

# Aplicação da metodologia de projeto de experimentos na dosagem de misturas de reciclagem de pavimentos com adição de cimento

Thaís Radünz Kleinert<sup>1</sup>, William Fedrigo<sup>2</sup>, Carla Schwengber ten Caten<sup>3</sup>,  
Washington Peres Núñez<sup>4</sup>, Jorge Augusto Pereira Ceratti<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, trkleinert@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, william.fedrigo@ufrgs.br

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, carlacaten@gmail.com

<sup>4</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, washington.nunez@ufrgs.br

<sup>5</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jorge.ceratti@ufrgs.br

## Recebido:

22 de janeiro de 2018

## Aceito para publicação:

16 de julho de 2018

## Publicado:

30 de abril de 2019

## Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

## Palavras-chaves:

Pavimento,  
Reciclagem com cimento,  
Projeto de experimentos,  
Otimização multivariada,  
Dosagem.

## Keywords:

Pavement,  
Full-depth reclamation with cement,  
Design of experiments,  
Multivariate optimization,  
Mix design.

DOI:10.14295/transportes.v27i1.1574

## RESUMO

Nesse estudo foi verificada a aplicação da metodologia de projeto de experimentos na dosagem de misturas de reciclagem de pavimentos com adição de cimento. Adotou-se um método de dosagem que avalia propriedades mecânicas, volumétricas e de erodibilidade, e foram desenvolvidas todas as etapas que contemplam um projeto de experimentos. O planejamento possibilitou definir as variáveis que exercem maior influência nos resultados, de modo a estabelecer uma matriz experimental abrangente e reduzida. Na análise dos resultados foi possível quantificar o efeito dos fatores controláveis estudados (teor de cimento e porcentagem de fresado) em cada variável de resposta. A partir da otimização multivariada, obteve-se o ajuste ótimo dos fatores controláveis considerando todas as variáveis de resposta simultaneamente. A ferramenta adotada nesse trabalho se mostrou bastante eficiente, podendo ser amplamente empregada na otimização de processos, como é o caso da dosagem de misturas recicladas.

## ABSTRACT

This study verified the application of design of experiments (DOE) to the mix design of full-depth reclamation with cement (FDR-C) mixtures. A mix design method that evaluates mechanical, volumetric and erodibility properties was adopted, and all the steps of a DOE were used. The planning stage enabled to define the variables with the most significant influence on the results, achieving a comprehensive and reduced experimental matrix. The results analysis made possible to quantify the effects of the studied controlled factors (cement content and reclaimed asphalt pavement percentage) on each response variable. The multivariate optimization resulted in an optimal adjust of those factors considering all the response variables simultaneously. DOE proved to be a very efficient tool that could be widely used in process optimization, including the mix design of FDR-C mixtures.



## 1. INTRODUÇÃO

A reciclagem profunda com adição de cimento é prática usual na restauração de pavimentos degradados em países com avançada tecnologia em pavimentação. No Brasil, a técnica vem sendo aplicada desde meados dos anos 1990 (Paiva *et al.*, 2013), mas ainda perduram dúvidas geradas, principalmente, pela escassez de documentação técnica qualificada. Tal condição leva à adoção de variados métodos e critérios em projetos envolvendo reciclagem com cimento. Dessa maneira, a eficácia da técnica pode ficar comprometida, resultando em um desempenho da camada reciclada não condizente com o previsto em projeto.

Embora exista uma vasta literatura sobre reciclagem de pavimentos com cimento, em âmbito nacional (Trichês *et al.*, 2013; Dalla Rosa *et al.*, 2015; Bessa *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2017; Castañeda López *et al.*, 2018; Fedrigo *et al.*, 2018) e internacional (Kolias, 1996; Grilli *et al.*, 2013; Isola *et al.*, 2013), apenas alguns estudos abordam considerações acerca de métodos de dosagem para misturas recicladas com cimento (Guthrie *et al.*, 2007; Yuan *et al.*, 2011), sendo que Chomicz-Kowalska e Maciejewski (2015) foram os únicos a apresentarem uma otimização multivariada para avaliar o ajuste ótimo de espuma de asfalto e cimento como agentes estabilizadores. De uma forma geral, são poucos os trabalhos que discutem questões a respeito da dosagem de misturas recicladas com cimento considerando-se materiais de pavimentação comumente empregados na malha rodoviária brasileira (Fedrigo *et al.*, 2017a).

No método de dosagem de misturas recicladas com cimento proposto por Fedrigo *et al.* (2017a) são avaliadas propriedades mecânicas, volumétricas e de erodibilidade. Ao examinar os resultados provenientes dos diferentes ensaios, surge uma dificuldade relacionada à definição de uma mistura ótima que atenda a todos os requisitos, já que cada propriedade apresenta um intervalo admissível. Dessa maneira, esse trabalho tem como objetivo verificar a aplicabilidade da metodologia de projeto de experimentos com intuito de facilitar a dosagem de misturas de reciclagem de pavimentos com adição de cimento.

## 2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A fim de obter a correta dosagem de misturas recicladas com cimento, optou-se pelo desenvolvimento de um projeto de experimentos, que corresponde às etapas de planejamento e execução do experimento, análise dos resultados e otimização do processo em estudo. Dessa maneira, os procedimentos metodológicos desse estudo são apresentados no fluxograma da Figura 1.

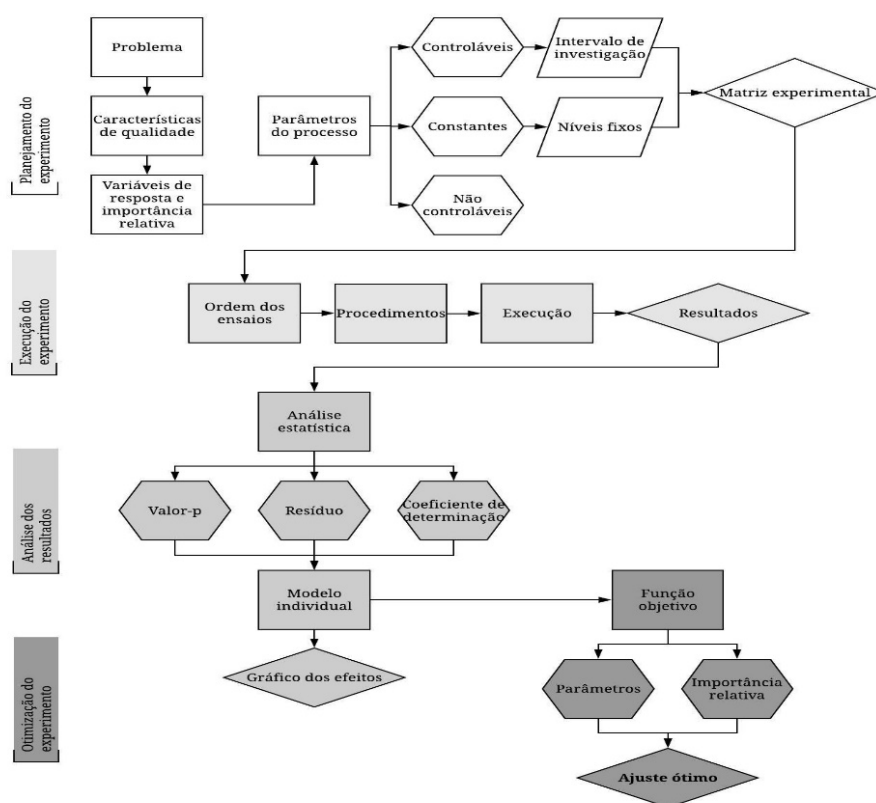


Figura 1: Procedimentos metodológicos adotados no trabalho

É importante ressaltar que muitos dos critérios adotados nesse trabalho se basearam na experiência e conhecimento dos autores, adquiridos durante o desenvolvimento de um amplo projeto de pesquisa acerca do assunto, no Laboratório de Pavimentação (LPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Dessa maneira, pretende-se fornecer ao meio técnico um embasamento científico para emprego de ferramentas que auxiliam na dosagem dessas misturas. Destaca-se que os parâmetros e critérios avaliados podem ser alterados pelo projetista, de acordo com as normas adotadas, as características da obra e suas limitações.

## 2.1. Planejamento do experimento

O problema identificado nesse trabalho consiste na dosagem adequada dos materiais envolvidos na técnica de reciclagem de pavimentos com cimento. Para otimizar esse processo, foram identificadas as propriedades que se desejava conhecer, que correspondem às características de qualidade (CQ). Desse modo, essas foram definidas como comportamento mecânico, volumétrico e de erodibilidade.

Para suprir as necessidades relacionadas com as características de qualidade, foi necessário estabelecer as variáveis de resposta (VR), que nesse trabalho correspondem aos ensaios para análise das propriedades supracitadas. Assim, foram definidas as seguintes VR: resistência à compressão simples – RCS ( $Y_1$ ), resistência à tração por compressão diametral – RCD ( $Y_2$ ), módulo de resiliência – MR ( $Y_3$ ), retração ( $Y_4$ ), ascensão capilar ( $Y_5$ ), absorção ( $Y_6$ ) e erodibilidade ( $Y_7$ ).

Cada VR deve estar associada a um valor correspondente à sua importância relativa (IR). Nesse estudo, o índice foi alusivo à relevância da realização do ensaio, conforme conhecimento técnico dos autores. Para os ensaios de RCS e RCD, os quais são os únicos exigidos na norma do DNIT (2013b), foi concedida a maior importância ( $IR = 10$ ). As demais variáveis de resposta receberam IR de 5 (retração e ascensão capilar) e IR igual a 3 (MR, absorção e erodibilidade), de acordo com a aplicabilidade dos resultados para dosagem da mistura.

Definidas as VR e as IR relacionadas, foram determinados os parâmetros do processo (X). Esses são todos os fatores que podem exercer alguma influência nas VR, e estão subdivididos em: controláveis – parâmetros do processo escolhidos para serem analisados a diferentes níveis no experimento; constantes – parâmetros que são mantidos constantes durante o experimento; não controláveis (ruído) – variáveis que não podem ser controladas pela equipe técnica e são responsáveis pelo erro experimental, variabilidade residual ou variância do erro (Ribeiro e Caten, 2014).

Para o estudo em questão, foram indicados os seguintes parâmetros: porcentagem de fresado ( $X_1$ ), teor de cimento ( $X_2$ ), tempo de cura ( $X_3$ ), energia de compactação ( $X_4$ ), teor de umidade ( $X_5$ ), tipo de ligante asfáltico no material fresado ( $X_6$ ), tipo de material de base ( $X_7$ ) e tipo de cimento ( $X_8$ ). A fim de dividir os fatores em controláveis e constantes, foi verificado o índice de priorização para cada parâmetro de entrada, conforme Equação 1.

$$PR(x_j) = \left( \sum_i R_{ij} \times IR_i \right) / \left( \sum_i IR_i \right) \quad (1)$$

em que:  $PR(x_j)$ : índice de priorização dos parâmetros de entrada;  
 $R_{ij}$ : relação entre a variável de resposta “i” e o parâmetro do processo “j”;  
 $IR_i$ : índice de importância relativa para a variável de resposta “i”.

Com base em experiências acerca da reciclagem de pavimentos com cimento e em estudos sobre reciclagem com cimento (Fedrigo *et al.*, 2016; 2017b), foi determinado o índice de prio-

rização conforme a magnitude do efeito do parâmetro de entrada na variável de resposta, sendo consideradas as seguintes intensidades de relação: inexistente (0), fraca (1), moderada (6) e forte (9). Dessa maneira, na Tabela 1 são apresentados os índices de priorização para cada parâmetro de entrada.

**Tabela 1:** Índices de priorização dos parâmetros de entrada

VR	IR <sub>i</sub>	R <sub>ij</sub> = Relações X <sub>i</sub> Y <sub>j</sub>							
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>
Y <sub>1</sub>	10	9	9	9	9	6	9	9	6
Y <sub>2</sub>	10	9	9	9	9	6	9	9	6
Y <sub>3</sub>	3	9	9	9	9	6	9	9	6
Y <sub>4</sub>	5	9	9	9	6	6	6	9	6
Y <sub>5</sub>	5	9	9	6	9	6	6	9	6
Y <sub>6</sub>	3	9	9	6	9	6	6	9	6
Y <sub>7</sub>	3	9	9	6	9	6	6	6	6
	PR(x <sub>i</sub> )	844	844	709	799	529	664	799	529

O número elevado de VR implica que a cada fator controlável (FC), aumenta significativamente o número de amostras a serem ensaiadas. Por isso, constatou-se a necessidade de reduzir ao máximo a quantidade de FC. A partir da Tabela 1, verificou-se que os parâmetros de entrada que exercem maior influência nas VR são a porcentagem de fresado (X<sub>1</sub>) e o teor de cimento (X<sub>2</sub>).

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros do processo. Para os fatores controláveis, foram indicados os intervalos de investigação interessantes para o estudo. São apresentados os níveis fixos adotados para os fatores mantidos constantes, definidos a partir de estudos realizados por Fedrigo *et al.* (2017a; 2017b), sendo que alguns deles já foram avaliados em mais níveis.

**Tabela 2:** Parâmetros do processo

Fatores controláveis		PR(x <sub>i</sub> )	Intervalo de investigação
X <sub>1</sub>	Porcentagem de fresado (Fr)	844	20 a 80%
X <sub>2</sub>	Teor de cimento (Ci)	844	2 a 6%
Fatores constantes		PR(x <sub>i</sub> )	Níveis fixos
X <sub>3</sub>	Tempo de cura	709	7 dias
X <sub>4</sub>	Energia de compactação	799	Modificada
X <sub>5</sub>	Teor de umidade	529	Ótimo
X <sub>6</sub>	Tipo de ligante asfáltico no material fresado	664	Convencional
X <sub>7</sub>	Tipo de material de base	799	Solo-cimento
X <sub>8</sub>	Tipo de cimento	529	CP II E 32
Fatores não controláveis			
Z <sub>1</sub>	Condições climáticas		
Z <sub>2</sub>	Habilidade e cansaço do operador		
Z <sub>3</sub>	Desgaste dos equipamentos		
Z <sub>4</sub>	Desgaste das ferramentas		
Z <sub>5</sub>	Variações nos moldes		

Ao desenvolver a matriz experimental, foi necessário limitar a quantidade de análises, concomitantemente com a necessidade de analisar o maior intervalo exequível. É comum a realização de análises considerando um fator por vez, de forma a manter os demais fixos. Contudo, Antony (1998) ressalta que tal abordagem requer grande quantidade de recurso para obter uma quantidade limitada de informações sobre o processo, já que tais condições são difíceis de serem reproduzidas, isto é, produzem falsas situações ótimas para o processo. Quando se deseja

estudar os efeitos de dois ou mais fatores e o efeito de interação entre eles, o planejamento fatorial é indicado (Button, 2012). Um caso particular é o planejamento fatorial  $2^k$ , que possui  $k$  fatores e dois níveis. No entanto, como o objetivo da pesquisa foi estudar, além dos efeitos principais e interações, os efeitos 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 (-1 e +1) possibilitam a estimativa de termos lineares e interações e os pontos da estrela ( $-\alpha$  e  $+\alpha$ ) permitem estimar os efeitos quadráticos puros. Destaca-se que os pontos da estrela são extrapolados a partir do PCSO, gerando valores não usuais para fins de aplicação prática, mas necessários para o desenvolvimento do projeto de experimentos.

No PCSO, o valor de  $\alpha$  pode ser calculado para atribuir rotacionalidade ou ortogonalidade ao projeto. A primeira assegura a mesma precisão nas estimativas das VR para todos os pontos do espaço amostral. A segunda faz com que as estimativas dos coeficientes de termos lineares e quadráticos sejam independentes, o que possibilita a retirada de algum termo do modelo sem causar danos a esse. Outra vantagem do PCSO é a possibilidade de blocagem, o que torna possível dividir os experimentos em dois: parte fatorial e parte em estrela. Isso facilita a moldagem dos corpos de prova (CP) e realização dos ensaios, sem prejudicar os resultados.

O projeto de experimentos foi planejado no *software* estatístico *Minitab*. Conforme apresentado na Tabela 2, os FC foram a porcentagem de fresado (Fr) e o teor de cimento (Ci), sendo que o intervalo de investigação apresentado corresponde aos pontos da parte fatorial (-1 e +1). A matriz experimental resultante é apresentada na Tabela 3 e contempla os níveis reais e codificados, assim como a nomenclatura das misturas estudadas.

**Tabela 3:** Descrição da matriz experimental

Níveis codificados		Níveis reais		Nomenclatura
A	B	Fr (%)	Ci (%)	Ci (%) – Fr (%)
0	-1,41 ( $-\alpha$ )	50	1,17	1,17-50
-1	-1	20	2	2-20
+1	-1	80	2	2-80
-1,41 ( $-\alpha$ )	0	7,57	4	4-7,57
0	0	50	4	4-50
0	0	50	4	4-50
0	0	50	4	4-50
0	0	50	4	4-50
0	0	50	4	4-50
0	0	50	4	4-50
0	0	50	4	4-50
+1,41 ( $+\alpha$ )	0	92,43	4	4-92,43
-1	+1	20	6	6-20
+1	+1	80	6	6-80
0	+1,41 ( $+\alpha$ )	50	6,83	6,83-50

Os parâmetros “A” e “B” da Tabela 3 representam os níveis codificados dos fatores controláveis, porcentagem de fresado e teor de cimento, respectivamente. Observa-se também que o ponto central (0;0), relativo à mistura 4-50, foi repetido 6 vezes. Esse procedimento garante maior confiabilidade devido ao maior número de graus de liberdade para estimativa do termo de erro, possibilitando uma avaliação mais precisa da variância experimental (Montgomery, 2001).

## 2.2. Execução do experimento

Conforme apresentado na Tabela 2, os materiais utilizados nas misturas foram o solo-cimento (SC) e o fresado asfáltico com ligante convencional (Fr). Ambos foram coletados separadamente durante a reciclagem da rodovia SP-425, no município de Barretos/SP. Na Figura 2 são apresentadas as curvas granulométricas dos materiais e das misturas, assim como as faixas granulométricas propostas pela Wirtgen (2012) para misturas de reciclagem de cimento. Observa-se que em algumas misturas foi necessária a adição de brita na fração 3/8" (B 3/8) para enquadramento nos limites propostos.

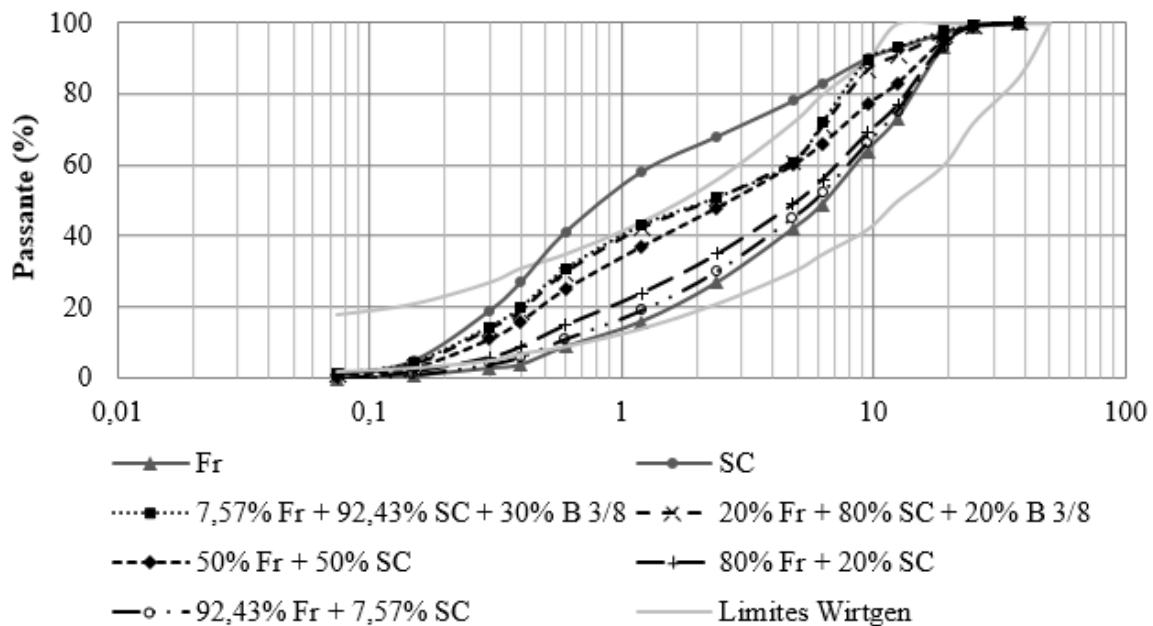


Figura 2: Curvas granulométricas dos materiais e das misturas

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

Depois de realizado o planejamento do experimento, a matriz experimental foi aleatorizada a fim de garantir a independência estatística dos valores observados. Foi seguida a ordem sugerida pelo *software*, de modo que a moldagem dos CP foi realizada conforme os blocos indicados (um dia para os pontos da parte fatorial e outro para os pontos em estrela) para cada ensaio. Os parâmetros adotados na moldagem foram obtidos por meio de ensaios de compactação na energia modificada, conforme o método de ensaio DNIT-ME 164 (DNIT, 2013a). Ressalta-se que a mistura foi realizada individualmente para cada CP, reduzindo a probabilidade de ocorrência da repetição de eventuais erros.

Para a produção das misturas, as amostras de base e fresado foram secas e, então, suas umidades foram determinadas. Com isso, calculou-se a massa seca dos materiais (solo-cimento, fresado asfáltico e cimento) e de água necessária para se alcançar o teor de umidade ótimo. As misturas foram realizadas manualmente e respeitando um mesmo período de homogeneização.

A cura dos corpos de prova de RCS, RCD, MR, ascensão capilar e absorção foi realizada a partir da imersão dos CP em água por 7 dias, os quais eram acondicionados em sacos plásticos a fim

de evitar o contato direto com a água. Os procedimentos adotados para a cura dos CP de retração e erodibilidade são apresentados juntamente com os respectivos métodos.

Os ensaios de RCS foram realizados em CP com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, conforme o método de ensaio DNER-ME 091 (DNIT, 1998), com velocidade de aplicação de tensão média de 0,25 MPa/s (Figura 3a). A RCD das amostras foi determinada com base no método de ensaio DNIT-ME 136 (DNIT, 2010a), com velocidade de deslocamento de 0,8 mm/s aplicada em CP com 6,5 cm de altura e 10,2 cm de diâmetro (Figura 3b). O MR foi determinado por compressão diametral, de modo que os CP foram moldados com as mesmas dimensões do ensaio de RCD. A realização do ensaio seguiu o método de ensaio do DNIT-ME 135 (DNIT, 2010b), com aplicação de 1 ciclo de carga por segundo (1 Hz) e carga equivalente a 30% da tensão de ruptura obtida no ensaio de RCD (Figura 3c).

Os demais ensaios foram realizados de acordo com normas australianas. A retração das misturas foi verificada conforme a AS 1012.13 (Standards Australia, 1992) em CP prismáticos (7,5 x 7,5 x 28 cm). Entre as duas camadas dos corpos de prova foram inseridos pinos metálicos nas extremidades para posterior leitura da variação volumétrica (Figura 3d). A primeira leitura, realizada após a desmoldagem do CP, foi considerada como medida inicial, de modo que a retração das amostras foi calculada subtraindo-se a leitura inicial do valor obtido com 7 dias de cura (temperatura de 23°C e umidade relativa igual a 50%). O extensômetro empregado nas leituras apresentava os resultados em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), os quais foram posteriormente calculados em porcentagem.

A partir da AS 1141.53 (Standards Australia, 1996), foram determinados os valores de ascensão capilar e de absorção de CP com 12 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Após 7 dias de cura úmida, os CP foram secos em estufa com temperatura entre 50 e 60°C, até constância de massa. Então, foi verificada a massa dos mesmos, e em seguida, esses foram dispostos em recipiente com lâmina d'água de 1 cm. Após 24 horas de exposição à água (Figura 3e), foi aferida a massa de cada CP, assim como sua altura e a ascensão por capilaridade. As VR foram então calculadas com base nas normas, de modo que os resultados foram expressos em porcentagem.



**Figura 3:** Fotos dos ensaios de RCS (a), RCD (b), MR (c), retração (d), ascensão capilar e absorção (e) e erodibilidade (f)

A erodibilidade foi determinada conforme a TM-T186 (Roads and Maritime Services, 2012). Depois de moldados os CP com 15,24 cm de diâmetro e 11,43 cm de altura, realizou-se a cura acelerada, em estufa a 60°C, por 7 dias. Finalizada a cura, os CP foram colocados em recipientes com lâmina d'água de 2,5 cm por uma hora. Após, cada CP foi disposto em recipiente cilíndrico contendo 200 ml de água, sendo posicionadas sobrecargas com 6,75 kg. O conjunto (CP mais sobrecargas) foi colocado em mesa vibratória, que permanecia ligada por 15 minutos (Figura 3f). O material desprendido do CP foi lavado e peneirado em peneira com abertura de 2,36 mm. Esse material foi seco em estufa a 110°C, sendo, então, aferida sua massa. A erodibilidade foi determinada pela relação entre a massa de material desprendido e o período de vibração (15 minutos), de modo que os resultados foram expressos em g/min.

### 2.3. Análise dos resultados

Primeiramente, foi realizada a análise estatística para cada variável de resposta. No *Minitab*, são apresentados os resultados individuais para cada termo (fator controlável), bem como para os termos quadráticos e a interação entre eles. Deve-se atentar principalmente ao “valor-p” a fim de obter apenas termos significativos no modelo. Esse reflete a significância do termo para o modelo, sendo que quando ele for igual ou inferior a 0,05, o termo é considerado significativo. De modo que os termos com “valor-p” superior a 0,05 não apresentam significância e por isso foram retirados dos modelos.

Pelo *software* também é possível verificar as observações não usuais, que correspondem aos resultados experimentais que não se adaptaram corretamente no modelo gerado. Dessa forma, o *Minitab* sugere um valor que mais se aproxima do modelo e que pode ser substituído, caso desejar. Na análise de resultados, aparecem apenas as observações com resíduo padrão maior do que 2. De modo que é possível retirar do modelo, substituir pelo valor sugerido ou realizar um novo ensaio. Recomenda-se adotar alguma dessas medidas quando o resíduo padrão for superior a 3. Considerando isso, não foi necessário alterar nenhum dado nesse trabalho, sendo que todos os valores analisados representam resultados obtidos experimentalmente.

Depois de excluir os termos não significativos, é possível obter uma equação que representa a influência de cada termo significativo na variável de resposta. Tal equação (ou modelo) pode ser expressa em unidades codificadas e não codificadas, conforme níveis da Tabela 3. As unidades codificadas permitem a comparação entre os coeficientes (escala comum), o que possibilita determinar qual fator exerce maior influência na resposta. Já o modelo gerado em unidades não codificadas é bastante usual para aplicações práticas, pois é possível determinar resultados aproximados para diferentes níveis dos FC, desde que estejam dentro do intervalo estudado. Ressalta-se que um experimento deixa de ser ortogonal quando é analisado em unidades não codificadas.

Além de compreender a significância de cada termo do modelo, deve-se verificar se esse é realmente significativo e pode ser empregado para estimar outras misturas. Tal interpretação pode ser realizada a partir do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que representa o quão bem os dados se ajustam ao modelo. Esse pode ser expresso em porcentagem, de modo que 100% indica que todas as observações estão sobre o hiperplano definido pelo modelo, e 0% demonstra que não existe relação entre a variável de resposta e as variáveis independentes.

Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes de determinação, os termos considerados em cada modelo, assim como o coeficiente (importância no modelo) e o “valor-p” obtidos para cada termo.

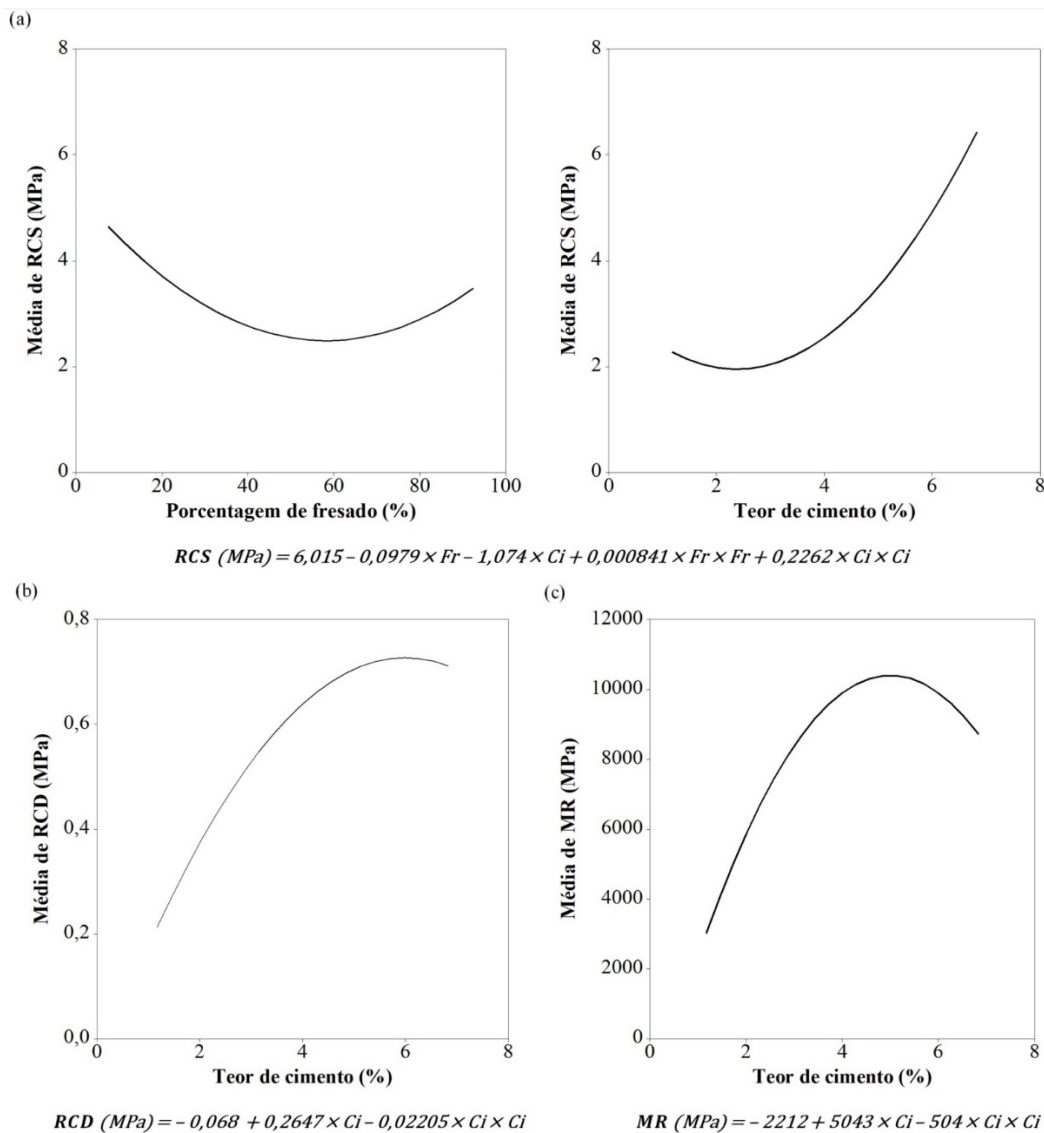


**Tabela 4:** Parâmetros dos modelos de regressão em unidades codificadas

Ensaio	R <sup>2</sup>	Termo	Coefficiente	Valor-p
RCS	95,71%	Constante	2,547	0,000
		Fr (%)	-0,585	0,012
		Ci (%)	2,082	0,000
		Fr (%)*Fr (%)	1,515	0,000
		Ci (%)*Ci (%)	1,810	0,000
RCD	76,82%	Constante	0,6384	0,000
		Ci (%)	0,2498	0,000
		Ci (%)*Ci (%)	-0,1764	0,018
MR	58,72%	Constante	9894	0,000
		Ci (%)	2855	0,016
		Ci (%)*Ci (%)	-4034	0,019
Retração	92,22%	Constante	0,20202	0,000
		Fr (%)	-0,03930	0,001
		Fr (%)*Fr (%)	-0,10260	0,000
		Ci (%)*Ci (%)	-0,05110	0,001
Ascensão capilar	75,94%	Constante	64,93	0,000
		Fr (%)	-23,88	0,003
		Ci (%)	-28,15	0,001
Absorção	69,06%	Constante	2,219	0,000
		Fr (%)	-1,417	0,008
		Ci (%)	-1,657	0,003
Erodibilidade	90,66%	Constante	0,4695	0,000
		Fr (%)	-0,4253	0,000
		Ci (%)	-0,2746	0,001
		Fr (%)*Ci (%)	0,4370	0,003

Com base nos termos significativos apresentados na Tabela 4, é possível verificar a relação entre o FC e a VR. Essa pode ser linear (quando o termo principal é significativo apenas individualmente) ou pode formar uma parábola (termo elevado ao quadrado é significativo). Quando a interação entre dois fatores é significativa, não se deve analisar os efeitos individualmente, como é o caso da VR erodibilidade. Observa-se ainda que o teor de cimento influenciou significativamente todas as VR e que a porcentagem de fresado não foi significativa apenas para a RCD e o MR.

Analisando-se os coeficientes, o sinal indica se a influência do termo sobre a VR é crescente ou decrescente. Considerando seus valores absolutos é possível comparar qual termo exerce maior influência em determinada VR. Tais constatações também podem ser observadas em gráficos de efeitos principais, que representam a resposta média para cada nível de fator ligado por uma linha. Dessa maneira, são apresentados na Figura 4 os gráficos correspondentes aos ensaios de comportamento mecânico, assim como os modelos estatísticos em unidades não codificadas que os representam.



**Figura 4:** Gráficos de efeitos principais e modelos obtidos para RCS (a), RCD (b) e MR (c)

Com base na Tabela 4 e na Figura 4, é possível observar que o teor de cimento exerce influência nas três VR, de maneira individual e quadrática. Observa-se que a elevação do teor de cimento tende a elevar os resultados de RCS, RCD e MR, havendo pontos específicos em que a mistura não se comportou de tal maneira, em função do termo quadrático. Porém, a elevação do teor de cimento nessas VR representa, na maior parte, uma melhora no comportamento mecânico. Tais ganhos de resistência e rigidez são explicados pelo aumento de produtos cimentícios gerados pelo acréscimo de cimento, levando a uma maior quantidade de pontos de ligação entre os grãos.

Já a porcentagem de fresado demonstrou ser menos significativa na resistência e rigidez das misturas, uma vez que ela não pareceu influenciar a RCD e a MR, e apresentou menor efeito do que o teor de cimento na RCS. Com base nos resultados de RCS, observa-se que existe uma tendência de redução na resistência, embora pequena, com o aumento da porcentagem de fresado, comportamento já verificado por outros autores (Kolias, 1996; Grilli *et al.*, 2013; Isola *et al.*, 2013; Fedrigo *et al.*, 2017b). Nesse trabalho, tal efeito pode estar ligado à redução de finos na mistura, o que aumenta os vazios entre os grãos, tornando a estrutura menos resistente.

Na Figura 5 são apresentados os gráficos de efeitos principais e os modelos estatísticos representativos dos ensaios de comportamento volumétrico.

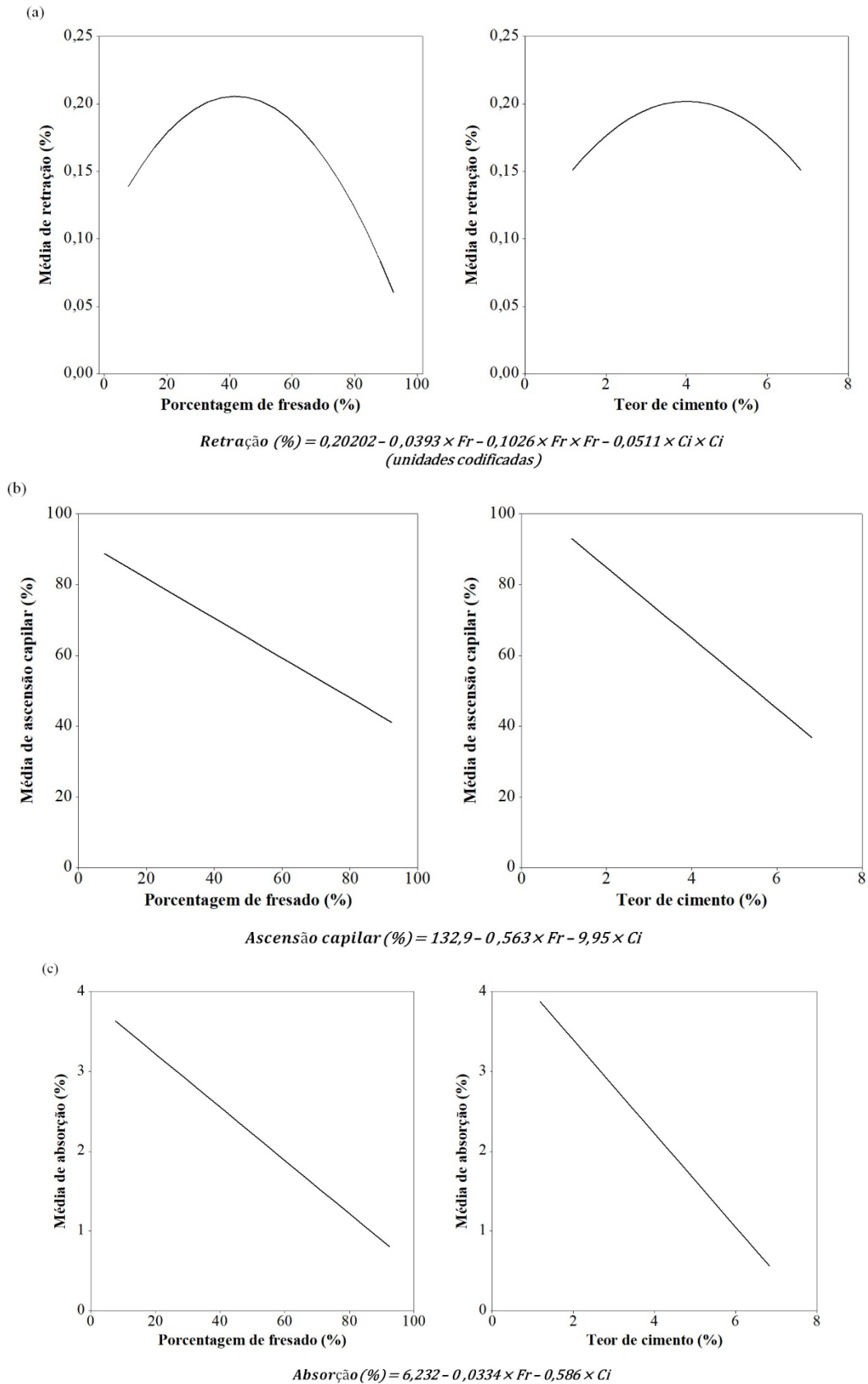


Figura 5: Gráficos de efeitos principais e modelos obtidos para retração (a), ascensão capilar (b) e absorção (c)

A porcentagem de fresado apresentou o maior efeito na retração das misturas estudadas, sendo que sua elevação tende a reduzir a retração. Isso se deve à grande diferença de granulometria dos materiais empregados, já que materiais finos tendem a retrair mais, conforme relatado por Chakrabarti e Kodikara (2005) em estudo sobre diferentes materiais cimentados para pavimentação. Ressalta-se que o trecho inicial do gráfico, de elevação da retração com a incorporação de material fresado, pode estar relacionado com a presença da fração 3/8" de BGS nessas misturas. Já o teor de cimento foi significativo apenas de maneira quadrática, ocasionando pouca variação nos valores de retração. Como o termo linear "Ci" não foi significativo, o modelo passa a ser não hierárquico, sendo possível obtê-lo apenas em unidades codificadas, conforme apresentado na Figura 5.

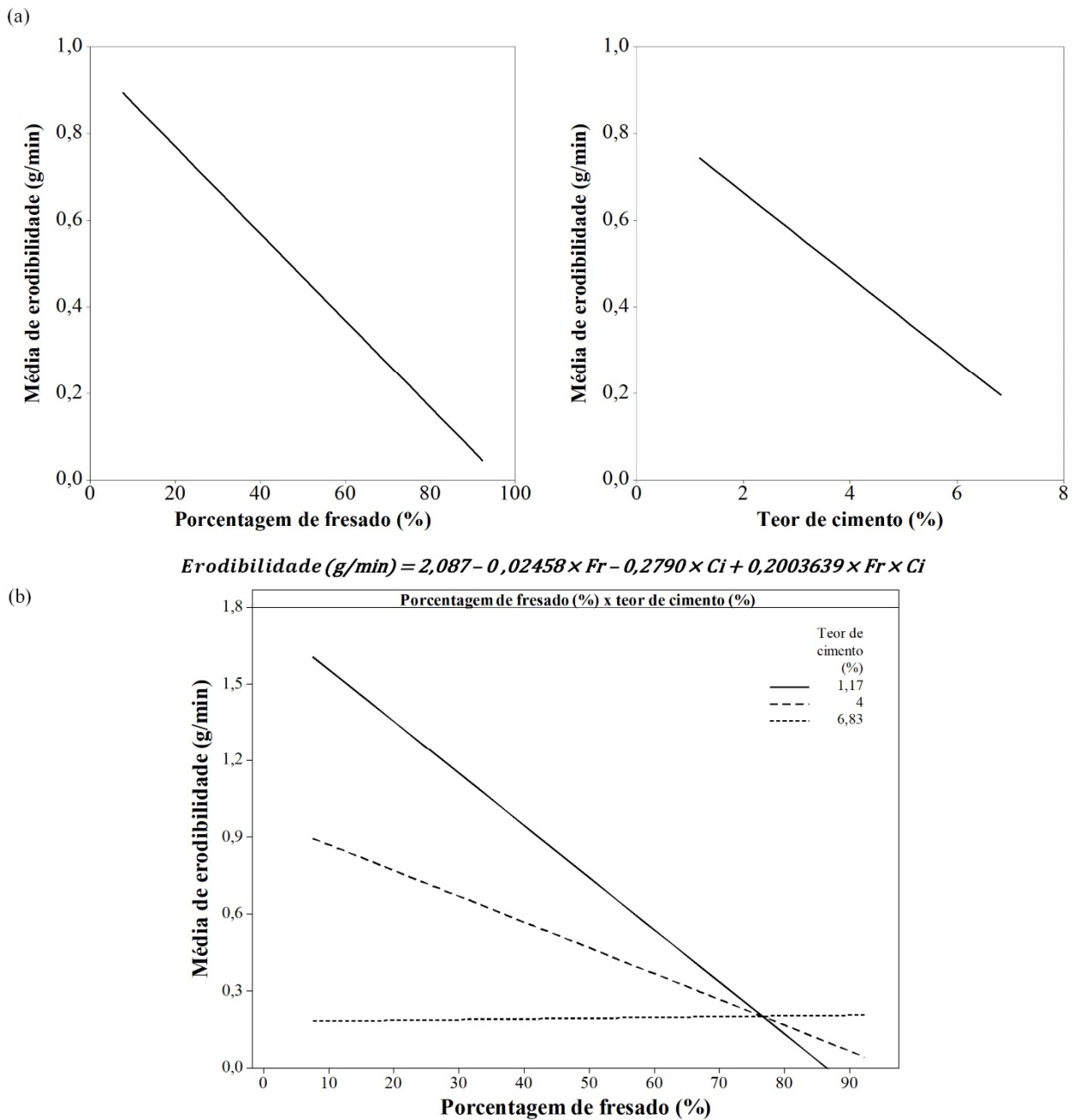


Figura 6: Gráficos de efeitos principais (a) e de interação (b), e modelo obtido para erodibilidade

Com relação aos resultados de ascensão capilar e absorção, o acréscimo de material fresado e de cimento provocou uma redução nessas propriedades. As partículas de solo-cimento são bastante porosas, o que eleva sua capacidade de absorver água e explica as reduções de absorção e ascensão capilar com o acréscimo de fresado. Já a adição de cimento diminui a porosidade das misturas e justifica as reduções de absorção e ascensão capilar com o acréscimo de cimento.

Na Figura 6 são apresentados os gráficos de efeitos principais (a) e de interação (b), bem como o modelo estatístico obtido a partir dos resultados do ensaio de erodibilidade.

A partir da Figura 6, observa-se que aumentos na porcentagem de fresado e no teor de cimento reduzem a erodibilidade das misturas, sendo que quanto menor o teor de cimento, maior a redução provocada pelo acréscimo de material fresado. Como se trata de uma medida direta da erosão de finos (grãos < 2,36 mm), o cimento, quando aplicado em maior quantidade, provoca a aglomeração das partículas, reduzindo a erodibilidade. Sendo o fresado um material mais grosseiro que o SC, seu acréscimo representa uma redução nos finos na mistura, o que, por consequência, reduz a erosão de finos.

## 2.4. Otimização do processo

Para finalizar o projeto de experimentos, deve-se realizar a otimização do processo, que representa a obtenção de uma mistura ótima, considerando as diferentes VR. Para tal, deve-se definir e indicar a importância relativa, o tipo de alvo (maior, menor ou nominal), assim como suas especificações ou tolerâncias (valores alvos; LIE – limite inferior de especificação; e LSE – limite superior de especificação) para cada VR analisada.

A IR para cada VR foi definida em 2.1, de modo que os mesmos valores foram empregados também na presente etapa. Os limites de especificação foram definidos conforme referências normativas ou dados existentes na literatura e são explicados na sequência. Quanto ao alvo, esse variou conforme o objetivo, sendo a média do LIE e do LSE para VR do tipo nominal; menor valor experimental para opção de minimizar (menor); e maior valor experimental quando o objetivo consistia em maximizar a VR (maior).

A norma DEINFRA-SC ES-P-09/16 (DEINFRA-SC, 2016), mais recente acerca da reciclagem de pavimentos no Brasil, indica resistências mínimas de 2,1 MPa para RCS e 0,25 MPa para RCD aos 7 dias. Com relação ao MR, foi considerado o intervalo sugerido por Balbo (2007) para bases cimentadas (5000-15000 MPa).

Para os ensaios de variação volumétrica, a Austroads (2002) recomenda uma retração máxima de 200  $\mu\text{m}$ , que corresponde a 0,08%, para CP com dimensões idênticas aos utilizados nesse estudo e curados por 7 dias. Quanto à ascensão capilar, a Austroads (2002) indica um valor máximo de 25% para CP expostos à lâmina d'água de 1 cm por 24 horas. O limite para absorção foi adotado como 2% com base em considerações da *Highways Agency* (2006), que aconselha tal valor como limite de absorção para mistura de agregados utilizados na fabricação de concreto para pavimentos.

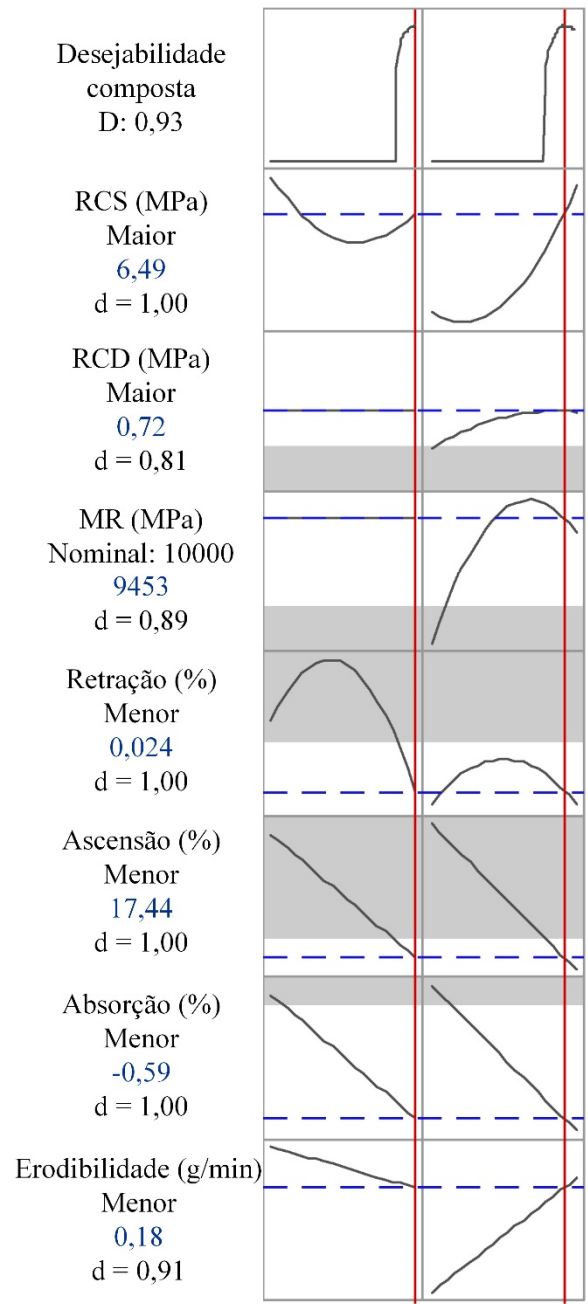
Quanto à erodibilidade, a Austroads (2002) indica que, para reduzir o máximo possível os problemas de erosão, deve-se objetivar um material que apresente erosão nula. Como é difícil de obter tal condição, optou-se por limitar a erodibilidade em 1 g/min, com base nos resultados experimentais.

Dessa forma, foi realizada a otimização multivariada a partir dos modelos obtidos e das definições apresentadas na Tabela 5. O resultado obtido encontra-se na Figura 7, sendo que os comentários na sequência facilitam seu entendimento.

**Tabela 5:** Descrição das variáveis de resposta para otimização

VR	Tipo	Alvo (unidade)	Limites de especificação		IR
			Inferior	Superior	
Y <sub>1</sub> RCS	Maior	6,49 (MPa)	2,1	-	10
Y <sub>2</sub> RCD	Maior	0,83 (MPa)	0,25	-	10
Y <sub>3</sub> MR	Nominal	10000 (MPa)	5000	15000	3
Y <sub>4</sub> Retração	Menor	0,07 (%)	-	0,08	5
Y <sub>5</sub> Ascensão capilar	Menor	18,79 (%)	-	25,00	5
Y <sub>6</sub> Absorção	Menor	0,60 (%)	-	2,00	3
Y <sub>7</sub> Erodibilidade	Menor	0,10 (g/min)	-	1,00	3

		Fr (%)	Ci (%)
Ótima	Alto	92,43	6,83
D: 0,93	<b>Obtido</b>	<b>92,43</b>	<b>6,37</b>
	Baixo	7,57	1,17



**Figura 7:** Otimização multivariada das propriedades de dosagem

Na Figura 7, as colunas representam os FC e as linhas correspondem às VR, de forma que a primeira indica a desejabilidade da otimização. As desejabilidades individual (d) e composta (D) classificam a satisfação de determinada combinação de FC em função das metas definidas para as VR. Sua faixa varia de 0 a 1, de modo que 1 representa o caso ideal e 0 indica que a resposta está fora do limite aceitável. Dessa forma, “d” corresponde a uma resposta única e “D” é a combinação de um conjunto de respostas. As regiões cinzas dos gráficos representam áreas com desejabilidade nula.

Ainda sobre a Figura 7, as linhas verticais vermelhas representam as definições atuais, sendo que os valores ótimos são apresentados, também em vermelho, na parte superior da figura. As linhas tracejadas horizontais indicam os valores de resposta atuais, os quais são representados pela resposta prevista (y) à esquerda dos gráficos de cada VR.

Dessa forma, verificou-se que com o emprego de 92,43% de fresado e de 6,37% de cimento é possível atender a todas as VR, obtendo uma desejabilidade composta de 0,93. Embora os parâmetros encontrados não sejam usuais do ponto de vista prático, o procedimento adotado demonstrou facilitar a dosagem de misturas de reciclagem de pavimentos com adição de cimento. É importante destacar que a ferramenta possibilita testar níveis distintos de FC, calculando-se instantaneamente a desejabilidade para tais condições. Dessa forma, a última etapa (otimização) de um projeto de experimentos pode ser facilmente adaptada para as condições e normas locais.

### 3. CONCLUSÕES

Foi verificado que a metodologia de projeto de experimentos permitiu a realização da dosagem de misturas de reciclagem de pavimentos com adição de cimento, proporcionando uma ampla visão dos aspectos relacionados com a aplicação da técnica. Foram constatadas diversas vantagens a partir do emprego das ferramentas utilizadas nesse trabalho, as quais contribuíram para uma melhor compreensão do processo e das variáveis que o afetam.

Na etapa de planejamento, foi possível desenvolver uma matriz experimental abrangente, isto é, com amplo intervalo de investigação, mas com uma quantidade reduzida de experimentos. Os fatores controláveis definidos nessa etapa foram a porcentagem de fresado e o teor de cimento, sendo avaliadas suas influências em sete variáveis de resposta (resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, retração, ascensão capilar, absorção e erodibilidade).

Foi realizada a aleatorização da ordem dos experimentos, de modo a reduzir a possibilidade de erros quanto à sequência de moldagem e execução dos ensaios. Dessa forma, todos os resultados obtidos experimentalmente foram utilizados na etapa de análise dos resultados. A ferramenta empregada simplificou a verificação dos termos significativos e então geração de modelos estatísticos. Também foi possível compreender o efeito dos fatores controláveis para cada variável de resposta.

Por se tratar de uma grande quantidade de variáveis de resposta, é difícil encontrar um ajuste ótimo que se enquadre nos intervalos de valores desejados para cada uma delas. Dessa forma, a última etapa de um projeto de experimentos pode ser considerada a mais importante, principalmente por se tratar da dosagem de uma mistura. Pela otimização multivariada foi possível definir níveis para os fatores controláveis, nos quais ocorreria uma melhor adaptação aos intervalos desejados. Para o presente trabalho, foi possível encontrar uma mistura que atendesse às

especificações consideradas, obtendo um ajuste ótimo com 6,37% de cimento e 92,43% de fresado. Mesmo não sendo usual a aplicação da técnica com o emprego de teores de cimento ou porcentagens de fresado tão elevadas, as ferramentas adotadas demonstraram ser eficientes para a proposta de dosagem.

Ressalta-se que todas as etapas da metodologia de projeto de experimentos podem ser facilmente adaptadas conforme particularidades da obra, normas locais e opções do projetista. Dessa forma, a partir desse estudo, demonstra-se a possibilidade de aplicação de projeto de experimentos na dosagem de misturas de reciclagem de pavimentos com cimento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos bolsistas, técnicos, funcionários, pesquisadores e professores dos laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) envolvidos na pesquisa: Laboratório de Pavimentação (LAPAV), Laboratório de Estruturas e Modelos Estruturais (LEME) e Laboratório de Geotecnologia (LAGEOTEC). Estendem-se os agradecimentos aos parceiros na pesquisa: Tecnopav, Wirtgen, Grupo EcoRodovias, Grupo CCR, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Os agradecimentos são estendidos ao CNPq e à CAPES pelas bolsas fornecidas.

## REFERÊNCIAS

- ABNT (1991) *Cimento Portland composto: NBR 11578*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Antony, J (1998). Some key things industrial engineers should know about experiments design. *Logistics Information Management*, v. 11, n. 6, p. 386-392. DOI: 10.1108/09576059810242606.
- Association Mondiale de la Route (2003) *Recyclage des chaussées (guides): AIPCR 78.02.BFR*. Paris.
- Austroroads (2002) *Mix design for stabilised pavement materials: Austroroads Publication AP-T16*. Sydney.
- Balbo, J. T. (2007) *Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Bessa, I. S.; A. L. Aranha; K. L. Vasconcelos; A. H. M. Silva e L. L. B. Bernucci (2016) Laboratory and field evaluation of recycled unbound layers with cement for use in asphalt pavement rehabilitation. *Materials and Structures*, Vol. 49 (7), 2669-2680. DOI: 10.1617/s11527-015-0675-6.
- Button, S. T. (2012) *Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados*. Apostila da disciplina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas.
- Castañeda López, M. A.; W. Fedrigo; T. R. Kleinert; M. F. Matuella; W. P. Núñez e J. A. P. Ceratti (2018) Flexural fatigue evaluation of cement-treated mixtures of reclaimed asphalt pavement and crushed aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol. 158, 320-325. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.003.
- Chakrabarti, S. e J. Kodikara (2005) Shrinkage behaviour of crushed basaltic rock and residual clay mixture stabilized with cementitious binders. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 6, 27-37. DOI: 10.1080/10298430500068654.
- Chomicz-Kowalska, A. e K. Maciejewski (2015) Multivariate optimization of recycled road base cold mixtures with foamed bitumen. *Procedia Engineering*, Vol. 108, 436-444. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.168.
- Dalla Rosa, F; F. S. Jorge; L. A. T. Brito e J. A. P. Ceratti (2015) Análise do comportamento mecânico de um pavimento reciclado com adição de diferentes agentes estabilizadores. *Transportes*, Vol. 23 (2), 95-104. DOI: 10.14295/transportes.v23i2.880.
- DEINFRA-SC (2016) *DEINFRA-SC-ES-P09/16 Pavimentação: Reciclagem profunda de pavimentos*. Departamento de Infraestrutura do Estado de Santa Catarina, Florianópolis.
- DNIT (1998) *ME 091: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010a) *ME 136: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010b) *ME 135: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2013a) *ME 164: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2013b) *ES 167: Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Fedrigo, W.; T. R. Kleinert; M. A. Castañeda López; W. P. Núñez; J. A. P. Ceratti; E. C. Souza; G. S. Gonçalves; A. M. Magalhães; P. R. Machado Filho; D. G. V. Melo e B. J. F. Gonçalves (2016) Efeito de diferentes tipos de base e de fresado na resistência de misturas de reciclagem profunda de pavimentos com adição de cimento. *Revista Estradas*, nº 21, 37-42.
- Fedrigo, W.; T. R. Kleinert; G. G. Schreinert; M. A. Castañeda López; W. P. Núñez e J. A. P. Ceratti (2017a) Procedimento para dosagem de misturas de reciclagem profunda de pavimentos asfálticos com adição de cimento Portland. *Revista Pavimentação*, nº 46, 4-19.



- Fedriago, W.; W. P. Núñez; T. R. Kleinert; M. A. Castañeda López e J. A. P. Ceratti (2018) A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests. *Construction and Building Materials*, Vol. 171, 161-169. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.119.
- Fedriago, W.; W. P. Núñez; T. R. Kleinert; M. F. Matuella e J. A. P. Ceratti (2017b) Strength, shrinkage, erodibility and capillary flow characteristics of cement-treated recycled pavement materials. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 10 (5), 393-402. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.06.001.
- Grilli, A; E. Bocci e A. Graziani (2013) Influence of reclaimed asphalt content on the mechanical behaviour of cement-treated mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 14 (3), 666-678. DOI: 10.1080/14680629.2013.794367.
- Guthrie, W. S.; A. V. Brown e D. L. Eggett (2007) Cement stabilization of aggregate base material blended with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2026, 47-53. DOI: 10.3141/2026-06.
- Highways Agency (2006) *Manual of Contract Documents for Highway Works – Volume 1 Specification for highway Works: Series 1000 – Road pavements – Concrete materials*. London.
- Isola, M.; G. Betti; A. Marradi e G. Tebaldi (2013) Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, Vol. 48, 238-247. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.042.
- Kolias, S. (1996) Mechanical properties of cement-treated mixtures of milled bituminous concrete and crushed aggregates. *Materials and Structures*, Vol. 29, 411-417. DOI: 10.1007/BF02485991.
- Montgomery, D. C. (2001) *Design and analysis of experiments* (5<sup>a</sup> ed.). John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Paiva, C. E. L.; P. C. A. Oliveira e V. Bonfim (2013) As perspectivas de reabilitação de pavimentos no estado de São Paulo – Brasil: Enquadramento e técnicas usuais. *Construção Magazine*, Vol. 53, 34-38.
- Ribeiro, J. L. D. e C. S. Caten (2014) *Projeto de experimentos*. Série Monográfica Qualidade – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre.
- Roads and Maritime Services (2012) *TM-T186: Erodibility of stabilised road construction materials: Test Method*. Roads and Maritime Services, New South Wales.
- Santos, R. O. G.; L. R. Rezende; V. M. Silva; L. C. S. Costa e J. H. G. Hómez (2017) Monitoramento do desempenho da técnica de reciclagem profunda em pavimentos do estado de Goiás. *Transportes*, Vol. 25 (4), 27-41. DOI: 10.14295/transportes.v25i4.1244.
- Standards Australia (1992) *AS 1012.13-1992: Determination of the drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory*. Standards Australia, Strathfield, New South Wales.
- Standards Australia (1996) *AS 1141.53-1996: Absorption, swell and capillary rise of compacted materials*. Standards Australia, Strathfield, New South Wales.
- Trichês, G.; J. V. S. Melo; L. F. Franken; L. S. S. Vieira e M. F. Neves (2013) Caracterização do comportamento mecânico de misturas recicladas com adição de cimento. In: 42<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação – *Anais...* Gramado.
- Wirtgen (2012) *Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen*. Windhagen.
- Yuan, D.; S. Nazarian; L. R. Hoyos e A. J. Puppala (2011) Evaluation and mix design of cement-treated base materials with high content of reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2212, 110-119. DOI: 10.3141/2212-12.