

# AVALIAÇÃO DA EFETIVIDADE DO ENCAPSULAMENTO DE UM SOLO CONTAMINADO POR BORRA OLEOSA ÁCIDA

Evaluation of the encapsulation effectiveness of a oily sludge contaminated soil

José Waldomiro Jiménez Rojas

Karla Salvagni Heineck

Nilo Cesar Consoli

**RESUMO** – A avaliação da efetividade da técnica de encapsulamento de um solo contaminado consistiu na realização de estudos pré e pós-tratamento, analisando fisicamente o solo contaminado através de ensaios de resistência à compressão simples, durabilidade e condutividade hidráulica. Devido ao despreendimento de calor detectado no momento das misturas de solo/cimento e o resíduo borra oleosa ácida, foram realizados ensaios para o monitoramento do tempo de hidratação da mistura solo/cimento. Os resultados apontam que quanto maior a quantidade de resíduo oleoso presente no solo tratado para uma mesma quantidade de cimento Portland, maior é a temperatura de hidratação do cimento, mais rápido o despreendimento de calor, menor a resistência à compressão simples e maior a perda de massa.

**PALAVRAS CHAVE** – Encapsulamento, Comportamento Físico, Solo Contaminado.

**SYNOPSIS** – The evaluation of the encapsulation effectiveness of a contaminated soil consisted of studies pre and post-treatment, in which the soil was physically analyzed through geotechnical characterization, compaction, unconfined compressive strength, durability and hydraulic conductivity tests. Due to the high temperatures detected during the soil/cement and the acid oily sludge mixing, tests were carried out to measure the temperature and the hydration rate of the cement. The results showed that the greater the amount of acid oily sludge in the treated soil, the higher the cement hydration temperature and the faster it reaches the maximum peak, which results in lower unconfined compressive strength values and greater mass loss.

**KEY WORDS** – Contaminated Soils, Encapsulation, Physical Behavior.

## 1 – INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo é a responsável pela geração de grandes quantidades de resíduos oleosos e viscosos. Estes resíduos, quando mal gerenciados resultam na degradação ambiental, com contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas.

A tecnologia de solidificação/estabilização ou encapsulamento vem-se tornando uma importante alternativa para o tratamento e a disposição de resíduos perigosos e controle de áreas conta-

---

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

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

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

minadas, pois provê o melhoramento das características físicas e toxicológicas do resíduo e/ou solo, facilitando o seu gerenciamento de forma segura e eficaz. Além disso, o custo do processo de solidificação/estabilização tem sido considerado baixo em relação a outras técnicas de tratamento, fator este que tem impulsionado o desenvolvimento desta tecnologia nos últimos anos.

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, condutividade hidráulica, durabilidade, entre outros.

Uma das principais vantagens da técnica de solidificação/estabilização é a transformação de um solo contaminado num novo material com elevada resistência. Conforme LaGrega *et al.* (2001), os ensaios de resistência à compressão simples para avaliar a eficácia da técnica de solidificação/estabilização são aplicados e difundidos como padrão internacional. O autor destaca ainda que a resistência à compressão simples, medida em poucos dias, não é capaz de prever o comportamento a longo prazo de amostras encapsuladas, portanto deve-se considerar a durabilidade do composto tratado, como também a forma e com que facilidade os líquidos percolaram pelas amostras.

Este artigo tem como objetivo avaliar a efetividade do encapsulamento, ou seja, investigar o comportamento físico de amostras de solo/cimento contaminadas por um resíduo oleoso industrial através de ensaios de resistência a compressão simples, durabilidade e condutividade hidráulica. Pretende-se, além disto, realizar o monitoramento da temperatura de hidratação do cimento das misturas de solo/cimento e solo/cimento/contaminante e correlacioná-las com o comportamento físico das amostras encapsuladas.

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

A técnica de solidificação/estabilização 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. Conforme 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.

Para Stergemann e Buenfeld (2002), o encapsulamento com cimento Portland ou outro agente cimentante hidráulico é geralmente sugerido como melhor tratamento para rejeitos que não podem ser eliminados ou reciclados. Mayers & Eappi (1992) destacam que a utilização de materiais cimentícios tem sido usada há décadas no tratamento final para a disposição de rejeitos químicos e radiativos.

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. Schwarz e Krizek (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. Os autores citam que a saturação do solo tem grande influência nos valores de resistência.

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.

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).

Pollard *et al.* (1991) destacam que inúmeras pesquisas mostram que os resíduos orgânicos podem apresentar efeitos prejudiciais na hidratação de materiais cimentícios e pozolânicos. Os autores afirmam que mesmo em baixas concentrações, os resíduos orgânicos podem produzir mudanças micro e macroestruturais significativas nas propriedades de hidratação do cimento. Neste mesmo contexto Knop (2003) relata que a resistência à compressão simples de um solo contaminado com cimento Portland diminui conforme aumenta a quantidade de óleo diesel. Segundo o autor, este comportamento demonstra que a presença de um contaminante orgânico altera o processo de hidratação do cimento, podendo até mesmo inibir a hidratação.

Lemos (2006) monitorou o calor de hidratação do cimento, porém os ensaios tiveram por objetivo avaliar a influência de substâncias agressivas na temperatura de cura e conseqüentemente, na obtenção de resistência do cimento mediante contaminação. O autor destaca que logo que o cimento foi acrescentado ao ácido sulfúrico, a mistura atingiu altas temperaturas em um pequeno intervalo de tempo. O calor de hidratação, resultante das reações exotérmicas, pode ser um problema, resultando em uma rápida liberação de calor, gerando fissuras que possivelmente alteraram o comportamento físico de um solo cimentado.

### 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental compreendeu ensaios de resistência à compressão simples, durabilidade, condutividade hidráulica e monitoramento da temperatura de hidratação.

Segundo Ibáñez *et al.* (1998), a tecnologia de solidificação/estabilização 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, portanto, foram adotados 10% e 20% de cimento em relação ao peso dos sólidos na densidade máxima seca obtida pelas curvas de compactação, com energia Proctor normal, realizados 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 a umidade da borra oleosa ácida (4,5% de umidade a 60°C) foi descontada da umidade ótima de compactação, para fins de controle de umidade das amostras.

#### 3.1 – Materiais utilizados

##### a) 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% (0,002 a 0,075mm) de sua composição total, além de 22% de argila (< 0,002mm) e 35% de areia (> 0,075mm). 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 (Gs) de 2,72.

Pelo método HRB - *Highway Research Board* o solo é classificado como siltoso não plástico ou moderadamente plástico. Pelo método da classificação unificada, USCS - *Unified Soil Classification System*, o solo apresenta-se como um silte de baixa compressibilidade.

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. As curvas de compactação são apresentadas pelas Figuras 1 (a) e (b).

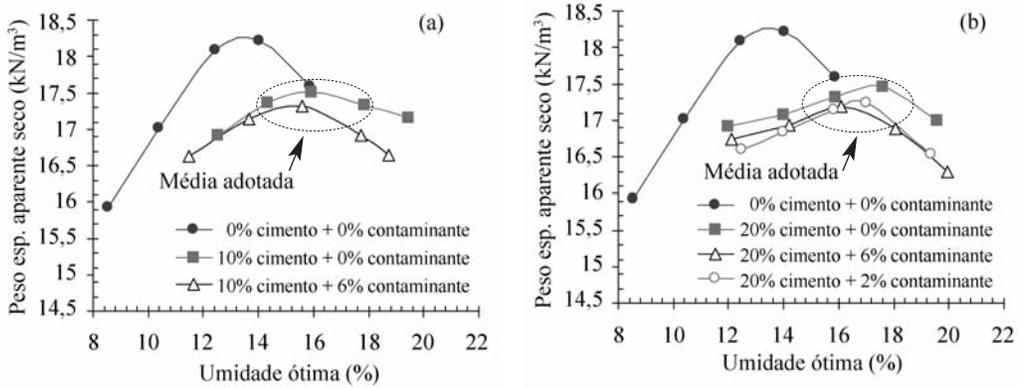


Fig. 1 – Curvas de compactação do solo natural, (a) 10% de cimento (b) 20% de cimento.

Os resultados tanto de umidade ótima quanto de peso específico máximo 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 do solo a umidade ótima obtida foi de 13,5% e o peso específico de 18,25  $\text{kN/m}^3$ . Com a adição de 10% de cimento, na mistura de solo natural e solo contaminante, a média da umidade ótima é de 15,73% e a média dos pesos específicos é de 15,73%. Já para 20% de cimento, adicionados no solo natural e solo contaminado, obteve-se uma umidade ótima média de 16,82% e um peso específico médio de 17,31  $\text{kN/m}^3$ .

#### b) Cimento

Como agente cimentante para o encapsulamento do solo contaminado, adotou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). 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, otimizando a execução do programa experimental.

#### c) Água

Para os ensaios de condutividade hidráulica foi utilizada água destilada, tanto para moldagem como também para fluido percolante. Para os ensaios de resistência à compressão simples, durabilidade e demais ensaios de caracterização foi utilizada a água disponível na rede pública de abastecimento.

#### d) Borra oleosa ácida

O contaminante utilizado nesta pesquisa é o resíduo, denominado borra oleosa ácida, 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.

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.

## **3.2 – Equipamentos**

Os ensaios para a determinação da condutividade hidráulica, segundo a ASTM D 5084 (1990), foram realizados no equipamento permeâmetro de parede flexível. A descrição detalhada deste equipamento encontra-se em Cruz (2004).

Para representar o equipamento, utilizado para o monitoramento da temperatura de hidratação do cimento e das misturas de cimento, solo e contaminante, descrito pela norma NBR 12006 (1990) - Garrafa de Langavant -, utilizou-se uma caixa térmica revestida internamente com manta impermeabilizante e lã de vidro. Este equipamento permitiu a coleta de dados a cada dois segundos por 24 horas. Detalhes do equipamento encontram-se descritos em Rojas (2007).

## **3.3 – Métodos**

### ***3.3.1 – Caracterização do solo e Compactação***

A análise granulométrica do solo foi realizada por peneiramento e sedimentação seguindo o procedimento proposto na NBR 7181 (ABNT, 1984). Como agente defloculante foi utilizada a solução de hexametáfosfato de sódio. O limite de liquidez e o limite de plasticidade foram determinados segundo a NBR 6459 (ABNT, 1984) e a NBR 7180 (ABNT, 1984), respectivamente. A massa específica real dos grãos foi determinada conforme o procedimento proposto pela NBR 6508 (ABNT, 1984). Os ensaios de compactação foram realizados segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 1986).

### ***3.3.2 – Preparação das amostras***

A mistura foi realizada pela seguinte ordem: [(solo + cimento) + borra oleosa ácida] + água. Após a mistura, 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 era retirada para o controle da umidade. A cura dos corpos-de-prova foi de 7 dias para todos os ensaios realizados, fora de câmara úmida e dentro de sacos plásticos em local de temperatura constante.

### ***3.3.3 – Monitoramento da temperatura de hidratação***

Com o propósito de verificar a influência do contaminante borra oleosa ácida sobre as reações exotérmicas de hidratação do cimento, foram realizados ensaios em amostras de solo/cimento/contaminante/água na mesma proporção utilizada na moldagem dos corpos-de-prova de resistência à compressão simples, durabilidade e condutividade hidráulica.

A amostra, depois de homogeneizada, foi acondicionada dentro de um frasco de vidro e armazenada em uma caixa térmica. As coletas dos dados de temperatura foram realizadas através de um termopar (tipo “K”) previamente introduzido na mistura. As leituras e os registros das temperaturas foram efetuados com auxílio de um multímetro com cabo de interface RS-232 o qual fazia a comunicação com o software de aquisição de dados.

### **3.3.4 – 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. Antes do rompimento, os corpos-de-prova foram imersos em água por um período de 4 horas. A velocidade de deformação utilizada é de 1,14mm/min.

### **3.3.5 – Durabilidade**

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 e n° 2 e a referida dosagem.

Ao final da cura as duas amostras foram imersas em água durante 5 horas e retiradas. 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.

### **3.3.6 – Condutividade hidráulica**

Os ensaios de condutividade hidráulica basearam-se 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. 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 foi aplicado no corpo-de-prova através do incremento de tensão no topo da amostra e da diminuição, de mesma magnitude (carga hidráulica), em sua base, registrada pelos transdutores eletrônicos de pressão. Baseando-se na medição do volume de água que entra e que sai da amostra (vazão), através de tubos graduados conectados aos acumuladores de entrada e saída de água e o tempo total de ensaio, calculou-se o coeficiente de condutividade hidráulica, de acordo com a lei de Darcy.

Considerando que a variação do volume de água dentro dos acumuladores é muito pequena e as tensões aplicadas relativamente altas, assumiu-se que a variação na carga hidráulica era desprezível. Como resultado, o teste foi considerado como um teste de carga constante.

## 4 – RESULTADOS

### 4.1 – Monitoramento da temperatura de hidratação

A partir da constatação do calor gerado no momento das misturas de solo, borra oleosa ácida, cimento e água para a moldagem dos corpos-de-prova de resistência à compressão simples, durabilidade e condutividade hidráulica, decidiu-se monitorar a temperatura de hidratação das misturas de solo/cimento/ e solo/cimento/contaminante.

Os resultados do teste de hidratação tornam-se importantes, pois auxiliam na previsão de como será a cura do cimento, dando uma indicação da possível qualidade do material cimentado.

Na Figura 2 tem-se a evolução da temperatura das misturas de solo com 10% (a) e 20% (b) de cimento para crescentes quantidades de borra oleosa ácida. Logo que a borra oleosa ácida foi acrescentada ao cimento a mistura apresentou um acréscimo de temperaturas em um pequeno intervalo de tempo, tendo aquecido inclusive o recipiente onde a mesma foi realizada, gerando forte odor.

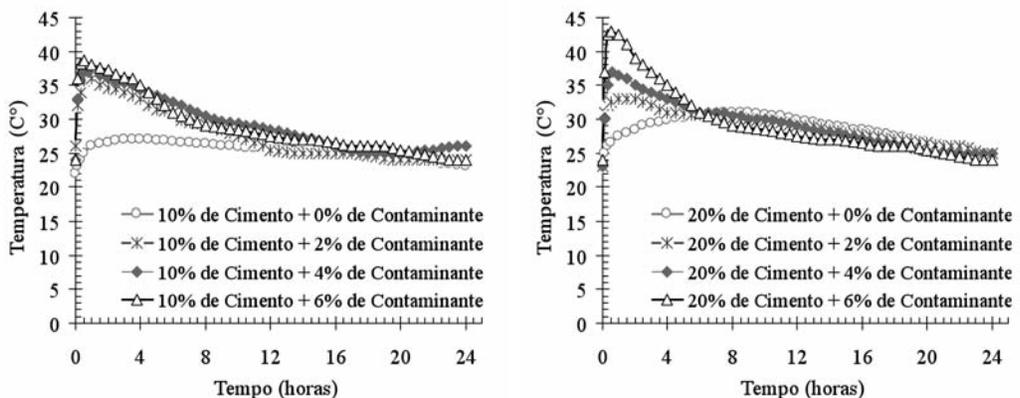


Fig. 2 – Evolução da temperatura ao longo do tempo nas misturas de solo com 10% (a) e 20% (b) de cimento para 0, 2, 4 e 6% de borra oleosa ácida.

Neville (1997) destaca que não é necessariamente a quantidade de calor de hidratação que preocupa, mas sim a velocidade com que esse calor se desprende. Desse modo, os resultados estão apresentados em gráficos de tempo versus temperatura.

A partir do comportamento das curvas ilustradas na Figura 2, verifica-se que as misturas de solo/cimento/borra oleosa ácida apresentam um tempo praticamente igual para atingir o pico máximo de temperatura, não importando a quantidade de contaminante e o teor de cimento.

### 4.2 – Análise do comportamento físico

#### 4.2.1 – Resistência à compressão simples

A Figura 3 ilustra o comportamento da resistência à compressão simples, aos 7 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.

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 dos corpos-de-prova. Possivelmente, o ganho de resistência das amostras contaminadas está relacionado com as características físicas da borra

oleosa ácida, ou seja, 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.

Segundo os resultados verificou-se 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.

Outro motivo da perda de resistência pode estar relacionado com o elevado calor liberado pela hidratação do cimento nos minutos iniciais da mistura, podendo levar ao aparecimento de fissuras de origem térmica, produzindo uma estrutura fisicamente mais pobre.

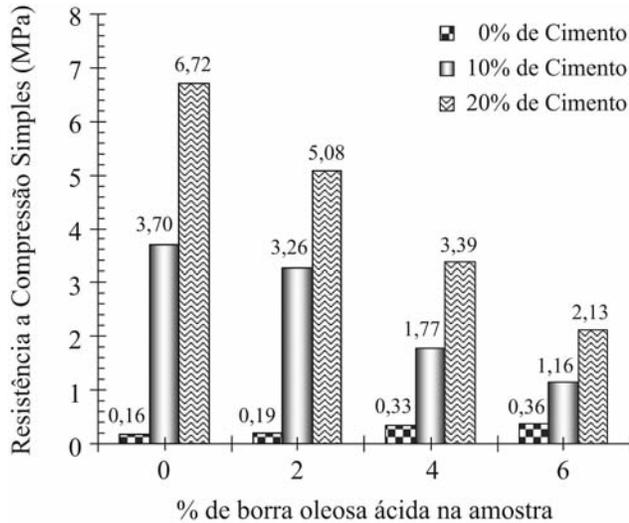


Fig. 3 – Resistência à compressão simples das variadas misturas de solo/cimento e solo/cimento/borra oleosa ácida.

#### 4.2.2 – Durabilidade

A Figura 4 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.

Os resultados obtidos demonstram que o aumento de borra oleosa ácida nas amostras encapsuladas fez com que houvesse 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 resultado de aproximadamente 10%, 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%.

Devido à falta de limites balizadores para o ensaio de durabilidade por molhagem, secagem e escovamento proposto pela NBR 13554 (ABNT, 1996) foram utilizados os limites estabelecidos por De la Fuente (1995) e ASTM 559 (1996), os quais estabelecem como boa durabilidade perda de massa inferior a 10% para 12 ciclos de molhagem, secagem e escovamento. Porém o ensaio proposto pela norma brasileira assume 6 ciclos de molhagem, secagem e escovamento.

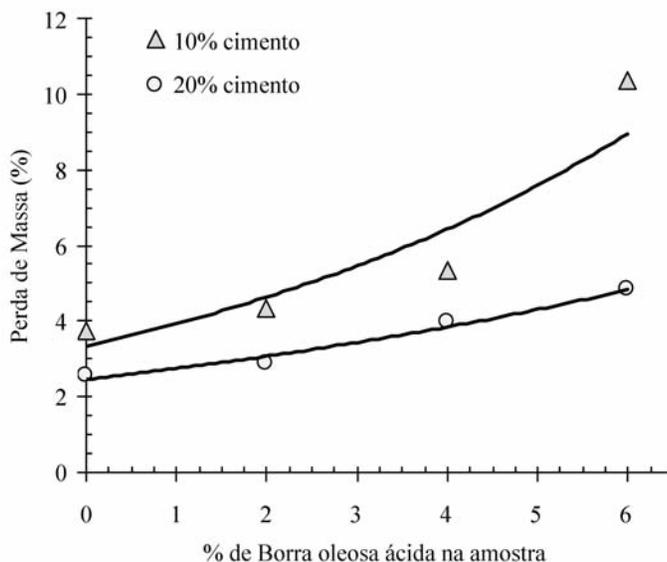


Fig. 4 – Perda de massa em relação à porcentagem de borra oleosa ácida e cimento nas amostras.

Para os corpos-de-prova encapsulados com 10% de cimento contendo 0% e 2% de borra oleosa ácida, percebe-se que a durabilidade por perda de massa encontra-se abaixo do limite de 10%, e se comparado, proporcionalmente, o número de ciclos com a metade do limite estabelecido, estas amostras atestariam boa durabilidade. Já para amostras com a mesma quantidade cimento, porém, quantidades maiores de borra oleosa ácida, os resultados apontam uma perda de massa maior, sendo que para 6% de contaminante, com 6 ciclos, a perda de massa extrapolaria o limite máximo, sendo considerado um material de baixa durabilidade.

Nos corpos-de-prova contendo 20% de cimento e contaminado com crescentes quantidades de borra oleosa ácida observa-se que todos os resultados de perda de massa estão abaixo de 5%. Neste caso, comparando os resultados obtidos através da NBR 13554 (ABNT, 1996) com os limites da ASTM 559 (1996), estas amostras atestam boa durabilidade.

#### 4.2.3 – Condutividade hidráulica

Os resultados obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica estão apresentados na Figura 5. 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 quantidades de 2% e 4% 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.

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 tornou a aumentar, chegando a  $2,12 \times 10^{-6}$  cm/s. Vale

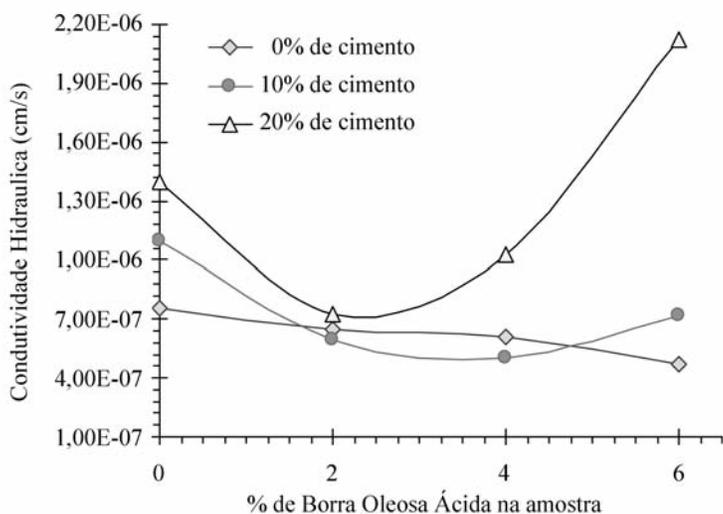


Fig. 5 – Condutividade hidráulica de amostras contaminadas e tratadas com cimento Portland.

ressaltar que o calor de hidratação da mistura solo/cimento/borra oleosa ácida, constatado taticamente na moldagem dos corpos-de-prova e detectado através do monitoramento da temperatura de hidratação do cimento, possivelmente favorece o aumento da condutividade hidráulica.

Segundo Lemos (2006), uma hidratação inicial rápida, aparentemente, forma produtos com uma estrutura fisicamente mais pobre, provavelmente mais porosa, de modo que uma fração dos poros permanecerá sempre não preenchida. Deste modo, o desprendimento de energia acelerado também poderá criar fissuras internas nos corpos-de-prova, favorecendo a percolação da água.

### 4.3 – Correlação dos resultados quanto ao comportamento físico

Na Figura 6 são apresentados os resultados obtidos para a relação de resistência à compressão simples 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.

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, de forma esperada, nota-se que a perda de massa e perda de resistência ocorre em maior grau para as amostras com menor teor de cimento.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão simples versus condutividade hidráulica são apresentados na Figura 7.

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.

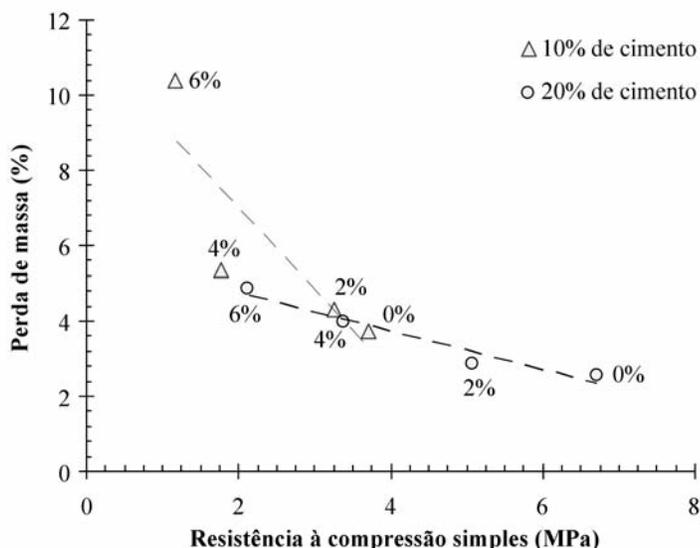


Fig. 6 – Resistência à compressão simples versus perda de massa.

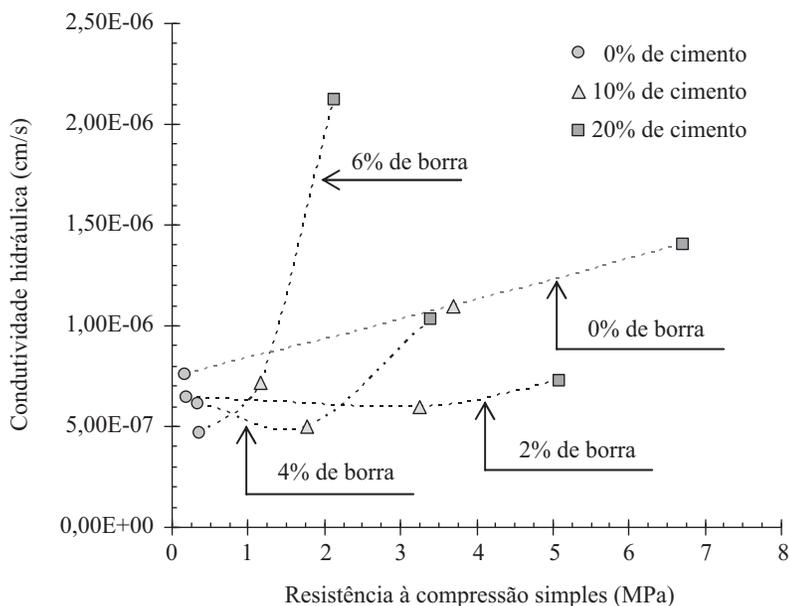


Fig. 7 – Resistência à compressão simples versus condutividade hidráulica.

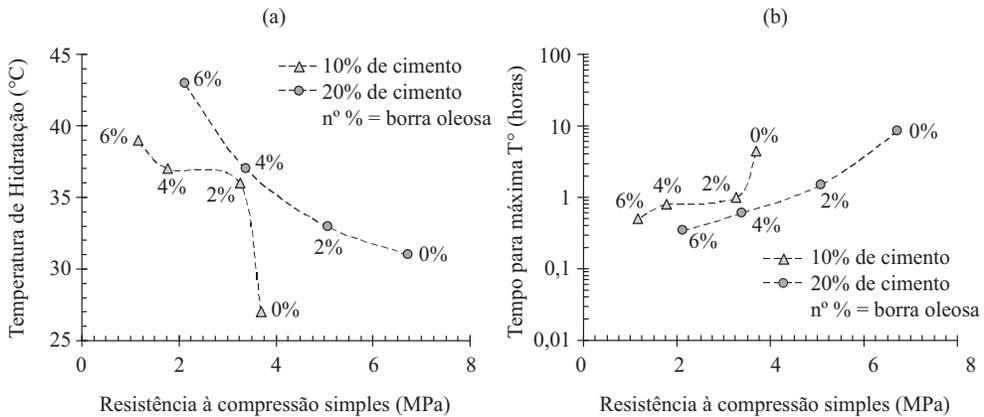
#### 4.4 – Correlação dos resultados quanto ao comportamento físico versus temperatura de hidratação

Na Figura 8 (a) são apresentados os resultados obtidos para a relação entre a resistência à compressão simples versus a temperatura de hidratação para as amostras de solo/cimento e solo contaminado com crescentes quantidades de borra oleosa ácida, encapsulados com cimento.

Analisando a figura citada, percebe-se que a temperatura de hidratação está relacionada com a perda de resistência das amostras encapsuladas, ou seja, quanto mais alta a temperatura menor a resistência à compressão simples, tanto para amostras com 10% de cimento, como para amostras com 20% de cimento.

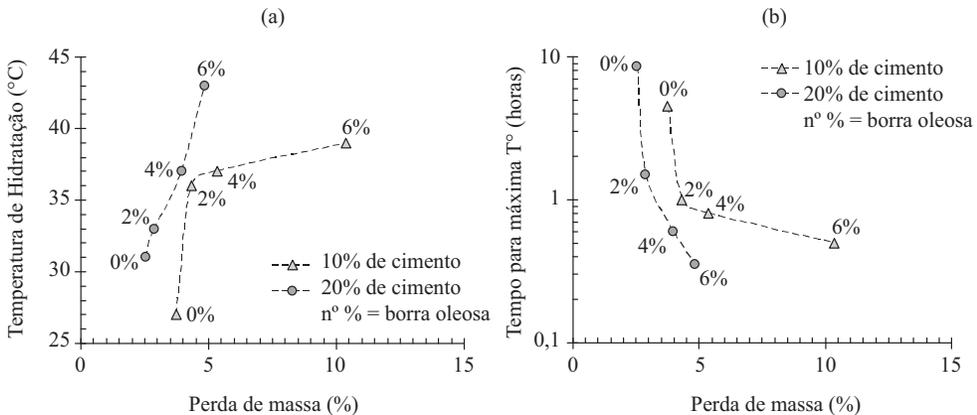
Vale realçar que para todas as amostras contaminadas e encapsuladas, além das reações exotérmicas provenientes da hidratação do cimento, também há as reações exotérmicas do ácido sulfúrico presente na borra oleosa ácida, o qual libera calor com o contato com água.

A partir do tempo necessário para se obter a temperatura máxima de hidratação do cimento pode-se relacionar o tempo necessário para atingir o pico máximo de temperatura ( $T^\circ$ ) com a perda de resistência à compressão simples, como pode ser visualizado através da Figura 8 (b). Portanto, constata-se que quanto maior a quantidade de borra oleosa ácida nas amostras, mais rápida a dissipação de calor máximo e menor a resistência.



**Fig. 8** – (a) Resistência à compressão simples versus temperatura de hidratação. (b) Resistência à compressão simples versus tempo para a máxima temperatura.

Verifica-se, através da Figura 9 (a), que o calor gerado pela hidratação do cimento exerce certa influência na perda de massa dos corpos-de-prova contaminados e encapsulados. Constata-se que quanto maior a quantidade de cimento no solo, contaminado ou não, menor a perda de massa.



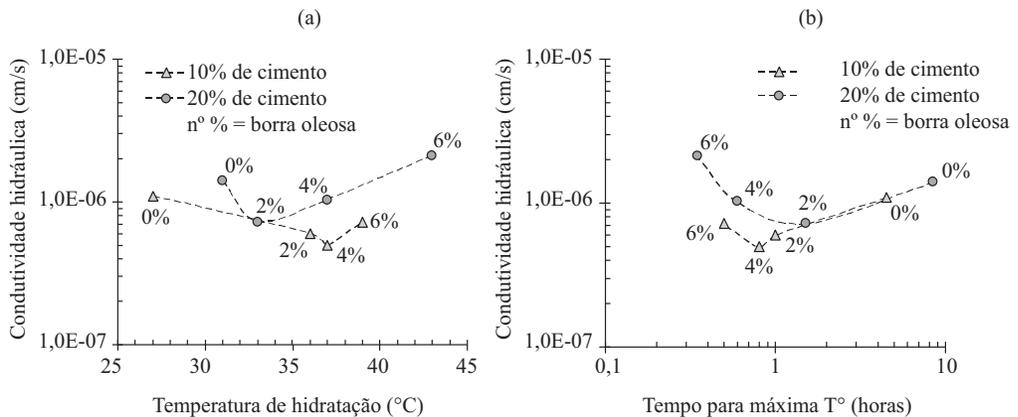
**Fig. 9** – (a) Perda de massa versus temperatura de hidratação. (b) Perda de massa versus tempo para a máxima temperatura.

No entanto quanto maior a quantidade de borra oleosa ácida maior a perda de massa. Em relação ao calor de hidratação é possível observar que quanto mais elevada a temperatura do composto solo/cimento/borra/água maior a perda de massa, não importando a quantidade de cimento.

Na Figura 9 (b) é possível observar a influência do tempo de hidratação sobre a perda de massa do solo contaminado e encapsulado. Os resultados levam a afirmar que quanto maior o tempo necessário para o desprendimento ou liberação total de calor, melhor será a condição dos corpos-de-prova encapsulados. Este fato é facilmente visualizado na Figura 9 (b), onde percebe-se que quanto maior o tempo para o auge da temperatura máxima, menor é a perda de massa, ou seja, quanto menor a quantidade de borra oleosa ácida, menor o tempo e menor a perda de massa.

Utilizando os resultados de condutividade hidráulica com a respectiva temperatura de hidratação, pode-se verificar que, inicialmente, há uma diminuição de condutividade hidráulica com o aumento da temperatura em amostras encapsuladas com 10% de cimento, sendo que, para 6% de contaminante a condutividade hidráulica volta a aumentar e a temperatura continua em elevação.

Para amostras encapsuladas com 20% de cimento o comportamento é variável, observa-se um aumento gradual de temperatura e inicialmente uma diminuição de condutividade para 2% de borra oleosa ácida, voltando a aumentar com a crescente quantidade de cimento. Estes comportamentos estão apresentados na Figura 10 (a).



**Fig. 10** – (a) Temperatura de hidratação versus condutividade hidráulica. (b) Tempo para a máxima temperatura versus condutividade hidráulica.

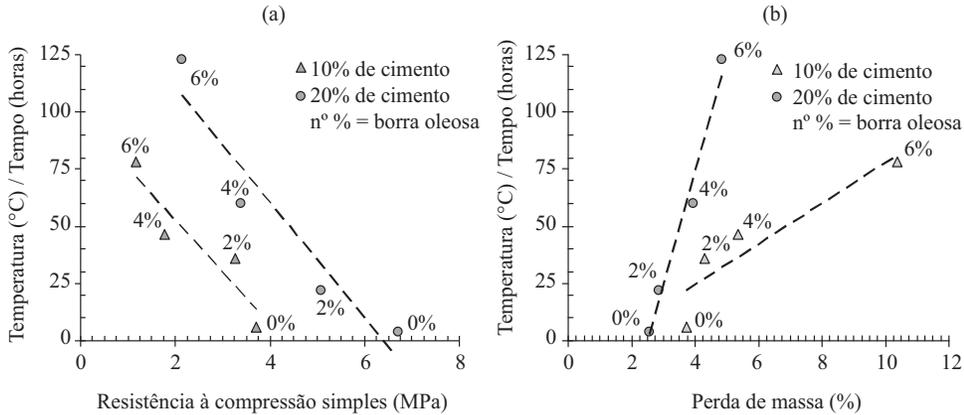
Quanto ao tempo necessário para a obtenção do pico máximo de temperatura ( $T^\circ$ ), percebe-se que para os dois teores de cimento estudados o comportamento é o mesmo, a condutividade hidráulica inicialmente decresce, diminuindo também o tempo para a obtenção da temperatura máxima. Com o aumento de borra oleosa ácida, nas amostras com 20% de cimento, percebe-se o menor tempo de espera para a máxima temperatura e a maior condutividade hidráulica entre todas as amostras analisadas, como visto na Figura 10 (b).

#### 4.5 – Análise global das correlações

O comportamento físico, quanto à resistência a compressão simples e durabilidade por perda de massa dos solos encapsulados mostra-se bastante dependente do teor de borra oleosa ácida contida nas amostras de solo. O comportamento é padrão para os ensaios realizados, ou seja, quanto maior a resistência menor a perda de massa, quanto maior a quantidade de cimento mais satisfatório o resultado.

Em termos de resistência à compressão simples, tem-se que um solo encapsulado e contaminado com crescentes quantidades de borra oleosa ácida perde resistência com o aumento da tempe-

ratura gerada a partir das reações exotérmicas do cimento e do ácido sulfúrico proveniente do reprocessamento do óleo lubrificante usado, borra oleosa ácida. Porém, vale realçar que a temperatura não exerce influência significativa, mas sim a velocidade com que o calor é liberado, como pode ser observada pelas Figuras 11 (a) e (b), onde estão apresentadas as relações entre temperatura máxima/tempo máximo de hidratação versus a resistência à compressão simples e a perda de massa.



**Fig. 11** – (a) Relação temperatura e tempo máximo de hidratação versus resistência a compressão simples. (b) Relação temperatura e tempo máximo de hidratação versus perda de massa.

As reações entre o cimento e a água são responsáveis pela formação da estrutura da matriz solo/cimento, o elevado calor gerado e a velocidade com que é alcançada a temperatura máxima, geram indícios de que esse comportamento afeta a estrutura, tornando-a menos resistente e vulnerável as degradações exercidas por ciclos de molhagem e secagem. Além de possivelmente criar fissuras internas, originadas por alterações volumétricas causadas pela variação de temperatura, as quais permitem que haja uma maior condutividade hidráulica.

## 5 – CONCLUSÃO

Através dos ensaios laboratoriais estabelecidos no programa experimental as seguintes considerações finais puderam ser estabelecidas:

Utilizando o ensaio de monitoramento e determinação da temperatura de hidratação constatou-se que a adição de borra oleosa ácida ao cimento gera elevadas temperaturas em um curto espaço de tempo. A liberação de calor é devido principalmente às reações exotérmicas do cimento, como já esperado, e as possíveis reações exotérmicas do ácido sulfúrico presente na borra oleosa ácida.

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 condutividade hidráulica do solo sem cimento tende a diminuir com o aumento da quantidade de borra oleosa ácida. Em hipótese, acredita-se que a diminuição de condutividade hidráulica em amostras de solo contaminado e não cimentado esteja relacionada com as características físicas da borra oleosa ácida, tais como a viscosidade, a ação ligante e a ação impermeabilizante, características de materiais betuminosos.

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 pode explicar a perda de resistência à compressão simples e o aumento da perda de massa.

A relação entre a 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 análogas, pois uma alta resistência significa uma baixa vulnerabilidade aos fatores climáticos.

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.

Quando analisada a resistência à compressão simples e a perda de massa em função da temperatura de hidratação e do tempo de hidratação, tem-se que quanto mais elevada a temperatura e mais rápida a velocidade de liberação de calor, menor é a resistência e maior a perda de massa das amostras de solo contaminado e encapsulado.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PRONEX-FAPERGS (Processo n° 04/0841.0) e ao CNPq (Projetos Edital Universal 2004 n° 472643/2004-5 e Produtividade em Pesquisa n° 300832/2004-4) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa. Além disto, o primeiro autor gostaria de registrar os agradecimentos à unidade financiadora de sua bolsa de mestrado, a CAPES.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials (1990). D 5084 *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter*. Philadelphia.
- American Society for Testing and Materials (1996). D 559 *Test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures*. Philadelphia.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990). *NBR 12006 Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). *NBR 12770 Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). *NBR 12025 Solo-cimento – Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996). *NBR 13554 Solos cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). *NBR 7182 Solos – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). *NBR 7181 Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). *NBR 6459 Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7180 Solo - *Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6508 Solo - *Determinação da massa específica aparente*. Rio de Janeiro.
- Cruz, R. C. (2004). *Condutividade hidráulica em solos contaminados encapsulados*. Dissertação de Mestrado em Engenharia, PPGEC/UFRGS. 109p. .
- De La Fuente, E. L. (1995). *Suelo-cemento, usos, propiedades y aplicaciones*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., México, p.56.
- Ibañez, R.; Andrés, A.; Ortiz, I.; Irabien, J. A. (1998). *Experimental study of the waste binder anhydrite in the solidification/stabilization process of heavy metal sludges*. Elsevier, *Journal of Hazardous Materials*, v. 57. p. 155-168.
- Lagrega, M. D.; Buckingham P. L.; Evans, J. C. (2001) *Hazardous waste management and environmental resources management*. 2nd Edition, 1157p..
- Lemos, R. G. (2006). *Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas*. Tese de Doutorado em Engenharia, PPGEC/UFRGS. 282p..
- Li, X. D.; Poon, C. S.; Sun, H.; Lo, I. M. C; Kirk, D. W. (2001). *Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials*. *Journal of Hazardous Materials*. v. A82. p. 215-230.
- Lovato, R. S. (2004). *Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal aplicado a pavimentação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia, PPGEC/UFRGS. 164p..
- Klich, I.; Bachelor, B; Wilding, L. P; Drees, L. R. (1999). *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.
- Knop, A. (2003). *Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos*. Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS. 67p..
- 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*. Second edition. ASTM publication, Philadelphia, 304p..
- Neville, A. M. (1997). *Properties of concrete*. São Paulo: Pini.
- 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*. Elsevier, *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v.28, p. 313-327.
- Rojas, J. W. J. (2007). *Estudo de remediação de solo contaminado por borra oleosa ácida utilizando a técnica de encapsulamento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia, PPGEC/UFRGS. 150p..
- Schwarz, L. G.; Krizek R. J. (2006). *Hydrocarbon Residuals and Containment in Microfine Cement Grouted Sand*. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 18, n. 2, 214-228.
- Skempton, A. W. (1954). *The pore pressure coefficients A and B*. *Géotechnique*, London, v.4, p. 143-147.

- Stegemann, J. A.; Buenfeld, N. R. (2002). *Prediction of leachate pH for cement paste containing pure metal compounds*. Elsevier, *Journal of Hazardous Materials*. Amsterdam, v. B90. p. 169-188.
- U. S Army Corps of Engineers (USACE) (1995). *Tractability Studies for Solidification/Stabilization of Contaminated Material*. Technical Letter N° 1110-1-158. Washington.
- Wiles, C. C. (1987). *A review of solidification/stabilization technology*. *Journal of Hazardous Materials*. Amsterdam, v. 14. p. 5-21.