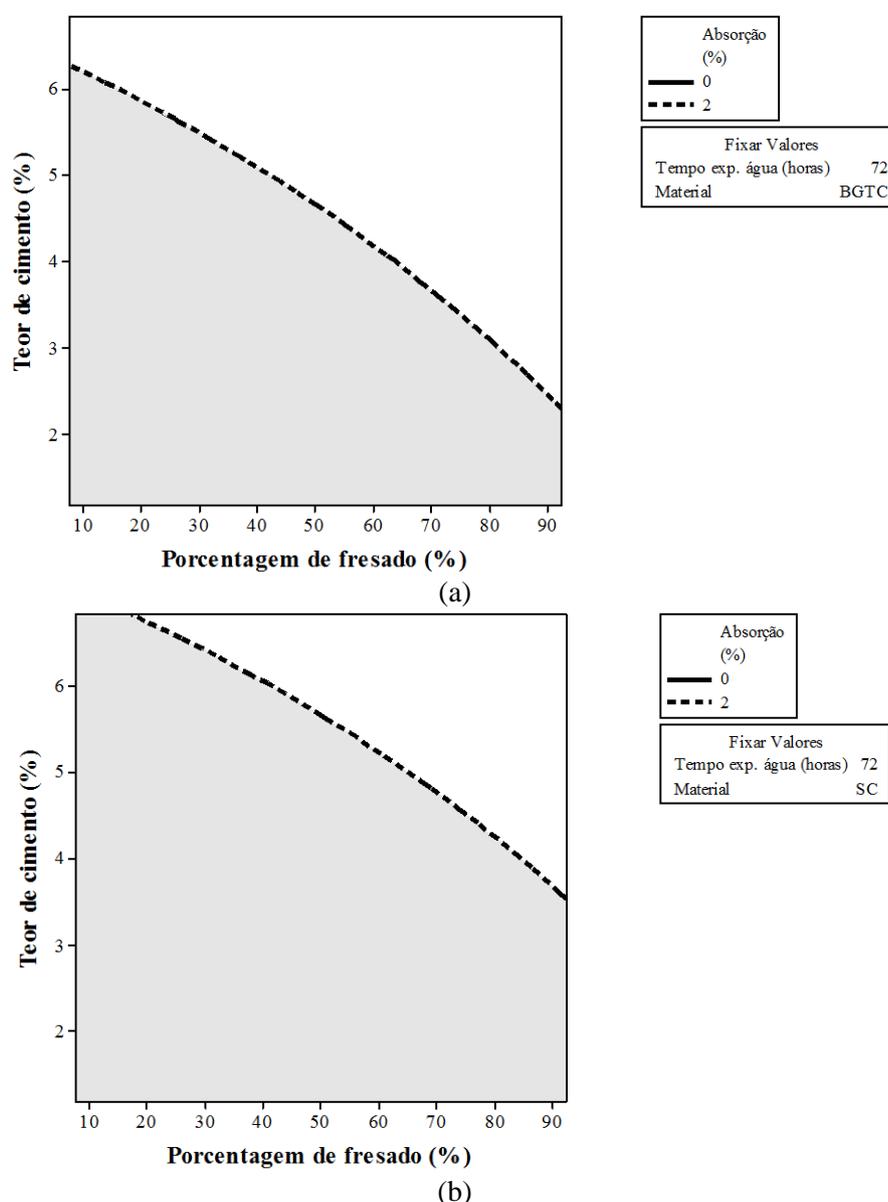


Figura 50: Gráfico de contorno de absorção considerando um intervalo específico de absorção para as misturas de (a) BGTC e (b) solo-cimento

Na Figura 50, observa-se que as misturas contendo BGTC, apresentaram uma maior gama de composições que podem ser geradas e que se enquadrariam dentro do limite proposto pela agência britânica. Porém, grande parte das misturas que podem ser realizadas, apresenta teor de cimento bastante elevado ou deve ser constituída predominantemente pelo material fresado. Características essas que podem comprometer de outras maneiras, já que a adição do fresado asfáltico reduz o comportamento mecânico, como comprovado nos itens 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.4, e o emprego de misturas fortemente cimentadas, provoca o enrijecimento da camada, podendo tornar o material muito frágil e então, com maior suscetibilidade ao aparecimento de trincas.

5.4.3.1 Comparação com resultados obtidos por Fedrigo (2015)

Da mesma maneira como foi realizada a comparação entre os resultados de ascensão capilar, a absorção é comparada apenas com os resultados obtidos por Fedrigo (2015) a partir de ensaios na energia Proctor Modificada com emprego de BGS. Na Tabela 27 são apresentados os resultados obtidos para os diferentes materiais avaliados.

Tabela 27: Comparação entre os resultados de absorção para os diferentes materiais de base

Teor de cimento (%)	Porcentagem de fresado (%)	A _{24h} (%) BGS	A _{24h} (%) BGTC	A _{24h} (%) SC	A _{72h} (%) BGS	A _{72h} (%) BGTC	A _{72h} (%) SC
2,00	20,00	2,69	3,52*	4,61*	3,00	4,52*	5,17*
4,00		0,89	2,48	3,00	1,08	3,10	3,62
2,00	50,00	2,37	2,77	3,29	2,65	3,39	3,91
4,00		0,96	1,61*	2,07*	1,18	2,30*	2,83*

*Resultados alcançados experimentalmente, sem a necessidade de prever pelo *software*.

As considerações realizadas acerca da análise da ascensão capilar são as mesmas para a absorção, já que as composições com 4% de cimento e BGS como material de base, demonstraram absorver água em quantidade consideravelmente menor do que os demais materiais. Porém, as misturas com 2% de cimento apresentaram comportamento mais similar ao das composições com BGTC e solo-cimento.

Ainda, pode-se verificar que a diferença na absorção entre a primeira (24 horas) e a última leitura (72 horas) é maior para as misturas estudadas nesta dissertação em comparação com as composições de BGS.

5.5 ERODIBILIDADE

Para analisar a durabilidade das composições estudadas, foi realizado o ensaio de erodibilidade, conforme descrito no item 4.2.5.

Parte dos materiais empregados no ensaio de erodibilidade entrou em contato com a água da chuva, o que comprometeu o parâmetro de umidade ótima de algumas misturas. Portanto, antes de realizar a análise dos resultados no *software*, optou-se por verificar a confiabilidade dos resultados referentes aos pontos centrais. Para isso, calculou-se a média e o desvio padrão desses, e observou-se pequena discrepância nos resultados, o que levou a retirar do modelo dois valores para cada material ensaiado. No lugar desses, utilizou-se a média das demais amostras ensaiadas.

Depois de analisados os resultados, optou-se por verificar se os valores atípicos exibidos pelo *Minitab* poderiam ter sofrido algum problema durante a moldagem dos respectivos CPs. Portanto, foi constatado que os três CPs que apresentaram disparidade nos resultados, foram moldados com uma variação no teor de umidade superior a 1%. Desta maneira, optou-se pela substituição desses pelo valor sugerido pelo modelo, por acreditar ser mais representativo.

O modelo de regressão obtido para as amostras com BGTC e solo-cimento está descrito nas Equações 24 e 25, respectivamente.

$$BGTC\ ER = 2,237 - 0,01974\ fr - 0,5167\ ci + 0,02469\ ci * ci + 0,003379\ fr * ci \quad (24)$$

$$SC\ ER = 2,377 - 0,02354\ fr - 0,4636\ ci + 0,02469\ ci * ci + 0,003379\ fr * ci \quad (25)$$

Onde:

- ER – erodibilidade (g/min);
- ci – teor de cimento (%);
- fr – porcentagem de fresado (%).

Verificou-se que o modelo em questão apresentou R² de 94% e R²_{ajustado} igual a 92%, resultado bastante satisfatório, porém, é lembrado que foram utilizados valores do modelo em três das 28 amostras, o que auxilia no melhor ajuste desses.

É importante ressaltar que as Equações 24 e 25 devem ser empregadas apenas para questões de comparação, já que existem fatores bem particulares que afetam os resultados, sendo de difícil “extrapolação”.

São apresentados na Tabela 28, os coeficientes codificados de cada termo analisado, assim como os valores-p respectivos.

Tabela 28: Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para erodibilidade

Termo	Coeficiente	Valor-p
Constante	0,3355	0,000
Porcentagem de fresado (%)	-0,3446	0,000
Teor de cimento (%)	-0,3497	0,000
Material (BGTC)	-0,0812	0,000
Teor de cimento (%) * Teor de cimento (%)	0,1975	0,001
Porcentagem de fresado (%) * Teor de cimento (%)	0,4055	0,000
Porcentagem de fresado (%) * Material (BGTC)	0,0807	0,024
Teor de cimento (%) * Material (BGTC)	-0,0752	0,034

A partir dos resultados da Tabela 28, observa-se que as interações entre dois fatores possíveis foram significantes e que apenas a porcentagem de fresado ao quadrado não se mostrou significativa, o que comprova a confiabilidade do modelo gerado.

Na Tabela 29 são apresentados os resultados de erodibilidade, sendo que nos pontos centrais (4-50) estão expostas as médias dos resultados e para as demais amostras, o valor é representativo de um CP analisado.

Tabela 29: Resultados de erodibilidade

Mistura	Erodibilidade (g/min)	Mistura	Erodibilidade (g/min)
BGTC 1,17-50	0,98	SC 1,17-50	0,79
BGTC 2-20	1,06	SC 2-20	1,25
BGTC 2-80	0,31	SC 2-80	0,11
BGTC 4-7,57	0,60	SC 4-7,57	0,81
BGTC 4-50	0,17	SC 4-50	0,46
BGTC 4-92,43	0,08	SC 4-92,43	0,10
BGTC 6-20	0,11	SC 6-20	0,42
BGTC 6-80	0,10	SC 6-80	0,15
BGTC 6,83-50	0,10	SC 6,83-50	0,25

Verifica-se, na Tabela 29, que o cimento atua na redução da erodibilidade das misturas, já que a elevação do seu teor provoca menor desprendimento de material. Isso ocorre devido à melhor coesão entre os agregados e, conseqüentemente menor volume de vazios das misturas. Além disso, a adição de cimento provoca a elaboração de grumos, fazendo com que a granulometria da mistura supere os 2,36 mm da peneira utilizada, reduzindo a quantidade de finos que soltou do corpo de prova.

A única adversidade encontrada para tal análise foi para as misturas de solo-cimento com 80% de fresado, já que a variação da erodibilidade foi bastante pequena, apresentando resultado inferior para a mistura com 2% de cimento. Resultado não muito significativo, já que a variação entre a erodibilidade das duas misturas pode ser considerada irrisória.

Foi possível observar também que o fresado atua de maneira positiva com relação à durabilidade dos materiais analisados, já que a elevação da sua quantidade reduz a erodibilidade das misturas. Acredita-se que esse resultado pode ser fortemente correlacionado com a granulometria dos materiais, já que o fresado asfáltico, possui poucos finos em sua constituição, conforme relatado no item 5.2.1 e como o presente ensaio analisa apenas a erodibilidade do material passante na peneira com abertura de 2,36 mm, grande parte do material desprendido nessas misturas pode ter ficado retido na peneira.

Com relação ao material, observou-se que as composições com BGTC são menos suscetíveis à erodibilidade, já que apresentaram resultados mais elevados em sete das nove misturas analisadas. Novamente, acredita-se que essa tendência está relacionada com a granulometria dos materiais, já que dentre aqueles analisados, o solo-cimento é o que possui maior quantidade de finos.

Para melhor visualização da influência das variáveis no ensaio analisado, está disposto na Figura 51, o gráfico de efeitos principais para erodibilidade.

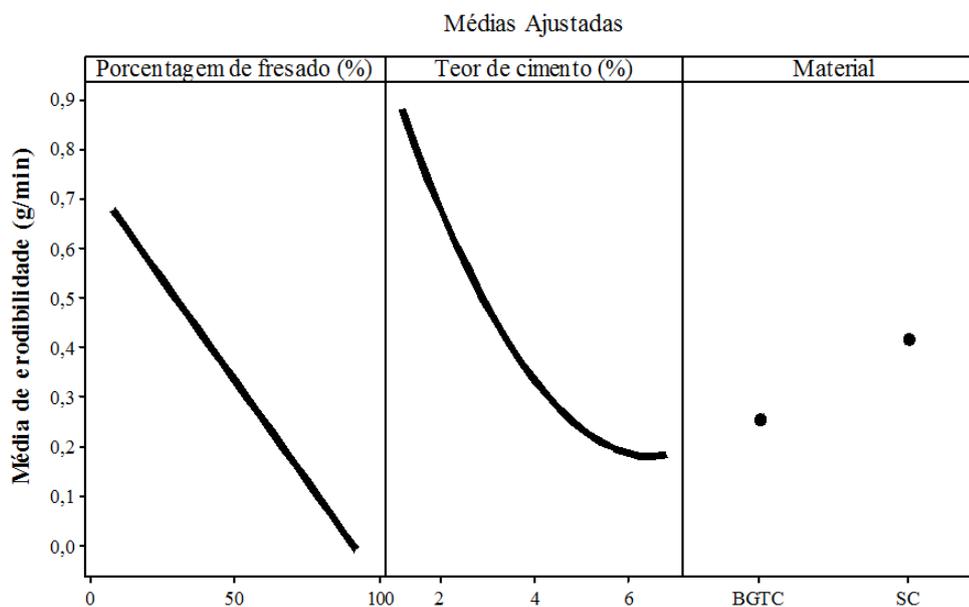


Figura 51: Gráfico de efeitos principais para erodibilidade

Na Figura 51, observa-se que a análise realizada com os dados da Tabela 29 a respeito da influência das variáveis estudadas está correta. Pois demonstra que a adição de fresado influencia positivamente a durabilidade das misturas, assim como o teor de cimento. Com relação ao material, é confirmada a obtenção de maiores valores para as composições de solo-cimento, o que indica que a BGTC é melhor frente à erosão de finos.

É possível observar também que a quantidade de fresado possui uma influência bem ampla, que vai de 0,7 g/min até valores aproximadamente nulos. Já o cimento, quando adicionado em pequena quantidade, pode alcançar valores mais elevados de erodibilidade (0,9 g/min) do que a influência do material fresado. Porém verifica-se uma possível estabilidade no valor, a partir da adição de cimento superior a 6%, obtendo resultados próximos a 0,2 g/min.

Uma maneira de verificar a influência de todos os fatores estudados é a partir da ilustração do gráfico de efeitos principais através da interação das variáveis. Desta maneira, estão expostos tais resultados na Figura 52.

Na Figura 52, é possível identificar o comportamento da interação das variáveis. Desta maneira, no eixo vertical são apresentados os resultados de erodibilidade e no eixo horizontal os valores correspondentes a primeira variável da interação, sendo que o comportamento da segunda variável é indicado pelas diferentes linhas de tendência. Essas são indicadas conforme a legenda.

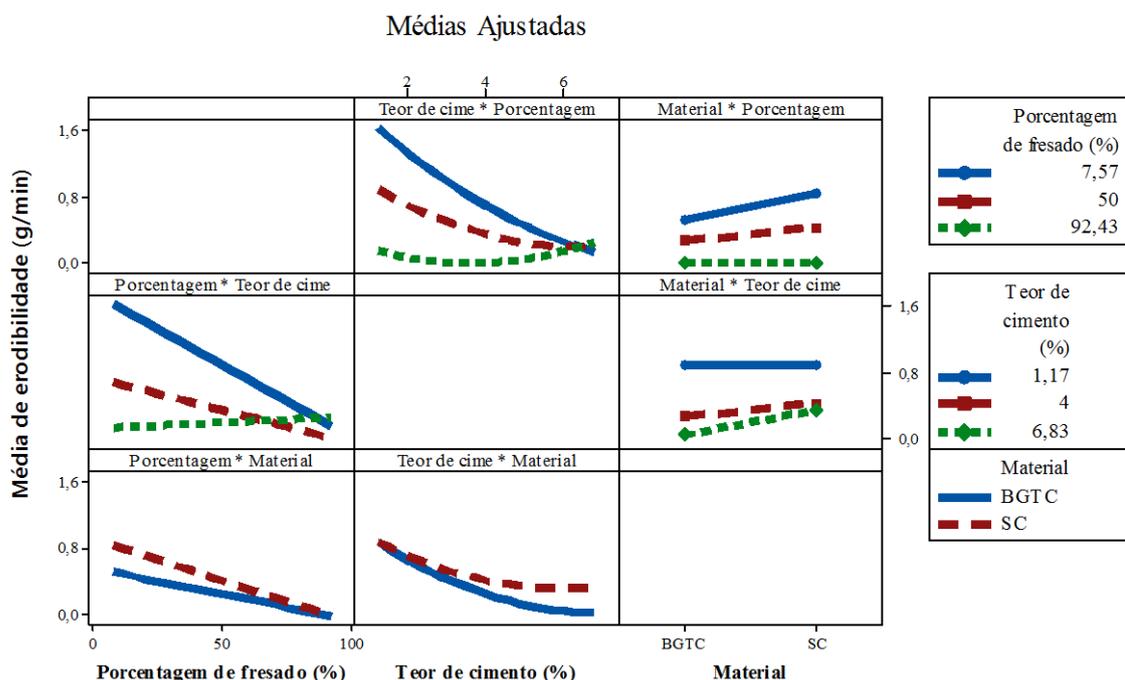


Figura 52: Gráfico de efeitos principais para erodibilidade considerando a interação das variáveis

Verifica-se então, que cada fator se comporta de uma maneira diferente dentro dos seus níveis analisados. Essa diferença de comportamento entre os níveis demonstra a presença da interação, identificando que a variável é significativa.

O que foi verificado na Tabela 29 a respeito do material empregado pode ser visualizado também no gráfico da Figura 52, já que para as misturas com menores teores de cimento, as duas bases apresentaram valor similar de erodibilidade. O mesmo ocorre com as misturas com predominância de material fresado.

Quanto ao teor de cimento em relação ao material, esse possui menor interferência para as composições com menores teores de cimento, porém essa diferença entre os materiais aumenta, conforme vai sendo adicionado cimento. Quando é verificada a relação entre o teor de cimento e a porcentagem de fresado asfáltico, essa situação se inverte, já que há maior discrepância para baixos teores, e ao empregar teores de cimento mais elevados, essa diferença praticamente se anula.

Contudo, pode-se verificar que a influência da variável categórica (material) é a menos relevante dentre as analisadas, já que a variação entre os dois materiais é pequena e segue uma tendência semelhante entre esses.

Para melhor visualizar a influência da porcentagem de fresado e do teor de cimento na erodibilidade das misturas, optou-se por ilustrar tal relação a partir de gráficos de contorno na Figura 53.

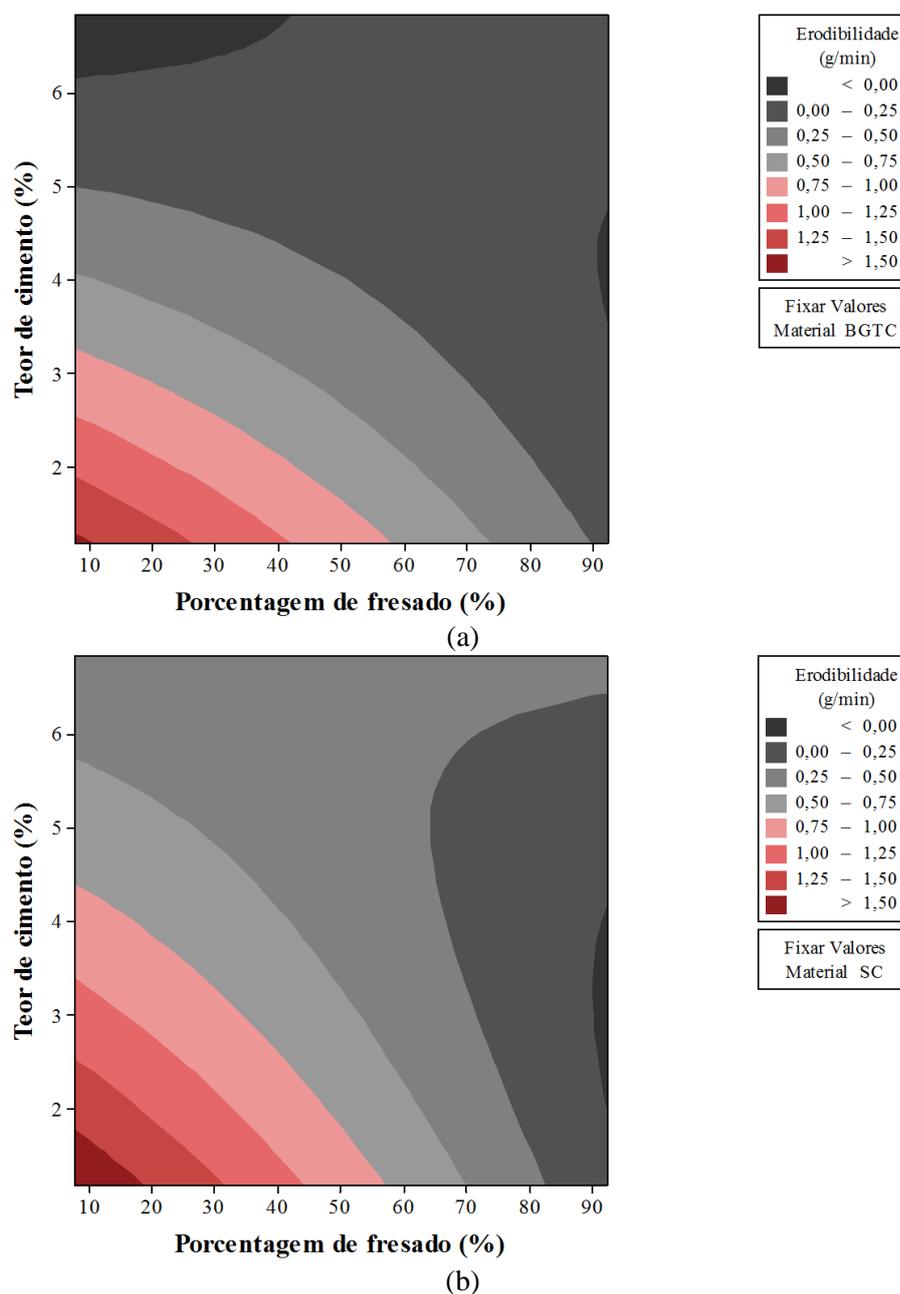


Figura 53: Gráfico de contorno de erodibilidade para as misturas contendo (a) BGTC e (b) solo-cimento

Observa-se, que com porcentagens baixas de fresado e cimento, alcançam-se valores de erodibilidade mais elevados, validando o que foi apurado a partir das análises anteriores. Outra questão que pode ser verificada na Figura 53 é que existe uma tendência para os

intervalos de erodibilidade mais altos, porém, para valores menores não é possível identificar alguma propensão relacionada com os fatores analisados. Também se observa que para as misturas com BGTC, o intervalo que apresenta maior probabilidade de enquadrar tais misturas é de 0 a 0,25 g/min. Já para as composições de solo-cimento, o intervalo em que ocorre é ligeiramente superior, enquadrando-se entre 0,25 e 0,50 g/min.

5.5.1.1 Comparação com resultados obtidos por Fedrigo (2015)

Na Tabela 30 são apresentados os resultados obtidos para as misturas com BGTC e solo-cimento, a fim de comparar com os alcançados para as composições de BGS estudadas por Fedrigo (2015).

Tabela 30: Comparação entre os resultados de erodibilidade para os diferentes materiais de base

Teor de cimento (%)	Porcentagem de fresado (%)	ER (%) BGS	ER (%) BGTC	ER (%) SC
2,00	20,00	1,07	1,06*	1,25*
4,00		0,38	0,44	0,72
2,00	50,00	0,92	0,65	0,71
4,00		0,31	0,17*	0,46*

*Resultados alcançados experimentalmente, sem a necessidade de prever pelo *software*.

Observa-se, a partir dos resultados da Tabela 30, que para as composições com predominância de material de base, as misturas com BGS e BGTC apresentaram comportamento bastante semelhante. Nesses casos, as composições com solo-cimento apresentaram maior erosão de finos, que deve ter ocorrido devido à granulometria das amostras. Quando as composições apresentam quantidade igual de fresado e material de base não é possível identificar uma tendência no comportamento quanto à durabilidade desses materiais, porém observa-se que a BGTC apresentou valores menores do que os demais materiais analisados.

Ressalta-se ainda, que os valores obtidos são consideravelmente baixos, o que sugere que a camada reciclada com diferentes materiais de base (BGS, BGTC e SC) não é propícia à erosão dos finos, indicando comportamento favorável quanto à durabilidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo estão descritas as conclusões obtidas a partir dos resultados ensaios e respectivas análises, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o procedimento de dosagem para misturas recicladas com cimento sugerido por Fedrigo (2015), com base no método de dosagem de materiais estabilizados com cimento proposto pela Austroads (2002), pode ser aplicado também no caso da restauração de pavimentos semirrígidos, já que as misturas com materiais de base cimentadas estudados na presente dissertação apresentaram comportamento semelhante ao observado no estudo com BGS.

Optou-se pelo desenvolvimento individual das conclusões a respeito dos resultados obtidos para cada ensaio realizado, dos fatores que afetaram os resultados, assim como do planejamento estatístico empregado. Essas são apresentadas na sequência:

Em relação à resistência à compressão simples:

- Foram alcançadas resistências bastante elevadas, variando entre 1,00 e 6,49 MPa. Quase todas as misturas (a exceção é a mistura BGTC 2-20) apresentaram RCS aos 7 dias de cura fora do intervalo indicado pelas normas do DNIT (2013a) e do DEINFRA-SC (2012), que é entre 2,1 e 2,5 MPa. Por outro lado, apenas as misturas com no mínimo 6% de cimento atingiram o intervalo especificado pelo DER-PR (2005) (de 3,50 a 8,00 MPa aos 7 dias de cura); o mesmo ocorrendo nas misturas com ampla predominância de material de base (apenas 7,57% de fresado);
- Grande parte das composições alcançaram RCS de 2,5 MPa aos 7 dias, valor proposto por Fedrigo (2015) como mínimo para efeito de dosagem, sendo que apenas misturas com baixos teores de cimento (BGTC 1,17-50, BGTC 2-20, BGTC 2-80 e SC 1,17-50) não alcançaram tal condição. Ainda, baixos teores

de cimento não são recomendados, pois podem comprometer a durabilidade das camadas, o que indica que o valor proposto por Fedrigo (2015) pode ser aplicado também à reciclagem de pavimentos com bases cimentadas;

- Todos os termos lineares estudados do modelo estatístico obtido apresentaram influência na RCS das misturas, sendo que o teor de cimento foi a variável que mais influenciou nos resultados, seguido da porcentagem de fresado, do tempo de cura e por último do tipo de material empregado como base. Dentre essas, apenas a porcentagem de fresado provocou redução na RCS. Com relação aos termos quadráticos, todos demonstraram ser significantes. Já no item interação com dois fatores, apenas a combinação entre teor de cimento e porcentagem de fresado mostrou ser significativa;
- A partir da avaliação a longo prazo das misturas do ponto central, foi possível verificar uma diferença no comportamento dessas com relação ao material empregado. Percebeu-se que a composição com BGTC apresentou um elevado ganho de resistência inicial, porém essa taxa de elevação foi reduzindo com o passar do tempo de cura, podendo-se concluir que entre o período de cura de 7 a 14 dias já é possível verificar uma tendência à estabilidade da RCS, assim como foi constatado por Fedrigo (2015) a partir do emprego de BGS. Já a mistura com solo-cimento apresentou uma maior taxa de elevação da resistência entre o 7º e o 14º dia de cura e, além disso, a mistura continuou adquirindo resistência de maneira considerável até o 168º dia de cura em que foi realizado o ensaio.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral:

- As resistências obtidas a partir do ensaio de RCD foram bastante elevadas, com variação entre 0,17 e 1,22 MPa. Intervalo bastante semelhante ao alcançado por Fedrigo (2015) a partir de misturas com BGS. Ressalta-se ainda que os valores obtidos são consideravelmente superiores à faixa estipulada pelo DNIT (2013a), sendo possível verificar que poucas composições se enquadraram no limite exposto para 7 dias de cura (entre 0,25 e 0,35 MPa). Além disso, a partir do gráfico de contorno considerando o intervalo especificado nacionalmente, verificou-se que dentre as misturas com solo-cimento, seriam poucas as

possibilidades de restauração do pavimento para formação da nova camada estabilizada com cimento a fim de alcançar valores de acordo com o descrito;

- Por outro lado, foi verificado que apenas misturas com baixos teores de cimento (BGTC 1,17-50, BGTC 2-20, BGTC 2-80, SC 1,17-50 e SC 2-20) alcançaram resultados de RCD inferiores a 0,40 MPa aos 7 dias de cura, sendo que esse valor foi proposto por Fedrigo (2015) como limite inferior de RCD para misturas recicladas com cimento e bases de BGS. Da mesma maneira que ocorreu com as análises de RCS, acredita-se que esse parâmetro pode ser adotado também para reciclagem de pavimentos semirrígidos com cimento.
- Os fatores analisados se mostraram significantes, sendo que o único que apresentou comportamento negativo foi novamente a porcentagem de fresado, já que sua adição reduz consideravelmente a RCD das misturas. Porém, diferentemente dos ensaios de RCS, os resultados apresentaram ser mais influenciados pelo tempo de cura do que pela incorporação de fresado. O teor de cimento permaneceu com o maior ganho e a variável material com a menor influência dentre os termos lineares estudados. Apenas o tempo de cura se mostrou relevante como termo quadrático e dentre as interações com dois fatores, a única que não apresentou significância foi a relação entre o teor de cimento e o material de base empregado;
- A correlação entre a RCD e a RCS se mostrou significativa apenas para as misturas de BGTC, alcançando-se resultados entre 0,10 e 0,23 e um valor médio de 0,16. Correlação bastante similar à obtida por Fedrigo (2015) para reciclagem com cimento em bases antigas de BGS, o qual obteve correlação de 0,18 entre a RCD e a RCS.

Com respeito ao módulo de resiliência:

- Obteve-se um intervalo de variação do módulo de resiliência bastante considerável, com valores de 484 a 20.031 MPa. Os limites superiores encontrados indicam que tais misturas possuem rigidezes bastante elevadas, o que fragiliza as estruturas, podendo provocar a ruptura dessas com níveis de deformação bastante baixos;

- Verificou-se que a variável material não se mostrou significativa dentre os termos lineares estudados, já que os resultados obtidos para ambos os materiais foram em média bastante próximos. Contudo, optou-se por não retirá-la do modelo, pois essa aparece em duas interações com dois fatores (teor de cimento e porcentagem de fresado). O teor de cimento apresentou o maior ganho de rigidez, seguido do tempo de cura, assim como, a porcentagem de fresado reduziu a rigidez com menor intensidade do que as outras variáveis. Os termos quadráticos que demonstraram ser significantes foram a porcentagem de fresado e o tempo de cura;
- Similar ao que ocorreu para os ensaios de RCD, o teor de cimento demonstrou ter comportamento linear quanto ao módulo de resiliência, o que indica que ao adicionar maiores quantidades de cimento, as composições serão mais rígidas. Graficamente, a adição de fresado demonstrou não influenciar a níveis extremos de módulo de resiliência, o que indica que o grande intervalo de resultados se deve basicamente à inclusão de cimento. Quanto ao tempo de cura, diferentemente do que aconteceu para as resistências, esse não parece se estabilizar até os 14 dias de cura, necessitando ensaios com prazos maiores.

Em referência à ascensão capilar:

- A ascensão capilar das misturas variou entre 18,79 e 100,00%, sendo que cinco das 18 misturas estudadas chegaram ao limite dentro do período ensaiado, o que indica que são bastante suscetíveis à ação da água;
- Diferentemente dos ensaios de comportamento mecânico, a variável porcentagem de fresado se mostrou favorável à ascensão capilar, já que sua adição auxiliou na redução da capilaridade. Da mesma maneira, as composições com BGTC apresentaram menores valores de ascensão capilar, demonstrando ser mais favoráveis no contato com a água. Verificou-se que dentre os materiais analisados (BGTC, SC e fresado), o solo-cimento é o que mais retém água, comportamento que pode estar relacionado à porosidade das partículas. Já a BGTC e o fresado apresentaram desempenho semelhante, sendo que tal variável parece não influenciar nessas composições, como observado por Fedrigo (2015) a partir de misturas com BGS;

- Quanto aos termos lineares, o material apresentou valor-p um pouco superior ao limite, porém como a interação com a porcentagem se mostrou significativa e também por ser uma variável de entrada, optou-se pela permanência dessa no modelo. O teor de cimento influenciou de maneira mais significativa os resultados, seguido da adição de fresado, e do tempo de exposição à água, sendo que esse interfere negativamente nos resultados. A única variável que apresentou significância ao elevá-la ao quadrado foi a porcentagem de fresado;
- Ao verificar a associação das variáveis principais (teor de cimento e porcentagem de fresado) nos resultados de ascensão capilar para 24 horas de exposição à água, percebeu-se que poucas combinações desses fatores apresentariam capilaridade inferior a 25%, valor proposto pela Austroads (2002) como limite superior.

Sobre a expansão:

- Foi verificado que o ensaio de expansão não apresentou resultados significativos e por se tratarem de materiais cimentados já era esperado que não fosse possível verificar uma tendência definida para a expansão. Motivos esses que induzem à exclusão dessa análise do procedimento de dosagem.

Com relação à absorção:

- Os resultados de absorção apresentaram variação entre 0,60 e 6,16%, amplitude bastante considerável, mas que pode ser relacionada à grande variação de fatores empregados no estudo;
- Todos os termos lineares analisados se mostraram significativos, sendo que a adição de cimento permanece como sendo a variável mais significante, seguida pela porcentagem de fresado, do tempo de exposição à água e por último, do material. Dentre essas, a única que apresentou influência negativa foi o tempo de exposição à água. Além disso, apenas o teor de cimento apresentou termo quadrático significativo e a única interação com dois fatores que pôde ser considerada foi entre a porcentagem de fresado e o material empregado. Desta maneira, verificou-se que o solo-cimento absorve mais água, seguido da BGTC

e do fresado, comportamento que pode estar relacionado com a porosidade dos materiais estudados.

- A *Highways Agency* (HA, 2006) estabelece um limite de 2% para misturas de agregados empregados na fabricação de concreto para pavimentos. Desta maneira, optou-se por verificar quais as combinações entre teor de cimento e porcentagem de fresado que se enquadrariam no limite proposto para 72 horas de exposição à água. Com isso, pôde-se observar que as composições com BGTC apresentaram maior possibilidade de composições (interação entre porcentagem de fresado e teor de cimento) do que as misturas com solo-cimento. Sendo que a maior parte das misturas possíveis empregam elevados teores de cimento e quantidades consideráveis de material fresado, podendo comprometer a estrutura de outras maneiras (possibilidade de retração e excesso de rigidez).

A respeito da erodibilidade:

- A erodibilidade das misturas estudadas é bastante baixa, já que variaram de 0,08 até 1,25 g/min, sendo que grande parte das composições com BGTC apresentou melhor comportamento frente à erosão do que as misturas com solo-cimento;
- Os três termos lineares estudados (teor de cimento, porcentagem de fresado e material) se mostraram significativos, sendo que a adição de cimento e de fresado auxilia na redução da erosão de maneira bastante similar, porém a influência do cimento é ligeiramente superior. verificou-se que todas as interações entre dois fatores se mostraram significativas e apenas o teor de cimento apresentou significância na análise ao quadrado;
- Observou-se também que a composição granulométrica das misturas influencia fortemente na erodibilidade, já que nesse ensaio é analisada apenas a erosão dos finos (material passante na peneira com abertura de 2,36 mm), motivo pelo qual as misturas com solo-cimento se mostraram mais suscetíveis aos efeitos da erosão, sendo que parte do material das composições de BGTC ficou retida na peneira.

Quanto aos fatores que afetam o comportamento das misturas recicladas com bases cimentadas:

- As misturas com solo-cimento se mostraram mais resistentes dentre os materiais estudados nesta dissertação. Por outro lado, as misturas com BGTC apresentaram melhor comportamento volumétrico e de erodibilidade ao comparar com aquelas com solo-cimento em sua composição. A partir do ensaio de módulo de resiliência, pode-se perceber que os materiais estudados apresentaram comportamento bastante similar quanto à rigidez;
- A partir dos resultados de todos os ensaios realizados foi inferido que o teor de cimentação é a propriedade que rege o comportamento de pavimentos em que a técnica de reciclagem profunda com adição de cimento é empregada. Fato bastante positivo, pois indica que ao aplicar o teor de cimento adequado, é possível restaurar diferentes estruturas de pavimentos degradados;
- Em relação ao material fresado, observou-se que esse é importante para todos os ensaios efetuados e que sua adição em excesso não é tão prejudicial quanto se esperava em decorrência de especificações limitarem seu uso em 50% da massa total de material. Acredita-se que a partir de uma dosagem adequada, é possível empregar quantidades maiores de fresado do que as especificadas nacionalmente, desde que sejam alcançadas as condições desejadas;
- O tempo de cura foi significativo para os ensaios em que sua análise foi verificada, porém a possível estabilidade das características analisadas ocorre em diferentes períodos. Observou-se que o método de cura empregado não foi prejudicial aos resultados dos ensaios (alcançando-se a cura e hidratação do cimento), sendo possível empregá-lo na ausência da câmara úmida;
- Foi verificado que a reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento não é indicada em localidades em que a água pode entrar em contato com a camada reciclada, devendo ser empregado outro agente estabilizador.

Sobre o planejamento experimental:

- Ao empregar o planejamento experimental na pesquisa adquiriu-se uma quantidade relativa de benefícios relacionada à quantidade de materiais e

ensaios e também à análise dos resultados. As vantagens de se planejar um experimento podem ser facilmente observadas no decorrer da dissertação e principalmente na análise dos resultados. É importante acrescentar que ao realizar o planejamento, não é necessária a exclusão de CPs que não se enquadraram nos parâmetros obtidos a partir da compactação, pois os valores das amostras podem ser facilmente substituídos a partir da análise estatística dos dados. Muitas vezes a diferença entre os parâmetros não é significativa, tendo em vista à heterogeneidade dos materiais e misturas.

6.2 SUGESTÕES

O tema empregado na presente dissertação é bastante amplo, podendo ser verificado diferentes comportamentos, que não puderam ser abordados nessa pesquisa. Com isso, na sequência, são expostas algumas sugestões para estudos futuros:

- Realização de ensaios de retração por secagem dos materiais, a fim de obter todos os parâmetros necessários para a dosagem de pavimentos semirrígidos reciclados com cimento;
- Ensaios de misturas semelhantes (bases rígidas, fresado asfáltico e cimento) à resistência compressão simples e resistência à tração por compressão diametral com tempos de cura a médio (28 dias) e longo prazo (mais de um ano);
- Análise do comportamento de materiais lateríticos utilizados em bases de pavimentos a partir da inclusão de material reciclado e cimento, com objetivo de verificar se o método de dosagem proposto por Fedrigo (2015) também se aplica a esse outro material empregado em bases de pavimentos no Brasil;
- Estudo do comportamento de misturas recicladas com cimento a partir do emprego da compactação por vibração, a fim de comparar com os métodos comumente empregados em laboratório (Proctor) e em campo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression**. ASTM C469/469 – 14. Estados Unidos, 5p. 2014.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland composto: NBR 11578**. Rio de Janeiro, 5p. 1991.

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.

BALBO, J. T. Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 14, p. 45-53, 2006.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

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

BUTTON, S. T. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. 2012. **Apostila da disciplina** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CERATTI, J. A. P. **Estudo de comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimento**. 1991. 314 p. Tese (Doutorado em Ciências) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

D'AVILA, V. E. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento: comportamento à flexão de misturas contendo BGTC e fresado asfáltico**. 2015. 82 p. Trabalho de diplomação (Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – UnB, Brasília.

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 ESTADUAL DE INFRA-ESTRUTURA DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Pavimentação – Especificação de Serviço: Reciclagem profunda de pavimento com adição de cimento Portland: DEINFRA-SC-ES-P09/12**. Florianópolis, 14 p. 2012.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Projeto de pavimentação – Instrução de Projeto: IP-DE-P00/001**. São Paulo, 53 p. 2006.

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.

DIAS, P. S.; PINTO, I. P.; COSTA, C. Contribuição ao estudo de materiais fresados incorporados a um solo argilo siltooso para o uso em camadas de pavimentos flexíveis. In: 44ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO E 18º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA – **Anais...** Foz do Iguaçu, 2015. 12 p.

ELLIS, S. Experience in the UK of recycling with cement for the structural maintenance of pavements In: SEMINAR ON ROAD PAVEMENT RECYCLING – **Proceedings...** Polônia, 8p. 2002.

ELY, V. **Influência da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura reciclada com cimento e com elevado teor de fresado.** 2014. 57 p. Trabalho de diplomação (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.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland: Definição das bases para um método de dosagem.** 2015. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – UFRGS, Porto Alegre.

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.

ISOLA, M. *et al.* Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, Vol. 48, p. 238-247, 2013.

JASIENSKI, A.; RENS, L. In situ recycling with cement: the Belgian experience . In: SEMINAR ON ROAD PAVEMENT RECYCLING –**Proceedings...** Polônia, 7 p. 2002.

JI, X.; JIANG, Y; LIU, Y. Evaluation of the mechanical behaviors of cement-stabilized cold recycled mixtures produced by vertical vibration compaction method. **Materials and Structures**, p. 1-14, 2015.

JONES, D; WU, R; LOUW, S. Comparision of full depth reclamation with Portland cement and full depth reclamation with no stabilizer in an accelerated loading test. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Vol. 2524, 16p., 2015.

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

MA, B.; WANG, H.; WEI, D. Performance of RAP in the System of Cold In-place Recycling of Asphalt Pavement. **Journal of Wuhan University of Tchnology-Mater Sci. Ed.**, p. 1211 – 1214, 2011.

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

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5. ed. New York: John Willey & Sons, Inc., 2001. 684p.

MOREIRA, J. P. V.; GOMES CORREIA, A.; PEREIRA, P. Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento. In: 10º CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA - **Geotecnia multidisciplinar: estudos**, Lisboa, v. 2, p. 439-448, 2006.

NUNES, A. S. N.; MULLER, E.R.; DALLA ROSA, F. Estudo da reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland. In: VII SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL – **Anais...** Santa Maria, 2013. 6 p.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; FEDRIGO, W. Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland – Desenvolvimento de Método de Dimensionamento e Avaliação de Procedimentos Construtivos – **Relatório CCR-ND-FRES- RT1-DEZ/2014**. Porto Alegre, 2015. 39p.

OLIVEIRA, A.; BARAN, K. R.; SCHMIDT, F. S. Reciclagem de pavimentos para restauração da BR-282 em Santa Catarina. 6º SEMINÁRIO NACIONAL MODERNAS TÉCNICAS RODOVIÁRIAS – **Anais...** Florianópolis, 2010. 14 p.

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.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. A importância do controle de compactação no desempenho da camada reciclada com cimento Portland. In: 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. 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.; 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. 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.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Instrução de Projeto 08: **Análise mecanicista à fadiga de estruturas do pavimento**. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura Urbana, 2004.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. Projeto de experimentos. 2014. **Série Monográfica Qualidade** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre.

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

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.* 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, 2009. 10 p.

TAHA, R. *et al.* Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 239 – 245, 2002.

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

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. Avaliação do desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC 303. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES e 7ª EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DE PRODUTOS PARA RODOVIAS. – **Anais...** Foz do Iguaçu, 2011. 15 p.

WEN, H., Muhuntham, B., Wang, J., Li, X., Edil, T. and Tinjum, J.M. **Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis**. Washington, DC: Transportation Research Board (NCHRP Report 789), 2014.

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

APÊNDICE A – Gráficos de contorno

Gráfico de contorno de RCS (MPa)

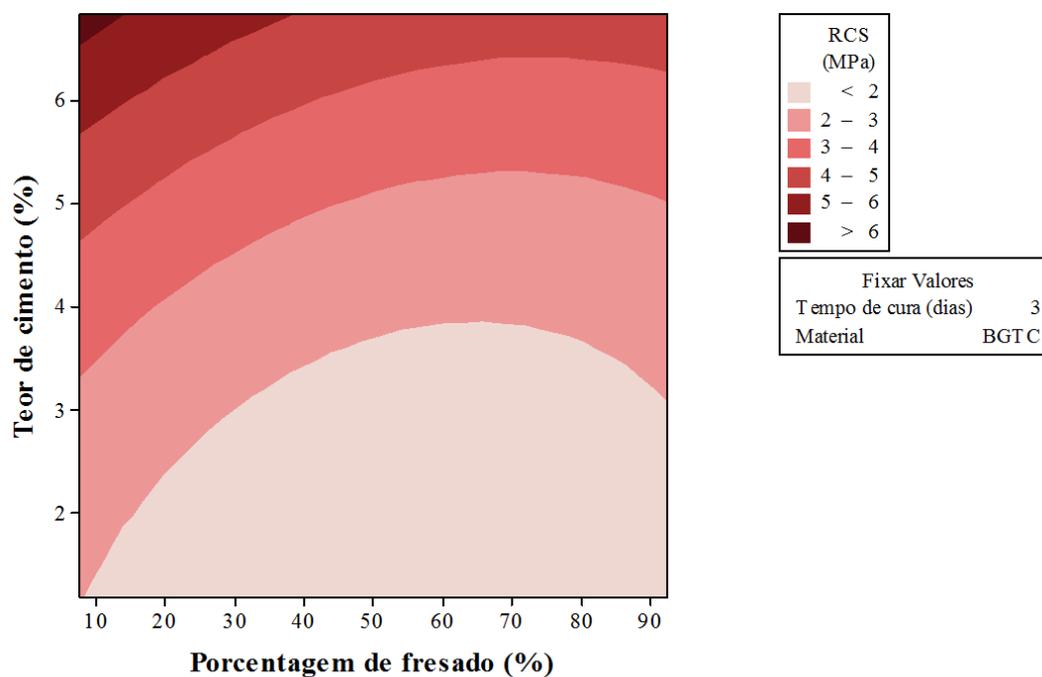


Gráfico de contorno de RCS das misturas contendo BGTC aos 3 dias de cura

Gráfico de contorno de RCS (MPa)

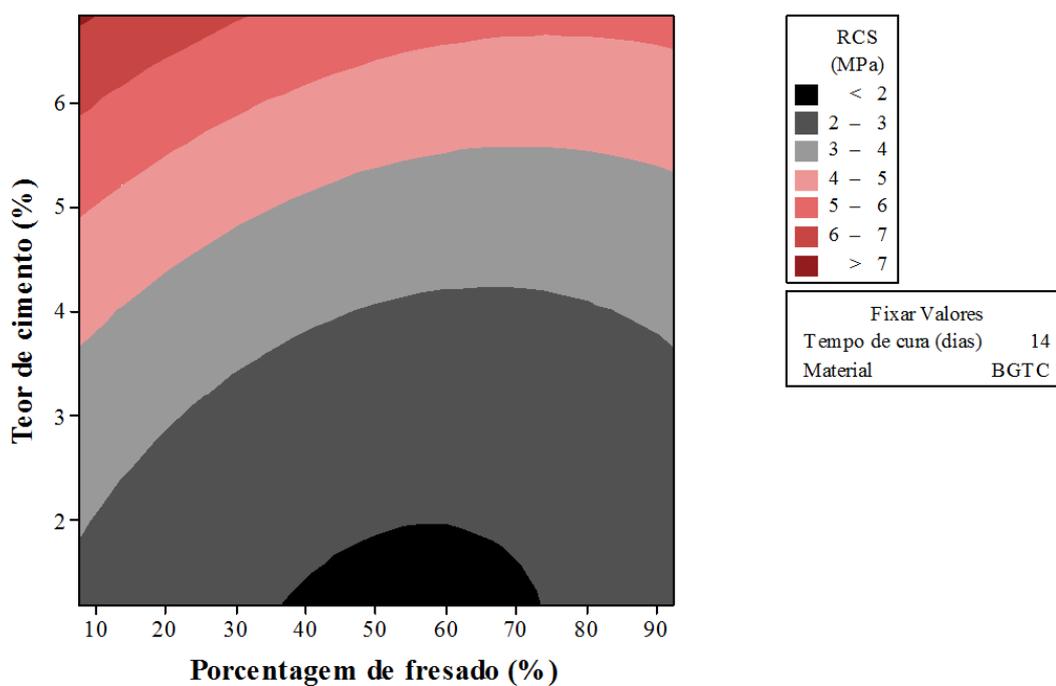


Gráfico de contorno de RCS das misturas contendo BGTC aos 14 dias de cura

Gráfico de contorno de RCS (MPa)

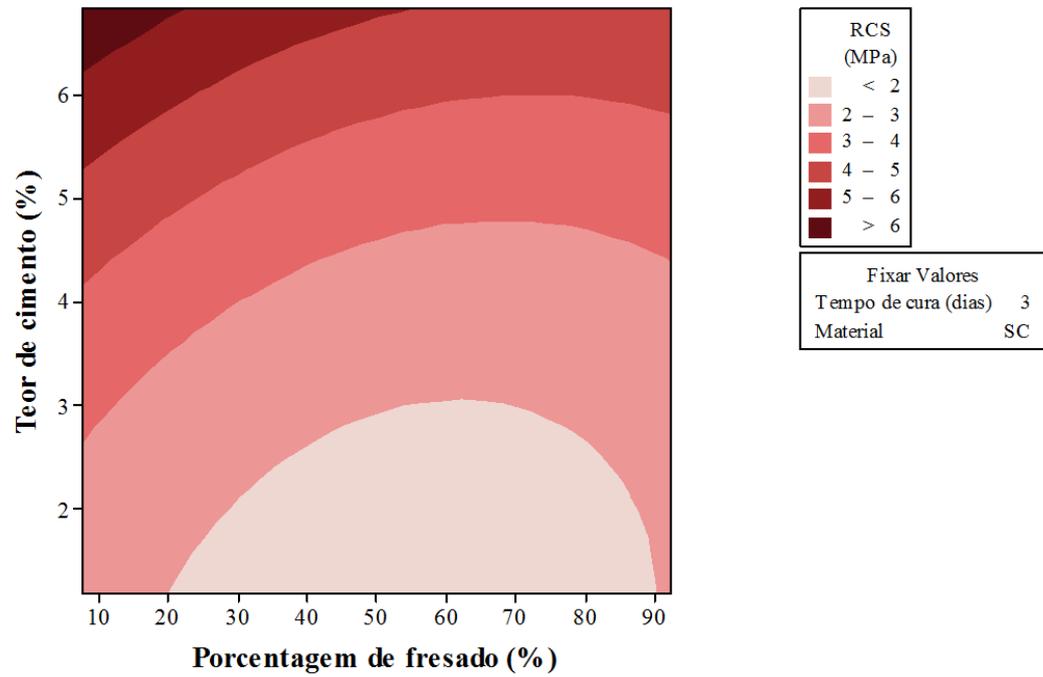


Gráfico de contorno de RCS das misturas contendo solo-cimento aos 3 dias de cura

Gráfico de contorno de RCS (MPa)

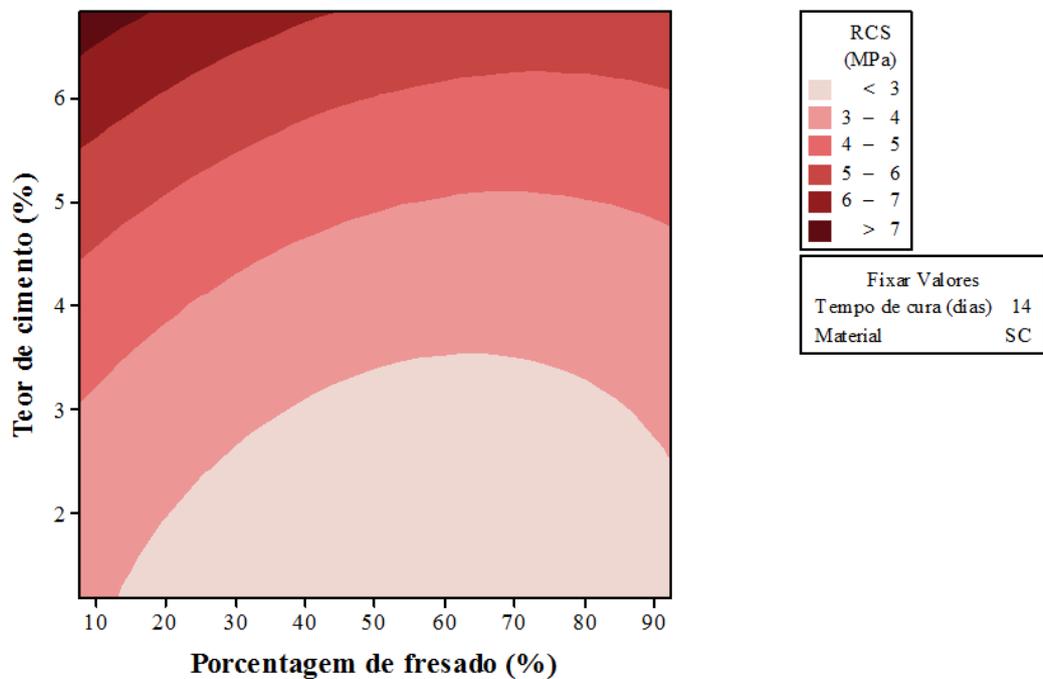


Gráfico de contorno de RCS das misturas contendo solo-cimento aos 14 dias de cura

Gráfico de contorno de RCD (MPa)

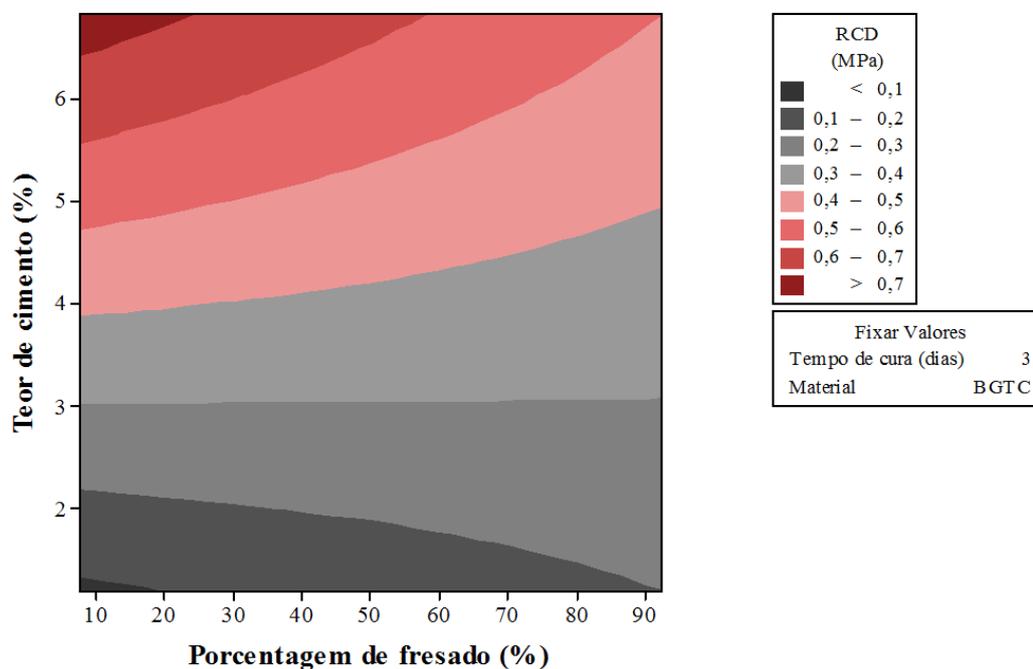


Gráfico de contorno de RCD das misturas contendo BGTC aos 3 dias de cura

Gráfico de contorno de RCD (MPa)

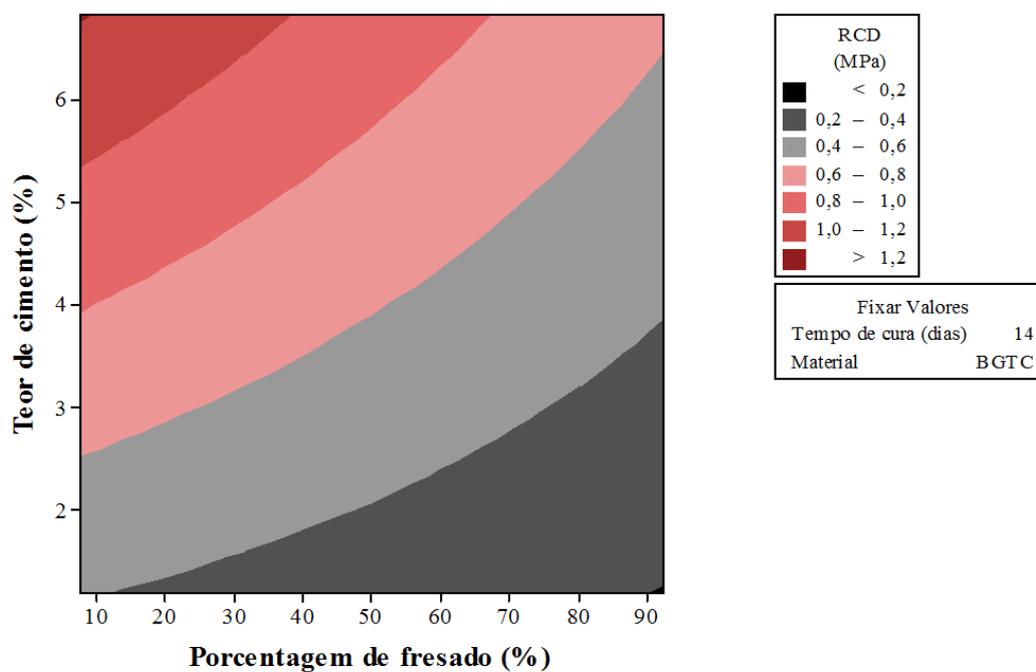


Gráfico de contorno de RCD das misturas contendo BGTC aos 14 dias de cura

Gráfico de contorno de RCD (MPa)

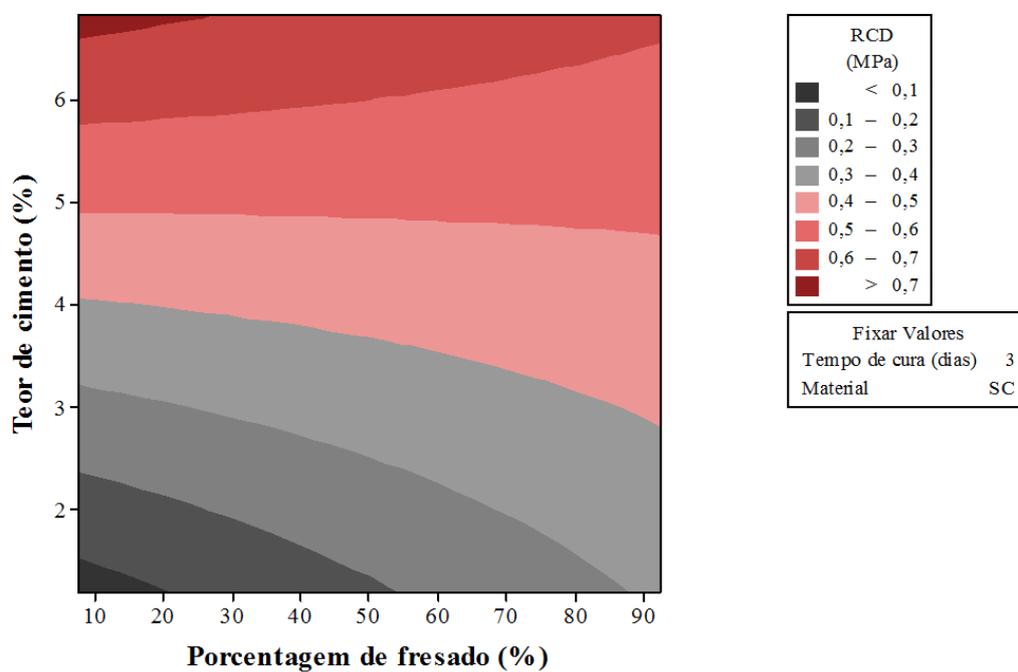


Gráfico de contorno de RCD das misturas contendo solo-cimento aos 3 dias de cura

Gráfico de contorno de RCD (MPa)

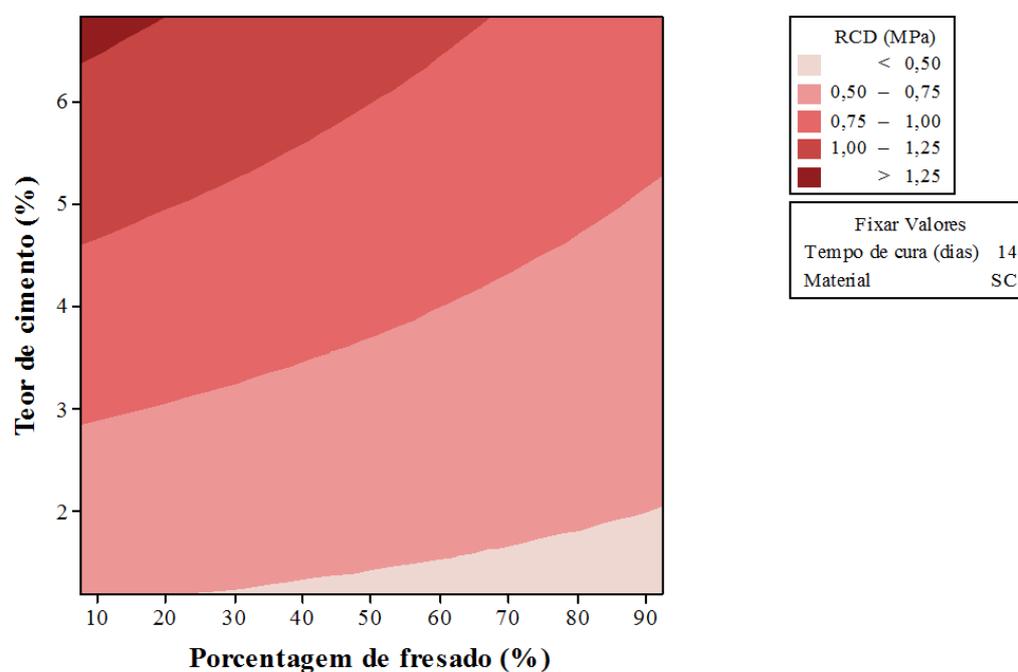


Gráfico de contorno de RCD das misturas contendo solo-cimento aos 14 dias de cura

Gráfico de contorno de MRD (MPa)

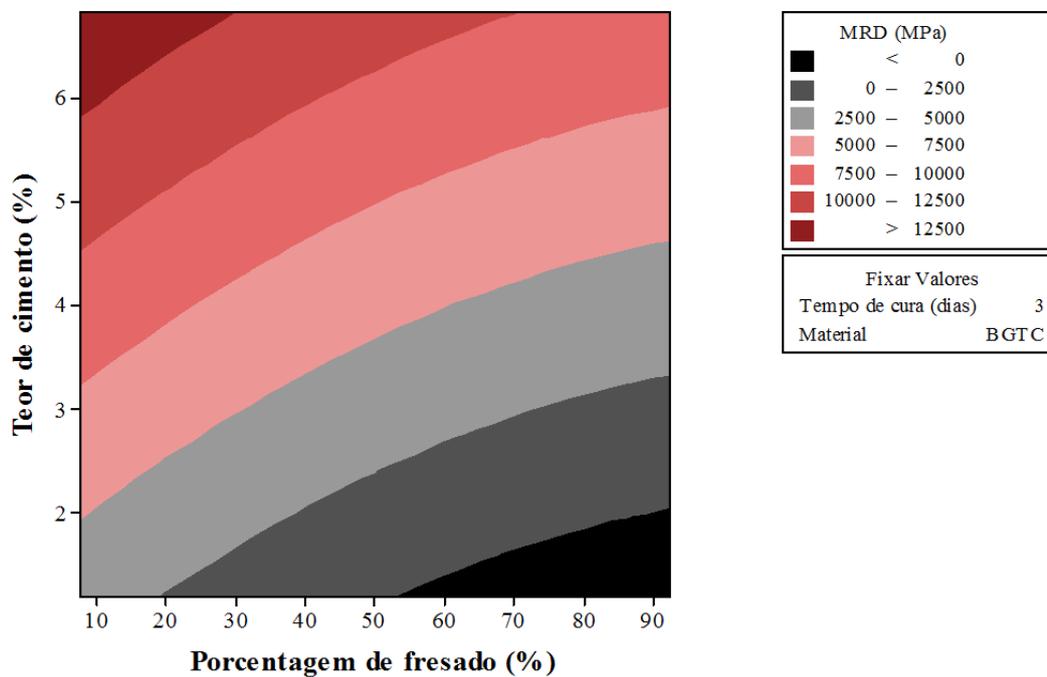


Gráfico de contorno de MRD das misturas contendo BGTC aos 3 dias de cura

Gráfico de contorno de MRD (MPa)

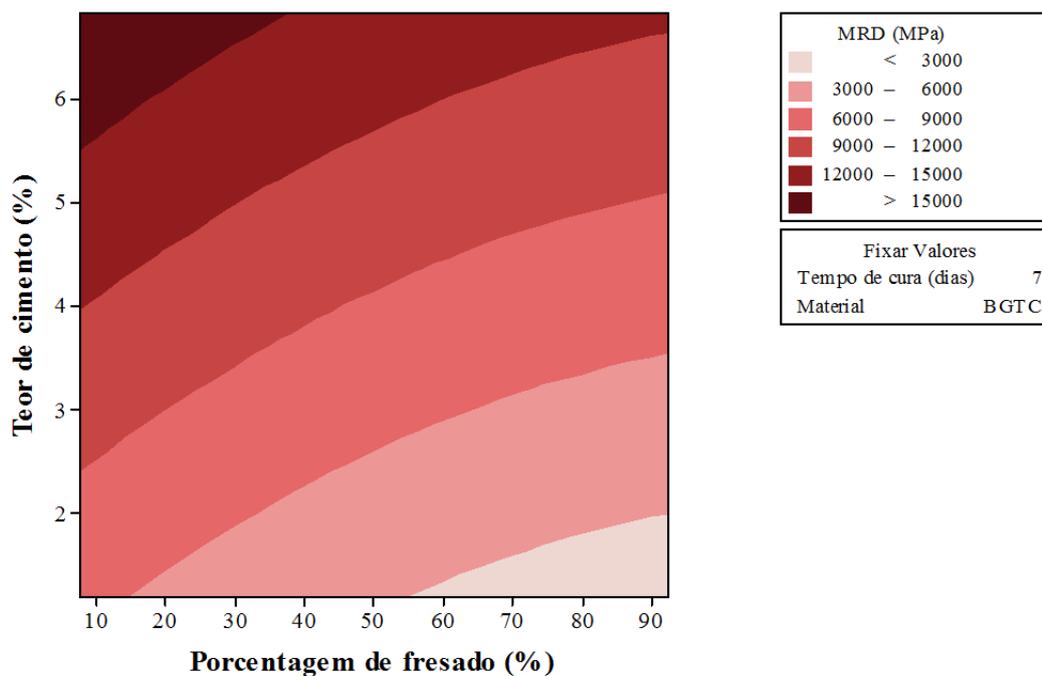


Gráfico de contorno de MRD das misturas contendo BGTC aos 7 dias de cura

Gráfico de contorno de MRD (MPa)

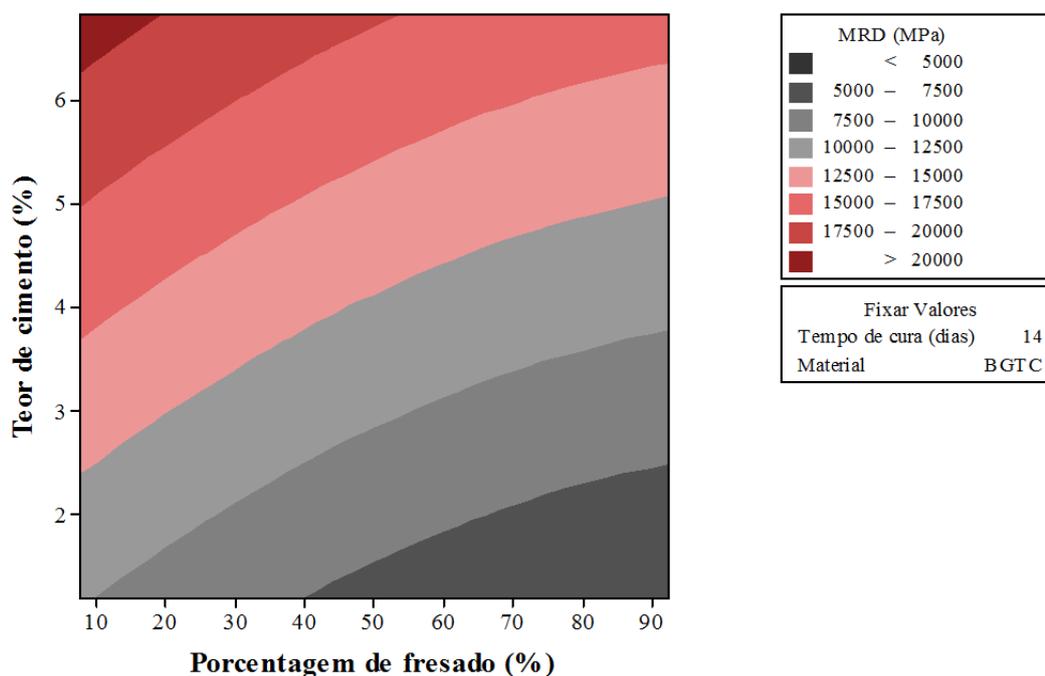


Gráfico de contorno de MRD das misturas contendo BGTC aos 14 dias de cura

Gráfico de contorno de MRD (MPa)

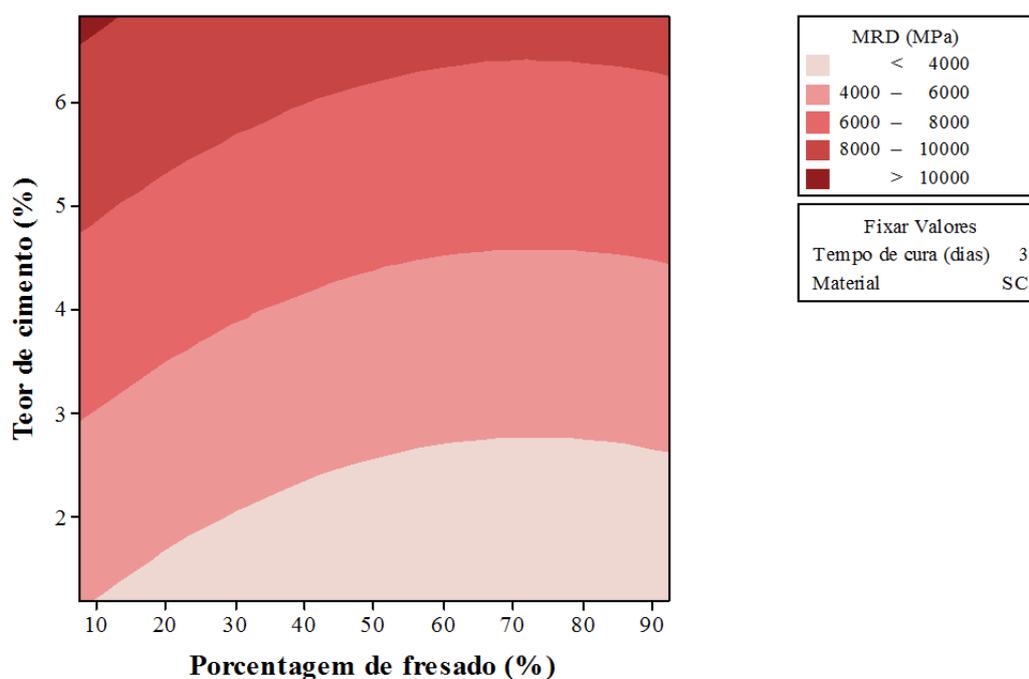


Gráfico de contorno de MRD das misturas contendo solo-cimento aos 3 dias de cura

Gráfico de contorno de MRD (MPa)

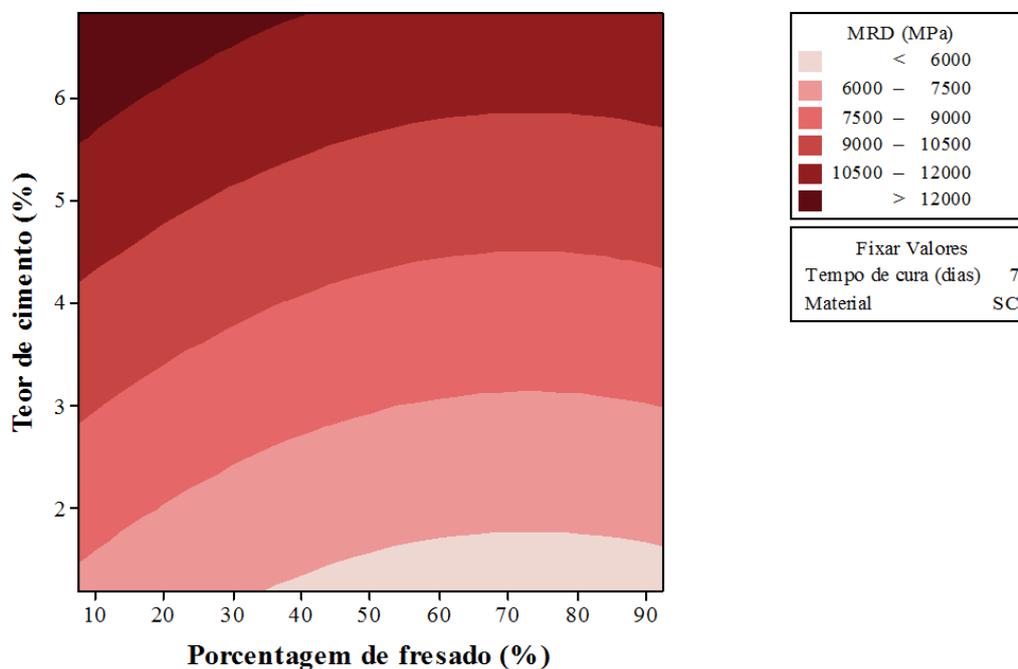


Gráfico de contorno de MRD das misturas contendo solo-cimento aos 7 dias de cura

Gráfico de contorno de MRD (MPa)

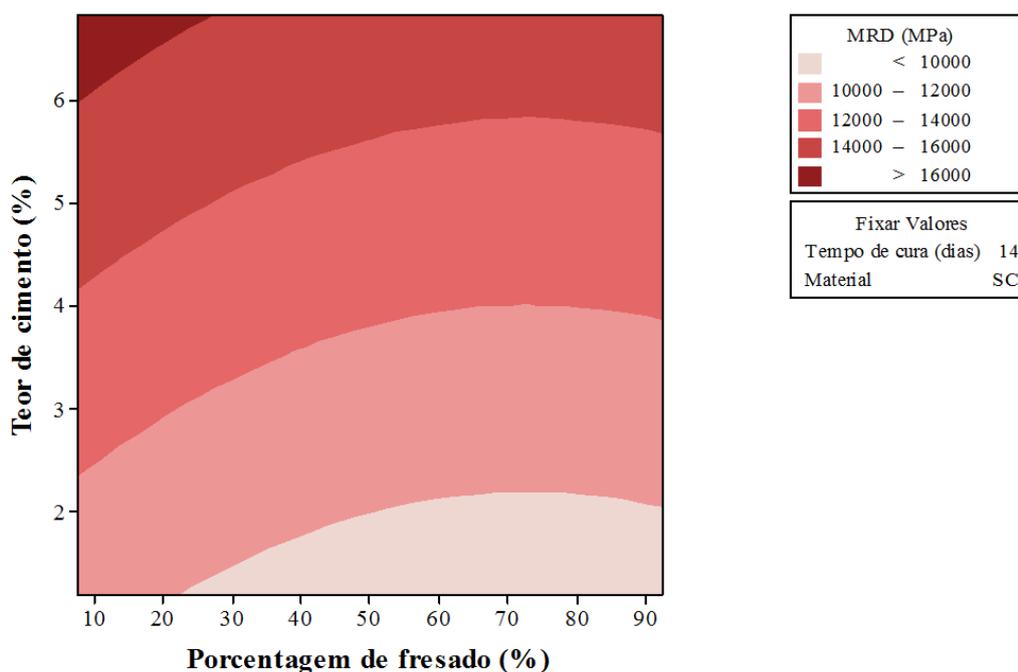


Gráfico de contorno de MRD das misturas contendo solo-cimento aos 14 dias de cura

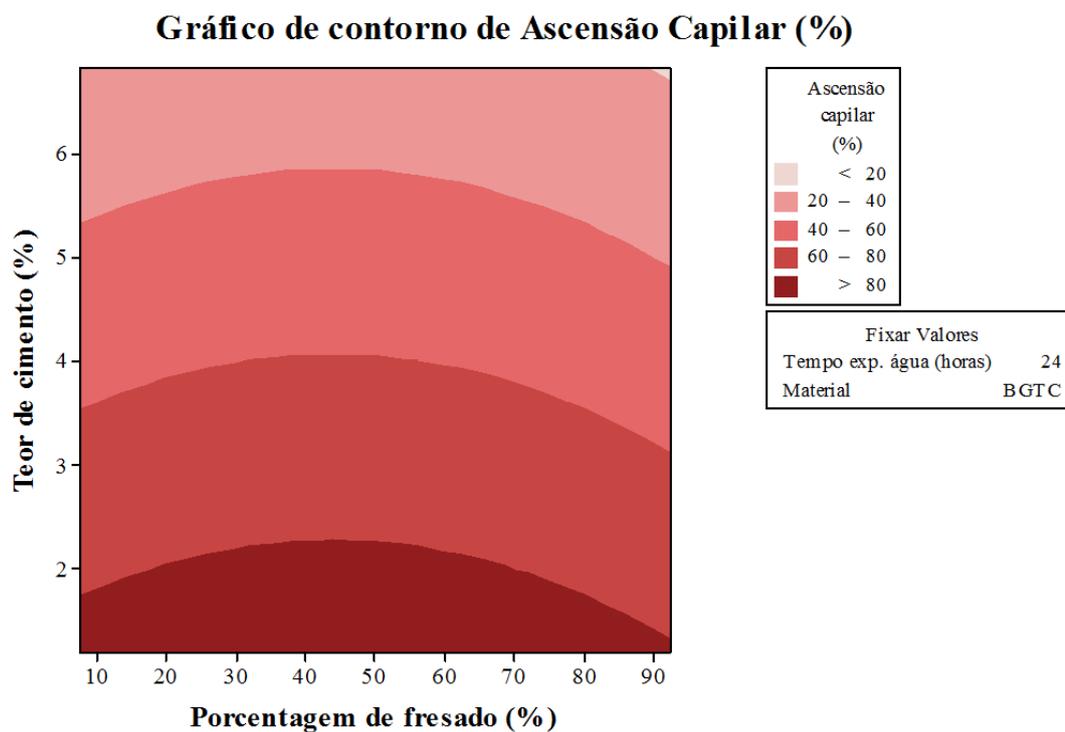


Gráfico de contorno de ascensão capilar das misturas contendo BGTC com 24 horas de exposição à água

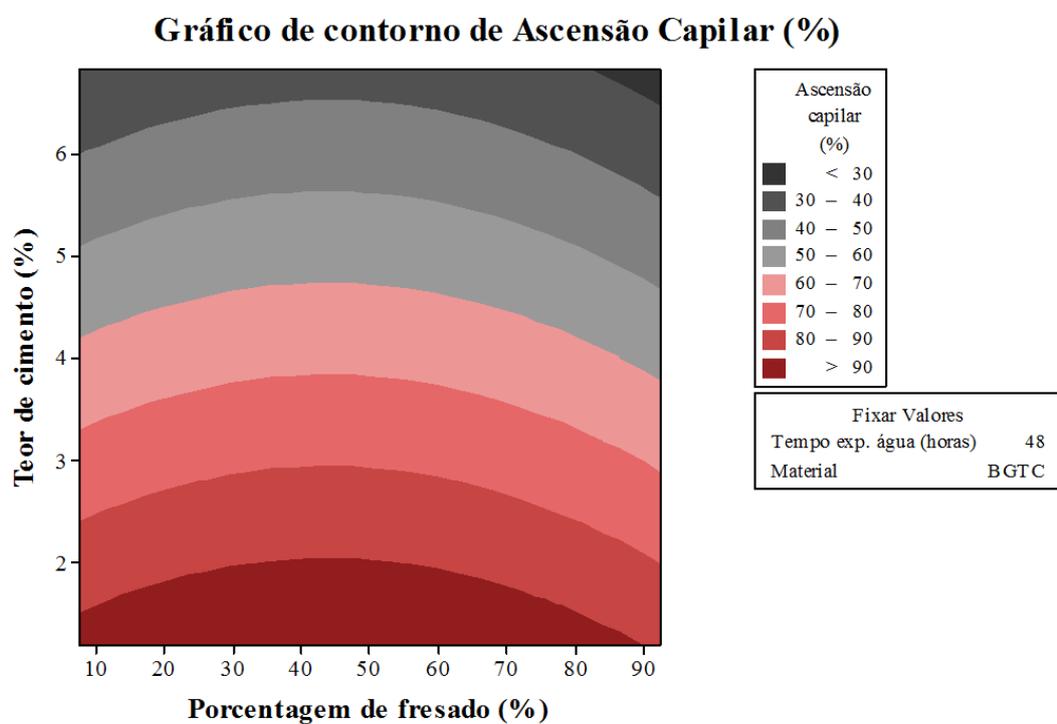


Gráfico de contorno de ascensão capilar das misturas contendo BGTC com 48 horas de exposição à água

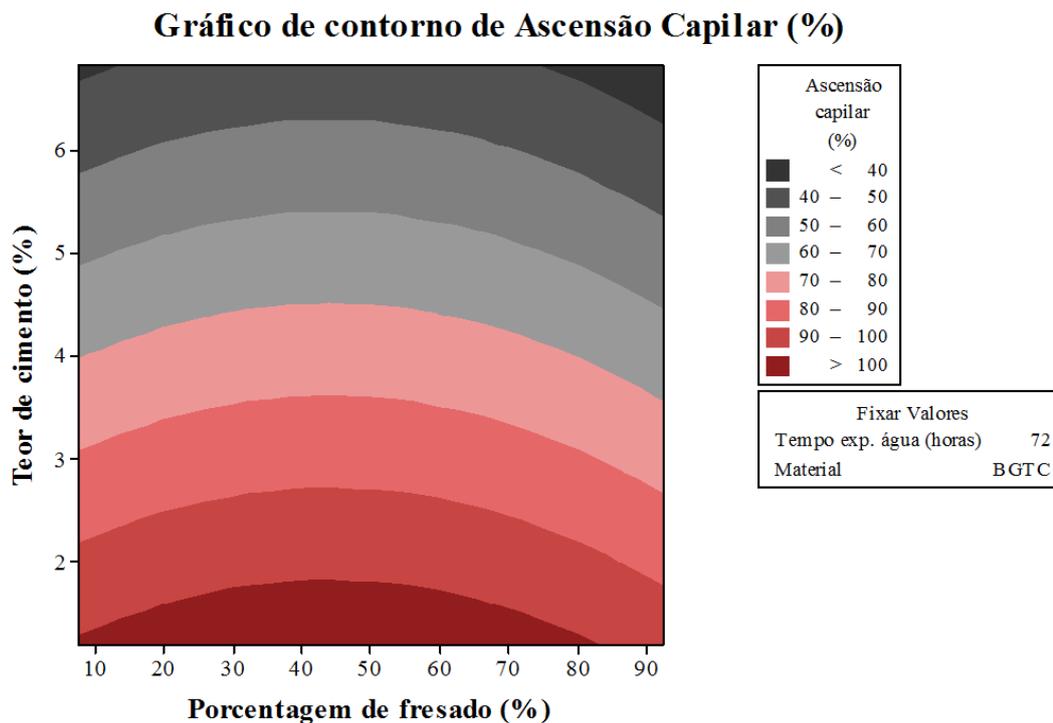


Gráfico de contorno de ascensão capilar das misturas contendo BGTC com 72 horas de exposição à água

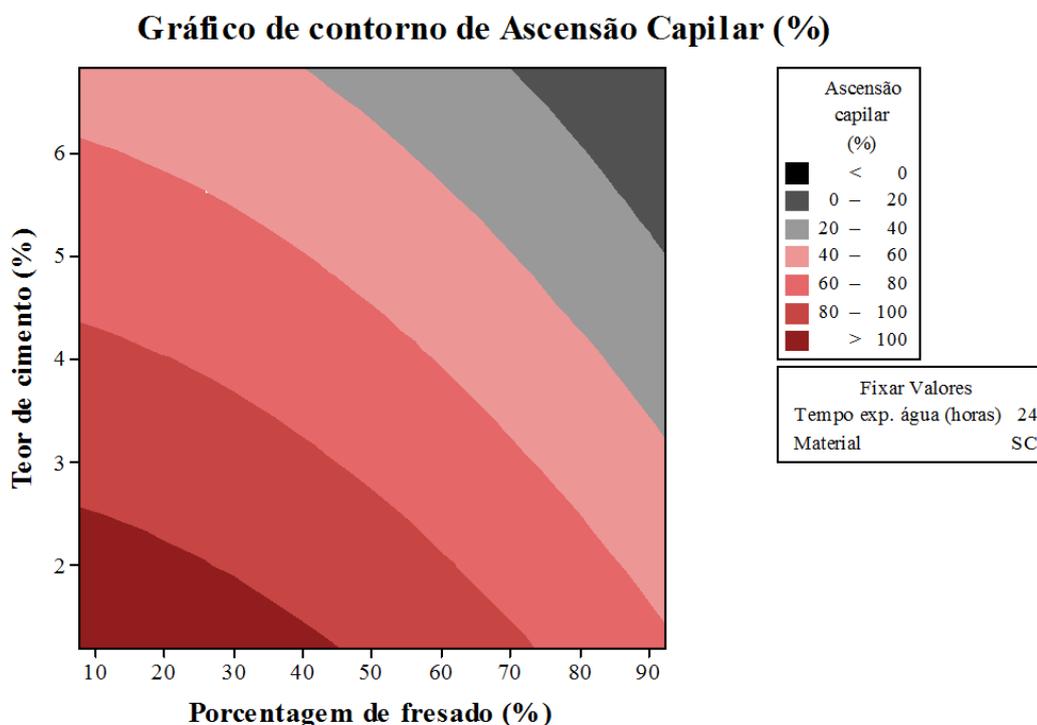


Gráfico de contorno de ascensão capilar das misturas contendo solo-cimento com 24 horas de exposição à água

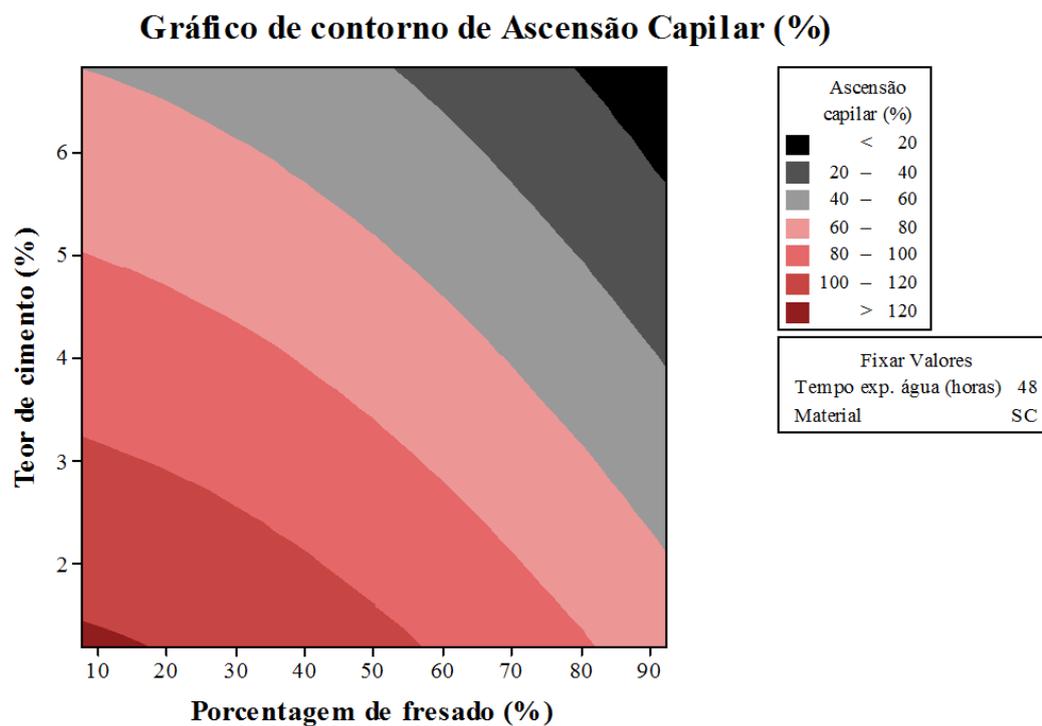


Gráfico de contorno de ascensão capilar das misturas contendo solo-cimento com 48 horas de exposição à água

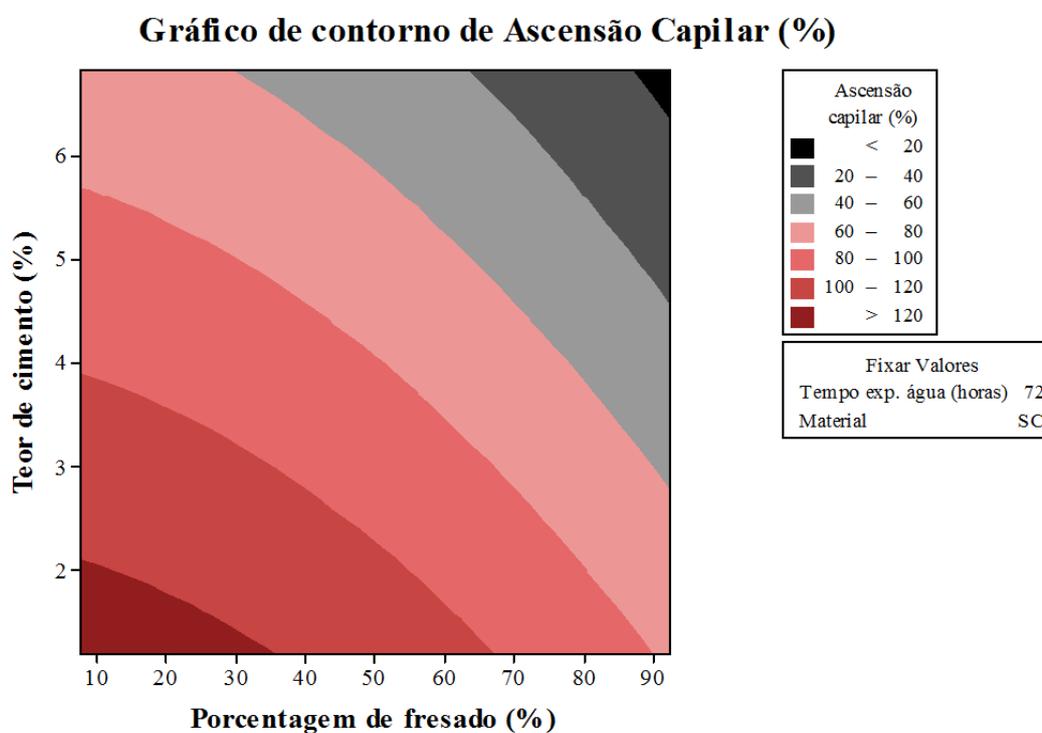


Gráfico de contorno de ascensão capilar das misturas contendo solo-cimento com 72 horas de exposição à água

Gráfico de contorno de Absorção (%)

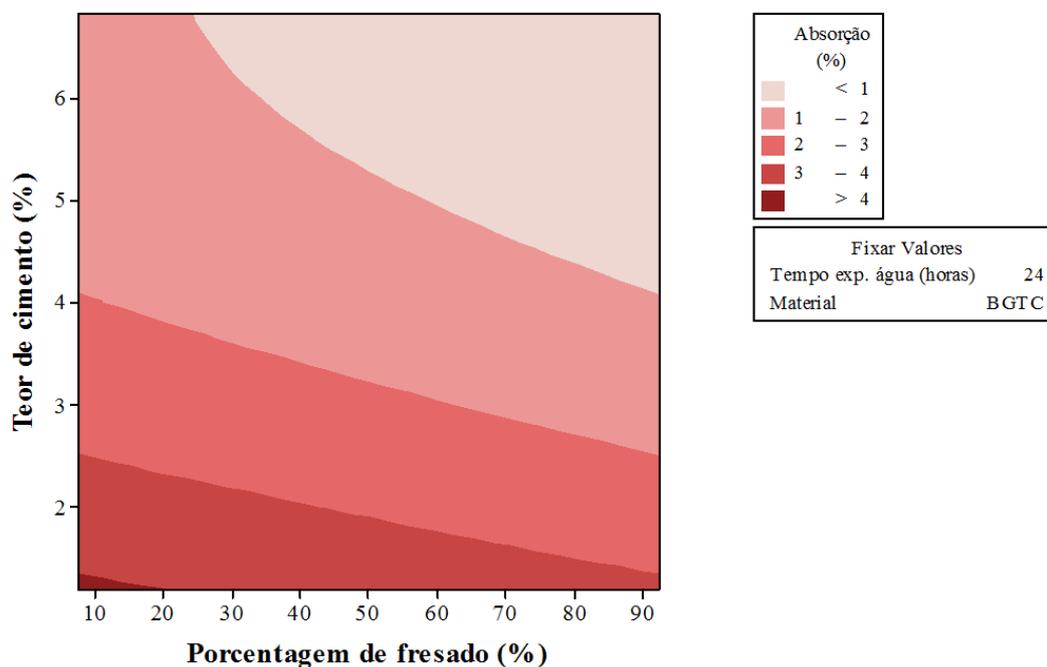


Gráfico de contorno de absorção das misturas contendo BGTC com 24 horas de exposição à água

Gráfico de contorno de Absorção (%)

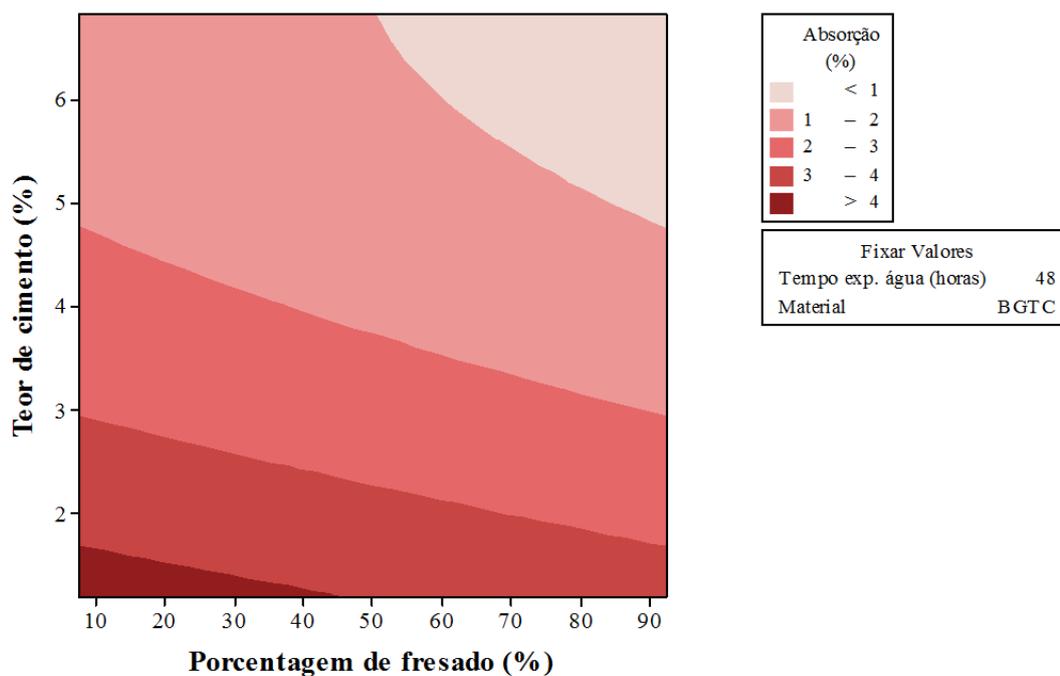


Gráfico de contorno de absorção das misturas contendo BGTC com 48 horas de exposição à água

Gráfico de contorno de Absorção (%)

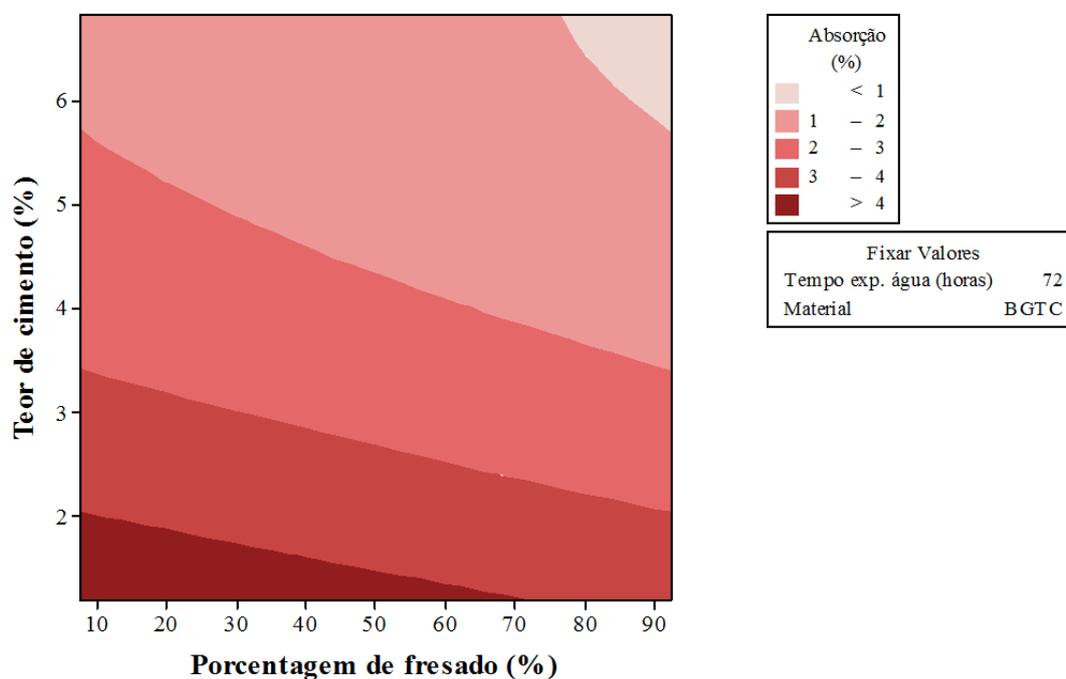


Gráfico de contorno de absorção das misturas contendo BGTC com 72 horas de exposição à água

Gráfico de contorno de Absorção (%)

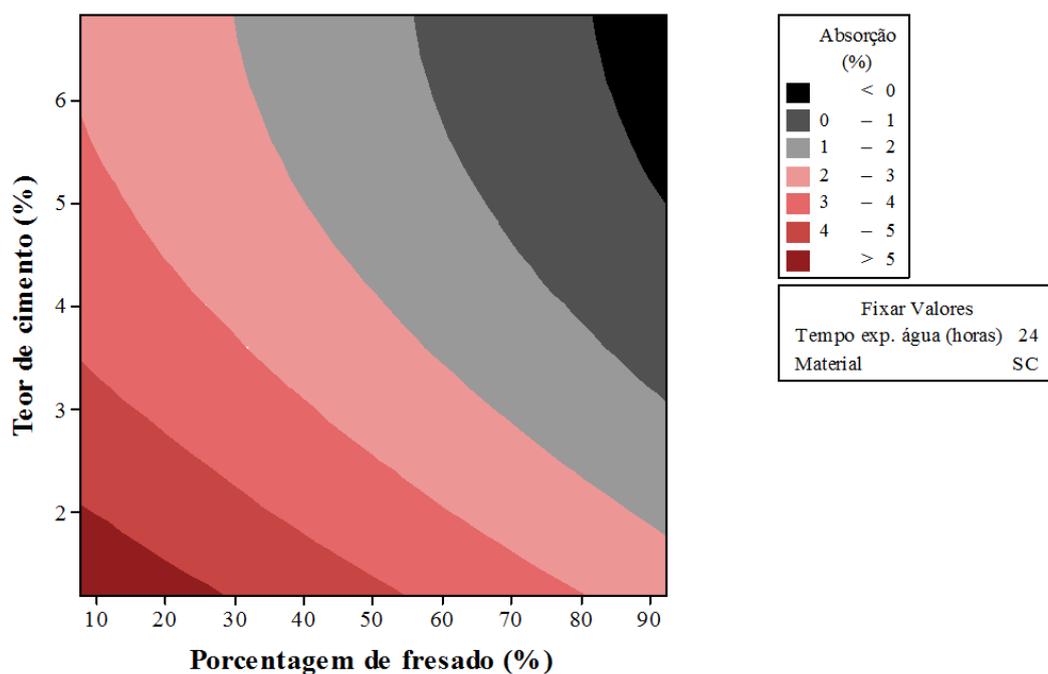


Gráfico de contorno de absorção das misturas contendo solo-cimento com 24 horas de exposição à água

Gráfico de contorno de Absorção (%)

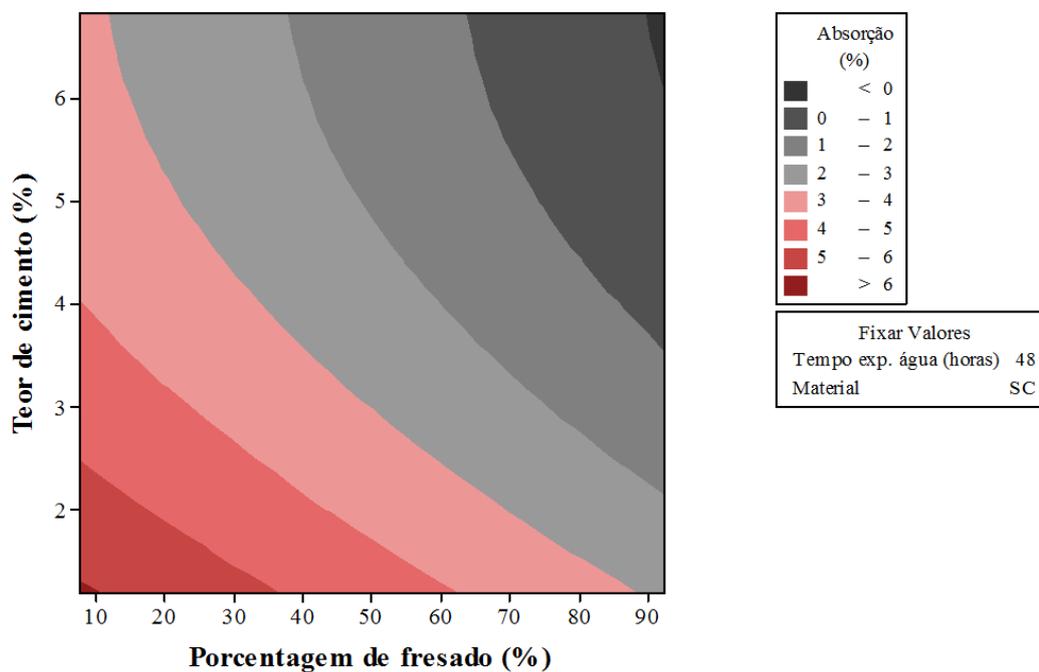


Gráfico de contorno de absorção das misturas contendo solo-cimento com 48 horas de exposição à água

Gráfico de contorno de Absorção (%)

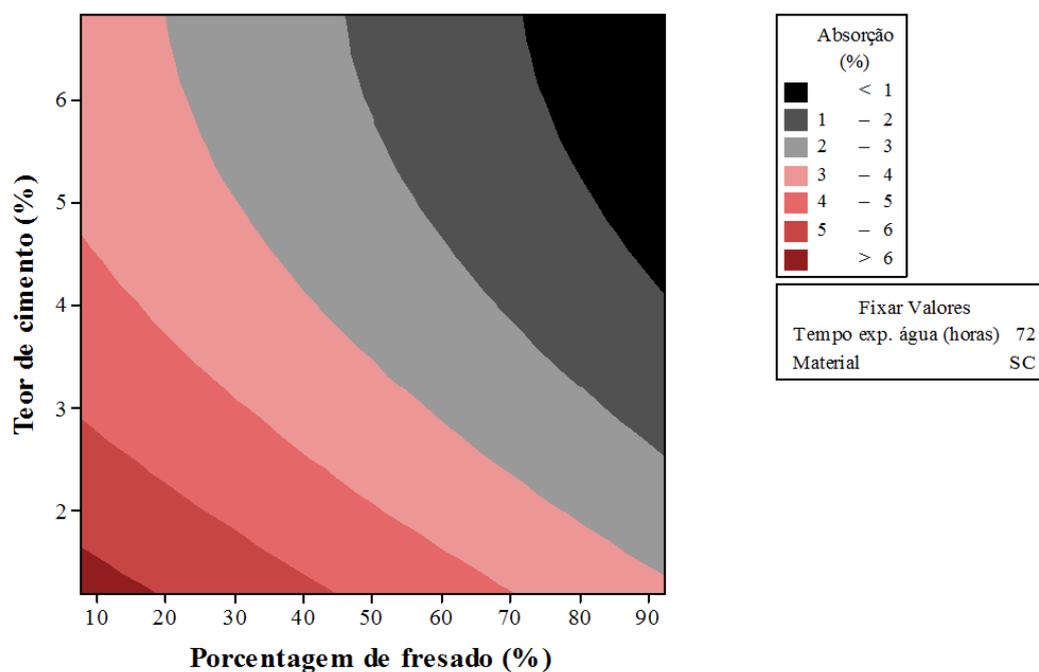


Gráfico de contorno de absorção das misturas contendo solo-cimento com 72 horas de exposição à água