

# ANÁLISES DO COMPORTAMENTO FÍSICO DE UM SOLO CONTAMINADO POR BORRA OLEOSA ÁCIDA E ENCAPSULADO COM CIMENTO PORTLAND

## ANALYSES OF PHYSICAL BEHAVIOR OF A SOIL CONTAMINATED BY ACIDIC OILY SLUDGE AND ENCAPSULATED WITH CEMENT PORTLAND

*JOSÉ WALDOMIRO JIMÉNEZ ROJAS*

Engenheiro Civil pela Universidade de Passo Fundo. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Geotecnia). Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Geotecnia)

*NILO CESAR CONSOLI*

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Mestre em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (Geotecnia). Doutor em Engenharia Civil pela Concordia University (Geotecnia Ambiental). Pós-doutor pela University of Western Austrália (Materiais Geotécnicos). Professor/Pesquisador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pesquisador categoria 1A do CNPq

*KARLA SALVAGNI HEINECK*

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Geotecnia) e Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Geotecnia). Professora/Pesquisadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pesquisador categoria 2 do CNPq

Recebido: 19/03/07 Aceito: 29/04/08

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo aplicar a técnica de encapsulamento 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 pós-tratamento, analisando fisicamente o solo contaminado através de ensaios de resistência à compressão simples e durabilidade. Os resultados apontam que quanto maior a quantidade de borra oleosa ácida presente no solo encapsulado, menor a resistência à compressão simples e maior a perda de massa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Encapsulamento, borra oleosa ácida, cimento Portland, solo contaminado.

### ABSTRACT

*The objective of this study is applying the encapsulation technique 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 encapsulation technique consisted in the accomplishment of post-treatment studies, analyzing the contaminated soil physically through unconfined compressive strength and durability tests. The results showed that an increasing amount of acidic oily sludge in the encapsulated soil ends up lowering the unconfined compressive strength as well as increasing the mass loss.*

**KEYWORDS:** Encapsulation, acidic oily sludge, Portland cement, contaminated soil.

### INTRODUÇÃO

Com a evolução e o desenvolvimento dos processos industriais no Brasil surgiram também grandes problemas de ordem ambiental, principalmente com a questão da disposição inadequada de resíduos industriais. Este fato ocasionou o surgimento de várias áreas contaminadas, resultando em degradações ambientais acentuadas, destacando a contaminação do solo e

das águas superficiais e subterrâneas.

Os resíduos industriais, principalmente os gerados nas indústrias petroquímicas, constituem-se em um dos graves problemas sócio-ambientais do país, e são apontados como um dos desafios para as áreas responsáveis pelas pesquisas em planejamento e operação do sistema de destino final de resíduos sólidos (Pires et al, 2003).

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.

Azambuja et al (2002) relatam que existem inúmeros processos de controle e remediação de solos contaminados, dentre estes processos a maioria das soluções passa pela remoção do solo contaminado, confinando o material

em aterros de resíduos sólidos ou disposto em *landfarmings*.

Entre os métodos de retenção ou imobilização de materiais contaminados pode-se citar o processo de encapsulamento de contaminantes, este método é utilizado para transformar materiais sólidos ou líquidos potencialmente poluentes em materiais sólidos menos poluentes ou não poluentes.

Oliveira et al (2003) destaca que a tecnologia de encapsulamento é considerada uma forma segura de tratamento para uma variedade de contaminantes, incluindo os resíduos oriundos do petróleo. O autor destaca que esta técnica é amplamente utilizada há mais de 30 anos em países como os Estados Unidos, Alemanha, França, Inglaterra e Japão.

No Brasil, tem-se constatado em diversas pesquisas que a técnica de encapsulamento tem sido explorada com o objetivo de desenvolver a tecnologia, facilitando o entendimento da mesma. Estudos realizados por Lange et al (1998) no final dos anos 90 chamavam a atenção para que a tecnologia de encapsulamento fosse melhorada e aplicada a diferentes fontes residuais.

Segundo Wiles (1987) a técnica de encapsulamento de contaminantes tem por objetivo produzir um estrado solidificado, diminuindo a área superficial e limitando a solubilidade e a transferência do contaminante quando exposto a um fluido lixiviante. O encapsulamento se dá por micro e macroencapsulamento, sendo que o primeiro é definido como um aglomerado de partículas já microencapsuladas, e o segundo como sendo o envolvimento das partículas unitárias do contaminante.

Segundo a *Federal Remediation Technologies Roundtable* (2006), a técnica de encapsulamento destaca como principal vantagem à transformação de um solo contaminado num novo material com elevada resistência, o que possibilita seu emprego em obras de engenharia como base e sub-base de pavimentos rodoviários. A técnica apresenta também outras vantagens, tais como: (i) aplicável a uma grande variedade de contaminantes, incluindo compostos orgânicos e metais pesados, sendo que os dois podem ser tratados em uma só etapa; (ii) baixo custo devido ao uso de uma grande variabilidade de agentes estabilizadores e relativamente baixo custo de aditivos e reagentes; (iii) aplicável a diferentes tipos de solo; (iv)

usa equipamentos facilmente disponíveis e simples; (v) altas taxas de sucesso se comparado com outras tecnologias.

Segundo a USACE (1995), os processos utilizados na técnica de encapsulamento podem ser *in-situ*, ou com retirada do material contaminado sendo o mesmo escavado e tratado em uma unidade de mistura (*ex-situ*). Segundo Rojas (2007) o processo *ex-situ* envolve os seguintes passos: (i) escavação do solo, (ii) mistura do reagente com o solo, (iii) cura do solo, (iv) aterro ou reaterro do solo tratado. Já o processo *in-situ* envolve a injeção e/ou a mistura de agentes estabilizantes no subsolo para imobilizar os contaminantes, precavendo sua lixiviação no lençol freático.

Os agentes freqüentemente empregados para o encapsulamento são o cimento Portland e a cal. Em termos físicos, o cimento apresenta uma resposta em um intervalo de tempo bem menor que o da cal, visto que a sua cura se dá em menos tempo. Quimicamente, ambos agem de forma a alcalinizar o ambiente, elevando o pH do composto, diminuindo a solubilidade dos contaminantes, uma vez que se sabe que a solubilidade dos mesmos é dependente do pH (Heineck et al, 2007). Fisicamente, ocorre a cimentação das partículas, causando uma diminuição da mobilidade do contaminante no interior do solo. Desta forma, a redução da mobilidade do contaminante pode ser acentuada pela alcalinização do ambiente e também pelo efeito da cimentação das partículas.

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 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.

De acordo com Li et al (2001), 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.

Conforme LaGrega et al (2001), o uso dos ensaios de resistência à com-

pressão simples para avaliar a eficácia da técnica de encapsulamento é aplicado e difundido como padrão internacional. Os Autores destacam que a resistência à compressão simples, medida em poucos dias, não pode confiantemente prever o comportamento a longo prazo de amostras encapsuladas, portanto que a resistência é dependente, e deve considerar a durabilidade do composto encapsulado.

Schwarz et al (2006) verificou a influência da adição de gasolina no comportamento de um solo arenoso cimentado e não cimentado através de ensaios de resistência à compressão simples. Concluiu que a resistência é dependente da água, relação do cimento, porcentagem de contaminante e duração do tempo de cura. O autor cita que a saturação do solo tem grande influência nos valores de resistência.

Para Suthersan (1997), a baixos níveis, muitos compostos orgânicos podem ser estabilizados, mas alguns compostos podem interferir no processo de encapsulamento. 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 flocculantes, os quais destroem a dispersão dos grãos de cimento, o que é vital para a formação de uma estrutura cimentada.

Para Klich et al (1999) a técnica de encapsulamento, utilizando materiais cimentícios, é vulnerável as mesmas degradações físicas e químicas presentes no concreto. A composição química e mineralógica, bem como o agente cimentante e o tipo de contaminante são fatores dos quais depende a durabilidade do método de encapsulamento.

Segundo Marcon (1977), os principais fatores que afetam a integridade estrutural de solos estabilizados são as condições ambientais (variações de temperatura e umidade) e as solicitações impostas, que debilitam o mesmo.

A durabilidade de misturas cimentadas é determinada, em laboratório, através da perda de peso e/ou resistência decorrente da aplicação de ciclos de molhagem e secagem ou congelamento e degelo (regiões de clima frio), com o objetivo de simular da melhor forma possível as condições de campo (Lovato, 2004).

Neste contexto este trabalho apresenta a aplicação da técnica de encapsulamento com cimento Portland em um solo contaminado pelo resíduo industrial borra oleosa ácida. O objetivo da pesquisa é analisar o comportamento físico do solo contaminado com crescentes quantidades de borra oleosa ácida e encapsulado com cimento Portland através de ensaios de resistência a compressão simples e durabilidade.

## METODOLOGIA

### Programa experimental

O programa experimental compreendeu ensaios de resistência à compressão simples e durabilidade. Foram adotados 10% e 20% de cimento em relação ao peso dos sólidos na densidade máxima seca obtida pelas curvas de compactação Proctor normal realizadas para o solo natural, solo/cimento e 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, sendo que, para fins de controle de umidade, o percentual da borra oleosa ácida que evapora a 60°C (4,5% de umidade) foi adicionado sobre a umidade ótima de compactação.

### Materiais utilizados

#### Solo

O solo utilizado nesta pesquisa é proveniente da região metropolitana de Porto Alegre, o local de coleta está situado na província geomorfológica denominada Depressão Periférica, cuja litologia é caracterizada pela presença de rochas sedimentares pertencentes à Bacia do Paraná.

O solo é constituído predominantemente por fração siltosa, com 43% de sua composição total. A Figura 1 apresenta a curva granulométrica obtida para o solo residual com o uso de defloculante (hexa-metafosfato de sódio). O solo possui limite de liquidez (LL) de 21%, limite de plasticidade (LP) de 17%, índice de plasticidade (IP) de 4% e massa específica real dos grãos ( $G_s$ ) de 2,72.

Os ensaios de compactação com energia Proctor normal foram realizados para determinar a umidade ótima e o peso específico máximo seco de

compactação, os quais foram utilizados como parâmetros para a moldagem dos corpos de prova nos variados ensaios desta pesquisa. Foram realizados ensaios para dois teores de cimento, 10% e 20% sobre o peso do solo e crescentes quantidades de contaminante. Os ensaios foram realizados para as seguintes misturas: solo natural, solo/cimento e solo/cimento/borra oleosa ácida, além da água. As curvas de compactação são apresentadas nas Figuras 2 e 3.

Os resultados tanto de umidade ótima quanto de peso específico má-

ximo seco, em amostras cimentadas, estão muito próximos. Em função disso, optou-se em utilizar a média dos resultados obtidos nas curvas de compactação de solo/cimento e solo/cimento/contaminante como parâmetro de moldagem dos corpos de prova contaminados e encapsulados.

Para a amostra natural a umidade ótima é de 13,5% e o peso específico de 18,25 kN/m<sup>3</sup>. Em amostras cimentadas e contaminadas a média de umidade ótima é de 15,73% e 16,82% e o peso específico médio é de 17,42 kN/m<sup>3</sup>

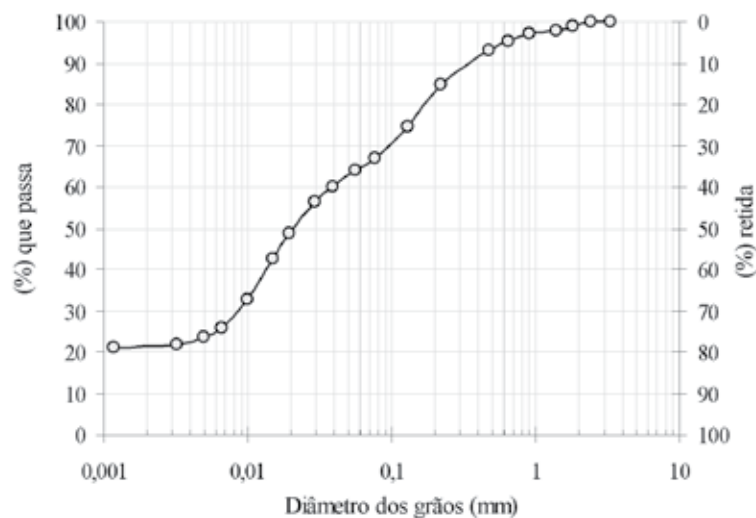


Figura 1 - Distribuição granulométrica do solo em estudo

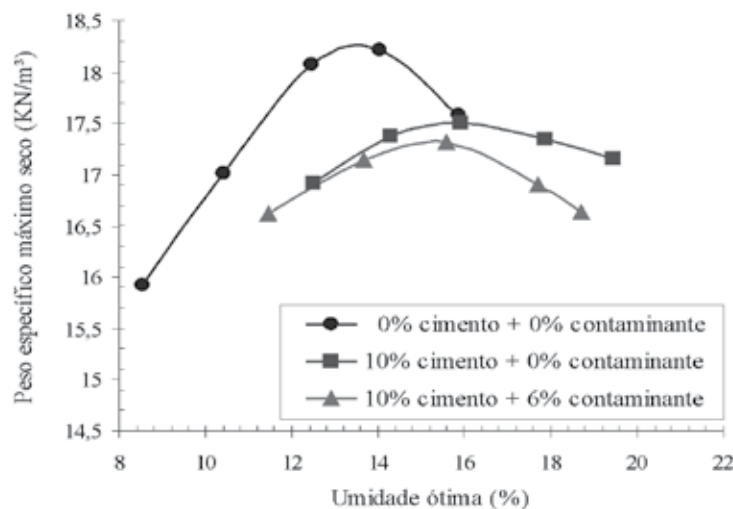
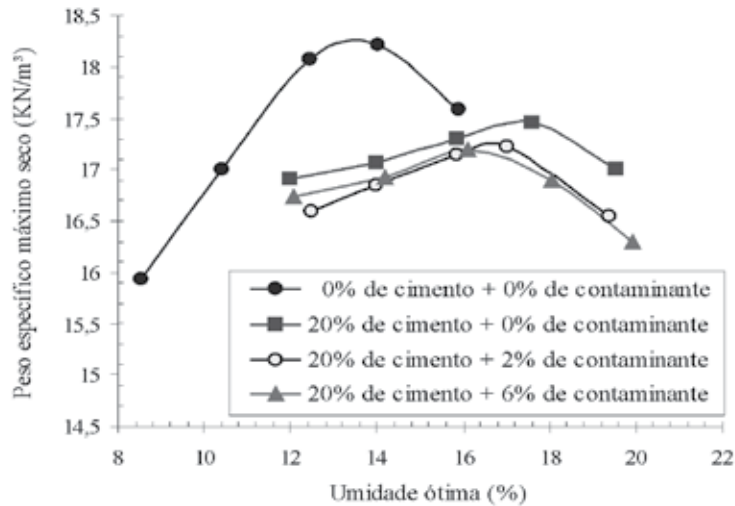


Figura 2 - Curvas de compactação do solo natural, solo + 10% de cimento e solo + 10% de cimento + 6% de borra oleosa ácida



**Figura 3 - Curvas de compactação do solo natural, solo + 20% de cimento e solo + 20% de cimento + 2% e 6% de borra oleosa ácida**

e 17,31kN/m<sup>3</sup> para 10% e 20% de cimento, respectivamente.

#### Cimento

Como agente cimentante para o encapsulamento do solo contaminado, adotou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) da marca Cauê. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquire elevadas resistências, com maior velocidade.

#### Água

Para os ensaios de resistência à compressão simples, durabilidade e demais ensaios de caracterização foi utilizada a água destilada e a disponível na rede pública de abastecimento.

#### Borra oleosa ácida

O contaminante utilizado nesta pesquisa é o resíduo borra oleosa ácida, oriundo de uma refinaria que realiza o reprocessamento 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.

O óleo usado recebido na indústria sofre um pré-aquecimento, onde parte das frações leves e da água nele contido é removida. Após este processo, o óleo passa por um filtro de malha grossa para a remoção de partículas grosseiras e segue para a etapa de desidratação e craqueamento térmico, para a remoção das frações leves e da água. O óleo desidratado é resfriado até uma temperatura de aproximadamente 40°C e é tratado com ácido sulfúrico concentrado (98%), numa proporção que varia de 3% a 4% do volume de óleo utilizado no processo. O óleo tratado com ácido passa por um processo de decantação, que é aplicado para a separação das frações pesadas. Deste processo, ocorre a formação da borra oleosa ácida.

#### Preparação das amostras

A mistura foi realizada pela seguinte ordem: [(solo + cimento) + borra oleosa ácida] + água. No momento da adição do contaminante, cuidados foram tomados para que este não ficasse retido nas luvas ou recipiente de mistura, precauções também foram tomadas no sentido de se evitar, ao máximo, a perda de umidade por evaporação. A mistura foi 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 ± 0,2 cm de altura e 5,0 ± 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 era 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 para os ensaios de resistência à compressão simples e durabilidade.

#### 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 ± 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 é de 1,14mm/min.

#### Durabilidade por perda de massa

Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios de durabilidade foram baseados na norma NBR 13554 (ABNT, 1996). Foram moldados dois corpos de prova para cada dosagem, identificados como n° 1, n° 2 e a referida dosagem.

Ao final da cura as duas amostras foram então imersas em água potável durante 5 horas e retiradas; a água em excesso contida na superfície das amostras foi secada com ajuda de um

pano úmido. Os dois corpos de prova foram então colocados em estufa a uma temperatura de  $(71 \pm 2)^\circ\text{C}$  por 42 horas. Retiradas da estufa as amostras foram submetidas ao escovamento com uma escova de tiras de chapa de aço, descrita pela NBR 13554 (ABNT, 1996). A escova foi aplicada com seu eixo longitudinal paralelo ao eixo longitudinal do corpo de prova e paralelo as suas bases, de maneira tal que foi possível cobrir toda a superfície do corpo de prova.

Foram aplicadas 20 escovadas enérgicas (aproximadamente 15N) a fim de cobrir toda a superfície lateral do corpo de prova e 4 para cada uma das bases. O ciclo de 48 horas de molhagem e secagem foi repetido por mais 5 vezes. Após os 6 ciclos, as amostras foram levadas à estufa, a uma temperatura entre  $105^\circ\text{C}$  e  $110^\circ\text{C}$  até atingir massa constante.

### Durabilidade pelo método de IOWA

Para a verificação da durabilidade das amostras cimentadas e contaminadas foi utilizado o procedimento proposto por Hoover et al (1958) apud Lovato (2004). Algumas modificações foram estabelecidas quanto aos procedimentos originais do método, optando em realizar o ensaio em 6 ciclos de molhagem e secagem.

Foram moldados 6 corpos de prova para cada dosagem proposta. Dessas 6 amostras, 3 foram curadas por 7 dias e, em seguida, submetidas a 6 ciclos de molhagem e secagem. Cada ciclo compreendeu um período de 48 horas, sendo 24 horas de imersão em água potável e 24 horas de secagem ao ar. As 3 amostras restantes permaneceram curando até o final dos ciclos. Todas as amostras, após os ciclos, foram imersas por 4 horas e posteriormente rompidas para a obtenção da resistência à compressão simples.

Segundo Marcon (1977) se a relação de resistência à compressão simples entre os corpos-de-prova submetidos ao ciclo de molhagem e secagem e os corpos de prova que estavam em cura normal for superior a 80%, pode-se considerar que o material apresenta boas características quanto à durabilidade.

## RESULTADOS

### Resistência à compressão simples

As Figuras 4 e 5 ilustram o comportamento da resistência à compressão simples, aos 7 e 28 dias de cura, com imersão em água dos corpos de prova quatro horas antes da ruptura, para as variadas quantidades de cimento e crescentes quantidades de borra oleosa ácida, presente no solo.

Os resultados demonstram também 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.

De um modo geral, constatou-se que a resistência à compressão simples dos corpos de prova encapsulados com cimento Portland está relacionada com a quantidade de cimento adicionada,

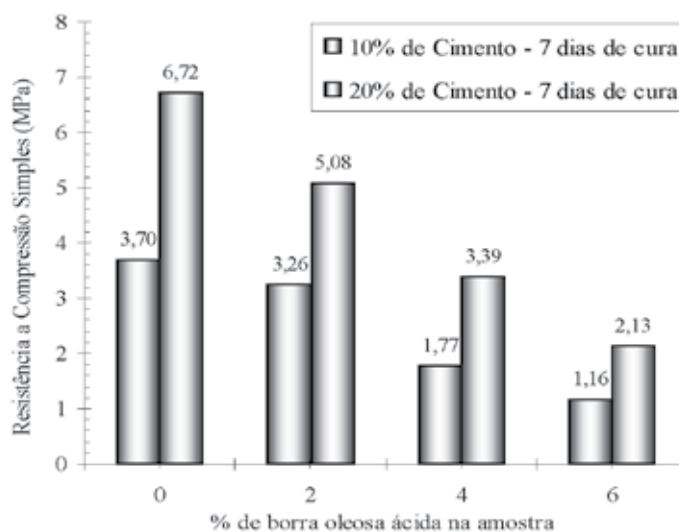


Figura 4 - Resistência à compressão simples das variadas misturas de solo/cimento e solo/cimento/borra oleosa ácida para 7 dias de cura

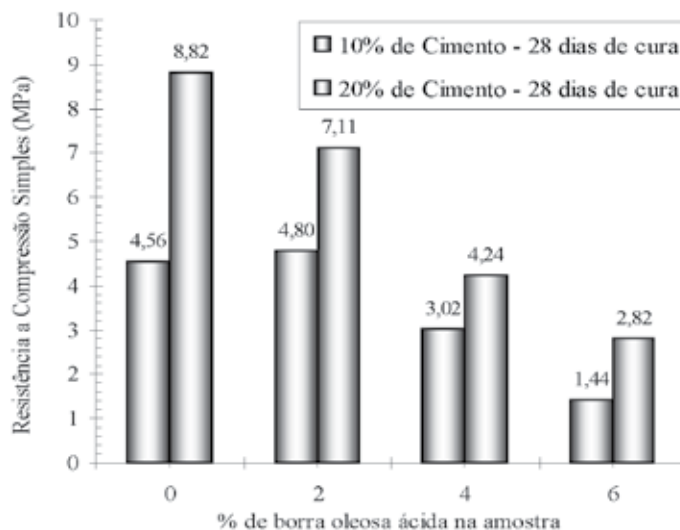


Figura 5 - Resistência à compressão simples das variadas misturas de solo/cimento e solo/cimento/borra oleosa ácida para 28 dias de cura



com o tempo de cura e com a quantidade de borra oleosa ácida presente no solo.

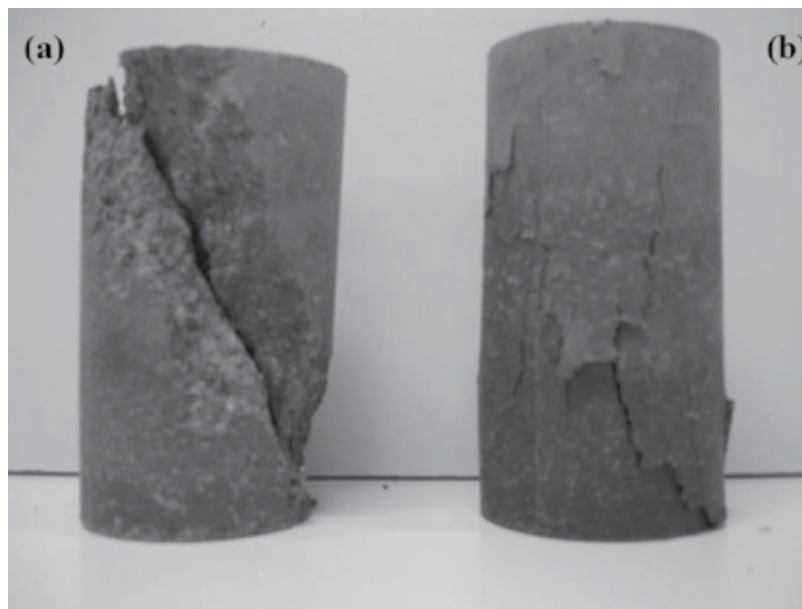
Segundo De Farias (2004) a evolução da reação de hidratação está diretamente relacionada à evolução das propriedades do material, como módulo de elasticidade, resistência, fluência, retração, entre outros. Evolução esta que pode ser denominada pelo termo "envelhecimento" do concreto. Portanto, outro motivo da perda de resistência pode estar relacionado com o elevado calor liberado pela reação de hidratação do cimento nos minutos iniciais da mistura, devido as reações exotérmicas do cimento e do ácido sulfúrico presente no contaminante podendo levar ao aparecimento de fissuras de origem térmica, produzindo uma estrutura fisicamente mais pobre.

Após o ensaio de resistência à compressão simples observou-se nos corpos de prova dois diferentes modos de ruptura, sendo que estes variam conforme a quantidade de borra oleosa ácida e o grau de cimentação. Para amostras encapsuladas com 10% e 20% de cimento e teores de borra oleosa ácida abaixo ou iguais a 4% foram observados planos de ruptura bem definidos, a amostra após a ruptura se comportou essencialmente como dois blocos rígidos deslizando-se um sobre o outro, conforme Figura 6 (a).

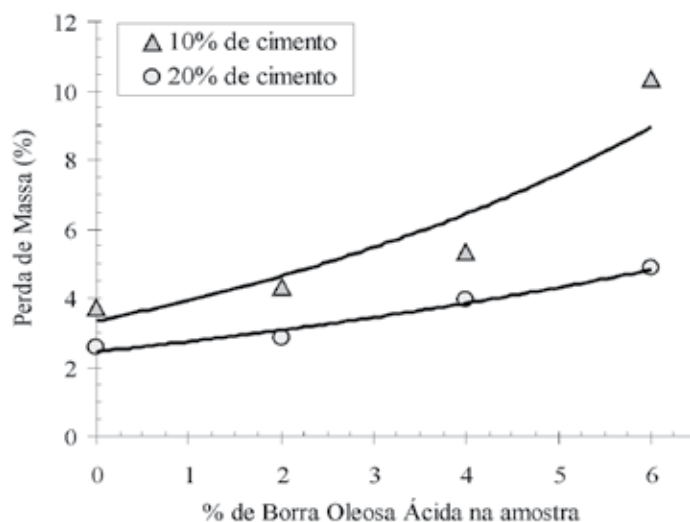
Quando submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples as amostras contaminadas e sem agente cimentante não apresentaram uma ruptura com planos definidos, seja de forma cisalhante ou com formato cônico e nem mesmo queda significativa de resistência após a tensão máxima ter sido atingida. Os corpos de prova apresentaram fissuras verticais e aumento do volume lateral, como pode ser visto pela Figura 6 (b). Este mesmo comportamento foi identificado para alguns corpos de prova contaminados com 6% de borra oleosa ácida e encapsulados com 10% e 20% de cimento.

### Durabilidade por perda de massa

A Figura 7 apresenta os resultados dos ensaios de perda de massa por ciclos de molhagem, secagem e escovamento em corpos de prova encapsulados com 10% e 20% de cimento para as combinações de 0%, 2%, 4% e 6% de borra oleosa ácida.



**Figura 6 - Planos de ruptura: (a) 20% de cimento + 2% de contaminante; (b) 10% de cimento + 6% de contaminante**



**Figura 7 - Perda de massa em relação à porcentagem de borra oleosa ácida e cimento nas amostras**

A Tabela 1 apresenta as porcentagens de perda de massa para as crescentes combinações de cimento e borra oleosa ácida.

Os resultados obtidos demonstram que o aumento de borra oleosa ácida nas amostras encapsuladas faz com que haja uma crescente perda de massa, tanto para amostras com 10% de cimento como para as amostras estabilizadas com 20% de cimento. Porém, nas amostras encapsuladas com 10% de cimento e contaminadas com 6% de borra oleosa ácida a perda de massa é mais pronunciada, apresentando re-

sultado de 10,37%, enquanto que para todas as demais amostras, não importando a quantidade de contaminante e de cimento, a perda de massa não foi superior a 5,35%.

### Durabilidade pelo método IOWA

De acordo com o método IOWA a durabilidade pode ser estimada através da relação entre a resistência à compressão simples dos corpos de prova submetidos e não submetidos a ciclos de molhagem e secagem. O tempo total

desde a moldagem até a ruptura foi de 19 dias, sendo 7 dias de cura e 12 dias de molhagem e secagem. A Tabela 2 e a Figura 8 sintetizam os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e a influência dos ciclos de molhagem e secagem na resistência.

Marcon (1977) admitiu que quando a relação de resistência à compressão simples entre as amostras submetidas e não submetidas aos ciclos de molhagem e secagem for superior a 80% pode-se considerar que o material apresenta uma boa durabilidade.

Segundo a relação das resistências obtidas, todos os corpos de prova encapsulados com 10% de cimento atingiram valores superiores ao limite mínimo de 80%. Já os corpos de prova com 20% de cimento e 6% de borra oleosa ácida não obtiveram resultados satisfatórios, obtendo uma relação de resistência de 77,44%, muito próximo do mínimo estabelecido. Para as demais amostras contaminadas e encapsuladas com 20% de cimento a relação de resistência apresenta-se com valores superiores a 80%, atestando boa durabilidade.

## Resistência à compressão simples versus perda de massa

Na Figura 9 são apresentados os resultados obtidos para a relação de resistência à compressão simples aos 7 dias versus a perda de massa por ciclos de molhagem, secagem e escovamento para amostras de solo/cimento e solo contaminado com crescentes quantidades de borra oleosa ácida, encapsulados com 10% e 20% de cimento.

Tabela 1 - Perda de massa das diferentes combinações de cimento e borra oleosa ácida.

10% de cimento		20 % de cimento	
Perda de massa (%)	% de borra	Perda de massa (%)	% de borra
3,73	0	2,55	0
4,31	2	2,86	2
5,35	4	3,95	4
10,37	6	4,85	6

Tabela 2 - Resistência à compressão simples de corpos de prova submetidos e não submetidos a ciclos de molhagem e secagem

10% Cimento Sem ciclo		10% Cimento Com ciclo		Relação RCS (%)	20% Cimento Sem ciclo		20% Cimento Com ciclo		Relação RCS (%)
% Borra	RCS (MPa)	% Borra	RCS (MPa)		% Borra	RCS (MPa)	% Borra	RCS (MPa)	
0	3,69	0	3,87	104,88	0	6,57	0	7,64	116,29
2	3,08	2	3,42	111,04	2	5,42	2	5,33	98,34
4	1,80	4	1,57	87,22	4	3,40	4	3,65	107,35
6	1,36	6	1,24	91,18	6	2,35	6	1,87	77,44

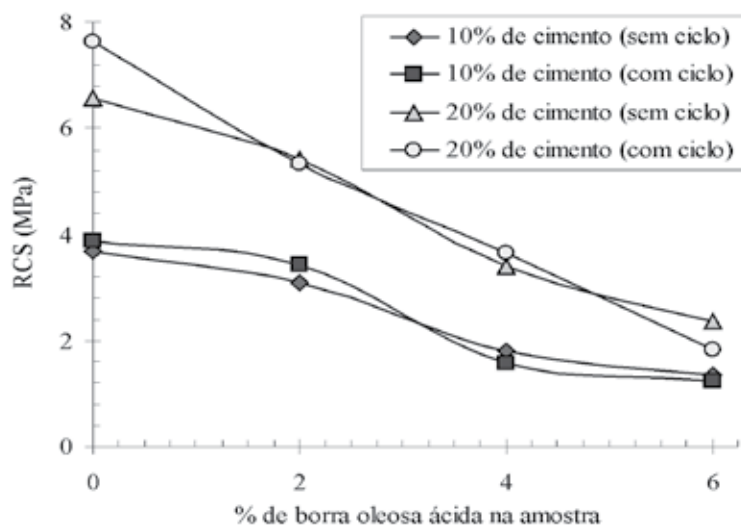
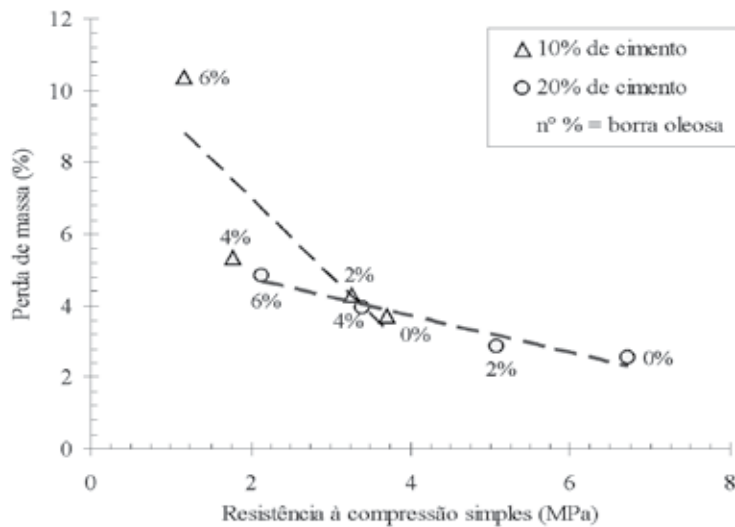


Figura 8 - Comportamento da resistência à compressão simples dos corpos de prova submetidos ou não a ciclos de molhagem e secagem



**Figura 9 - Resistência à compressão simples versus perda de massa**

Observa-se que o aumento de borra oleosa ácida, não importando a quantidade de cimento, gera uma diminuição da resistência a compressão simples e um aumento na perda de massa. Quando analisado em função do teor de cimento nota-se que a perda de massa e perda de resistência ocorre em maior grau para as amostras com menor teor de cimento.

## CONCLUSÃO

A resistência à compressão simples aumentou com o aumento de cimento e do tempo de cura, tendo uma redução com a adição de borra oleosa ácida. Quanto mais borra oleosa ácida para um mesmo teor de agente cimentante menor será a resistência.

A inclusão de borra oleosa ácida no solo pode provocar diferentes comportamentos quanto a rupturas dos corpos-de-prova cimentados, quanto maior a quantidade de borra oleosa ácida menor é a rigidez.

O aumento de borra oleosa ácida provocou crescente perda de massa, tanto para amostras encapsuladas com 10% de cimento como para as amostras contendo 20% de cimento.

A relação entre resistência à compressão simples versus perda de massa apresenta-se de forma linear, ou seja, quanto maior a quantidade de cimento maior a resistência e menor a perda de

massa, quanto maior a quantidade de borra oleosa ácida menor a resistência e maior a perda de massa.

A resistência à compressão simples e a durabilidade por ciclos de molhagem, secagem e escovamento mostram-se dependentes uma da outra, pois uma alta resistência significa uma baixa vulnerabilidade aos fatores climáticos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PRONEX-FAPERGS (Processo # 04/0841.0) e ao CNPq (Projetos Produtividade em Pesquisa # 301869/2007-3 e 301840/2007-5 e Edital Universal # 470938/2007-2 and 470971/2007-0).

## REFERENCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solos cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem*. NBR 13554. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solo-cimento – Ensaios 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.
- AZAMBUJA, E.; CANCELIR, D. B.; NANNI, A. S.; *Contaminação dos solos por LNAPL: Discussão sobre diagnóstico e remediação*. II Simpósio

*de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul*. Rio Grande do Sul – GEOSUL, Porto Alegre, 2000.

DE FARIA, É. F. *Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termoquímico e modelo de dados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE (FRTR). *Solidification/Stabilization: Ex Situ Physical/Chemical Treatment (assuming excavation)*. Disponível em: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-21.html>. Acesso em 18 de Janeiro de 2007, 2006.

HEINECK, K. S. et al. *Encapsulamento de um solo contaminado por óleo diesel*. Geotecnia (Lisboa), v. 110, p. 3-17, 2007.

KLICH, I. et al. *Mineralogical alterations that affect the durability and metals containment of aged solidified and stabilized waste*. Pergamon, Cement and Concrete Research, v.29 p.1433-1440, 1990.

LAGREGA, M. D.; BUCKINGHAM P. L.; EVANS, J. C. *Hazardous waste management and environmental resources management*. 2nd Edition, 1157p. 2001.

LANGE, L.C.; SCHWABE, W. S.; HILLS, C. D. *A tecnologia da estabilização/solidificação aplicada ao tratamento de resíduos industriais*. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, n.1, 1998.

LI, X.D.; et al. *Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials*. Journal of Hazardous Materials. v. A82. p. 215-230, 2001.

LOVATO, R. S. *Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal aplicado a pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MARCON, A. F. *Durabilidade e Módulo de Elasticidade de Misturas Areia – Cal – Cinza Volante*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1977.

OLIVEIRA, D. M.; CASTILHOS Jr.; MEIOTELLO, E. *Avaliação da solidificação/estabilização de borras oleosas utilizando caulinita e vermiculita como materiais adsorventes*. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Joinville, 2003.

PIRES, J. C. A. et al. *Projeto experimental de tratamento de chorume produzido no aterro metropolitano de gramacho através de wetland*. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Joinville, 2003.

ROJAS, J. W. J. *Estudo de Remediação de Solo Contaminado por Borra Oleosa Ácida Utilizando a Técnica de Encapsulamento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SUTHERSAN, S. 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 Nº 1110-1-158. Washington, 1995.



WILES, C. C. *A review of solidification/stabilization technology.* Journal of Hazardous Materials. Amsterdam, v. 14. p. 5-21. 1987.

---

---

**Endereço para correspondência:**

**José Waldomiro Jiménez Rojas**  
**Programa de Pós- Graduação em**  
**Engenharia Civil - Laboratório**  
**de Resíduos, Novos Materiais**  
**e Geotecnia Ambiental**  
**(ENVIRONGEO) - Universidade**  
**Federal do Rio Grande do Sul**  
**Av. Osvaldo Aranha, 99**  
**90035-190 - Porto Alegre - RS - Brasil**  
**Tel.: (51) 3308-3669**  
**Fax:(051) 3316-3999**  
**E-mail: engrojas@gmail.com**

# engenharia sanitária e ambiental

<http://www.abes-dn.org.br>



REPIDISCA

**REPIDISCA - REDE PANAMERICANA  
DE INFORMACIONES EN SALUD  
AMBIENTAL**

<http://www.cepis.org.pe>



**SCIENTIFIC ELECTRONIC  
LIBRARY ONLINE**

<http://www.scielo.org>

**LILACS - LITERATURA LATINO-AMERICANA  
E DO CARIBE EM CIÊNCIAS DA SAÚDE**

<http://www.bireme.br>