

# **Projeto RDT (CCR MSVia / UFMS / ANTT): "Estudo do comportamento mecânico de solos estabilizados quimicamente no Estado de Mato Grosso do Sul"**

## **Avaliação do planejamento estatístico de misturas usadas na estabilização química de solos no Estado de Mato Grosso do Sul**

**David Alex Arancibia Suárez (LATRAN/UFMS), alex.arancibia@ufms.br**  
**Raphael Ricardo de Jesus Portela (CCR/MSVia), raphael.portela@grupoccr.com.br**  
**Décio de Rezende Souza (CCR/MSVia), decio.souza@grupoccr.com.br**

### **RESUMO**

O objetivo deste trabalho é a implementação do planejamento experimental de misturas usadas para a dosagem de solos coletados na BR-163 no Estado de Mato Grosso do Sul, no intuito de simplificar o método de dosagem e modelar o comportamento mecânico destes mediante a estabilização química dos mesmos. Neste sentido, é usada como ferramenta de análise estatística a metodologia de experimentos com misturas do Cornell, variando as porcentagens de água, cimento e solo com a finalidade de avaliar o desempenho de cada um desses componentes a partir das dosagens geradas nesta pesquisa e usadas neste tipo de estabilização de solos. Com base nos experimentos realizados envolvendo os três componentes citados serão avaliadas as propriedades mecânicas das misturas, gerando modelos matemáticos que fornecem superfícies de resposta que facilitam a visualização dos efeitos que cada componente da mistura desempenha em diferentes características mecânicas. Um estudo de caso é empregado para aplicar este procedimento, neste sentido os parâmetros de controle deste caso de estudo, são a resistência à compressão simples (RCS - kPa), módulo de resiliência à tração por compressão diametral cíclico (MR – MPa e tempo de cura ( $\Delta T$  - dias).

Palavras chave: Planejamento experimental, dosagem de solos, compressão simples, módulo de resiliência.

### **1. INTRODUÇÃO**

A estabilização de solos seja ela física ou química é fundamental quando um solo não possui as características geotécnicas exigidas para suportar a obra projetada em relação à resistência requerida e é necessário corrigir ou substituir por outro, a partir da adição ou subtração de componentes, ou com a ação de agentes. A escolha da técnica empregada deve ter como base a finalidade da obra, as propriedades do solo e, principalmente, a economia sem perda de qualidade (GUIMARÃES, 1997).

Neste sentido, a estabilização química é empregada neste trabalho com o intuito de melhorar o comportamento mecânico do solo coletado para estudo, a partir do uso de combinações de experimentos com misturas (CORNELL, 2002) pelo uso da combinação de dois ou mais componentes – neste caso serão utilizados três componentes de diferentes proporções – sendo eles o solo, a água e o cimento.

O objetivo deste trabalho é avaliar o planejamento experimental de misturas usadas para a estabilização química de solos coletados na BR-163 no Estado de Mato Grosso do Sul. Uma análise estatística será usada baseada na metodologia de experimentos com misturas (CORNELL, 2002) a partir do delineamento do experimento, em que as variações das proporções de cada componente da mistura são interdependentes. Esta técnica de

experimentos com misturas tem caráter empírico por ser experimental e fundamentada na teoria estatística de misturas.

A relação de dependência entre os níveis das três variáveis explicativas, solo, água e cimento exigem uma técnica de delineamento em que isso seja considerado, por isso a técnica abordada de experimentos com misturas é utilizada por ser uma solução a respeito da variabilidade nas proporções de cada componente.

Pela fundamentação na análise estatística de experimentos com misturas (CORNELL, 2002) é possível avaliar o desempenho de todos os elementos gerados em estudo e através dos modelos matemáticos são proporcionadas superfícies de resposta. Com a realização dos gráficos de traço de resposta (cox graphic) é possível visualizar os efeitos que permitem a avaliação dos componentes separadamente e os de superfície de resposta permitem avaliar as interações entre os componentes para as diferentes características mecânicas, baseadas nos modelos de regressão ajustados.

Os parâmetros de controle deste caso de estudo, para aplicação do procedimento de análise citado anteriormente são a resistência à compressão simples (RCS - kPa), módulo de resiliência à tração por compressão diametral cíclico (MR - MPa), e tempo de cura ( $\Delta T$  - dias).

## **2. PROCEDIMENTO DE DOSAGEM**

A realização da dosagem é feita a partir da teoria de experimentos com misturas (CORNELL, 2002). As dosagens obtidas e a análise de resultados são feitas através do programa Minitab versão 17, sendo este um artifício voltado para fins estatísticos. O procedimento consiste em 6 etapas:

1 – É definida a região experimental (Figura1) pela limitação de cada componente. O solo entre 80% e 91%, a água entre 9% e 14% e o cimento entre 0 e 6%.

Os valores de restrições utilizados de solo é uma composição entre as quantidades de água e cimento máximas para o limite inferior de solo e quantidades de água e cimento mínimas para o limite superior. A restrição quanto a água foi obtida por meio do ensaio realizado em laboratório fundamentada na NBR 7182/1986 – Solo – Ensaio de Compactação, na energia modificada. As restrições do cimento são da NBR 12253/1992 – Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento e também devido a questão econômica.

2 – Já com as restrições dos três componentes escolhidos solo, água e cimento, o grau do modelo ajustado é definido como de terceiro grau e fornecerá o número de misturas a serem realizadas com uma réplica para cada determinação, pois as réplicas colaboram com a qualidade de ajuste do modelo.

3 – Após definido o número de misturas, para este caso são 13 dosagens com uma réplica para cada uma delas totalizando 26 misturas para cada ensaio, elas estão localizadas na região experimental (Figura 1) por treze pontos sendo eles nos vértices, no ponto médio dos lados e no centro.

4 – Para o preparo das misturas é necessário separar, preparar as amostras e moldar os corpos-de-prova para realizar os ensaios de resistência à compressão simples (RCS e determinação do módulo de resiliência à tração por compressão diametral cíclico (MR).

5 – É feito o ajuste do modelo através da distribuição normal dos resíduos e análise dos valores do Fator de Inflação de Variância (FIV) ou Variance Inflation Factor (VIF) descritos como altos os valores maiores que 5 a 10 (MONTGOMERY E PECK, 1992) levando a multicolinearidade, que não é desejada pois pode aumentar a variância dos coeficientes de regressão tornando-os instáveis e difíceis de interpretar. Assim, são classificados  $VIF=1$  como

não correlacionados,  $1 < VIF < 5$  moderadamente correlacionados e  $5 \leq VIF \leq 10$  altamente correlacionados. É analisado também o  $R^2$  ou coeficiente de determinação que indica em porcentagem de 0 a 100% a capacidade de o modelo explicar os valores observados, e quanto maior o valor do  $R^2$  significa que o modelo é mais explicativo e que ele se ajusta melhor à amostra.

6 – São gerados os gráficos de traço de resposta (cox graphic) e os gráficos superfície de resposta. Segundo Pilati et al (2008), no primeiro gráfico o interessante é o fato de ser possível uma análise dos efeitos isoladamente para cada um dos componentes, através dessa ferramenta estatística são fornecidos os efeitos isolados da variação das proporções onde as amostras são as misturas que não podem variar uma proporção sem variar as demais. No segundo gráfico, são avaliadas as características de interação dos componentes da mistura representadas como curvas de nível na superfície.

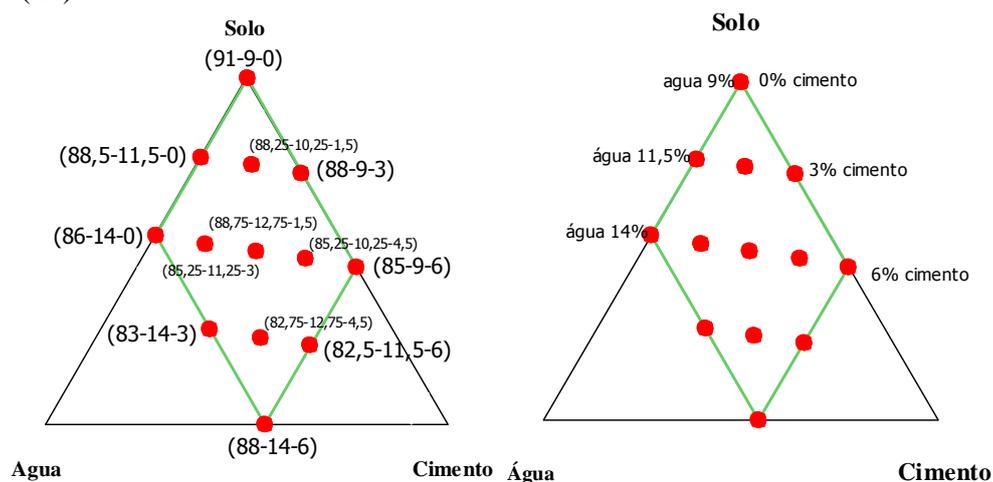
### 3. DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO

O experimento deste caso de estudo delineado pela metodologia estatística de experimentos com misturas (CORNELL, 2002) é composto por três componentes com variação de proporções para cada mistura. É adotado como  $x_1$  o solo,  $x_2$  a água e  $x_3$  o cimento. Os limites para cada um dos componentes ficou então em porcentagem:  $0,80 \leq x_1 \leq 0,91$ ;  $0,09 \leq x_2 \leq 0,14$  e  $0,00 \leq x_3 \leq 0,06$ . As condições também impostas são  $x_i \geq 0$ ,  $i=1,2, \dots, q$ , sendo  $q$  o número de componentes da mistura, neste caso  $q=3$  e  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ .

A Figura 1 ilustra o universo experimental em que nessa região simplex delimita-se a área de forma a englobar apenas as misturas possíveis através das restrições impostas anteriormente aos componentes.

Existe uma combinação do simplex composta por solo ( $x_1$ ), água ( $x_2$ ) e cimento ( $x_3$ ). São treze misturas para uma combinação, como o delineamento do experimento apresenta uma réplica para cada mistura o total é de vinte e seis misturas. Portanto como os corpos-de prova foram realizados em dois tempos de cura de sete e vinte e oito dias,  $26 \times 2 = 52$  misturas.

Por economia de espaço só foi apresentada a Figuras 1 para a combinação solo ( $x_1$ ), água ( $x_2$ ) e cimento ( $x_3$ ).



**Figura 1:** Simplex do experimento em que cada ponto representa uma mistura e os teores de cada componente são nesta ordem solo, água e cimento.

Para este experimento foi adotado o modelo polinomial canônico (CORNELL, 2002) de terceiro grau. A forma geral da função de regressão que pode ser montada com os dados

coletados nos pontos  $\{q, m\}$ , sendo  $q=3$  componentes e um modelo de polinômio de grau  $m=3$  na região simplex da estrutura, a equação é feita a partir de um polinômio de terceiro descrita como:

$$\eta = \sum_{i \leq j}^q \sum_{i \leq j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i \leq j \leq k}^q \sum_{i \leq j \leq k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{i \leq j \leq l}^q \sum_{i \leq j \leq l}^q \sum_{i \leq j \leq l}^q \beta_{ijkl} x_i x_j x_k x_l$$

Com  $i, j, k = 1, 2, \dots, q$ , sendo  $q$  o número de componentes da mistura e  $\beta_{ij}$ ,  $\beta_{ijk}$  e  $\beta_{ijkl}$  as estimativas dos coeficientes dos termos  $x_{ij}$ ,  $x_{ijk}$  e  $x_{ijkl}$  respectivamente e  $x_i$ ,  $x_j$  e  $x_k$ , correspondentes aos teores de solo, água e cimento.

#### 4. MATERIAIS UTILIZADOS

Os três componentes utilizados para constituir as misturas deste estudo foram o solo, a água e o cimento.

##### 4.1. Solo

Foram coletados 14 solos na BR-163 no Estado de Mato Grosso do Sul, após a coleta, os solos foram destorroados, peneirados e secos ao ar para depois serem homogeneizados e armazenados em sacos plásticos devidamente identificados.

##### 4.2. Caracterização e classificação

Os solos apresentam características diferentes segundo as classificações tradicionais, HRB (*Highway Research Board*) e USCS (*Unified Soil Classification System*), e segundo a metodologia MCT (*Miniatura, Compactado, Tropical*).

As catorze amostras foram submetidas a ensaios para a determinação das massas específicas dos grãos (DNER-ME 93-64) e curvas granulométricas (DNER-ME 51-94). Após as análises das duas curvas granulométricas, verificou-se que os solos apresentavam composições granulométricas diferentes.

Em seguida, foram obtidos os limites de consistência destes materiais, permitindo-se, classificá-los segundo as classificações HRB e USCS. Para determinação dos limites de consistência foram desenvolvidas as atividades descritas nas normas DNER-ME 122-94 e DNER-ME 82-94 relativas à determinação do limite de liquidez e plasticidade, respectivamente. Finalmente, foram realizados os ensaios preconizados na metodologia MCT por Nogami & Villibor (1995) e assim, obtidos as suas respectivas classificações segundo a metodologia em questão.

Os ensaios de Mini-MCV e perda de peso por imersão são os parâmetros básicos para determinação da classificação segundo a metodologia MCT. Estes ensaios foram executados de acordo com as normas: DNER-ME 256/94 “Solos Compactados com Equipamento Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão”; DNER-ME 254/94 “Solos Compactados em Equipamentos Miniatura-Mini-CBR e Expansão” e DNER-CLA 259/96 Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura”. A Tabela 1 apresenta os resultados da caracterização realizada na pesquisa dos catorze solos, além da classificação geotécnica por diferentes metodologias.

Tabela 1 – Classificações dos dezoito solos escolhidos.

N	Jazida	Limites de Atterberg		Classificações		
		LL (%)	IP (%)	HRB	USCS	MCT
1	Mimosa Acima LS	29	10	A-2-6	SC	LA'
2	Mimosa LS	24	7	A-2-4	GC	LA'

3	Mimosa abaixo LS	35	17	A-2-6	SC	NA'
4	Diretoria	31	16	A-2-4	SC	NA
5	Araras	36	17	A-2-6	SC	NA'
6	Araras FBS	25	8	A-2-4	SC	LA'
7	Araras Abaixo LS	35	16	A-2-6	SC	NA'
8	Toldo A	26	10	A-2-4	GC	NA
9	Toldo B	39	19	A-2-6	GC	NA'
10	Santa Sé	35	14	A-6	SC	NG'
11	Real Fazenda	36	18	A-2-6	SC	NA
12	Fernando	NP	NP	A-1-a	SW	NA
13	Gilmar	40	15	A-2-6	GC	NA
14	Smanioto	NP	NP	A-1-b	GP	NA

Os limites de contração (LC), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL) também foram realizados em laboratório segundo as NBR – 7183/1982 – Determinação do limite e relação de contração de solos, NBR – 7180/1984 – Limite de plasticidade, NBR – 6459/1984 – Limite de liquidez, respectivamente.

#### 4.2. Água

A água destilada foi usada nas proporções das misturas nos valores de 9% a 14%. Para maior precisão no monitoramento da umidade dos corpos-de-prova realizaram-se planilhas de controle de qualidade com o intuito de alcançar um melhor desempenho dos parâmetros de resposta do experimento e evitar dispersões das proporções definidas no planejamento experimental.

#### 4.3. Cimento

De acordo com Senço (1979), a base de solo-cimento é a mistura de solo, água e cimento nas proporções corretas e, ao ser uniformizada e compactada pode ser usada também como sub-base do pavimento. Depois da cura é possível realizar uma capa de rolamento que proporcionará boas condições de durabilidade e trafegabilidade. Os atrativos deste tipo de estabilização química é ser uma solução econômica e ser possível sua utilização em regiões precárias de jazidas de agregados.

O Cimento Portland utilizado nas proporções de 0 a 6%, é o CP II E-32 que possui uma composição intermediária entre o cimento Portland comum e o cimento Portland com adições (alto-forno e pozolânico). Este cimento combina bons resultados de baixo calor de hidratação devido a adição de escória granulada de alto-forno, com o aumento de resistência. Este cimento apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo.

### 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento feito em laboratório consiste em basicamente três fases: preparação dos componentes solo, água e cimento, moldagem dos corpos-de-prova nos tempos de cura de sete e vinte e oito dias e por fim, avaliar os parâmetros de controle da variação volumétrica ( $\Delta V$ ), dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e módulo de resiliência à tração por compressão diametral cíclico (MR).

#### 5.1. Preparação dos componentes

Nesta primeira fase, na preparação do solo coletado da jazida foi peneirado, destorroado e seco em estufa na temperatura de 60°C por um período máximo de doze horas para não

modificar o comportamento dos grãos do solo devido ao calor em excesso. Após tal procedimento, o solo foi passado no quarteador de amostras para a homogeneização do material e posteriormente obter a umidade do solo. Em segundo lugar, foi preparado o cimento e passado na peneira #10. Depois de prontos, as misturas de solo e água foram preparadas doze horas antes da moldagem.

### **5.2. Moldagem dos corpos-de-prova**

Na segunda fase, já com as misturas de solo e água, foram adicionadas quando necessárias as proporções de apenas cimento requeridas de acordo com cada dosagem. Em acordo com as quantidades de cada variável do delineamento do experimento foi feita a homogeneização dos componentes para a compactação na energia modificada segundo a ABNT 7182/1986 – Solo – Ensaio de Compactação.

### **5.3. Parâmetros de controle**

Na terceira fase, depois da moldagem dos corpos-de-prova, foram medidos os diâmetros e as alturas e calculada uma média para obter os volumes dos corpos-de-prova e analisar a variação volumétrica ( $\Delta V - \text{cm}^3$ ) entre o dia da moldagem até o dia da realização do ensaio. Os cinquenta e dois corpos-de prova para cada ensaio foram embalados em papel filme em função dos procedimentos adotados por Suárez et al (2008). Assim, aguardou-se os períodos de cura de sete e vinte e oito dias para a execução dos ensaios segundo as NBR 12270/1992 – Ensaio de compressão simples (RCS) por deformação controlada e DNIT 135/2010 – Determinação do módulo de resiliência (MR).

Os ensaios de RCS e MR foram realizados em laboratório. Com os dados das resistências em mãos, será analisado o comportamento das misturas quanto à deformação ( $\epsilon$ ), pois compreende uma característica essencial avaliar as respostas de desempenho das camadas estruturais de pavimentos.

## **6. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

A partir dos dados obtidos no procedimento experimental, esses foram analisados e realizados os ajustes para gerar os modelos polinomiais, porque segundo Cornell (2002), os experimentos com misturas são tipicamente modelados por polinômios.

Com base na análise de regressão é possível avaliar o coeficiente de determinação, também conhecido como  $R^2$  em que quanto maior o valor do  $R^2$  de 0 a 100%, mais variância é explicada pelo modelo de regressão e os pontos de dados ficarão mais próximos a linha de regressão ajustada.

Todos os modelos foram gerados usando as diretrizes da tese de Faxina (2006) pelo método de ajuste stepwise com nível de significância de 5%, porém, neste caso de estudo adotou-se o modelo cubico completo. De acordo com Myers e Montgomery (1995), para reduzir os valores maiores que 10 para o fator de inflação da variância (FIV) é sugerido transformar os componentes em pseudocomponentes. Esta foi a solução encontrada para contornar os problemas de multicolinearidade, devido aos valores do FIV serem maiores 10 que não são desejados, pois quando as variáveis são altamente correlacionadas levando a multicolinearidade, as inferências baseadas no modelo de regressão podem ser errôneas ou pouco confiáveis.

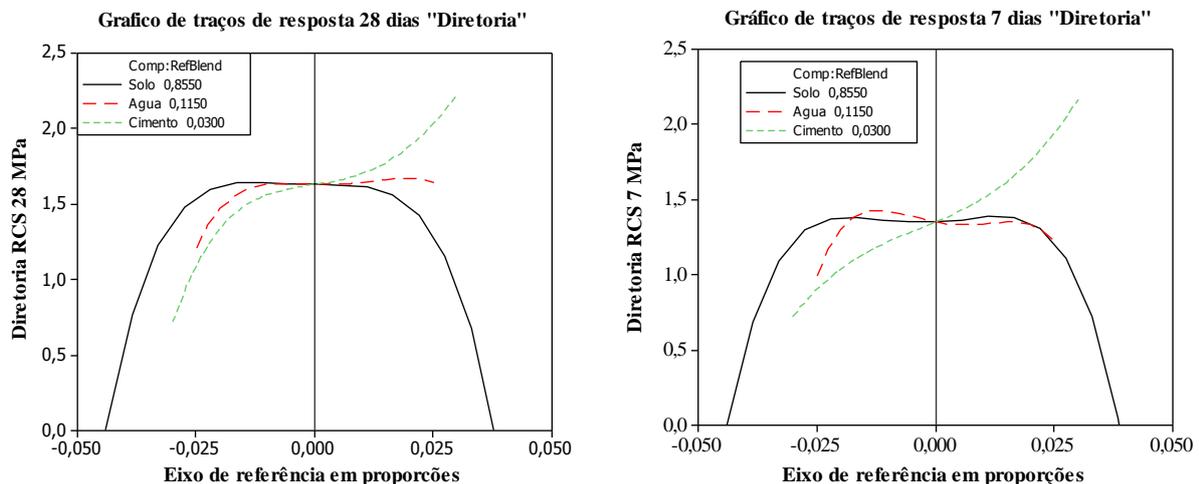
Em todos os modelos, foi necessária a extração dos pontos indicados como outlier ou valor atípico que prejudica a interpretação dos resultados da análise estatística referente às

amostras. Os outliers extraídos são aqueles que não possuem o resíduo padronizado dentro do intervalo de -2 a +2. Em algumas situações, mesmo com a retirada dos outliers, não foi possível a melhora dos ajustes dos modelos.

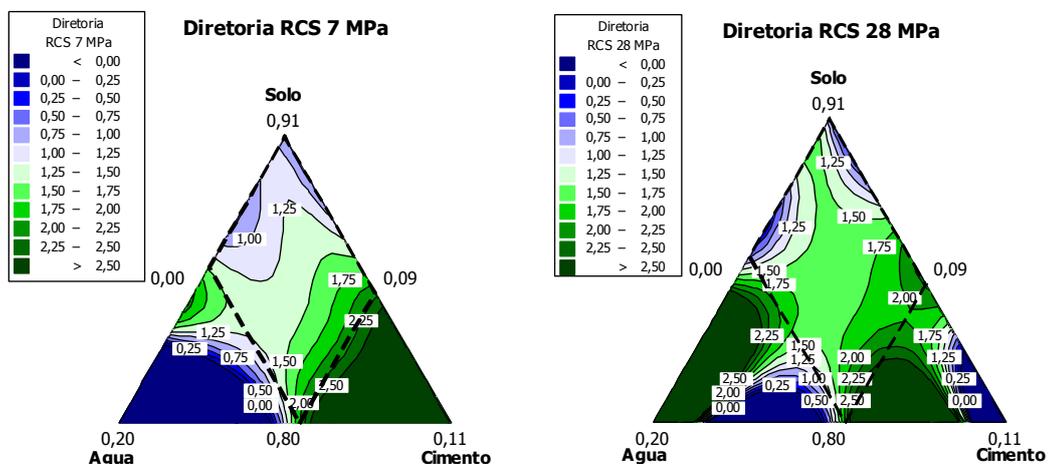
Na discussão dos resultados serão apresentados os gráficos de traço de resposta (cox graphic) gerados em estudo. No entanto, os de superfícies de resposta serão mostrados somente para uma jazida e para uma combinação x1-x2-x3 (solo-água-cimento) por economia de espaço.

### 6.1. Resistência à compressão simples (RCS - kPa)

Na Figura 2 a água possui comportamento parabólico com ponto de máximo em torno das misturas de referência correspondente ao zero no eixo horizontal. Em ambas, a água com o aumento de suas proporções do limite inferior ao médio atinge o ponto de máximo e a partir desse ponto até o limite máximo de água não contribui mais para a resistência (efeito pouco expressivo), o seu formato de parábola se assemelha as curvas de umidade do ensaio de Proctor. O cimento é o componente com efeito crescente na Figura 2 de comportamento linear em ambas as figuras e, na medida em que se aumenta o seu teor, a resistência aumenta. O aumento considerável da resistência em relação ao maior tempo de cura é visível ao comparar as Figuras 2 (7) e (28) dias.



**Figura 2:** Traços de resposta para a resistência à compressão simples nos tempos de cura de (a) sete dias e (b) vinte e oito dias.



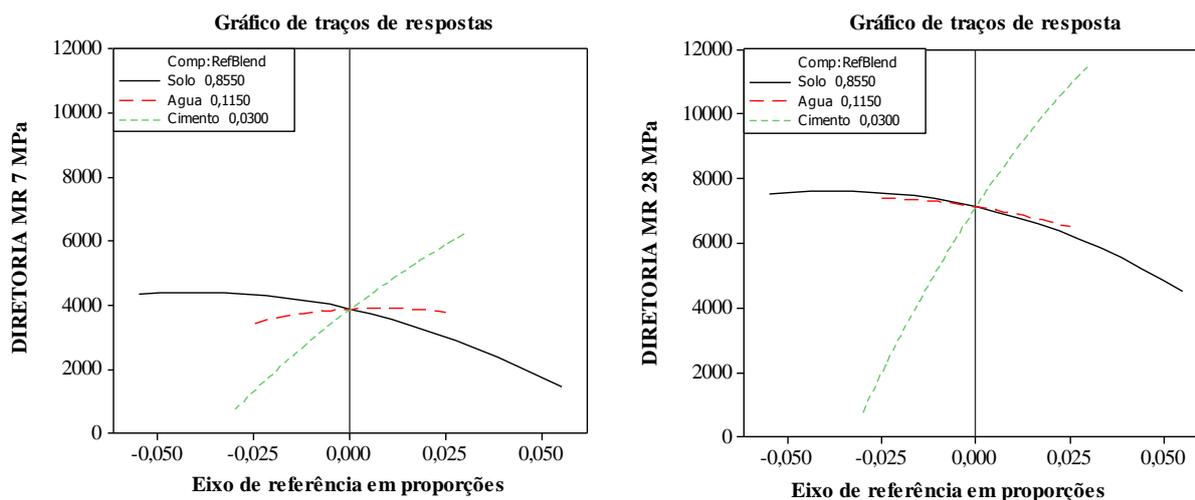
**Figura 3:** Superfícies de resposta para a resistência à compressão simples no tempo de cura de sete e vinte e oito.

Na Figura 3 as superfícies de resposta comparam os tempos de sete e vinte e oito dias de cura para a RCS, respectivamente para a combinação x1-x2-x3 (solo-água-cimento). Em ambas, é nítido que para baixas a médias concentrações de água e altas de cimento aumenta-se a resistência, existe a tendência de aumento de resistência para maiores teores de cimento nos gráficos.

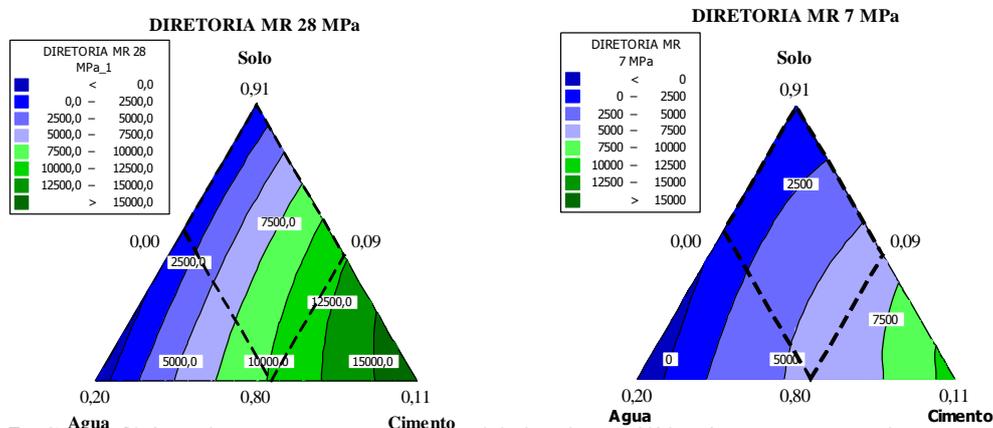
## 6.2. Módulo de resiliência (MR - MPa)

Na Figura 4 foram gerados os gráficos de traço de resposta para módulo de resiliência (MR) no tempo de cura de sete e vinte e oito dias. Na Figura 5, o efeito da água e do cimento são concorrentes e praticamente lineares em que com o aumento gradativo de suas proporções contribuem para o aumento da resistência sendo que a água possui um efeito menos intenso do que o cimento por apresentar maior coeficiente angular.

As superfícies de resposta para a combinação x1-x2-x3 (solo-água-cimento) da Figura 5, mostram que o aumento da MR é com proporções altas de água e baixas a intermediárias de cimento e teores de água baixos a intermediários e altos de cimento, a tendência de maiores resistências está mais para o canto inferior esquerdo. A melhor proporção para água neste parâmetro de controle é a máxima com altos valores de cimento.



**Figura 4:** Traço de resposta para a resistência à tração por compressão diametral no tempo de cura de (a) vinte e oito dias.



**Figura 5:** Superfícies de resposta para a módulo de resiliência no tempo de cura de vinte e oito dias para x1-x2-x3 (solo-água-cimento).

## 7. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi implementar o planejamento experimental de misturas aplicadas à estabilização de solos com cimento Portland. Um estudo de caso (Jazida Diretoria) foi empregado para verificar a aplicabilidade deste procedimento e assim, foram avaliados os parâmetros de controle de resistência à compressão simples (RCS) e módulo de resiliência à tração por compressão diametral cíclico (MR). Desse modo, foram obtidas as seguintes conclusões:

1 - Quanto as resistências RC e MR: a água para RCS tem efeito positivo na resistência até a média da proporção de água e efeito prejudicial a partir deste ponto e para o MR a água apresentou efeito praticamente inexpressivo. O cimento é em todos os casos apresentou-se eficiente para o incremento das resistências de acordo com seu aumento de proporções, sendo que se mostrou mais expressivo para o caso do MR.

Com base no planejamento experimental, em conjunto com a análise de misturas foi possível correlacionar as variáveis independentes solo, água e cimento com valores de  $R^2$  acima de 97%. Portanto, tornou-se válido o estudo de caso para a estabilização química do solo através da interpretação dos modelos matemáticos pelos comportamentos individual e em conjunto dos componentes que estão de acordo com o que a bibliografia indica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: solo –determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: solo –determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7183: determinação do limite e relação de contração dos solos. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 – agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12253: solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12270: ensaio de compressão simples. Rio de Janeiro, 1992.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 135: pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 138: pavimentos flexíveis – misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.
- CORNELL, J.A. Experiments with Mixtures: Design, Models, and the Analysis of Mixture Data. John Wiley & Sons, New York, 2002.
- GUIMARÃES, J.E.P. Cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil. PINI, São Paulo/SP, 1997.

- LITTLE, D.N. Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime. Published by Kendall/Hunt Publishing Company.1995.
- MONTGOMERY D. C.; E. A. PECK: Introduction to Linear Regression Analysis. John Wiley & Sons, New York, 1992. Experiments. John Wiley & Sons, New York, 1995.
- PILATI F.; FAXINA A. L.; FABBRI G. T. P.; GIGANTE A. C.; SÓRIA M. H. A.; LEITE L. F. M. Procedimento para formulação de asfaltos-borracha com vistas a atender os requisitos da dosagem Marshall. Revista Transportes, v.XVI. 2008.
- SENÇO, W. Pavimentação. São Paulo: Grêmio politécnico, 1979.
- SUÁREZ, D.A.A.; PARREIRA A.B.; JUNIOR J. L. F. Estudo de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com a adição de emulsão asfáltica. 39ª. Reunião Anual de Pavimentação, Recife, 2008.
- THOMPSON, M.R. Lime Reactivity of Illinois Soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. 1966.
- FAXINA A. L. Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha. EESC/USP, São Carlos, 2006.