



Resistência e Condutividade Hidráulica de um Solo Encapsulado

José W. J. Rojas¹, Karla S. Heineck², Nilo C. Consoli³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (jose.rojas@ufrgs.br)

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul (karla@ppgec.ufrgs.br)

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul (consoli@ufrgs.br)

Resumo

A técnica de encapsulamento tem sido alvo de estudo de diversos pesquisadores do Brasil e de outros países, entres estes, o Laboratório de Resíduos, Novos Materiais e Geotecnia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ENVIRONGEO – UFRGS). Este trabalho tem como objetivo investigar a resistência à compressão simples e a condutividade hidráulica de um solo contaminado por borra oleosa ácida e encapsulado com cimento Portland de alta resistência inicial. Foram moldados corpos de prova com quantidades de 0%, 10% e 20% de cimento sobre o peso do solo, sendo que para cada uma destas quantidades de cimento tomaram-se as quantidades de 0%, 2%, 4% e 6% de borra oleosa ácida. De acordo com os resultados, constatou-se que quanto maior a quantidade de cimento maior a resistência, quanto maior a quantidade de borra oleosa ácida menor a resistência a compressão simples. Por fim, foi registrado que para a mesma quantidade de borra oleosa ácida o aumento de cimento gera aumento de condutividade hidráulica e ganho de resistência à compressão simples.

Palavras Chave: Solos contaminados. Encapsulamento. Cimento Portland. Borra oleosa ácida.

Área Temática: Resíduos Sólidos.

1 Introdução

Uma das inúmeras formas de intervenção de áreas contaminadas por resíduos oleosos, metais pesados e hidrocarbonetos é o encapsulamento. Solidificação ou encapsulamento é a técnica que enclausura o rejeito em um sólido monolítico de alta integridade estrutural. O encapsulamento pode ser de finas partículas de rejeito ou até de grandes blocos de contaminantes. A solidificação não necessariamente envolve a interação química entre o rejeito e os agentes solidificantes, mas pode mecanicamente tornar o rejeito monolítico. (Cruz 2004).

De acordo com Passos (2001), o encapsulamento, também chamado de estabilização e solidificação, é um estágio de pré-tratamento pelo qual, os constituintes perigosos de um resíduo ou solo contaminado são transformados e mantidos em suas formas menos solúveis ou tóxicas.

Para Suthersan (1997), a baixos níveis, muitos compostos orgânicos podem ser estabilizados, mas alguns compostos podem interferir no processo de solidificação/estabilização. O autor explica que os contaminantes a base de óleos e graxas podem simplesmente cobrir os grãos de cimento, evitando a reação entre a água e o cimento. Alguns contaminantes orgânicos podem ser absorvidos pela superfície de cimento e retardar severamente a hidratação do mesmo. Outros contaminantes orgânicos são agentes floclantes, os quais destroem a dispersão dos grãos de cimento, o que é vital para a formação de uma estrutura cimentada.



Para a U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 1995) 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 dos compostos tratados. As análises químicas são realizadas com base em ensaios de lixiviação e extração química. Fisicamente são realizados ensaios de compactação, resistência à compressão simples, condutividade hidráulica, durabilidade, entre outros.

Assim, objetivou-se neste trabalho investigar a resistência à compressão simples e a condutividade hidráulica de um solo contaminado por crescentes quantidades do resíduo industrial borra oleosa ácida por meio da técnica de encapsulamento.

2 Metodologia utilizada

2.1 Materiais

O solo utilizado nesta pesquisa é oriundo da região metropolitana de Porto Alegre. Os resultados da análise granulométrica evidenciam a predominância da fração siltosa (43,0%). A areia apresenta 35% da composição total, seguida de 22% de argila. O solo possui limite de liquidez de 21%, limite de plasticidade de 17%, índice de plasticidade de 4% e massa específica real dos grãos de 2,72. Conforme classificação trilinear, que leva em consideração somente a granulometria, o solo é classificado como um silte argiloso.

Como agente cimentante para o encapsulamento do solo contaminado, adotou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). Embora contemplado pela ABNT com uma norma separada do cimento Portland comum, este é na verdade um tipo particular de cimento, o qual apresenta a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação.

Além da utilização da água destilada, foi utilizado como contaminante o resíduo industrial borra oleosa ácida, oriundo de uma refinaria que realiza o reprocessamento de óleos lubrificantes usados utilizados em veículos automotores, este resíduo apresenta variabilidade quanto a sua composição devido às características da matéria prima e outros fatores inerentes ao processo de refino.

2.2 Métodos e equipamentos

▪ Definição da dosagem e preparação das amostras

Segundo Ibáñez et al. (1997), a tecnologia de estabilização/solidificação consiste em misturar quantidades variadas de agentes cimentantes em um contaminante específico. A definição da dosagem dos materiais utilizados nas misturas está baseada em valores publicados na literatura (Valls et al. 2000, Asavapisit et al. 2001, Poon et al. 2001, Ylmas et al. 2003, Cruz 2004, Rojas et al. 2008).

Foram adotados 10% e 20% de cimento em relação ao peso dos sólidos na densidade máxima seca obtida pelas curvas de compactação Proctor normal realizados para o solo natural, solo/cimento e solo/cimento/borra oleosa ácida, apresentadas nos resultados. 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.

A mistura procedeu-se pela seguinte ordem: [(solo + cimento) + borra oleosa ácida] + água, sendo realizada 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.



Foram aceitos os corpos de prova com $10,0 \pm 0,2$ cm de altura e $5,0 \pm 0,2$ 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 foi 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. A cura dos corpos de prova foi de 7 dias.

▪ Ensaio de condutividade hidráulica

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados através de um permeâmetro de parede flexível capaz de receber contaminantes, tanto no interior do solo quanto como líquido percolante. Foram utilizadas tubulações de nylon e válvulas de aço inox. O permeâmetro de parede flexível segue as especificações da norma ASTM 5084 – D: *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall Permeameter*.

▪ Ensaio de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples seguiram os procedimentos das normas NBR 12770 (ABNT, 1992) e NBR 12025 (ABNT, 1990).

As amostras foram moldadas em triplicata para cada dosagem, sendo admitidos os valores de tensão de ruptura de $\pm 10\%$ da média. Se um dos valores se afastasse dessa faixa, determinava-se novamente a média dos dois restantes. 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 foi de 1,14mm/min.

3 Resultados

3.2 Resistência à compressão simples

A Figura 1 ilustra o comportamento da resistência à compressão simples para 0%, 10% e 20% de cimento com crescentes quantidades de borra oleosa ácida, presente no solo.

Para os corpos de prova não cimentados e contaminados com 2%, 4% e 6% de borra oleosa ácida verifica-se um ligeiro aumento de resistência à compressão simples, ou seja, quanto maior a quantidade de borra oleosa ácida maior a resistência.

Possivelmente, o ganho de resistência das amostras contaminadas está relacionado com as características físicas da borra oleosa ácida. A borra está trabalhando como um agente estabilizante, devido principalmente à sua viscosidade e similaridade a materiais betuminosos, conferindo coesão e resistência às misturas de solo e borra oleosa ácida.

Os resultados demonstram que quanto maior for a quantidade de borra oleosa ácida nos corpos de prova encapsulados, gradativamente menor é a resistência. Um dos motivos desta perda de resistência possivelmente é a coesão ou aglutinação adquirida com a borra oleosa ácida, a qual poderá criar uma película ao redor dos grãos do solo e do cimento, película que possivelmente encapsula uma parte do cimento adicionado na mistura, interferindo na obtenção de resistência das amostras encapsuladas.

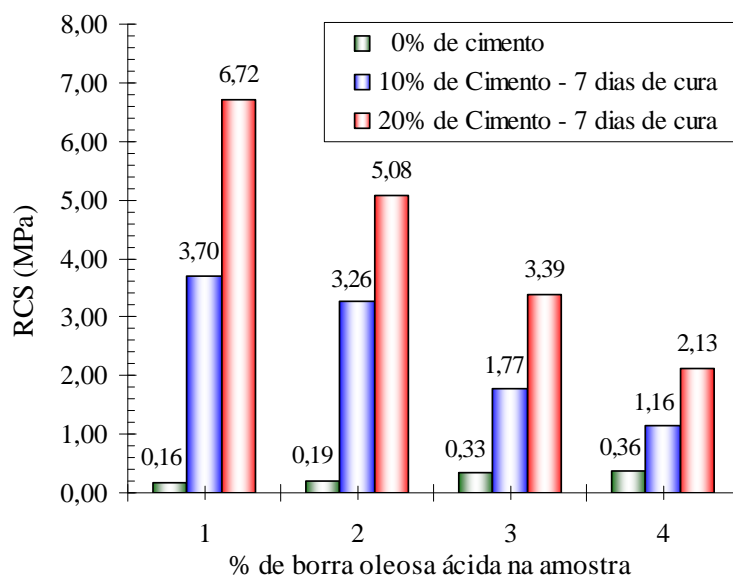


Figura 1 - Resistência à compressão simples aos 7 dias de cura.

3.3 Condutividade hidráulica

Os resultados dos ensaios de Condutividade Hidráulica são mostrados pela Figura 2 e Tabela 1. Através dos resultados verifica-se que para 0% de cimento a condutividade hidráulica diminui para crescentes quantidades de contaminante, o mesmo ocorre para amostras encapsuladas com 10% e 20% de cimento, porém para pequenas quantidades de borra oleosa ácida. Este comportamento é devido, possivelmente, à viscosidade da borra oleosa ácida, através do simples bloqueio dos poros das amostras, impedindo o fluxo de água.

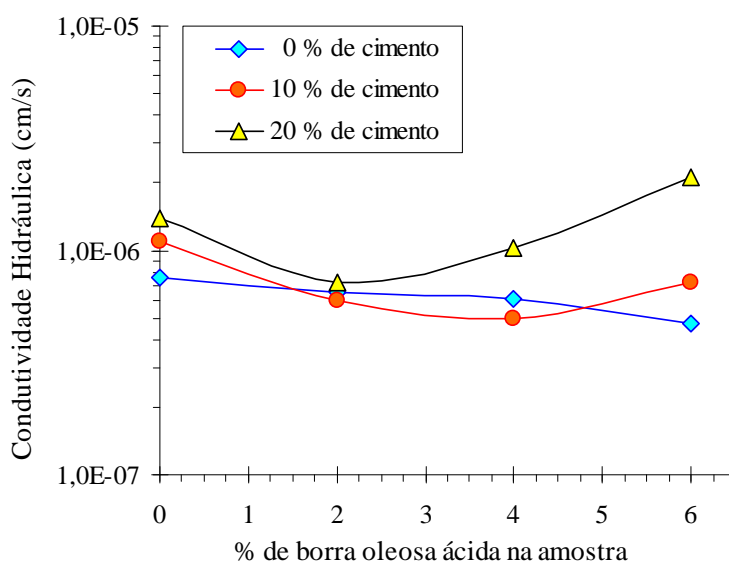


Figura 2 - Condutividade hidráulica de amostras contaminadas tratadas com cimento Portland.

Para os teores de 10% e 20% de cimento observou-se um padrão de comportamento onde inicialmente a condutividade hidráulica decresce e posteriormente volta a aumentar para crescentes quantidades de borra oleosa ácida. Em amostras com 4% de borra oleosa ácida e



encapsulada com 10% de cimento a condutividade hidráulica teve uma ligeira diminuição quando comparada à amostra cimentada e não contaminada, passando de $1,10 \times 10^{-6}$ cm/s para $4,98 \times 10^{-7}$ cm/s. Já para amostras com 6% de borra oleosa ácida a condutividade hidráulica voltou a aumentar.

Para amostras encapsuladas com 20% de cimento verificou-se uma queda inicial de condutividade hidráulica quando comparada à amostra não contaminada. Porém, com 4% e 6% de borra oleosa ácida a condutividade hidráulica voltou a aumentar, chegando a $2,12 \times 10^{-6}$ cm/s.

Tabela 1 - Resultado dos ensaios de condutividade hidráulica.

BOA (%)	0% de cimento	10% de cimento	20% de cimento
0	$7,58 \times 10^{-7}$ cm/s	$1,10 \times 10^{-6}$ cm/s	$1,40 \times 10^{-6}$ cm/s
2	$6,47 \times 10^{-7}$ cm/s	$5,96 \times 10^{-7}$ cm/s	$7,24 \times 10^{-7}$ cm/s
4	$6,11 \times 10^{-7}$ cm/s	$4,98 \times 10^{-7}$ cm/s	$1,03 \times 10^{-6}$ cm/s
6	$4,70 \times 10^{-7}$ cm/s	$7,18 \times 10^{-7}$ cm/s	$2,12 \times 10^{-6}$ cm/s

3.4 Resistência à compressão simples versus condutividade hidráulica

Os resultados obtidos para a resistência à compressão simples versus condutividade hidráulica são apresentados na Figura 3.

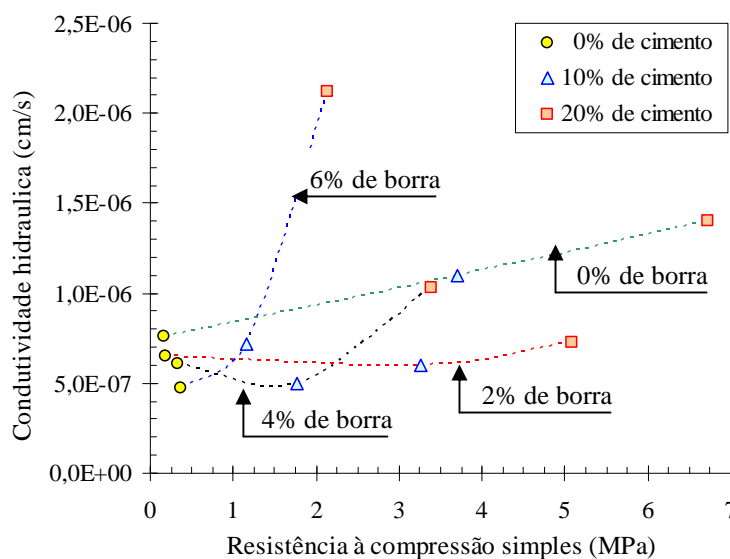


Figura 3 - Resistência à compressão simples versus condutividade hidráulica.

Analisando em função da mesma quantidade de borra oleosa ácida contida nos corpos de prova, porém para crescentes quantidades de cimento, observa-se que o aumento de cimento gera, como esperado, ganho de resistência e ao mesmo tempo uma condutividade hidráulica maior.

Este comportamento é registrado para todos os corpos de prova cimentados, porém, algumas amostras, com mesma quantidade de borra oleosa ácida, passam por uma ligeira queda de condutividade hidráulica quando passam do estágio não cimentado para cimentado e logo voltam a aumentar com o aumento de cimento. Em suma, a maior resistência à compressão simples de amostras com mesma quantidade de contaminante está para a maior



condutividade hidráulica e maior quantidade de cimento.

4 Conclusões

A partir dos resultados e das análises apresentadas anteriormente foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- A borra oleosa ácida quando adicionada em baixas quantidades exerce função de estabilizante, preenchendo os vazios do solo compactado. No entanto, o aumento do contaminante causa a diminuição na estabilidade, pois a borra passa a agir como lubrificante e encapsulante das partículas de solo e cimento. Esta mesma conclusão explica a perda de resistência à compressão simples e o aumento da perda de massa
- A relação entre a resistência à compressão simples versus condutividade hidráulica não apresentou comportamento padrão, mas foi registrado que para a mesma quantidade de borra oleosa ácida o aumento de cimento gera aumento de condutividade hidráulica e ganho de resistência à compressão simples.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter**: D 5084. Philadelphia, 1990.

ASAVAPISIT, S.; NANTHAMONTRY, W.; POLPRASERT, C. Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wastes. **Pergamon, Cement and Concrete Research**, v.31 p. 1147-1152, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo-cimento – Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos. **NBR 12025**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada: **NBR 12770**. Rio de Janeiro, 1992.

CRUZ, R. C., KNOP, A., HEINECK, K. S., CONSOLI, N. C., **Encapsulation of a Soil Contaminated by Hydrocarbons** – Symposium International Sur L'amélioration des Sols en Place International/ Symposium on Ground Improvement. ASEP-GI. Paris, França, 2004.

IBAÑÉZ, R.; ANDRÉS, A.; ORTIZ, I.; IRABIEN, J.A. Experimental study of the waste binder anhydrite in the solidification/stabilization process of heavy metal sludges. Elsevier, **Journal of Hazardous Materials**. Amsterdam, v. 57. p. 155-168. 1998.

PASSOS, J. A. L. & NEDER, L. T. C. **Encapsulamento: Uma Técnica Moderna de Processamento de Resíduos Sólidos Perigosos**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES – III-119, 2001.

POON, C.S.; CHEN, Z.Q; WAI, O.W.H. The effect of flow-through leaching on the diffusivity of heavy metals in stabilized/solidified wastes. Elsevier, **Journal of Hazardous Materials**. Amsterdam, v. B81. p. 179-192. 2001.



ROJAS, J. W. J.; RIGHETTO, G. L.; FONINI, A.; CONSOLI, N. C.; HEINECK, K. S. Ensaio de lixiviação em coluna em um solo contaminado e encapsulado. **In:** XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, III Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos. 2008, Búzios.

SUTHERSAN, SUTHAN. S. **Remediation Engineering: Design Concepts**. CRC Press Inc. Lewis Publishers. 362p. 1997.

U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Tractability Studies for Solidification/Stabilization of Contaminated Material. **Technical Letter N° 1110-1-158**. Washington, 1995.

VALLS, S.; VASQUEZ, E. Stabilization and Solidification of sewage sludges with Portland cement. **Pergamon, Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1671-1678, 2000.

YILMAZ, O; UNLU, K; COKCA, E. Solidification/Stabilization of Hazardous Wastes Containing Metals and Organic Contaminants. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 129, n. 4, p. 366–376, 2006.