

# **Resistência à compressão simples de um solo contaminado e cimentado**

## **Unconfined compressive strength of a cemented contaminated soil**

**José W. Jiménez Rojas, Karla Salvagni Heineck, Nilo Cesar Consoli**

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS*

*jose.rojas@ufrgs.br, karla@ppgec.ufrgs.br, consoli@ufrgs.br*

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo aplicar a técnica de encapsulamento, conhecida também como solidificação/estabilização, em um solo contaminado com crescentes quantidades do resíduo industrial borra oleosa ácida, utilizando como agente encapsulante o cimento Portland CP-V ARI. A aplicação da técnica de encapsulamento consistiu na realização de estudos pré e pós-tratamento, analisando fisicamente o solo contaminado através de ensaios de resistência à compressão simples. Análises de regressão múltipla permitiram uma leitura mais confiável dos resultados experimentais. Ao término da pesquisa concluiu-se que o solo deve ser encapsulado com 14% de cimento e deixado em cura por 28 dias para obter resistência de aceitação mínima de 2MPa.

**ABSTRACT:** The objective of this study is applying the encapsulation technique, also known as solidification/stabilization, in soil contaminated with increasing amounts of acidic oily sludge industrial residues, using Portland cement CP-V ARI as the encapsulating agent. The application of the technique of tunnel consisted of studies pre and post-treatment, physically examining the contaminated soil by tests for, unconfined compressive strength. Multiple regression analysis allowed a more reliable reading of the experimental results. At the end of the research concluded that the soil should be encapsulated with 14% of cement and left in cure for 28 days.

### **1. INTRODUÇÃO**

Os resíduos industriais, principalmente os gerados nas indústrias petroquímicas, constituem-se em um dos graves problemas sócio-ambientais do país, e são apontados com um dos desafios para áreas responsáveis pelas pesquisas em planejamento e operação do sistema de destino final de resíduos sólidos (PIRES [6]).

Em função deste panorama, crescem as iniciativas de programas de preservação e gerenciamento ambiental, como também estudos para o controle e remediação de áreas contaminadas, além de estudos tecnológicos capazes de minimizar o volume e a toxicidade dos resíduos industriais.

Segundo Rojas et al [8] entre os métodos de retenção ou imobilização de materiais contaminados pode-se citar o processo de solidificação/estabilização ou encapsulamento de contaminantes, este método é utilizado para transformar materiais sólidos ou líquidos

potencialmente poluentes em materiais sólidos menos poluentes ou não poluentes.

De acordo com Li et al [5] a técnica de encapsulamento é extensamente usada porque pode oferecer garantia de estabilização química de muitos contaminantes e produzir uma forma mecanicamente estável do resíduo.

Segundo a U.S. Army Corps of Engineers (USACE, [9]), após a aplicação da técnica de encapsulamento alguns ensaios tornam-se necessários para a análise da efetividade do método, os quais consistem em análises químicas e físicas do composto tratado. As análises químicas são realizadas com base em ensaios de lixiviação e extração química. Fisicamente, são realizadas análises de compactação, resistência à compressão simples, permeabilidade, durabilidade, entre outros.

Conforme LaGrega et al. [4], o uso dos ensaios de resistência à compressão simples para avaliar a eficácia da técnica de solidificação/estabilização é aplicado e difundido como padrão internacional. Relata o autor, que os

materiais encapsulados devem ter resistência suficiente para suportar elevadas cargas colocadas sobre eles.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento físico de um solo contaminado e encapsulado com cimento Portland através de ensaios de resistência à compressão simples.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Programa experimental

O programa experimental compreendeu ensaios de resistência à compressão simples (RCS). Foram adotados 10% e 20% de cimento (CPO) em relação ao peso dos sólidos na densidade máxima seca obtida pelas curvas de compactação Proctor normal realizadas para o solo o solo/cimento e o solo/cimento/borra oleosa ácida. Para cada teor de cimento foram adotadas crescentes combinações de borra oleosa ácida nas quantidades de 0%, 2%, 4% e 6% em relação ao peso do solo.

### 2.2 Materiais utilizados

O solo utilizado nesta pesquisa é proveniente da região metropolitana de Porto Alegre e está constituído predominantemente por fração siltosa, com 43% de sua composição total. Como agente cimentante para o encapsulamento do solo contaminado, adotou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI).

O contaminante utilizado nesta pesquisa é o resíduo borra oleosa ácida (BOA), oriundo de uma refinaria que realiza o re-processamento de óleos lubrificantes usados, utilizados em veículos automotores. O resíduo apresenta variabilidade quanto a sua composição devido às características da matéria prima utilizada e outros fatores inerentes ao processo de refino.

### 2.3 Preparação das amostras

A mistura foi realizada pela seguinte ordem: [(solo + cimento) + borra oleosa ácida] + água. A mistura procedeu-se manualmente em recipientes de aço inox e com auxílio de espátulas. Todos os materiais foram pesados com resolução de 0,01 gf.

As amostras foram compactadas em três camadas estáticas no interior de um molde

metálico tri-partido devidamente lubrificado, de 10,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro.

O controle da densidade foi realizado monitorando a altura e o peso de cada camada. Ao final desta etapa uma amostra de material foi retirada para o controle da umidade.

Concluído o processo de moldagem, o corpo-de-prova era imediatamente extraído do molde, seu peso e medidas devidamente anotados, com resolução de 0,01 gf e 0,1 mm, respectivamente, e acondicionado em um saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade.

### 2.4 Ensaios de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples seguiram os procedimentos das normas NBR 12770 [2] e NBR 12025 [1]. As amostras foram moldadas em triplicata para cada dosagem. Antes do rompimento, os corpos de prova foram imersos em água por um período de 4 horas. A prensa utilizada para a ruptura dos corpos de prova é da marca Wykeham Farrance, adaptada com anel dinamométrico de 50 KN, previamente calibrado. A velocidade de deformação utilizada é de 1,14mm/min.

### 2.5 Planejamento do experimento

O propósito da realização de um projeto de experimentos é aprofundar o conhecimento sobre o comportamento de um determinado processo, de forma a adquirir um maior domínio sobre o mesmo. Portanto, neste item, será dada ênfase à definição dos fatores controláveis, das características de qualidade, das variáveis de resposta a serem medidas nos ensaios de resistência a compressão simples e às informações relevantes que auxiliam a realização do estudo e compreensão dos resultados. A Tabela 1 apresenta as características consideradas importantes (faixas de variação) para a determinação da qualidade e de aceitação de moldagem e resultado final.

Quanto à resistência à compressão simples, Rojas [7] destaca que para resistências inferiores a 2MPa o solo apresenta maior facilidade de lixiviação, portanto este parâmetro foi considerado balizador para aceitação nos ensaios de resistência à compressão simples.

Tabela 1: Características de qualidade e parâmetros de aceitação.

| Características de qualidade dos Corpos-de-Prova (CP) | Parâmetros de aceitação |
|---|-------------------------|
| Altura dos CP após moldagem                           | 10,0±0,2 cm             |
| Diâmetro do CP após moldagem                          | 5,0±0,2 cm              |
| Peso do CP após moldagem (10% de CPO)                 | 403,75 g                |
| Peso do CP após moldagem (20% de CPO)                 | 404,98 g                |
| Resistência à compressão simples (RCS)                | > 2MPa                  |

Neste trabalho, as variáveis de resposta, aspectos do sistema que permitem identificar o desempenho, são oriundas dos ensaios de resistência à compressão simples. Sendo assim, a variável de resposta para o ensaio é a própria resistência à compressão simples, sendo sua unidade de medida o MPa.

Os fatores controláveis que merecem ter sua influência sobre as variáveis de resposta medida são dependentes do tipo de ensaio. Portanto, a fim de identificar os indicadores de desempenho das amostras de solo contaminado e encapsulado foram definidos os fatores de controle. A Figura 1 apresenta tais fatores e seus respectivos níveis.

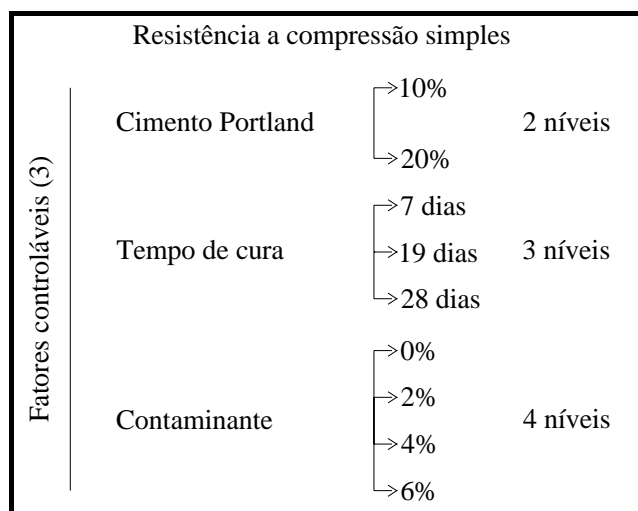


Figura 1: Fatores controláveis e níveis para os ensaios de RCS.

Os fatores mantidos constantes são o solo e os parâmetros de compactação (densidade e umidade).

### 3. RESULTADOS

Os dados apresentados na Tabela 2 correspondem aos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples aos 7, 19 e 28

dias de cura, com imersão em água dos corpos-de-prova quatro horas antes da ruptura.

Tabela 2: Resistência à compressão simples do solo/cimento/BOA.

|                          |    | Cimento Portland (B) |         |         |        |         |         |
|--------------------------|----|----------------------|---------|---------|--------|---------|---------|
|                          |    | 10%                  |         |         | 20%    |         |         |
|                          |    | Tempo de Cura (C)    |         |         |        |         |         |
|                          |    | 7 dias               | 19 dias | 28 dias | 7 dias | 19 dias | 28 dias |
| Teor de contaminante (A) | 0% | 2,57                 | 3,75    | 4,56    | 6,80   | 6,37    | 8,78    |
|                          |    | 3,51                 | 3,62    | 4,55    | 6,68   | 6,74    | 8,08    |
|                          |    | 3,87                 | 3,96    | 4,51    | 6,74   | 9,01    | 8,85    |
|                          | 2% | 3,24                 | 2,92    | 4,69    | 5,06   | 5,37    | 6,20    |
|                          |    | 3,34                 | 3,09    | 4,90    | 5,08   | 5,14    | 7,18    |
|                          |    | 3,28                 | 3,07    | 5,15    | 5,10   | 5,43    | 7,03    |
|                          | 4% | 1,72                 | 1,77    | 2,98    | 3,34   | 3,45    | 4,09    |
|                          |    | 1,61                 | 1,89    | 3,05    | 2,92   | 3,71    | 4,68    |
|                          |    | 1,81                 | 1,83    | 2,76    | 3,44   | 3,36    | 4,37    |
|                          | 6% | 1,16                 | 1,41    | 1,86    | 2,13   | 2,05    | 2,77    |
|                          |    | 1,16                 | 1,36    | 1,53    | 2,08   | 2,34    | 2,87    |
|                          |    | 0,94                 | 1,35    | 1,34    | 2,11   | 2,08    | 3,12    |

### 3.1 Experimento - Análise da Variância

A partir dos dados coletados através de ensaios de resistência à compressão simples foi possível estabelecer os valores totais e assim chegar aos dados iniciais para a elaboração da análise de variância ANOVA. Foram testados todos os fatores principais e todas as interações para um nível de significância de 95%. O resultado do experimento está descrito na Tabela 3.

Tabela 3: Análise de variância ANOVA para os ensaios de RCS.

| Fonte de variação | SQ     | GDL | MQ    | Teste F | Prob. | Sig. |
|-------------------|--------|-----|-------|---------|-------|------|
| A                 | 162,82 | 3   | 54,27 | 401,01  | 0,00% | Sim  |
| B                 | 77,04  | 1   | 77,04 | 569,21  | 0,00% | Sim  |
| C                 | 21,65  | 2   | 10,83 | 79,99   | 0,00% | Sim  |
| AB                | 17,64  | 3   | 5,88  | 43,44   | 0,00% | Sim  |
| AC                | 3,03   | 3   | 1,01  | 7,47    | 0,03% | Sim  |
| BC                | 0,17   | 2   | 0,09  | 0,64    | 53,3% | Não  |
| ABC               | 0,59   | 6   | 0,10  | 0,73    | 62,8% | Não  |
| Erro              | 6,90   | 51  | 0,14  |         |       |      |
| Total             | 289,86 | 71  |       |         |       |      |

Obs.: SQ: Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Quadrado Médio; Prob. – Probabilidade; Sig. – Significância.

Todos os fatores principais apresentaram-se como significativos inclusive as interações AB e

AC. As demais interações (BC e ABC) não apresentaram significância.

### 3.2 Superfícies de resposta

Através da Figura 2 é possível observar que o aumento de cimento e o aumento do tempo de cura elevam a resistência para solos não contaminados, chegando a valores próximos a 9MPa. Conforme a Figura 3, que está contaminada, visualiza-se a queda de resistência, sendo que esta queda é contínua, chegando a valores próximos a 1MPa.

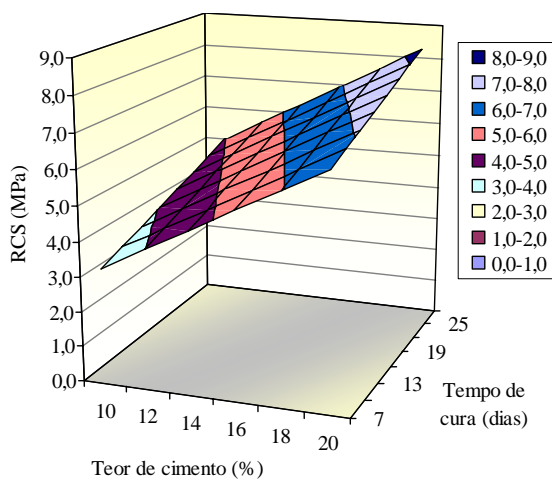


Figura 2: Superfície de resposta RCS x tempo de cura x teor de cimento (0% de contaminante).

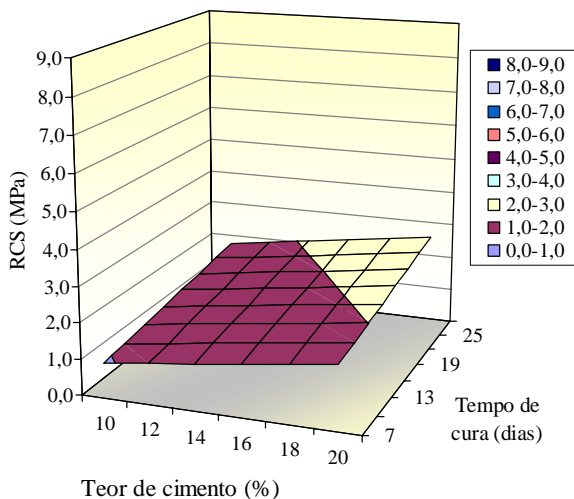


Figura 3: Superfície de resposta RCS x tempo de cura x teor de cimento (6% de contaminante).

As Figuras 2 e 3 acusam comportamento similar quando se trata de teor de cimento e tempo de cura, ou seja, quanto maior o teor de cimento e mais duradouro o tempo de cura mais elevada a resistência.

As Figuras 4 e 5 mostram graficamente a influência do contaminante e do tempo de cura na resistência à compressão simples quando o teor de cimento apresenta-se fixo.

É possível comparar os resultados da resistência com a adição de 10% e 20% de cimento, onde fica claro o aumento de resistência com o aumento de cimento e do tempo de cura, porém, neste último caso, com menor magnitude.

Para os dois casos apresentados, Figura 3 e 4, o aumento de contaminante gera perda de resistência, levando-os a valores inferiores a 2MPa.

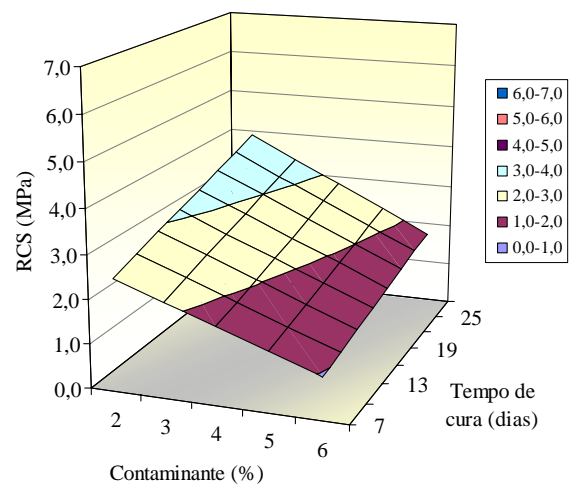


Figura 4: Superfície de resposta RCS x tempo de cura x quantidade de contaminante (10% de CPO).

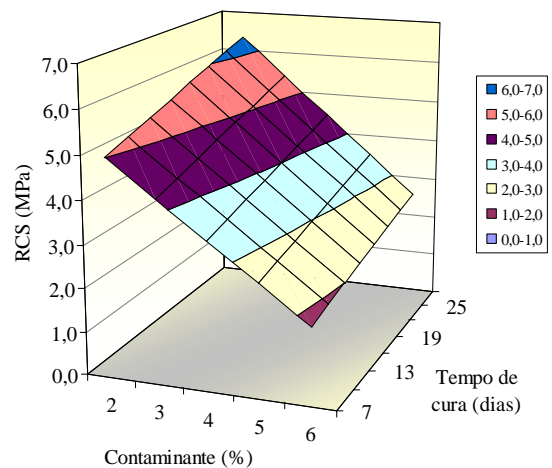


Figura 5: Superfície de resposta RCS x tempo de cura x quantidade de contaminante (20% de CPO).

As Figuras 6 e 7 apresenta a influência da quantidade de contaminante e do teor de cimento na resistência à compressão simples no fator tempo de cura de 7 e 28 dias, respectivamente. A análise

destas Figuras evidencia, além da boa representatividade do modelo, que o grau de influência do tempo de cura é relativamente pequeno se comparado aos demais fatores.

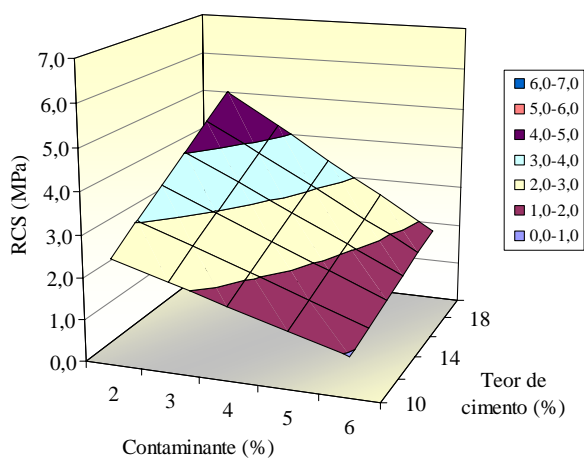


Figura 6: Superfície de resposta RCS x teor de cimento x quantidade de contaminante (7 dias).

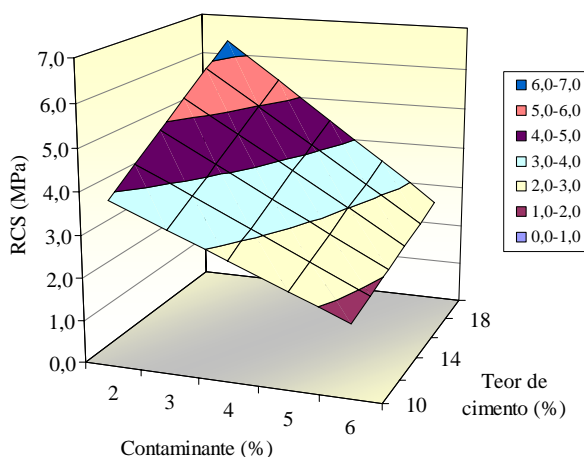


Figura 7: Superfície de resposta RCS x teor de cimento x quantidade de contaminante (28 dias).

A partir das considerações descritas anteriormente e das superfícies de respostas podemos estabelecer algumas hipóteses para as melhores condições de encapsulamento para o limite balizador de 2MPa.

A Tabela 4 apresenta as condições de aceitação e tais hipóteses quando o teor de contaminante das amostras encapsuladas estiver fixo em 6% de borra oleosa ácida.

Como pode ser visualizado na Tabela 4 o encapsulamento pode ser realizado de forma eficaz utilizando um teor de 14% de cimento para um tempo de cura de 28 dias, sendo considerada esta escolha como a mais econômica.

Tabela 4: Condições de encapsulamento para amostras com 6% de borra oleosa ácida.

| Contaminante (%) | Cimento (%) | Tempo de cura (dias) | Condição |
|------------------|-------------|----------------------|----------|
| 6                | 20          | 13                   | >2MPa    |
| 6                | 18          | 18                   | >2MPa    |
| 6                | 16          | 25                   | >2MPa    |
| 6                | 14          | 28                   | >2MPa    |

#### 4. CONCLUSÕES

O planejamento de experimentos realizado sobre a resistência à compressão simples de um solo contaminado e encapsulado permitiu constatar que:

- Todos os fatores constantes se mostram significativos. O teor de cimento e o tempo de cura demonstraram ter impacto positivo sobre a resistência à compressão simples. O acréscimo de contaminante demonstrou impacto negativo.
- Segundo a regressão múltipla para se obter a melhor condição de encapsulamento, ou seja, prender a quantidade máxima de contaminante e obter a melhor condição física acima do nível estipulado, o solo deve ser encapsulado com 14% de cimento e deixado em cura por 28 dias.
- Conclui-se que o contaminante é o causador da principal influência nos resultados de resistência à compressão simples, que o teor de cimento aumenta a resistência do solo contaminado e que o tempo de cura acarreta em um breve aumento de resistência.

#### REFERÊNCIAS

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo cimento. *Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos*. – ABNT 1986 - NBR 12025.
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo coesivo. *Determinação da resistência à compressão não confinada*. ABNT 1992 - NBR 12770.
3. Knop, A. *Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGE/UFGRS, Porto Alegre, 2003.
4. Lagrega, M.D.; Buckingham P.L.; Evans, J.C. *Hazardous waste management and environmental resources management*. 2nd Edition, 1157 p. 2001.

5. Li, X.D.; Poon, C.S.; Sun, H.; Lo, I.M.C; Kirk, D.W. Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials. *Journal of Hazardous Materials*. v. A82. p. 215-230, 2001.
6. Pires, J.C.A. et al. *Projeto experimental de tratamento de chorumes produzido no aterro metropolitano de gramacho através de wetland*. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinvile, 2003.
7. Rojas, J.W.J. *Estudo de Remediação de Solo Contaminado por Borra Oleosa Ácida Utilizando a Técnica de Encapsulamento*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2007.
8. Rojas, J.W.J; Heineck, K.S; Consoli, N.C. Análises do Comportamento físico de um Solo Contaminado por Borra Oleosa Ácida e Encapsulado com Cimento Portland. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.13, N°2, p. 227-225, 2008.
9. U.S Army Corps of Engineers (USACE). *Tractability Studies for Solidification Stabilization of Contaminated Material*. *Technical Letter N° 1110-1-158*. Washington, 1995.