

# COMPORTAMENTO DE LINERS SOB A INFLUÊNCIA DE UM CONTAMINANTE ORGÂNICO

Behaviour of liners under the influence of an organic contaminant

Karla Salvagni Heineck\*

Augusta Brenner dos Santos\*\*

Rosemar Gomes Lemos\*\*\*

Juan Antônio Altamirano Flores\*\*\*\*

Nilo Cesar Consoli\*\*\*\*\*

**RESUMO** – Neste artigo é discutido o comportamento hidráulico e mecânico de misturas de Solo-Bentonita (SB) e de Solo-Cimento-Bentonita (SCB) quando permeadas com água e óleo diesel, assim como a influência da variação do teor de cimento com a finalidade de propiciar resultados capazes de auxiliar em projetos construtivos de barreiras verticais de contaminantes. O programa experimental consistiu na realização de ensaios de compressão não-confinada, ensaios de condutividade hidráulica e ensaios de difração de raios-X. A análise dos resultados permitiu identificar as alterações provocadas na condutividade hidráulica pela variação do fator água-cimento e pelo líquido percolante.

**ABSTRACT** – The objective of this work is to study the mechanical and hydraulic behavior of soil-cement-bentonite (SCB) and soil-bentonite (SB) mixtures when permeated with water and diesel oil, as well as to investigate the influence of cement content with the purpose of providing results capable of helping in the design of vertical cutoff walls. The experimental program was based on unconfined compression tests, hydraulic conductivity tests and X-ray diffraction tests. The analysis of the results allowed identifying changes in hydraulic conductivity due to the variation of the water-cement ratio and permeant fluid.

**PALAVRAS CHAVE** – Condutividade hidráulica, contaminante orgânico, bentonita, cimento.

## 1 – INTRODUÇÃO

Solos com altos teores de argila apresentam baixos valores de condutividade hidráulica. Devido a essa característica as misturas de Solo-Bentonita (SB) e Solo-Cimento-Bentonita (SCB) vem sendo cada vez mais utilizadas nos últimos anos como uma forma de barreira vertical de contenção de

---

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

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

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

\*\*\*\* Professor, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.  
E-mail: juan.flores@ufrgs.br

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

contaminantes, sendo que sistemas de barreiras verticais utilizando estes materiais apresentam uma maior rapidez construtiva e um menor custo que os demais processos construtivos consagrados de barreiras de contenção, tais como paredes diafragma, estacas prancha e outros (Xanthakos, 1979).

Este sistema de barreiras recebe a denominação de *Slurry Walls*, ou barreiras de lama, e consiste numa matriz de solo e bentonita, com ou sem a presença do cimento Portland. Deve, contudo, apresentar uma umidade suficiente para manter a mistura com baixa consistência para possibilitar sua disposição dentro da barreira.

As barreiras verticais de contenção têm a finalidade de evitar a contaminação do lençol freático ou de áreas específicas, confinando-as ou impedindo o contato destas com as plumas de contaminantes encontradas no solo, sendo que estas plumas podem ser geradas de várias maneiras: vazamento de tanques de combustível, rompimento de canos, despejo de produtos químicos inadequados, etc. Desta forma esta pesquisa se propõe analisar o comportamento hidráulico do composto Solo-Bentonita e Solo-Cimento-Bentonita quando permeado com óleo diesel, simulando o comportamento de um *liner* quando em contato com um contaminante orgânico.

## 2 – PESQUISAS ANTERIORES

As barreiras verticais de contenção, conhecidas como *Slurry Walls*, consistem em uma escavação em forma de trincheira, normalmente com 0,60 a 1,50 m de largura (D’Appolonia, 1980), em que as paredes da escavação são suportadas por uma “lama de bentonita”, que posteriormente enrijece dentro do trecho (propriedade tixotrópica) ou é substituída por um material geotécnico (solo).

Xanthakos (1979) menciona que as trincheiras de contenção são preenchidas com Solo-Bentonita ou Solo-Cimento-Bentonita, e passam a constituir uma barreira de materiais misturados por equipamentos móveis, que acompanham o ritmo da escavação. Entre eles pode-se citar as retro-escavadeiras e as carregadeiras de esteiras. Esta é a principal razão para a alta produtividade e diminuição dos custos das barreiras tipo *Slurry Walls*.

Este sistema vem sendo cada vez mais utilizado, porém, apesar de ser um método construtivo bastante difundido, são bastante escassos os dados de parâmetros publicados na literatura, tanto nacional quanto internacional, a respeito das propriedades mecânicas e hidráulicas dos materiais componentes e sobre o seu desempenho após a completa execução da obra, quando percolados por líquidos distintos da água.

### 2.1 – Barreiras de Solo-Bentonita

Este tipo de barreira começou a ser utilizada para o controle das infiltrações nas escavações (fundações, etc) e, posteriormente, para evitar as infiltrações de poluentes carregados através do lençol freático contaminado (Ryan e Day, 2002).

O material de preenchimento da barreira, ou *backfill*, apresenta uma composição de acordo com as necessidades de projeto, sendo que nesta mistura a bentonita sempre está incluída. Para Xanthakos (1979), a bentonita contribui para uma granulação adequada do material de preenchimento, o que, por sua vez, está relacionada com a condutividade hidráulica do mesmo. A granulometria do solo utilizado na mistura é, portanto, um fator importante na condutividade hidráulica do material de preenchimento como um todo, sendo que quanto menor a condutividade hidráulica no solo, menor será a condutividade hidráulica da mistura de Solo-Bentonita. Desta forma, solos com maior porcentagem de finos plásticos na sua granulometria irão apresentar menores valores de condutividade hidráulica se comparados a materiais de maior diâmetro e não-plásticos (Xanthakos, 1979; D’Appolonia, 1980).

Para se obter uma baixa condutividade hidráulica em barreiras de Solo-Bentonita é essencial a aplicação de uma grande quantidade de finos com características plásticas na sua granulometria, mas ao mesmo tempo a inserção desse material irá gerar uma alta compressibilidade. Uma combinação ótima para se gerar um material de baixa condutividade hidráulica e baixa compressibilidade consiste de uma matriz granular cujos vazios gerados serão preenchidos por solos de grãos finos e bentonita. D'Appolonia (1980), por exemplo, sugere a combinação de uma areia com 20 a 30% de materiais finos (partículas de solo que passam pela abertura da peneira de nº 200) de características plásticas.

Segundo Azambuja (2004), as amostras de Solo-Bentonita apresentam valores de condutividade hidráulica inferiores às das misturas de Solo-Cimento-Bentonita.

## **2.2 – Barreiras de Solo-Cimento-Bentonita**

As barreiras de Solo-Cimento-Bentonita (SCB) são construídas da mesma forma que as barreiras de Solo-Bentonita, porém são mais rasas e normalmente apresentam uma profundidade inferior a 15m (Ryan e Day, 2002), sendo que isto depende do tipo do solo no local. Para Xanthakos (1979), a bentonita serve como sustentação para as partículas de cimento, em misturas de cimento-bentonita, evitando a segregação da lama.

A mistura da lama de SCB é bastante difícil de ser realizada, devido à adição do cimento, devendo ser misturada até atingir uma forma homogênea. Este processo é conhecido como sendo de execução em duas etapas. A primeira etapa consiste da escavação do trecho e a outra é o enchimento da trincheira, conforme Ryan e Day (2002).

Segundo Broderick e Daniel (1990) a adição de cimento Portland melhora a resistência química do solo ao ataque de químicos orgânicos, podendo, em alguns casos, a condutividade hidráulica do solo estabilizado com cimento e permeado com químicos orgânicos ser menor que a condutividade hidráulica do solo não estabilizado e permeado com água.

O cimento Portland quando adicionado à mistura de SB altera as propriedades químicas da bentonita. A mesma é afetada na sua capacidade de inchamento e retenção de água (Koch, 2002). Além disso, o cimento Portland requer mais água na mistura de solo-bentonita para que se consiga atingir o slump adequado para o material ser lançado para dentro da escavação (Ryan e Day, 2002). Com a introdução de mais água, a densidade do material será menor, mais poros serão formados e, conseqüentemente, maior será a condutividade hidráulica da mistura.

A condutividade hidráulica de uma mistura de Solo-Cimento-Bentonita é um resultado de complexas interações entre os vários componentes da mistura. Segundo Ryan e Day (2002), o cimento Portland interfere na capacidade de uma mistura de solo e bentonita de atingir baixos valores de condutividade hidráulica, mas por outro lado, o cimento aumenta a resistência da mistura, sendo que esta resistência é função do fator água-cimento e da sua idade de cura. Segundo Opdyke e Evans (2005), uma resistência à compressão simples mínima de 0,1 MPa é requerida para o projeto de barreiras de contenção contendo solo-bentonita-cimento.

## **3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, ou seja, a investigação da condutividade hidráulica de materiais de preenchimento de barreiras hidráulicas, foram utilizados dois materiais compósitos, um contendo a mistura de solo areno-siltoso e bentonita e o outro de solo areno-siltoso, cimento e bentonita, visando avaliar a influência do uso do cimento Portland sobre a condutividade hidráulica do meio percolado com hidrocarbonetos.

A primeira etapa do programa experimental foi a realização de ensaios preliminares de caracterização dos solos utilizados, sendo eles: Solo Residual de Arenito Botucatu (SRAB) e bentonita sódica. Posteriormente foram definidas as dosagens das misturas de SCB a serem trabalhadas no programa experimental, através dos resultados de ensaios de compressão simples. A terceira etapa consistiu na análise do comportamento hidráulico das amostras através de ensaios de condutividade hidráulica realizados em um permeâmetro de parede rígida e, posteriormente, análises por difração de raios X em amostras não saturadas e saturadas com óleo diesel.

### **3.1 – Materiais Utilizados**

#### ***a) Solo***

O solo utilizado no desenvolvimento desta pesquisa – o Solo Residual de Arenito Botucatu (SRAB) - 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 grande Porto Alegre, RS.

A curva granulométrica apresentada na Figura 1 mostra um solo composto por 5% de argila ( $<0,002\text{mm}$ ), 38,9% de silte (0,002 a 0,075mm) e 56,1% de areia, sendo que 47,3% composta por areia fina (0,075 a 0,042mm) e somente 8,8% de areia média (0,042 a 2,0mm). O material é classificado como uma areia siltosa de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995), e SM (areia siltosa) conforme ASTM D 2487 (1993), conhecendo os limites de liquidez (LL) de 22% e limite de plasticidade (LP) de 19%, determinados no programa experimental.

O SRAB possui densidade real dos grãos (G) de 2,65. Ensaios de difração de Raios-X mostraram a presença predominante do argilomineral caulinita.

#### ***b) Bentonita***

A bentonita utilizada foi adquirida comercialmente. As características determinadas em laboratório da bentonita sódica utilizada nos experimentos são as seguintes: limite de plasticidade: 139%; limite de liquidez de 608% e densidade real dos grãos (G) de 2,66.

Através da curva granulométrica, também apresentada na Figura 1, verifica-se um solo com 36% de argila ( $<0,002\text{mm}$ ) e 64% de silte (entre 0,002 a 0,075mm), sendo classificada como CH (argila inorgânica de alta plasticidade) pela classificação unificada (ASTM D 2487/93).

#### ***c) Cimento***

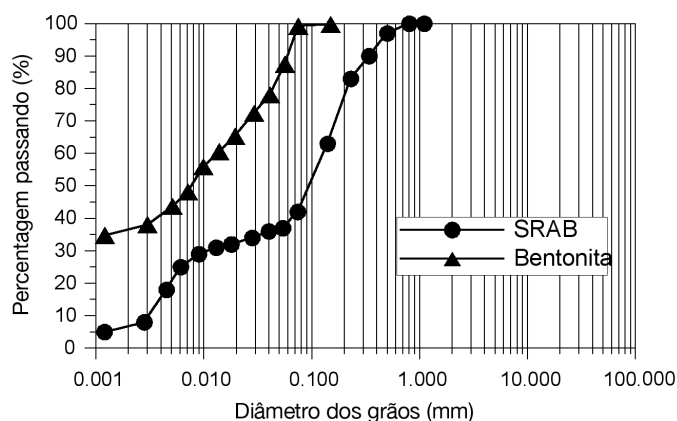
Como agente cimentante adotou-se cimento tipo Portland CP-V de alta resistência inicial (ARI), adquirido junto a um estabelecimento comercial da cidade de Porto Alegre (RS-Brasil), este cimento tem a peculiaridade de atingir altas resistências iniciais já nos primeiros dias da aplicação.

#### ***d) Água***

A água destilada foi utilizada na preparação de todos os corpos de prova, bem como nos ensaios de condutividade hidráulica.

#### ***e) Óleo Diesel***

Nesta pesquisa, foi empregado como contaminante à base de hidrocarbonetos o óleo diesel, obtido junto à Refinaria Alberto Pasqualini S.A. – REFAP (2003), da cidade de Canoas/RS. O óleo diesel apresenta um comportamento não volátil, sendo imiscível em água. A densidade unitária do óleo diesel é de 0,84 e viscosidade de 1,8 cSt (ASTM D445, 2006).



**Fig. 1** – Curva granulométrica do SRAB e da Bentonita.

### 3.2 – Definição da Dosagem dos Materiais nas Misturas

Foram testados diversos teores de umidade, entre 60 e 200%, no intuito de definir o teor de umidade a ser utilizado nas misturas. Optou-se por um teor de umidade de 100% e um teor de bentonita de 12%, pois com estes se conseguiu obter uma amostra com alta trabalhabilidade e sem que houvesse a segregação dos materiais. Os teores de bentonita e cimento, apresentados na Tabela 1, foram escolhidos baseando-se em valores relatados na literatura (Ryan e Day, 2002) e na experiência do grupo de pesquisa em trabalhos anteriores (Azambuja, 2004; Santos, 2005). A escolha de diferentes fatores água-cimento para uma mesma umidade teve como objetivo verificar a interferência da adição do cimento no comportamento mecânico e hidráulico da mistura.

**Tabela 1** – Dosagem dos Materiais.

Bentonita (%)	Fator a/c	Cimento (%)
12,0	–	0
12,0	2	50
12,0	4	25
12,0	6	16,7

### 3.3 – Preparação das Amostras

A moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão simples foi realizada em moldes bipartidos de PVC com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Para a preparação das amostras os componentes foram adicionados em um recipiente colocando-se primeiramente a bentonita e o SRAB, misturando-se até atingir a homogeneização dos materiais. A seguir se colocava aos poucos a água; caso fosse uma amostra com cimento este também era adicionado aos poucos. Esta sequência foi a mais apropriada, pois permitiu que os grumos de bentonita formados em contato com a água fossem facilmente desagregados, propiciando assim uma melhor homogeneização da mistura. Durante este processo todas as precauções foram tomadas no sentido de se evitar as perdas de umidade por evaporação.

Somente os corpos de prova com cimento puderam ser desmoldados, o que foi feito quando o mesmo apresentou resistência suficiente capaz de não provocar danos na amostra (em torno de 48 horas). Os corpos de prova de solo-bentonita não apresentaram consistência suficiente, impossibilitando os ensaios de resistência à compressão simples. Após desmoldados, os corpos de prova de SCB foram pesados com precisão de 0,01 gf, medidos com precisão de 0,01 cm e acondicionados em sacos plásticos até completar o período de cura de 7 dias.

Para os ensaios de condutividade hidráulica, as misturas foram realizadas seguindo os mesmos princípios descritos acima, porém, por se tratar de um permeâmetro de parede rígida, a mistura, depois de homogeneizada, era colocada diretamente no permeâmetro, onde permaneciam curando durante 24h até o início do ensaio.

### **3.4 – Métodos**

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados segundo a ASTM D 5856 (1997), utilizando um permeâmetro de parede rígida construído no Laboratório de Resíduos e Geotecnia Ambiental - Environgeo/UFRGS (Lemos, 2006). O permeâmetro em questão foi projetado e desenvolvido para realizar testes em amostras contaminadas ou percoladas por agentes agressivos. No desenvolvimento deste equipamento teve-se o cuidado de utilizar materiais inertes ao ataque de compostos inorgânicos com características de pH bastante baixos (ácidos) e fortemente alcalinos, além de compostos orgânicos, como é o caso dos hidrocarbonetos que constituem o óleo diesel utilizado nesta pesquisa. Deste modo, este equipamento foi totalmente construído com peças e conexões de aço inox e tubulação de teflon e polipropileno.

Nesta pesquisa foram realizados ensaios de condutividade hidráulica com teores de umidade em torno de 100% e teor de bentonita de 12%. Nos ensaios contendo cimento, foram utilizados fatores água-cimento de 2, 4 e 6. Estes ensaios foram realizados tendo como material permeante a água e o óleo diesel, onde primeiramente era percolada a água até a obtenção de no mínimo quatro leituras semelhantes, e depois era substituída pelo óleo diesel. Todas as amostras foram percoladas sob um gradiente hidráulico de aproximadamente 8, sob carga constante. Os procedimentos de realização dos ensaios de condutividade hidráulica estão descritos em Santos (2005).

Os ensaios de difração de raios X foram realizados no Laboratório de Difração de Raios X do Instituto de Geociência da UFRGS. Ao todo, foram realizados quatro ensaios, sendo três deles na bentonita (amostra natural, amostra tratada com etileno glicol e amostra calcinada) e um na bentonita saturada com óleo diesel.

## **4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1 – Ensaios de Resistência à Compressão Não Confinada**

Os ensaios de resistência à compressão não confinada foram realizados de forma padronizada para todos os corpos de prova quanto ao tempo de cura, no caso sete dias, com imersão prévia ao rompimento. A Tabela 2 apresenta os resultados destes ensaios, que se basearam na média da RCS de três corpos de prova para cada mistura, todos apresentando variabilidade menor que 10% em relação à resistência média. Tal fato comprova a confiabilidade destes resultados, em relação à reprodutibilidade das amostras testadas.

Pode-se observar que a resistência à compressão não-confinada aumentou, conforme esperado, com o acréscimo da quantidade de cimento na amostra e com a conseqüente redução do fator água-

**Tabela 2** – Resultados do programa de ensaios de compressão não-confinada.

Fator água-cimento (a/c)	Resistência (MPa)
(sem cimento)	*
2	0,45
4	0,16
6	0,05

\*Não houve o endurecimento da amostra, não se podendo desmoldar e por consequência não foi possível realizar o ensaio de compressão não-confinada.

cimento. Segundo Opdyke e Evans (2005), a resistência à compressão simples mínima requerida para projeto de barreiras de SCB seria de 0,1MPa, portanto, dentre as misturas estudadas, as com fator água-cimento 2 e 4 apresentaram valores satisfatórios de resistência à compressão simples.

#### **4.2 – Ensaios de condutividade hidráulica segundo a norma ASTM D5856/97**

Para assegurar a confiabilidade dos resultados de condutividade hidráulica, foram realizadas repetições dos testes nas amostras de solo-bentonita e solo-cimento-bentonita, obtendo-se resultados praticamente idênticos aos apresentados, confirmando, desta forma, a reprodutibilidade dos mesmos.

##### **4.2.1 – Resultados da amostra Solo-Bentonita (SB)**

Os parâmetros de moldagem obtidos para a amostra de SB estão resumidos na Tabela 3. A amostra de Solo-Bentonita quando percolada com água apresentou inicialmente uma condutividade hidráulica na ordem de  $10^{-8}$  m/s. Posteriormente houve uma diminuição gradativa de seu valor chegando a um valor médio de condutividade hidráulica de  $k=1,7.10^{-9}$  m/s, sendo que foi permeado na amostra um volume equivalente a 0,2 vezes o seu volume de vazios, conforme a Figura 2. Esta Figura apresenta o gráfico da razão volume percolado/volume de vazios ( $V_p/V_v$ ) versus condutividade hidráulica ( $k$ ), tendo como líquido permeante inicialmente a água e posteriormente o óleo diesel, onde se percebe uma mudança na condutividade hidráulica após a percolação de aproximadamente 0,2  $V_p/V_v$  de óleo diesel, indicando que este, quando percolado na amostra de SB, ocasiona mudanças no comportamento hidráulico da mistura solo-bentonita. As Figuras 2 e 3 mostram claramente o ponto onde houve o aumento na condutividade hidráulica, após a mudança no fluido percolado.

Quando a amostra é percolada com óleo diesel observa-se uma baixa condutividade hidráulica inicial, com valores em torno de  $2,5.10^{-9}$  m/s. A partir de um determinado momento a amostra apresenta um rápido aumento do valor da condutividade hidráulica, atingindo o valor médio de  $9,6.10^{-7}$  m/s. Este fenômeno será explicado, mais adiante, com o auxílio do ensaio de difração de raios X.

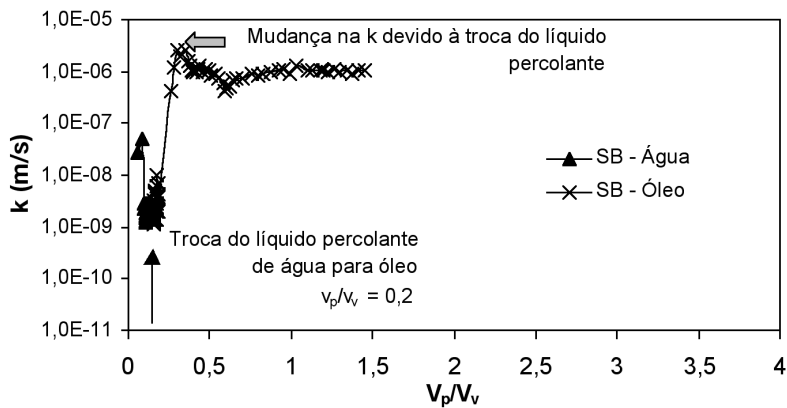
##### **4.2.2 – Resultados das amostras Solo-Cimento-Bentonita (SCB)**

###### *a) Resultados da amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) com fator água-cimento 2*

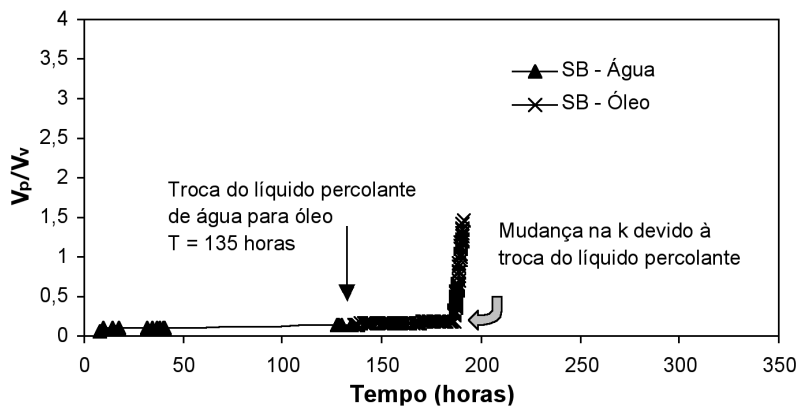
Os parâmetros de moldagem obtidos para a amostra de SCB com fator água-cimento 2 estão resumidos na Tabela 3. Esta amostra, quando percolada com água, apresentou um valor médio de condutividade hidráulica de  $4,3.10^{-8}$  m/s, superior à amostra de solo-bentonita sem cimento. Na

**Tabela 3** – Resumo dos resultados de condutividade hidráulica para as amostras de SB e SCB.

Propriedades	SB	SCB (a/c=2)	SCB (a/c=4)	SCB (a/c=6)
Teor de Umidade	102%	98%	99%	98%
Peso Específico Natural	13,4 kN/m <sup>3</sup>	13,7 kN/m <sup>3</sup>	13,5 kN/m <sup>3</sup>	13,7 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Seco	6,6 kN/m <sup>3</sup>	6,9 kN/m <sup>3</sup>	6,8 kN/m <sup>3</sup>	6,9 kN/m <sup>3</sup>
Índice de Vazios	3,1	2,9	3,0	2,9
Cond. Hidráulica (água)	1,7.10 <sup>-9</sup> m/s	4,3.10 <sup>-8</sup> m/s	1,4.10 <sup>-7</sup> m/s	5,9.10 <sup>-7</sup> m/s
Cond. Hidráulica (óleo diesel)	9,6.10 <sup>-7</sup> m/s	7,5.10 <sup>-9</sup> m/s	3,8.10 <sup>-10</sup> m/s	1,7.10 <sup>-8</sup> m/s



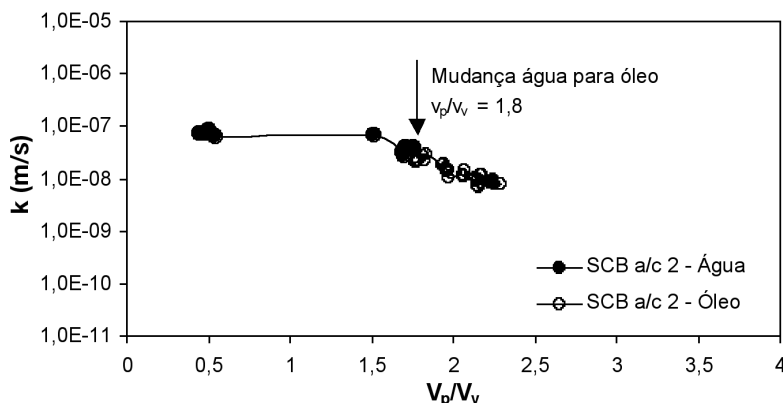
**Fig. 2** – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra Solo-Bentonita permeada com água e óleo diesel, em função da razão volume percolado/volume de vazios ( $V_p/V_v$ )



**Fig. 3** – Resultado da evolução da razão volume percolado/volume de vazios ( $V_p/V_v$ ) em função do tempo, para a amostra Solo-Bentonita permeada com água e com óleo diesel.

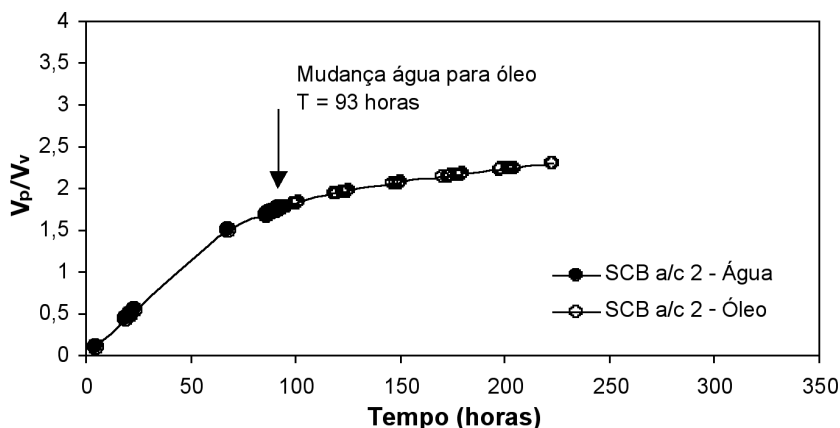


Figura 4 é apresentado o gráfico da  $k$  em função do  $V_p/V_v$ , onde se observa a evolução da condutividade hidráulica com água até o volume de água percolado atingir 1,8 vezes o volume de vazios da amostra.



**Fig. 4** – Resultado da condutividade hidráulica, em função da razão  $V_p/V_v$ , para a amostra SCB com fator água-cimento 2 permeada com água e com óleo diesel

Na Figura 5 pode-se observar comportamento do fluxo de líquido na amostra com o tempo quando permeada primeiro com água, depois com óleo, sendo observada a percolação com água de uma vez o volume de vazios da amostra em aproximadamente 40 horas.

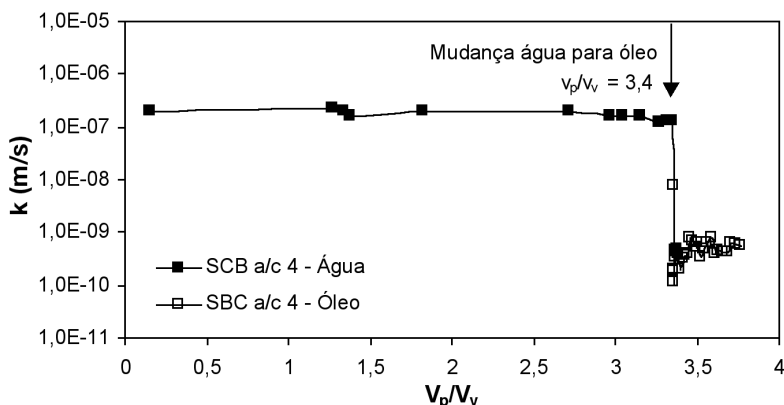


**Fig. 5** – Resultado da evolução da razão volume percolado/volume de vazios ( $V_p/V_v$ ) em função do tempo, para a amostra SCB com fator água-cimento 2 permeada com água e com óleo diesel.

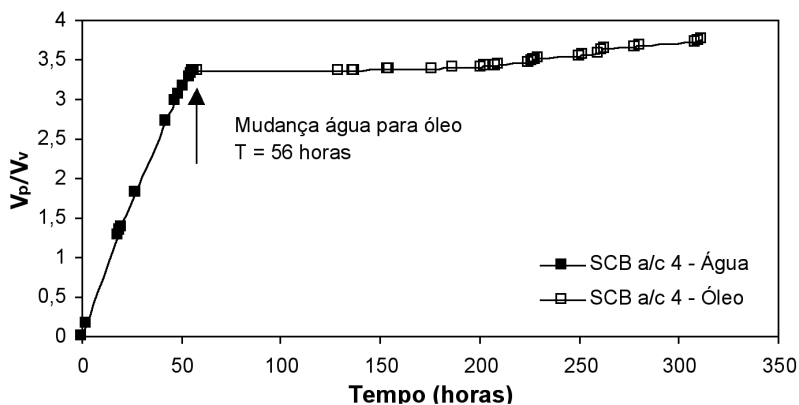
A amostra SCB permeada com óleo diesel apresentou uma condutividade hidráulica inicial com uma ordem de grandeza de  $10^{-8}$  m/s, tendo se estabilizado em um valor médio de condutividade de hidráulica de  $7,5 \cdot 10^{-9}$  m/s. Não foram observadas grandes mudanças na condutividade hidráulica do SCB (fator água-cimento 2), provavelmente devido ao efeito da cimentação, sendo permeado cerca de 0,6 vezes o volume de vazios da amostra. Os gráficos apresentados nas Figuras 4 e 5 demonstram o desenvolvimento do ensaio.

*b) Resultados da amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) com fator água-cimento 4*

A Tabela 3 também apresenta os parâmetros de moldagem obtidos para a amostra em questão. A amostra de Solo-Cimento-Bentonita apresentou uma grande estabilidade na condutividade hidráulica desde o início do ensaio, quando percolado com água, tendo o valor de  $k$  médio igual a  $1,4 \cdot 10^{-7}$  m/s. Conforme a Figura 6, foi percolado um volume de aproximadamente 3,4 vezes o volume de vazios da amostra. Na Figura 7 pode ser observada a evolução do volume permeado ao longo do tempo, percebendo-se um volume percolado com água igual a 3,4 volumes de vazios em aproximadamente 56 horas, e um volume de 0,4 volume de vazios percolado com óleo em 250 horas.



**Fig. 6** – Resultado da condutividade hidráulica, em função da razão  $V_p/V_v$ , para a amostra SCB com fator água-cimento 4 permeada com água e com óleo diesel.

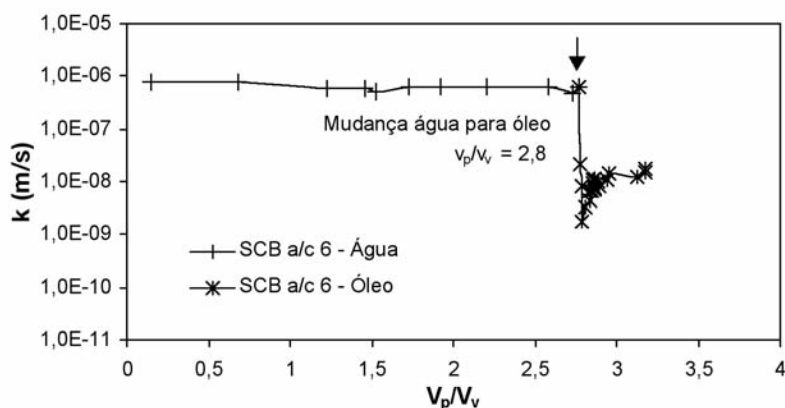


**Fig. 7** – Resultado da evolução da razão volume percolado/volume de vazios ( $V_p/V_v$ ) em função do tempo, para a amostra SCB com fator água-cimento 4 permeada com água e com óleo diesel.

A amostra SCB com fator água-cimento 4 quando permeada com óleo diesel apresentou uma mudança drástica nos valores de condutividade hidráulica, tendo o ensaio estabilizado com um valor médio de condutividade hidráulica de  $3,8 \cdot 10^{-10}$  m/s.

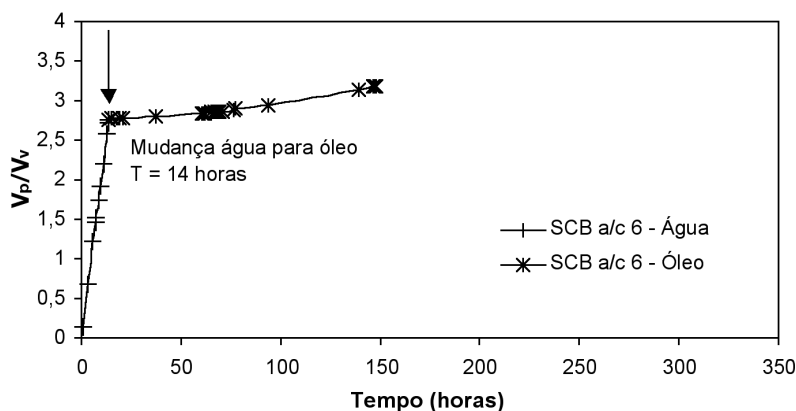
c) Resultados da amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) com fator água-cimento 6

Os parâmetros de moldagem obtidos para a amostra SCB com fator água-cimento 6 estão apresentados na Tabela 3. Esta amostra apresentou, quando permeada com água, uma condutividade hidráulica média igual a  $5,9 \cdot 10^{-7}$  m/s, quando permeado um volume de aproximadamente 2,8 vezes o volume de vazios. As Figuras 8 e 9 ilustram o resultado deste ensaio.



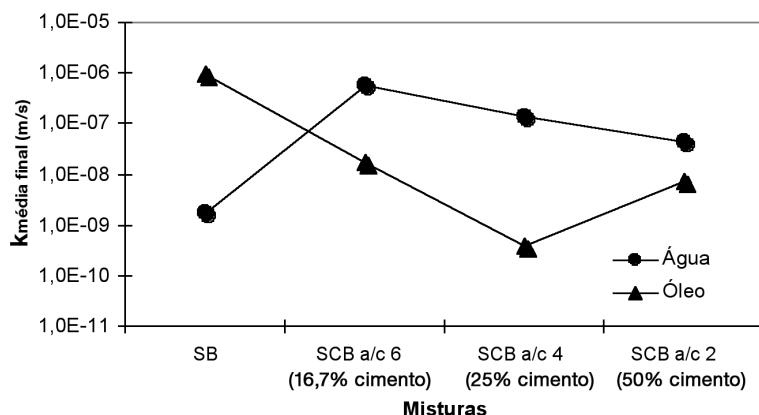
**Fig. 8** – Resultado da condutividade hidráulica, em função da razão  $V_p/V_v$ , para a amostra SCB com fator água-cimento 6 permeada com água e com óleo diesel.

Quando a amostra passou a ser permeada com óleo diesel observou-se uma rápida queda inicial na condutividade hidráulica da mesma; logo após os valores estabilizaram em torno de  $1,7 \cdot 10^{-8}$  m/s. Durante esta etapa do ensaio foi percolado um volume de aproximadamente 0,4 vezes o volume de vazios da amostra, conforme a Figura 9.



**Fig. 9** – Resultado da evolução da razão volume percolado/volume de vazios ( $V_p/V_v$ ) em função do tempo, para a amostra SCB com fator água-cimento 6 permeada com água e com óleo diesel.

A Tabela 3 e a Figura 10 apresentam os resultados da condutividade hidráulica média final obtidos para todas as amostras estudadas. Pode-se observar nos resultados das amostras percoladas



**Fig. 10** – Resultado da condutividade hidráulica média final das amostras de solo-bentonita e solo-cimento-bentonita (fator água-cimento 2, 4 e 6) permeadas com água e com óleo diesel.

com água, um aumento da condutividade hidráulica de  $1,7 \cdot 10^{-9}$  m/s, para a amostra sem cimento, para um valor na ordem de  $10^{-7}$  m/s para o caso das amostras de Solo-Cimento-Bentonita com fatores de água-cimento 4 e 6, e de  $10^{-8}$  m/s para o fator água-cimento 2, corroborando os resultados obtidos por Azambuja (2004), que observou o aumento da condutividade hidráulica com a introdução de cimento quando comparado com amostras de solo-bentonita sem cimento. Para as amostras com cimento foram observados valores menores de condutividade hidráulica para maiores teores de cimento.

Por outro lado, quando as amostras com cimento foram percoladas com óleo diesel, a condutividade hidráulica das mesmas reduziu com o aumento da porcentagem de cimento adicionada, indicando que a introdução de cimento acarretou a formação de uma estrutura cimentante, provavelmente responsável pela estabilidade hidráulica das misturas em contato com o contaminante. Tal comportamento é corroborado por trabalhos apresentados na literatura, tal como o de Broderick e Daniel (1990), que conclui que a adição de cimento Portland melhora a resistência química do solo ao ataque de químicos orgânicos. Segundo os autores, a condutividade hidráulica do solo estabilizado e permeado com químicos orgânicos pode vir a ser menor que a condutividade hidráulica do solo não estabilizado e permeado com água. Além disso, segundo Koch (2002), as propriedades da bentonita podem ser alteradas quando da introdução de cimento Portland na mistura de SB.

Dentre os ensaios de SCB percolados com óleo diesel, o ensaio de SCB com fator água-cimento 4 foi o que apresentou o menor valor de condutividade hidráulica, o que provavelmente se deveu à quantidade de água adicionada em relação ao cimento. Sabe-se que quanto maior a adição de cimento Portland, maior quantidade de água deve ser adicionada à mistura de solo-bentonita para que se consiga atingir o slump adequado para o material ser utilizado como preenchimento (Ryan e Day, 2002). Para uma mesma quantidade de água, o aumento do teor de cimento dificulta a trabalhabilidade da amostra. Portanto, existe um teor de umidade “ideal” para um dado teor de cimento em que a amostra irá atingir a densidade adequada.

Na presente pesquisa, todas as amostras de SCB foram moldadas com um teor de umidade de 100% em relação ao peso de material seco, porém, aquelas com maior teor de cimento (fator água-cimento 2 - 25% de cimento) apresentaram misturas muito secas, dificultando sua moldagem; as

com fator água-cimento 6 (8,3% de cimento) apresentaram uma pequena segregação dos materiais. A melhor trabalhabilidade foi obtida com as amostras de fator água-cimento 4 (12,5% de cimento), o que provavelmente ocasionou uma melhor distribuição do cimento na amostra, levando a valores menores de condutividade hidráulica.

#### 4.3 – Análises por Difração de Raios X

A bentonita foi analisada por técnicas de difração de raios X, de acordo com a rotina de preparação de argilominerais do Laboratório de Difração de Raios do Instituto de Geociências da UFRGS, obedecendo-se as seguintes condições: (a) bentonita não saturada - nesta situação foram preparadas três laminas de bentonita orientada, nas condições natural, glicolada e calcinada; (b) bentonita saturada com óleo diesel.

A Figura 11 apreapresenta o difratograma da amostra natural de bentonita, em que se observa o pico da esmectita em 12,973 Å. No mesmo difratograma observam-se traços de caulinita e quartzo, respectivamente.

A Figura 12 apreapresenta o difratograma da amostra de bentonita tratada com etileno glicol, simulando a bentonita em seu grau máximo de expansão. Observa-se o deslocamento do pico da esmectita da amostra natural em 12,973 Å para 17,115 Å. Este pico caracteriza-se por uma significativa cristalinidade e simetria. Ocorrem como traços caulinita e quartzo.

Na Figura 13 está apresentado o difratograma da bentonita natural calcinada a 500°C. Pelo processo de calcinação o pico característico da esmectita natural de 12,973 Å desloca-se para 9,940 Å, que define a esmectita colapsada. Como consequência, também, da calcinação, o pico da caulinita desaparece por completo por colapso estrutural. Entretanto, o quartzo permanece por tratar-se de um mineral de comportamento refratário nessa faixa de temperatura.

O difratograma da amostra de bentonita saturada com óleo diesel está apresentado na Figura 14. Destaca-se neste difratograma o posicionamento do pico da esmectita em 12,826 Å. O pico da esmectita em 12,826 Å indica uma redução da distância entre os planos atômicos ou planos basais (d) quando comparado com a amostra natural que apresenta o pico da esmectita em 12,973 Å. Por outra parte, a comparação da amostra glicolada com o pico da esmectita em 17,115 Å com a amostra saturada com óleo diesel ( $d=12,826$  Å), equivale a uma significativa redução do inchamento intracristalino da esmectita. Este inchamento intracristalino é produzido pelo líquido que penetra e provoca o afastamento recíproco entre os planos basais da esmectita, ou seja, o inchamento intracristalino acontece quando a esmectita entra em contato com a água, que preenche o espaço intercamadas, expandindo a argila e adsorvendo grandes porções de água.

Este comportamento poderá estar relacionado com o aumento da permeabilidade da amostra em determinados teores de óleo diesel. Pode ser sugerido que o óleo diesel satura a amostra expulsando a água presente nos sítios de inchamento intracristalino da esmectita. O aumento da porosidade pode estar relacionado, também, com a redução da propriedade expansiva da bentonita. Por isso, uma vez atingido o ponto de saturação em óleo diesel, a água presente é expulsa, diminuindo o espaçamento entre as plaquetas de argila expandida, que se “contraem” aumentando a porosidade e consequente permeabilidade da amostra.

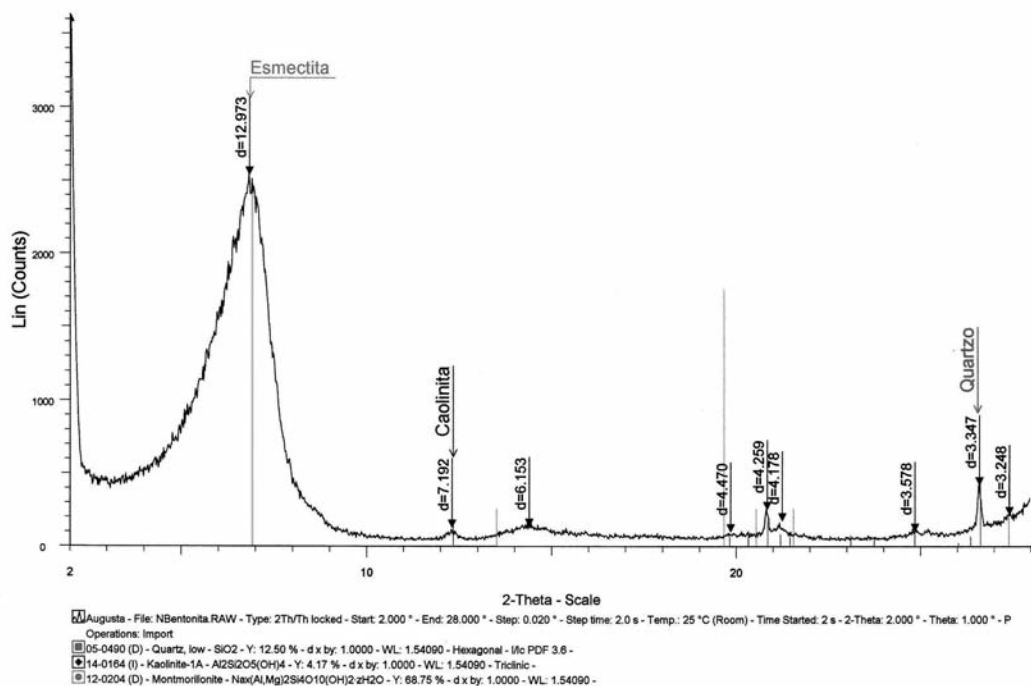


Fig. 11 – Difratoograma de Raios X - Amostra natural de bentonita.

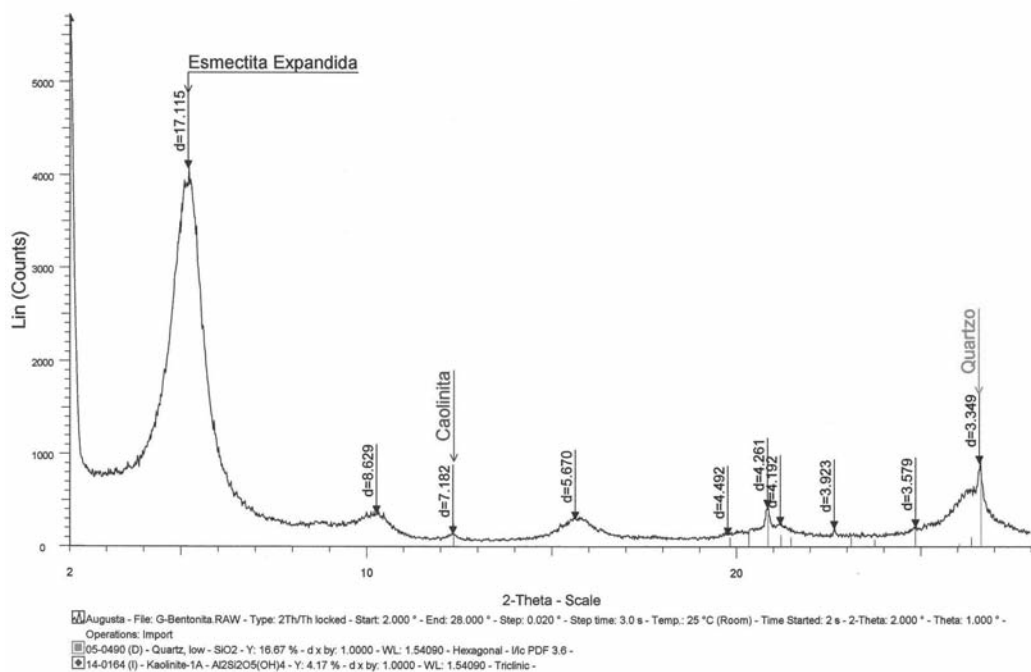


Fig. 12 – Difratoograma de Raios X. Amostra de bentonita tratada com etileno glicol.

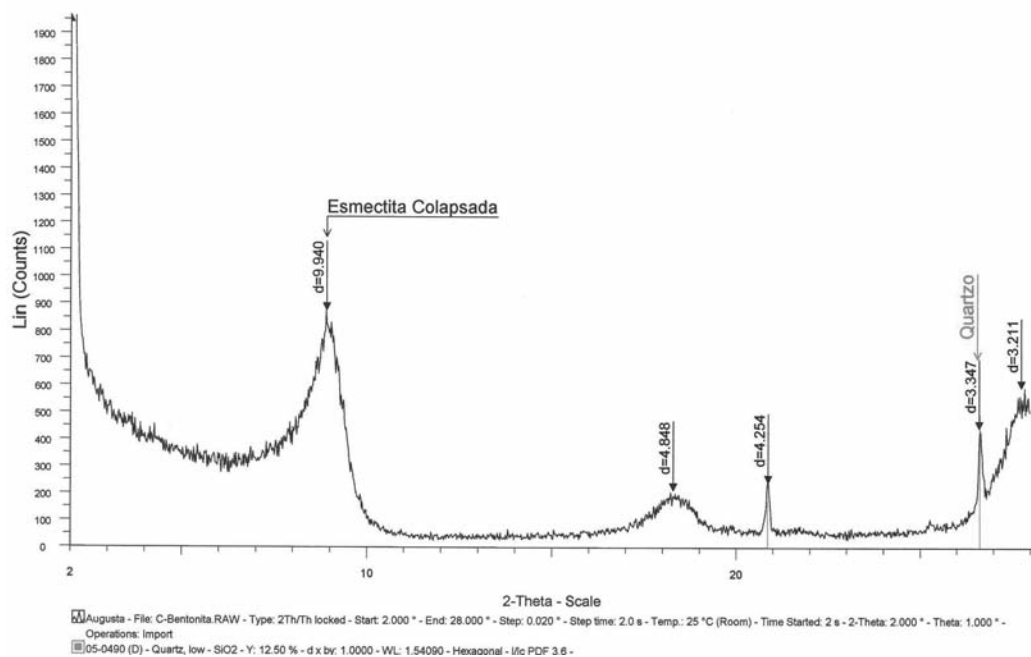


Fig. 13 – Difratoograma de Raios X da bentonita calcinada.

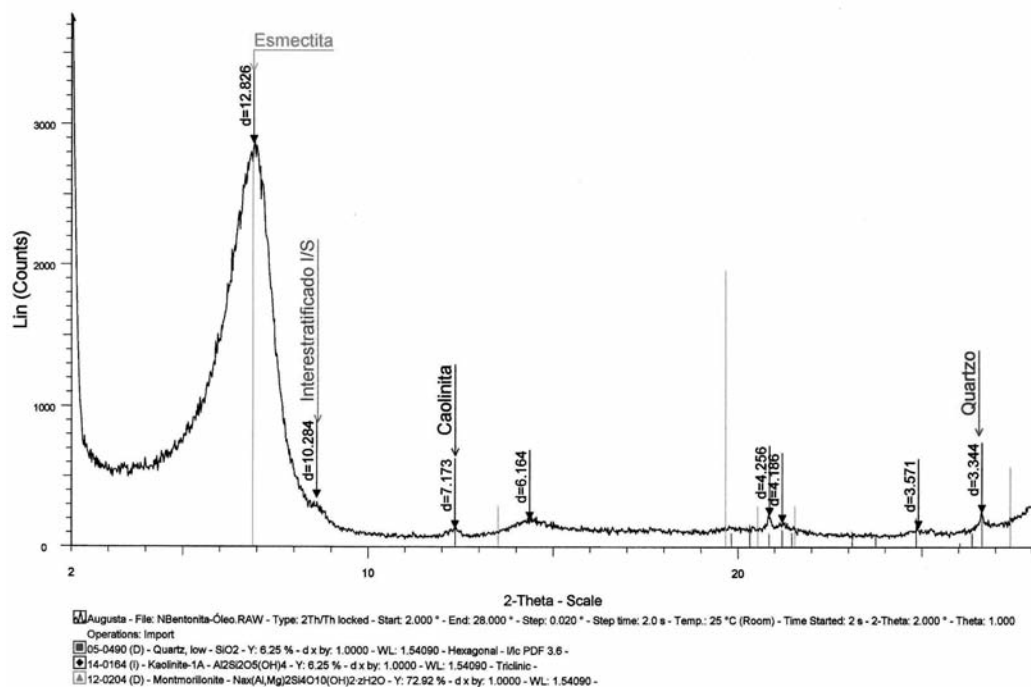


Fig. 14 – Difratoograma de Raios X. Amostra de bentonita saturada com óleo diesel.

## 5 – CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados obtidos no programa experimental foram estabelecidas as tendências e influências no comportamento do compósito, das principais variáveis estudadas: o fator água-cimento e o líquido permeante. Baseando-se nestes resultados, as seguintes considerações finais puderam ser estabelecidas:

De um modo geral, a adição de cimento às misturas de SB ocasionou um aumento na condutividade hidráulica para as amostras percoladas com água. Além disso, foi observado que quanto maior o teor de cimento adicionado, menor a condutividade hidráulica das misturas, corroborando os resultados descritos por Azambuja (2004).

A condutividade hidráulica da amostra Solo-Bentonita aumentou com a percolação de óleo diesel, o que pode ser explicado através dos ensaios de difração de raios X. Segundo o observado, quando o óleo diesel é utilizado como agente percolante há uma significativa redução do inchamento intracristalino da esmectita, ou seja, o óleo diesel ocasiona o encolhimento da bentonita quando esta estiver saturada com água e depois entrar em contato com o óleo diesel.

Dentre as misturas estudadas, a de SB foi a única que apresentou um aumento significativo na condutividade hidráulica quando percolada com óleo diesel, provavelmente porque a presença da cimentação nas amostras de SCB inibiu o efeito negativo do encolhimento da bentonita quando em contato com óleo diesel.

Considerando as amostras de SCB, a amostra com fator água-cimento 4 foi a que apresentou o menor valor de condutividade hidráulica ao óleo. Este resultado deve-se ao fato de que para uma certa quantidade de água, o aumento do teor de cimento dificulta a trabalhabilidade das amostras. Amostras com maior teor de cimento (fator água-cimento 2 – 25% de cimento) resultam em misturas muito secas, já as com teores mais baixos (fator água-cimento 6 – 8,3% de cimento) resultam em misturas muito úmidas. A melhor trabalhabilidade foi obtida com as amostras de fator água-cimento 4 (12,5% de cimento), o que provavelmente ocasionou uma melhor distribuição do cimento na amostra, levando a valores menores de condutividade hidráulica.

Todas as amostras contendo cimento, quando percoladas com óleo diesel apresentaram uma diminuição na condutividade hidráulica.

De um modo geral, a introdução de cimento, apesar de aumentar os valores de condutividade hidráulica nas amostras percoladas com água, apresentou-se benéfica quando em contato com o contaminante, pois inibiu o efeito do encolhimento da bentonita quando em contato com o óleo diesel, resultando em valores estáveis de condutividade hidráulica e valores aceitáveis de resistência à compressão simples, com exceção da mistura com fator água-cimento 6, que não alcançou o valor mínimo recomendado na literatura.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS (Projeto PRONEX/FAPERGS no 0408410), ao CNPq (Projetos Edital Universal 471396/03-6 e 472643/2004-5 e projeto 300832/2004-4) e à CAPES (Projeto ProDoc), pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.



## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes*: D 2487. Philadelphia, 1993. 11p.
- American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of porous material using a rigid-wall, Compaction-Mold Permeameter*: D 5856. Philadelphia, 1997.
- American Society for testing and materials. *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)*: D 445. Philadelphia, 2006.
- Associação Brasileira de Norma Técnicas. *Rochas e solos – Terminologia*: NBR 6502. Rio de Janeiro, 1995, 18p.
- Azambuja, R. M. B. *Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas de Solo-Cimento-Bentonita para a Aplicação em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes*. 2004. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- Broderick, G. P., Daniel, D. E. *Stabilising compacted clay against chemical attack*. Journal of Geotechnical Engineering, New York, ASCE, 116, n. 10, p.1549-1567, 1990.
- D'Appolonia, D. J. *Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, New York, v. 107, n 4, p. 393-409, 1980.
- Koch, D. *Bentonite as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls*. Applied Clay Science, Vol.21, Issues 1-2, p.1-11, 2002.
- Lemos, R. G. *Estudo do Comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas*. 2006. 315p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- Opdyke, S. M.; Evans, C. *Slag-Cement-Bentonite Slurry Walls*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 131 n 6, p. 673-681, 2005.
- Refinaria Alberto Pasqualini – REFAP. *Especificações técnicas para óleo diesel*. Canoas, Internet. Site <http://www.refap.petrobras.com.br/SegMAmb/substancias/Sub-072.htm>. Acesso em 09/06/2003.
- Ryan, C. R.; Day, S. R. *Soil-Cement-Bentonite Slurry Walls*. In: M. W. O'NEILL; F. C. TOWNSEND. *Deep Foundations 2002: Na International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance (Geotechnical Special Publication N° 116)*. New York: ASCE, 2002, p. 713-727.
- Santos, A. B. *Comportamento de liners sob a influência de um contaminante orgânico*. 2005. 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- Xanthakos, P. P. *Slurry Walls*. New York: McGraw Hill, 1979. 622p.

## LISTA DE SÍMBOLOS

*Foram utilizados os seguintes símbolos neste artigo técnico:*

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
a/c	Fator água-cimento
k	Condutividade Hidráulica
G	Densidade Real dos grãos
RCS	Resistência à Compressão Simples
SB	Solo-Bentonita
SCB	Solo-Cimento-Bentonita
SRAB	Solo Residual de Arenito Botucatu
$V_p/V_v$	Razão volume percolado/volume de vazios