

# ENCAPSULAMENTO DE UM SOLO CONTAMINADO POR ÓLEO DIESEL

Encapsulation of a soil contaminated by diesel oil

Karla Salvagni Heineck\*

Nilo Cesar Consoli\*\*

Rodrigo Caberlon Cruz\*\*\*

Alexandre Knop\*\*\*\*

**RESUMO** – Ensaios de lixiviação em coluna, condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível, ensaios de compressão não-confinada e fotomicrografia foram realizados com o objetivo de avaliar a eficiência da remediação de um solo residual do arenito Botucatu (SRAB) contaminado por hidrocarbonetos através do método de solidificação/estabilização, por meio da adição do cimento de Portland. Como resultado do programa de ensaios, o método foi considerado eficiente apenas para quantidades pequenas do óleo no solo contaminado.

**SYNOPSIS** – Leaching test, hydraulic conductivity in flexible-wall permeameter, unconfined compressive strength tests (UCS) and petrographic microscopy were carried out in order to evaluate the efficiency of remediation in a Botucatu residual sandstone soil (BRS) contaminated by diesel oil, through solidification/stabilization method by means of Portland cement addition. The method was considered efficient just for small oil amounts on the contaminated soil.

**PALAVRAS CHAVE** – Solos Contaminados, Encapsulamento, Óleo Diesel.

## 1 – INTRODUÇÃO

Tecnologias de tratamento *in situ* para mitigação de contaminação de hidrocarbonetos de petróleo de locais contaminados estão em estágio de desenvolvimento, sendo que uma das formas mais empregadas é a de fixação do contaminante na matriz do solo, por meio de métodos físicos, químicos e biológicos ou combinações dos mesmos.

Tratamentos químicos *in situ* que utilizam a imobilização dos contaminantes de petróleo no substrato de solo envolvem precipitação e outras reações químicas no subsolo contaminado, sendo necessário a inserção de agentes que propiciem estas reações (Yong & Rao, 1991). Estas reações químicas alteram as características originais do solo através da formação de uma nova matriz entre o solo, o agente cimentante adicionado (que vai propiciar a fixação dos contaminantes) e os próprios contaminantes.

---

\* Professora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. (E-mail: karla@ppgec.ufrgs.br)

\*\* Professor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. (E-mail: consoli@ufrgs.br)

\*\*\* Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

\*\*\*\* Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

A técnica de encapsulamento de solos contaminados, também conhecida como estabilização/solidificação (S/S), utilizando materiais cimentícios, é vulnerável a degradações físicas e químicas. A composição mineralógica, bem como o agente cimentante e o tipo de contaminante são fatores dos quais depende a durabilidade do método de estabilização/solidificação (S/S). Neste sentido, a EPA (Environmental Protection Agency), recomenda ensaios de pós-tratamento em solos onde a técnica de solidificação/estabilização foi aplicada, os quais consistem em análises químicas e físicas do conjunto solo-contaminante. As análises químicas são realizadas com base em ensaios de lixiviação e extração química. Fisicamente, são realizadas ensaios de resistência à compressão não confinada, condutividade hidráulica e durabilidade.

Por meio de ensaios de lixiviação em coluna, é possível determinar o potencial do método de estabilização e solidificação (S/S) em conter o contaminante na matriz do composto encapsulado após inserção de agentes cimentantes. Ensaios de condutividade hidráulica fornecem dados da variação da condutividade hidráulica do material quando este estiver contaminado e após o tratamento.

Neste sentido, o objetivo desta pesquisa é investigar a viabilidade do emprego da técnica de S/S através de ensaios de lixiviação em coluna, resistência à compressão não confinada e ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível. Pretende-se além disto, analisar microscopicamente a estrutura da matriz formada pelo solo, agente cimentante e contaminante.

## **2 – TÉCNICA DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS**

Define-se a técnica de encapsular o contaminante em um sólido monolítico de alta integridade estrutural como solidificação. A estabilização altera o contaminante para uma forma quimicamente mais estável, resultando numa melhor aceitação ambiental. Segundo o USACE (1995), a técnica de solidificação/estabilização é aplicada para o tratamento de solos contaminados, tendo por objetivo melhorar as características físicas do material contaminado, diminuir a área superficial da massa de contaminante e reduzir a solubilidade dos constituintes perigosos no contaminante.

A melhoria das propriedades de engenharia como trafegabilidade, capacidade de suporte e condutividade hidráulica dos solos contaminados estabilizados pode ser alcançada com o encapsulamento dos materiais, que engloba os efeitos de estabilização e solidificação. A solidificação refere-se ao efeito físico (diminuição da condutividade hidráulica, aumento de resistência mecânica), gerado pela densificação do material após a compactação, além da criação de ligações físicas geradas pela cimentação que imobilizam os contaminantes. A estabilização química é responsável pela alteração da forma química dos contaminantes onde a lixiviabilidade é eliminada ou substancialmente reduzida. Isto se deve basicamente pela alcalinidade do ambiente gerada pelas reações de hidratação do cimento ou cal, responsável pela diminuição da solubilidade de alguns contaminantes e também pela transformação destes em silicatos e carbonatos insolúveis (Mayers & Eappi, 1992). O encapsulamento, de acordo com Wiles (1987), deve ser compreendido como sendo uma técnica que isola o contaminante por uma membrana impermeável, que enclausura o mesmo. O encapsulamento se dá em duas fases: micro e macroencapsulamento. O primeiro é definido como o mecanismo pelo qual constituintes de resíduos perigosos são fisicamente presos na estrutura cristalina de uma matriz solidificada em níveis microscópicos, e o segundo como sendo o mecanismo pelo qual constituintes de resíduos perigosos são fisicamente presos em uma grande matriz estrutural, onde os constituintes são presos em poros descontínuos com o material estabilizador.

Os agentes mais frequentemente 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 e diminui com o aumento do pH do meio (Sawyer, 1994 e Baird, 2002). Fisicamente, ocorre a cimentação das partículas, causando uma diminuição da mobilidade do contaminante no interior do solo.

O encapsulamento de solos contaminados por contaminantes orgânicos pode sofrer problemas quanto ao retardamento da hidratação do cimento, devido a substituição da água pelo contaminante nos vazios do solo. Estudos prévios devem ser realizados para verificar a viabilidade quanto à aplicação da técnica de encapsulamento nestes casos (Pollard *et al.*, 1991).

Wiles (1987) afirma que as vantagens e desvantagens do emprego da técnica S/S variam conforme os reagentes empregados, o tipo de contaminante e grau de contaminação, as condições locais, do solo, entre outros fatores.

Entre as vantagens no emprego da técnica S/S frente às demais, destacam-se: o tempo de execução (da ordem de dias a semanas), contrastando com a ordem de meses a anos para o emprego de biorremediação, por exemplo; o baixo custo de execução; a mudança de um solo inicialmente comprometido pela presença de contaminação para um novo material cimentado, o que o torna um possível material a ser empregado em obras de engenharia, tais como base em pavimentos.

Entre as desvantagens, destaca-se o aumento do volume contaminado, visto que os agentes que são adicionados para fixar os contaminantes na matriz de solo podem chegar a 70% do volume de solo, bem como a degradação com o tempo desta matriz que fixa os contaminantes, fazendo desta forma necessárias constantes análises pós-tratamento.

### **3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 – Condições experimentais**

O programa experimental foi baseado em ensaios de laboratório que permitiram avaliar as características pós-tratamento de um solo residual contaminado por hidrocarbonetos. Para simular tal contaminação, o solo foi contaminado em laboratório com óleo diesel e posteriormente encapsulado com cimento Portland CP V - ARI.

O programa experimental compreendeu ensaios de resistência à compressão não confinada, ensaios de lixiviação em coluna, condutividade hidráulica e microscopia petrográfica. Os ensaios de compressão não confinada foram realizados com teores de 10, 20, 30, 40 e 50% de cimento Portland com relação ao peso total de sólidos e teores de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 75 e 100% de óleo diesel em relação ao peso total de líquidos, para 3 e 7 dias de cura, totalizando 81 amostras ensaiadas.

Os ensaios de lixiviação em coluna foram realizados para as quantidades de 0, 10 e 20% de cimento e 10 e 40% de óleo diesel, para 3 dias de cura. Ensaios de condutividade hidráulica foram realizados com teores de 0, 10 e 20% de cimento Portland com relação ao peso total de sólidos e de 0, 10, 20 e 40% do óleo diesel com relação ao peso total líquido, para 7 dias de cura.

A última etapa do programa experimental consistiu na execução de análise estrutural do material através de microscopia petrográfica convencional em amostras de Solo Residual de Arenito Botucatu (SRAB) com teor de 10% de cimento e 0, 10, 20 e 40% de óleo diesel.

### 3.2 – Materiais utilizados

#### a) Solo

O solo utilizado no desenvolvimento do programa experimental foi o Solo Residual de Arenito Botucatu (SRAB), que é uma areia fina siltosa, mal graduada e fracamente plástica. Trata-se de um solo residual pertencente ao horizonte C, substrato de arenito, pertencente à denominada Formação Botucatu, proveniente de uma jazida localizada em São Leopoldo, na região da grande Porto Alegre, RS. Muitas pesquisas utilizando este solo foram realizadas nos últimos anos neste programa de pós-graduação (Knop, 2003, Caberlon, 2004 e Santos, 2005), contribuindo para a caracterização do mesmo.

O solo possui Limite de Liquidez (LL) de 22%, Limite de Plasticidade (LP) de 13%, densidade real dos grãos ( $G_s$ ) de 2,65, coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) de 46,9, coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) de 0,18 e diâmetros médio e efetivo das partículas ( $D_{50}$  e  $D_{10}$ ) de 0,11mm e 0,0032mm, respectivamente. A curva de compactação do material, realizada com energia Proctor normal, é apresentada na Figura 1. Os parâmetros utilizados para a confecção dos corpos de prova foram obtidos da curva apresentada, onde se verifica um teor de umidade óptimo ( $w_{ót}$ ) de 14,2% e um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 17,6 kN/m<sup>3</sup>, resultando em amostras com um índice de vazios de aproximadamente 0,5.

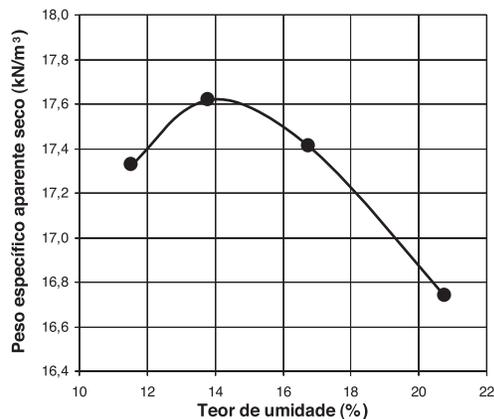
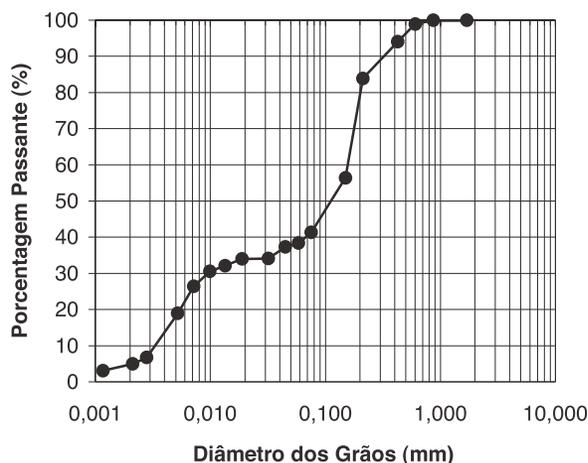


Fig. 1 – Curva de compactação do SRAB.

A curva granulométrica apresentada na Figura 2 mostra um material composto por 5% de argila (< 0,002mm), 36,4% de silte (0,002 a 0,075mm) e 58,6% de areia, sendo que desta porcentagem 52,6% é de areia fina (0,074 a 0,42mm) e somente 6,0% é de areia média (0,042-2,0mm). Assim sendo, o material é classificado como uma areia siltosa de acordo com a ABNT NBR 6502 (1995). Ensaio de difração de Raios-X mostraram a presença predominante do mineral de argilo caulinita.

#### b) Óleo diesel

O óleo diesel utilizado nesta pesquisa foi obtido junto à Refinaria Alberto Pasqualini S.A., localizada na cidade de Canoas/RS. Possui de 70 a 75% (volume) de hidrocarbonetos saturados, menos de 1% (volume) de hidrocarbonetos olefínicos, de 20 a 30% (volume) de hidrocarbonetos aromáticos e menos de 0,5% (peso) de enxofre. Apresenta um comportamento não volátil, sendo imiscível em água. A densidade unitária do óleo diesel é 0,84, a viscosidade é 1,8 e seu ponto de ebulição é 174°C.



**Fig. 2** – Curva granulométrica do SRAB.

### c) Cimento

O cimento utilizado é o cimento CP V – ARI composto de 95 a 100% de clínquer e gesso, e de 0 a 5% de material carbonático, a fim de acelerar o tempo de cura.

### 3.3 – Equipamentos

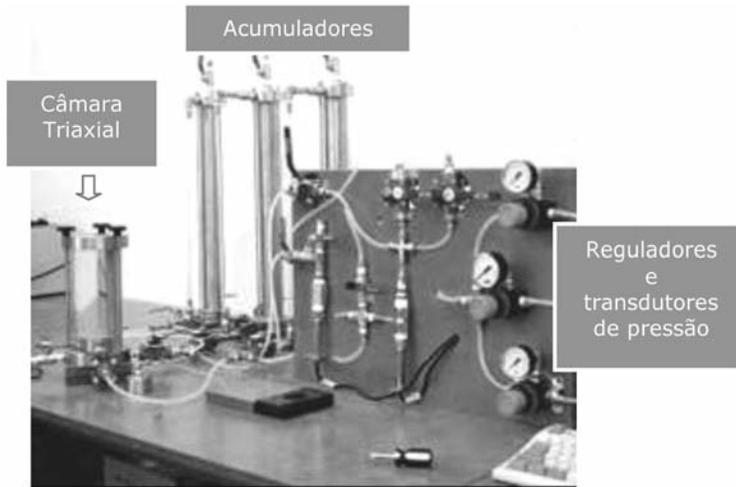
Foram desenvolvidos equipamentos especiais de laboratório para a determinação da condutividade hidráulica e potencial lixiviante. O permeâmetro de parede flexível, apresentado na Figura 3, foi projetado e construído segundo recomendações da norma ASTM D5084 (1990). A distinção do permeâmetro desenvolvido nesta pesquisa para os demais é o material com que foi construído, sendo à base de aço inox, o que possibilita a realização de ensaios com amostras contaminadas ou a percolação de fluidos contaminantes no interior da amostra.

Para os ensaios de lixiviação foi desenvolvido um equipamento em coluna segundo a norma ASTM D4874 (1995) totalmente adaptado ao contato com compostos perigosos, o que também justifica sua construção em aço inox. Detalhes do equipamento podem ser observados na Figura 4; a descrição mais detalhada destes equipamentos se encontra em Knop (2003) e Caberlon (2004).

### 3.4 – Métodos

#### 3.4.1 – Preparação das amostras

As amostras utilizadas nos ensaios de resistência à compressão não confinada, condutividade hidráulica e fotomicrografia foram confeccionadas a partir de parâmetros determinados em ensaio de compactação (peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótimo) com energia Proctor Normal, apresentado na Figura 2. A moldagem das amostras deu-se através de compactação estática em 3 camadas em moldes bipartidos de PVC com 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Somente para o ensaio de lixiviação em coluna, a amostra era compactada diretamente dentro do cilindro onde era realizado o ensaio, em 6 camadas, até atingir os mesmos parâmetros utilizados para as demais amostras do programa experimental, resultando em corpos de prova com dimensões de 100mm de diâmetro e 300mm de altura.



**Fig. 3** – Permeômetro de Parede Flexível desenvolvido no programa experimental.



**Fig. 4** – Equipamento de lixiviação em coluna desenvolvido no programa experimental.

Para a preparação das amostras, os componentes foram adicionados em um recipiente colocando-se primeiramente o SRAB e o cimento. A seguir se colocava aos poucos a água e o óleo, misturando-os até atingir a homogeneização dos materiais. Durante este processo todas as precauções foram tomadas no sentido de se evitar as perdas de água por evaporação. Após desmoldados, os corpos de prova eram pesados com precisão de 0,01gf, medidos com precisão de 0,01cm e acondicionados em sacos plásticos até completar o período de cura desejado, de 3 e 7 dias.

As quantidades necessárias de cada material foram previamente determinadas em relação a massa destes, sendo que as diferentes quantidades de contaminante inseridos nos corpos de prova se deram em relação a massa de líquidos. Desta forma, um teor de 100% de óleo corresponderia a substituição total da água por óleo ou 14,2% de óleo.

### **3.4.2 – Ensaios de resistência à compressão não confinada**

Os procedimentos adotados para os ensaios de resistência à compressão não confinada basearam-se nas normas ABNT NBR 12770 (1992) e ABNT NBR 12025 (1990). A cura dos corpos de prova foi de 3 e 7 dias para todas as dosagens. Antes do rompimento, as amostras foram colocadas em imersão por 4 horas para inibir os efeitos de saturação parcial e rompidas com uma velocidade de aplicação de carga de 1,14mm/min.

### **3.4.3 – Ensaios de lixiviação em coluna**

Os ensaios de lixiviação em coluna basearam-se basicamente nos procedimentos descritos pela ASTM D 4874 (1995), a qual consiste na percolação do material que se objetiva determinar o potencial lixiviante por um tempo de  $24 \pm 3$  horas através da aplicação de uma pressão máxima de 275 kPa ou a percolação de um volume equivalente a 8 vezes o volume de vazios da amostra. Como o material encapsulado apresentou uma baixa condutividade hidráulica, optou-se por aplicar a pressão máxima permitida pela norma, resultando em um gradiente hidráulico máximo de aproximadamente 92. Após a percolação, o pH do efluente era medido e em seguida o mesmo era encaminhado para a separação água-óleo, onde foi adotada a metodologia descrita pela APHA (1995), Standard Methods for the examination of water and wastewater, sob o título Partition-Gravimetric Method, com o objetivo de determinar o teor de óleo lixiviado do material encapsulado.

Todos os ensaios de lixiviação em coluna foram realizados em amostras compactadas diretamente no equipamento, com três dias de cura.

### **3.4.4 – Ensaios de condutividade hidráulica**

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados baseados nas recomendações da norma ASTM D 5084 (1990): Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter.

Após a instalação das amostras no permeâmetro de parede flexível era estabelecida a fase de saturação dos corpos de prova, que consistia em duas etapas: (1) Aplicação de uma tensão confinante de 15 a 20kPa para impedir o fluxo preferencial entre o corpo de prova e a membrana e posterior percolação de água, da base para o topo do corpo de prova durante aproximadamente 24 horas ou até quando não eram mais percebidas bolhas de ar saindo da amostra. (2) Saturação por contra-pressão, que consistia na aplicação de incrementos de tensão de 50kPa na tensão confinante e na contra-pressão, mantendo-se a tensão efetiva constante em aproximadamente 20kPa. Após a fase de saturação aumentava-se a tensão confinante até que a tensão efetiva atingisse o valor em que o ensaio seria conduzido, tomando-se o cuidado de esperar o tempo necessário para a amostra adensar. Ao final do adensamento, media-se a variação volumétrica do corpo de prova para que se pudesse calcular o índice de vazios da amostra depois de adensada. A garantia de saturação da amostra foi monitorada através da medição do parâmetro B (Skempton, 1954), medido nos dois últimos níveis de tensões possíveis, limitado pela contra-pressão máxima utilizada.

Todos os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados com tensões efetivas médias de 100 kPa e com gradiente hidráulico constante de aproximadamente 10, conforme ASTM D 5084 (1990).

O gradiente hidráulico era aplicado na amostra através do incremento de tensão no topo da amostra e da diminuição, de mesma magnitude, em sua base. Tal procedimento minimiza as diferenças de tensões efetivas aplicadas ao longo da amostra. Baseando-se na medição de volume de

água que entrava e que saía da amostra, através de tubos graduados conectados aos acumuladores de entrada e saída de água, estimava-se o momento em que o fluxo encontrava-se estável, e a partir deste momento calculava-se a condutividade hidráulica, de acordo com a Lei de Darcy. Um medidor de variação volumétrica externo também era utilizado para a medição do volume de água que saía da amostra. Considerando que a variação do volume de água dentro dos acumuladores é muito pequena e as tensões aplicadas muito altas, assumiu-se que a variação na carga hidráulica era desprezível. Como resultado, o teste foi considerado como um teste de carga constante.

### **3.4.5 – Microscopia petrográfica**

Foram realizadas análises microscópicas do material encapsulado em microscópio óptico de luz transmitida. A lâmina delgada foi confeccionada do corte da amostra impregnada em placas, que são coladas em lâmina de vidro e levadas a rebaixamento até atingir a espessura de observação necessária para este método. As lâminas delgadas foram analisadas em microscópio petrográfico no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Através das análises petrográficas pôde-se avaliar a composição mineralógica do material, a diferença na textura do material para cada amostra e a influência desta na condutividade hidráulica, em amostras encapsuladas com 10% de cimento e 0, 20 e 40% de óleo diesel, para três dias de cura.

## **4 – RESULTADOS**

### **4.1 – Resultados obtidos nos ensaios**

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada, lixiviação em coluna, condutividade hidráulica e fotomicrografias são apresentados a seguir.

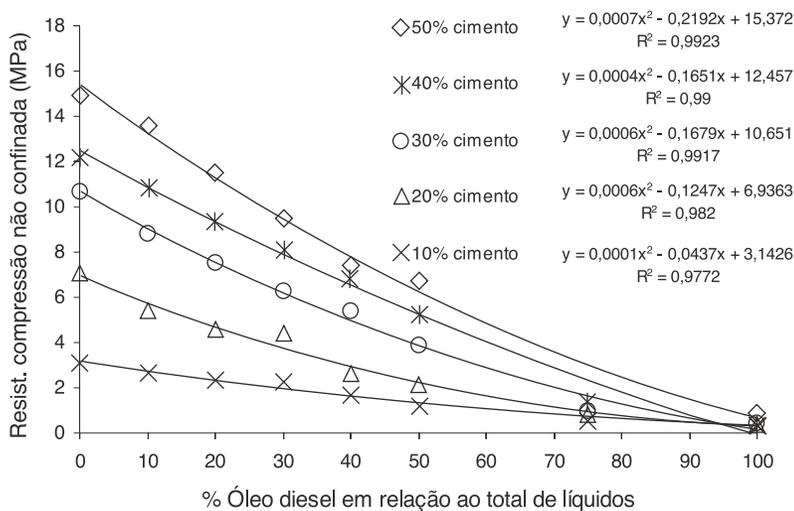
### **4.2 – Resistência à compressão simples**

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada para 3 e 7 dias de cura são apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

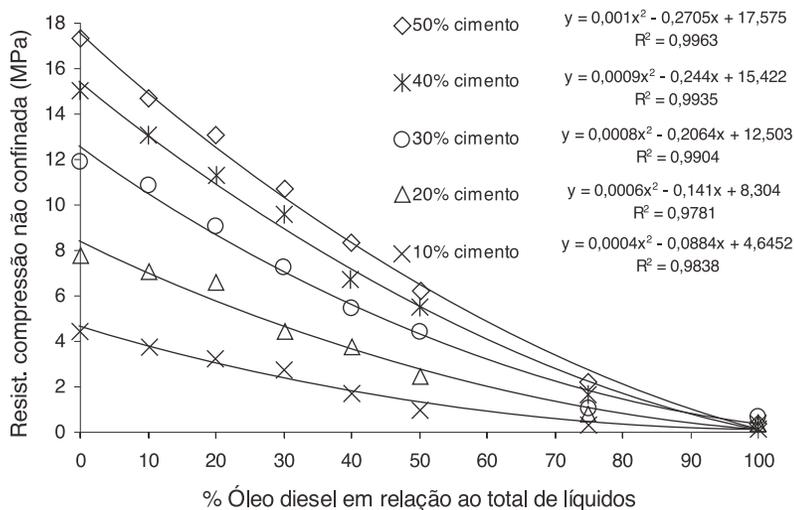
A partir destes resultados pode ser observado que em ambos os tempos de cura das amostras a resistência dos corpos de prova aumenta com o acréscimo do teor de cimento Portland.

Os resultados ainda mostram que quanto maior a quantidade de óleo diesel menor é a resistência, ocorrendo o caso em que em algumas amostras, com 100% de óleo sobre o peso total de líquidos, a resistência é mantida pela sucção existente no solo não saturado, chegando à ruptura imediatamente após a imersão, ou seja, nos casos onde o óleo representa 100% do total de líquidos, a água é totalmente substituída pelo óleo, resultando em uma amostra onde o cimento não possui água disponível para a sua hidratação.

Desta forma, pode-se dizer que a inibição ou retardamento da hidratação do cimento ocorreu devido à presença do contaminante, o que vem a corroborar a pesquisa de Pollard *et al.* (1991), os quais identificaram problemas no enrijecimento da camada encapsulada devido à presença de hidrocarbonetos. Como resultado, quanto maior a quantidade de óleo, maior a quantidade de cimento necessária para que o solo encapsulado mantenha uma dada resistência.



**Fig. 5** – Resultados de compressão não confinada do SRAB contaminado, encapsulado aos 3 dias de cura.



**Fig. 6** – Resultados de compressão não confinada do SRAB contaminado, encapsulado aos 7 dias de cura.

### 4.3 – Lixiviação em Coluna

A seguir estão apresentados na Tabela 1 e na Figura 7 os resultados dos ensaios de lixiviação em coluna segundo a ASTM D 4874 (1995), realizados nas amostras de 0, 10 e 20% de cimento e 10 e 40% de óleo diesel, para 3 dias de cura.

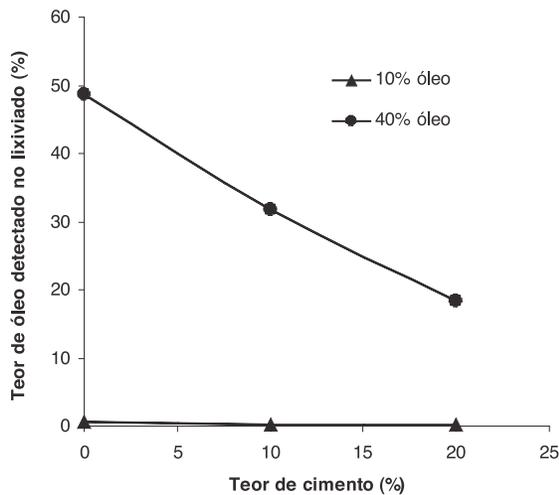
Observa-se que para ambas as quantidades de óleo estudadas (10 e 40%), a quantidade de óleo lixiviado e volume total de líquido lixiviado são inversamente proporcionais à quantidade de cimento adicionado. Da mesma forma, observa-se o aumento do pH para as misturas em que foram adicionados agentes cimentantes proporcionalmente ao teor de cimento adicionado, como era esperado em função da formação de produtos de hidratação do cimento.

**Tabela 1** – Resultados dos ensaios de lixiviação em coluna segundo ASTM D4874 (1995)

Ensaio	Dosagem	Massa total da amostra (g)	Massa total de líquidos* da amostra (g)	Massa de óleo da amostra (g)	Massa de óleo detectada no lixiviado (g)	Volume total de líquido lixiviado (ml)	Massa de óleo por volume de lixiviado (g/ml)	% de óleo lixiviado	pH do lixiviado
1	0% cim. 10% óleo	4146,91	588,86	58,89	0,3289	475,6	6,92E-04	0,55	6,370
2	0% cim. 40% óleo			235,54	114,15	896,0	1,27E-01	48,63	6,720
3	10% cim. 10% óleo			58,89	0,1387	186,30	7,44E-04	0,24	12,89
4	10% cim. 40% óleo			235,54	74,5758	582,30	1,28E-01	31,66	12,95
5	20% cim. 10% óleo			58,89	0,094	140,56	6,69E-04	0,16	13,01
6	20% cim. 40% óleo			235,54	38,1575	210,25	1,81E-01	16,20	13,05

\*Líquidos são água e óleo diesel.

Para o caso do teor de 10% de óleo em relação à massa total de líquidos, pode-se atribuir a baixa quantidade de óleo presente no lixiviado devido à compactação da mistura, uma vez que o solo compactado se mostrou capaz de reter baixas quantidades de contaminante por adsorção mesmo sem a presença de um agente cimentante. Além disto, a massa de óleo por volume de lixiviado, para um mesmo teor de óleo (seja 10 ou 40%), não é afetada pela introdução do cimento (pelo menos até o valor máximo de 20% de cimento utilizado na presente pesquisa).



**Fig. 7** – Relação entre a porcentagem de óleo presente no lixiviado e teor de cimento, para um tempo de cura de 3 dias em amostras contaminadas com 10 e 40% de óleo.

#### 4.4 – Condutividade Hidráulica

Os resultados obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica são apresentados na Tabela 2 e na Figura 8. De um modo geral, pode ser observado que, para crescentes porcentagens de cimento, a condutividade hidráulica diminuiu de  $10^{-8}$  m/s para  $10^{-9}$  m/s, em todas as dosagens estudadas.

A condutividade hidráulica do SRAB diminui, inicialmente, com a introdução de óleo diesel, para teores de óleo de até 20%, sendo que para teores mais altos a condutividade hidráulica se torna praticamente constante. A diminuição da condutividade hidráulica com a introdução de óleo provavelmente é causada pela presença de uma pequena quantidade de óleo na amostra, onde suas partículas, de densidade maior que a da água, ficam dispersas na matriz bloqueando a passagem da água.

Para teores maiores de óleo presentes na amostra, este provavelmente é adsorvido à superfície da partícula argilosa, não influenciando diretamente na condutividade hidráulica.

A partir de um certo teor de óleo, no caso aproximadamente 20%, o mesmo é adsorvido pela fração fina do solo por forças de Van Der Waals. As agregações de moléculas de hidrocarbonetos na formação micelar conduzem à atração substancialmente maior por forças de Van Der Waals na superfície da argila, sendo presumivelmente responsável pela remoção de moléculas do hidrocarboneto do meio aquoso (Yong e Rao, 1991). Este fenômeno poderia estar acontecendo para teores de óleo diesel acima de 20%, onde acontece a adsorção do óleo às partículas de solo, desobstruindo a passagem de água.

Para amostras sem contaminação, a condutividade hidráulica diminui com o aumento da quantidade de cimento Portland, corroborando estudos previamente relatados para este solo quando da adição de cimento Portland (Azambuja, 2004 e Santos, 2005).

A condutividade hidráulica varia devido à maior ou menor adsorção do óleo pela fração fina da matriz silto-argilosa de solo. A maior quantidade de óleo diesel causa também outros fenômenos na mistura, como: a inibição da expansão da fração esmectita presente na matriz de solo, o retardamento da hidratação do cimento e a flocculação do material. Estes três fenômenos podem levar a um aumento da condutividade hidráulica.

Os pontos com 5% de óleo diesel que estão apresentados na Figura 8 inicialmente não estavam previstos no programa experimental, mas foram realizados para corroborar os resultados apresentados com outros teores de óleo.

**Tabela 2** – Condutividade Hidráulica do material contaminado encapsulado.

Condutividade Hidráulica			
Óleo Diesel	Cimento		
	0%	10%	20%
0%	$7,74 \times 10^{-8}$ m/s	$3,42 \times 10^{-8}$ m/s	$1,76 \times 10^{-8}$ m/s
5%	$4,69 \times 10^{-8}$ m/s	$3,21 \times 10^{-8}$ m/s	$8,91 \times 10^{-9}$ m/s
10%	$5,77 \times 10^{-8}$ m/s	$2,01 \times 10^{-8}$ m/s	$4,15 \times 10^{-9}$ m/s
20%	$2,41 \times 10^{-8}$ m/s	$7,86 \times 10^{-9}$ m/s	$5,05 \times 10^{-9}$ m/s
40%	$2,99 \times 10^{-8}$ m/s	$2,38 \times 10^{-8}$ m/s	$9,02 \times 10^{-9}$ m/s

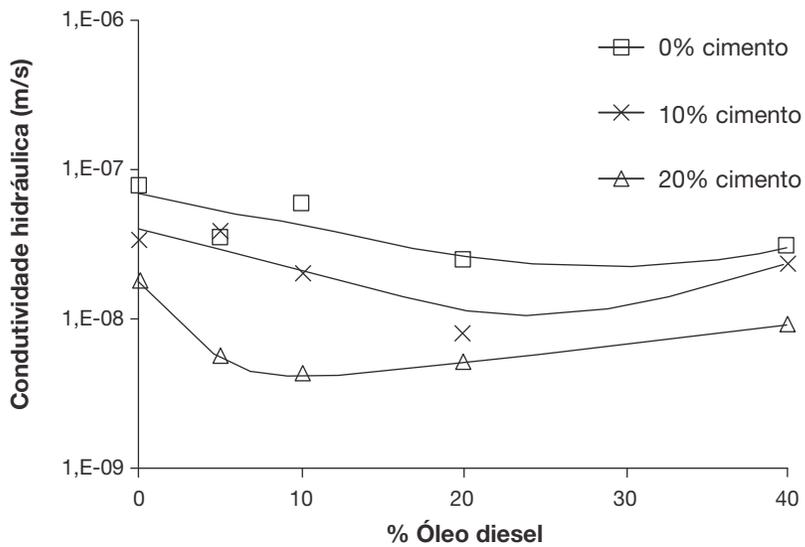


Fig. 8 – Coeficiente de Condutividade Hidráulica do material contaminado encapsulado.

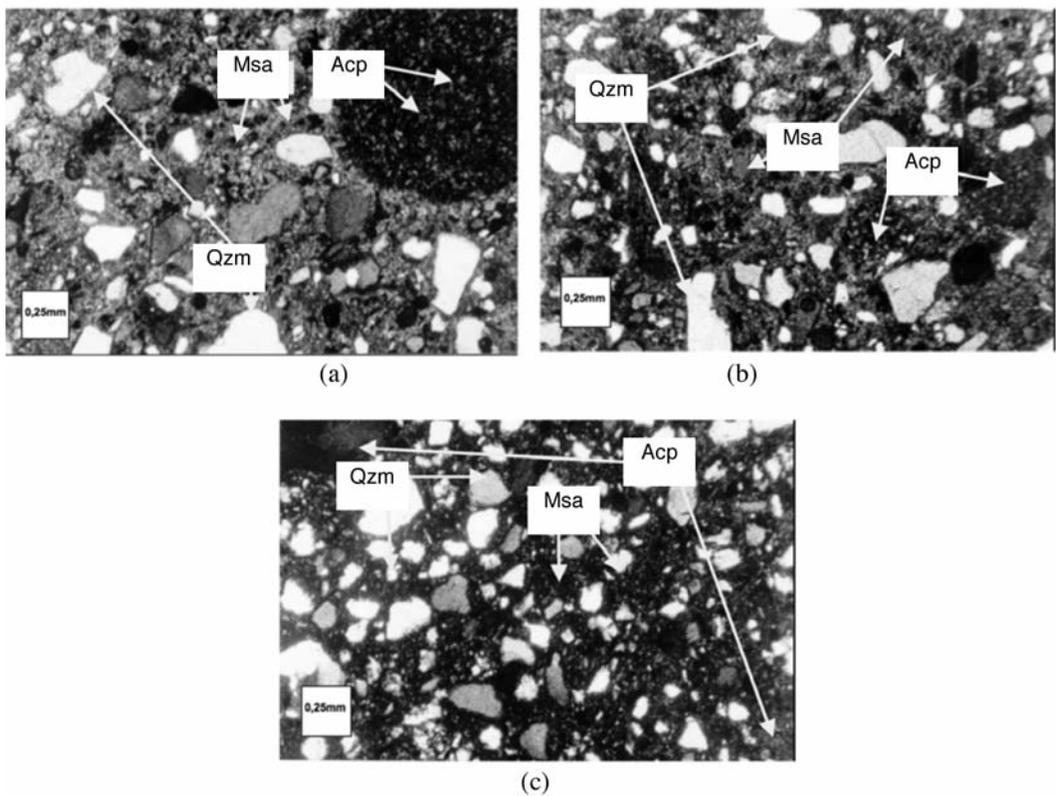


Fig. 9 – Fotomicrografias do solo residual do arenito Botucatu com teores de (a) 0%, (b) 10% e (c) 40% de óleo diesel. Aumento: 48x.

#### 4.5 – Microscopia Petrográfica

A partir de ensaios de microscopia petrográfica em várias amostras moldadas com distintas quantidades de óleo diesel, cujos resultados são apresentados na Figura 9, verifica-se que a amostra é constituída de grãos arredondados de quartzo monocristalino (Qzm), quartzo policristalino (Qzp), matriz silto-argilosa (Msa) e agregados de cimento Portland (Acp).

Pode-se observar uma mudança na coloração das amostras ensaiadas, sendo que esta mudança depende da quantidade de óleo presente. A amostra com 40% de óleo apresenta a matriz escurecida em relação às amostras sem óleo e com 10% de óleo diesel, que por sua vez é mais escura que a amostra sem contaminação, devido a maior adsorção do óleo às partículas de solo, ou seja, quanto maior a presença de óleo na amostra, mais escura ela se torna, para uma mesma quantidade de cimento.

### 5 – CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados obtidos no programa experimental foram estabelecidas as tendências e influências no comportamento do solo contaminado encapsulado, das principais variáveis estudadas: o teor de cimento e o teor de óleo diesel adicionados. Baseando-se nestes resultados, as seguintes considerações finais puderam ser estabelecidas:

A resistência à compressão não confinada aumenta com quantidades crescentes do cimento na amostra. Para as mesmas quantidades do cimento, a resistência diminui com o crescimento do óleo diesel na amostra. Com os ensaios de compressão não confinada realizados verifica-se que o solo contaminado encapsulado apresentou uma resistência aceitável para ser considerado um solo com características melhoradas à compressão para quantidades entre 0% e 20%.

Quanto aos ensaios de lixiviação em coluna, o aumento do teor de óleo conduz a um aumento do volume total de líquido lixiviado. Também foi possível constatar uma redução da quantidade de óleo presente no percolado, na ordem de 3 vezes para o caso de um solo com 40% de óleo, após adição de 20% de cimento. Nas simulações de contaminação onde foram empregados 10% de óleo, esta redução também foi percebida, porém o fato que se destaca é a capacidade da simples compactação do material em conter baixos níveis de contaminante, mesmo sem que se fizesse necessária a adição de agentes cimentantes. Na realidade, os valores da massa de óleo por volume de lixiviado, para um mesmo teor de óleo (seja 10% ou 40%), não são afetados pela introdução do cimento (pelo menos até o valor máximo de 20% de cimento utilizado na presente pesquisa), uma vez que a massa de óleo lixiviada e o volume total de líquido lixiviado são reduzidos na mesma proporção com a inserção de cimento. Baseado nestas afirmativas, pode-se afirmar que a presença do cimento diminui o volume total de líquido lixiviado e que não há nenhuma evidência que leve a concluir que o cimento introduza qualquer efeito sobre o óleo, em particular a alcalinidade, o que contraria grande parte das pesquisas realizada até o momento (Mayers e Eappi, 1992; Sawyer, 1994 e Baird, 2002), as quais afirmam que o aumento da alcalinidade é responsável pela diminuição da solubilidade dos contaminantes.

Para os ensaios de condutividade hidráulica observou-se um comportamento padrão para 0, 10 e 20% de cimento, onde inicialmente o coeficiente de condutividade hidráulica diminui, por ocasião do bloqueio de poros pelo óleo diesel que está disperso na matriz, e posteriormente tende a um valor quase constante, com pequena tendência ao aumento, por ocasião da adsorção do óleo que está em maior quantidade na amostra, para crescentes quantidades do óleo diesel.

Analisando-se conjuntamente os resultados dos diferentes ensaios, verifica-se que os ensaios de lixiviação em coluna e resistência à compressão simples apresentam uma tendência de compor-

tamento, onde, o aumento do teor de óleo conduz a uma redução da resistência e um aumento do volume total de líquido lixiviado e quanto maior a quantidade de cimento, maior a resistência e menor o volume total de líquido lixiviado. Já os resultados dos ensaios de condutividade mostraram, de maneira geral, que quanto maior o teor de cimento, menor a condutividade hidráulica, sendo os valores encontrados aceitáveis para a aplicabilidade da técnica de solidificação/estabilização de solos contaminados.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS [Projeto PRONEX-FAPERGS (04/0841.0)], ao CNPq (Projetos Produtividade em Pesquisa 300832/2004-4 e Edital Universal 472643/2004-5), e a CAPES (Projeto ProDoc) pelo apoio financeiro ao grupo de pesquisa.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 6502 (1995) *Solos e Rochas – Terminologia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6502. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 12025 (1990) *Solo-Cimento – Ensaio de Compressão Simples de Corpos-de-Prova Cilíndricos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12025. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 12770 (1992) *Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada*. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12770. Rio de Janeiro.
- APHA (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. 19th ed. Baltimore.
- ASTM D 4874 (1995) *Standard Test Method for Leaching Solid Material in a Column Apparatus*. American Society for Testing and Materials D 4874. Philadelphia.
- ASTM D 5084 (1990) *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. American Society for Testing and Materials D 5084. Philadelphia.
- Azambuja, R. M. B. (2004) *Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas de Solo-Cimento-Bentonita para a Aplicação em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- Baird, C. (2002) *Química Ambiental*. Bookman Ed., 2a Edição, Rio de Janeiro.
- Caberlon, R.C. (2004) *Condutividade Hidráulica em Solos Contaminados Encapsulados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- Knop, A. (2003) *Encapsulamento de Solos Contaminados por Hidrocarbonetos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- Mayers, T. E.; Eappi, M. E. (1992) *Laboratory evaluation of stabilization/solidification technology for reducing the mobility of heavy metals in New Bedford Harbor superfund site sediments stabilization of hazardous radioactive and mixed wastes*. 2<sup>nd</sup> edition. ASTM publication, Philadelphia.
- Pollard, S. J. T.; Montgomery, D. M.; Sollars, C. J.; Perry, R. (1991) *Organic compounds in the cement-based stabilization/solidification of hazardous mixed wastes-Mechanistic and process considerations*. Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, vol. 18, p. 313-327.

- Santos, A. B. (2005) *Comportamento de liners sob a influência de um contaminante orgânico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- Sawyer, C. (1994) *Chemistry for Environmental Engineering*. McGraw Hill International, 4th Edition.
- Skempton, A. W. (1954) *The pore pressure coefficients A and B*. Géotechnique, London, vol. 4, p. 143-147.
- USACE (1995) *Tractability Studies for Solidification/ Stabilization of Contaminated Material*. United States Corps of Engineers, Technical Letter N° 1110-1-158. Washington.
- Wiles, C. C. (1987) *A review of solidification/stabilization technology*. Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, vol. 14, p. 5-21.
- Yong, R. N.; Rao, S. M. (1991) *Mechanistic Evaluation of Mitigation of Petroleum hydrocarbon contamination by soil medium*. Canadian Geotechnical Journal. vol. 28. p. 84-91.