



## Determinação da condutividade hidráulica do solo da bacia hidrográfica do rio Cascavel

Décio Lopes Cardoso<sup>1</sup>

Simone Minuzzo<sup>2</sup>

Camila Daiane Cancelier<sup>3</sup>

**Resumo:** Bacias hidrográficas constituem o elemento foco de estudos de impactos ambientais. Mas para desenvolver esses estudos deve-se conhecer a propriedade mecânica do solo que condiciona o fluxo da água e dos contaminantes na bacia. Tal propriedade é a condutividade hidráulica, que, caso seja elevada no solo, a contaminação será potencializada. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da adição de cinza de casca de arroz (CCA) para reduzir a condutividade hidráulica, em ensaios de laboratório, realizados em amostras de solo típico da região oeste do Paraná. Os resultados mostraram que compósitos formados por solos regionais e CCA têm potencial de reduzir a condutividade hidráulica e possivelmente substituir a geomembrana de elevado custo utilizada em sistemas de contenção de contaminantes.

**Palavras Chave:** solo, permeabilidade, compósito.

**Abstract:** Watersheds constitute the focus of environmental impact studies. But these studies to develop must meet the mechanical property of the soil which determines the water and contaminants flow in the basin. This property is the hydraulic conductivity, which if high ground, the contamination will be increased. The aim of this study was to evaluate the influence of the addition of rice husk ash (RHA) to reduce the hydraulic conductivity in laboratory tests performed on typical soil samples of western Paraná. The results show that composites formed by regional soils and RHA have the potential to reduce the hydraulic conductivity and possibly replace the high cost of geomembrane utilized in contaminants retaining systems.

**Keywords:** soil, permeability, composite.

<sup>1</sup> Prof. Doutor, pesquisador do Colegiado de Engenharia Civil da UNIOESTE, Campus de Cascavel. Cascavel – PR. [decioic@gmail.com](mailto:decioic@gmail.com)

<sup>2</sup> Engenheira Civil, Ampere-PR. [siminuzzo\\_ecivil@hotmail.com](mailto:siminuzzo_ecivil@hotmail.com)

<sup>3</sup> Acadêmica do Curso de Engenharia Civil–UNIOESTE. [camilacancelier@yahoo.com.br](mailto:camilacancelier@yahoo.com.br)

## Introdução

Existem dois tipos de procedimentos laboratoriais para a determinação da condutividade hidráulica do solo: o ensaio de carga constante e o ensaio de carga variável. Segundo Das (2011) o ensaio de permeabilidade com carga constante possui um arranjo conforme mostrado na Figura 1, com um reservatório para abastecimento de água na entrada que é ajustado para que haja uma diferença de carga constante entre a entrada e a saída no decorrer do ensaio. É estabelecida uma vazão constante, então é realizada a coleta de água em um recipiente graduado em um intervalo de tempo conhecido, o cálculo é dado pela equação 1.

$$Q=Avt= A(ki)t \quad (1)$$

Onde:

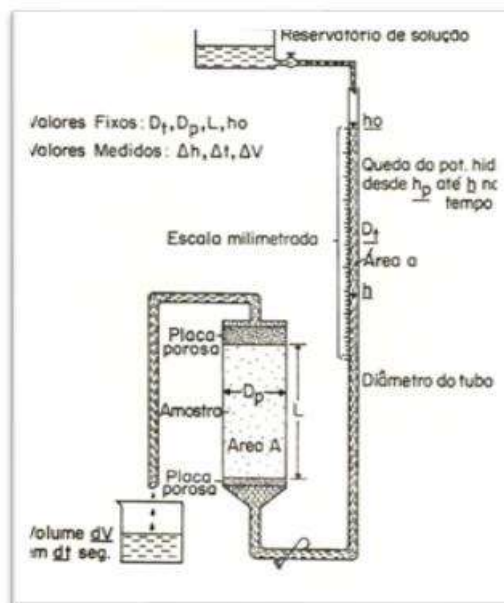
$Q$  = volume de água coletada na unidade de tempo ( $\text{cm}^3/\text{s}$ );

$A$  = área da seção transversal do corpo de prova do solo ( $\text{cm}^2$ );

$v$  = velocidade de descarga ( $\text{cm/s}$ );

$t$  = duração da coleta de água (s);

$k$  = condutividade hidráulica ( $\text{cm/s}$ ).



**Figura 1: – Figura 1: Ensaio de permeabilidade com Carga Constante**  
**Fonte: JOSE e ELLERT, 1988**

O gradiente hidráulico vem da equação 2:

$$i = h/L \quad (2)$$

Onde:

$L$  = comprimento da amostra (cm)  
 $h$  = perda de carga do sistema (cm)  
 $i$  = gradiente hidráulico

Substituindo na primeira equação temos a equação 3:

$$Q = A \left( k \frac{h}{L} \right) \quad (3)$$

Onde:

$Q$  = volume de água coletada na unidade de tempo (cm<sup>3</sup>/s)  
 $A$  = área da seção transversal do corpo de prova do solo (cm<sup>2</sup>)  
 $k$  = condutividade hidráulica (cm/s)  
 $h$  = perda de carga do sistema (cm)  
 $L$  = comprimento da amostra (cm)

Ou a equação 4:

$$k = QL/Aht \quad (4)$$

Onde:

$Q$  = volume de água coletada na unidade de tempo (cm<sup>3</sup>/s)  
 $A$  = área da seção transversal do corpo de prova do solo (cm<sup>2</sup>)  
 $t$  = duração da coleta de água (s)  
 $h$  = perda de carga do sistema (cm)  
 $k$  = condutividade hidráulica (cm/s)  
 $L$  = comprimento da amostra (cm)

Em se tratando de ensaio com carga variável, é empregado um piezômetro, utilizado para realizar a percolação da água através do solo. A montagem do ensaio é mostrada na Figura 2. As diferenças entre a carga inicial  $h_1$  no tempo  $t = 0$  antes da água fluir e da carga final  $h_2$   $t = t_2$ , depois do fluxo concluído são registradas (DAS, 2011).

A vazão da água através da amostra de solo em qualquer tempo pode ser calculada através da equação 5:

$$q = k (h/L)A = -a \, dh/dt \quad (5)$$

Onde:

$q$  = vazão (cm<sup>3</sup>/s)  
 $k$  = condutividade hidráulica (cm/s)  
 $a$  = área da seção transversal da bureta (cm<sup>2</sup>)  
 $A$  = área da seção transversal da amostra de solo (cm<sup>2</sup>)  
 $t$  = tempo duração da coleta de água (s)

$h$  = perda de carga do sistema (cm)

Fazendo uma integração do lado esquerdo da equação, com limites de tempo de 0 a  $t$ , e ao lado direito com limites de diferença de carga  $h_1$  para  $h_2$ , resulta na equação 6:

$$k = 2,303(aL/At) \frac{1}{t} \log \frac{h_1}{h_2}$$

(6)

Onde:

$k$  = condutividade hidráulica (cm/s)

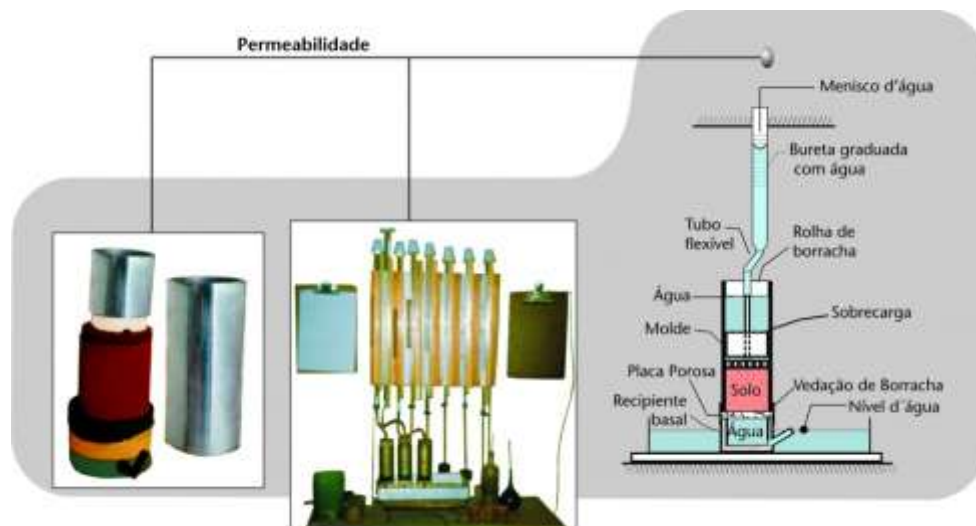
$A$  = área da seção transversal do corpo de prova do solo (cm<sup>2</sup>)

$t$  = duração da coleta de água (s)

$h_1$  = diferença de carga inicial (cm)

$h_2$  = diferença de carga final (cm)

$L$  = comprimento da amostra (cm)



**Figura 2: Ensaio de permeabilidade com Carga Variável.**  
Fonte: PORTAL DA TECNOLOGIA, 2012

## Metodologia

Nesta parte do trabalho serão detalhados os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

Materiais

a) Solo

O solo utilizado é procedente do campus da Unioeste - Cascavel. Típico no centro sul do Terceiro Planalto Paranaense (MINEROPAR, 1998). O solo é classificado pedologicamente como Latossolo Vermelho distroférico (EMBRAPA, 1999),

geotecnicamente é classificado como A7. Classificado ainda como CH pelo U.S.C.S. (ASTM Test Designation D-2487). Este solo é bem drenado, originado da decomposição do basalto, contém teores elevados de hematita ( $Fe_2O_3$ ), possui forte atração magnética, se fragmenta com facilidade quando úmido possui densidade aparente baixa 0,92 a 1,15 g/cm<sup>3</sup>, porosidade elevada entre 60% a 69% e bastante resistente a erosão laminar.

b) CCA: cinza da casca de arroz

A cinza que foi utilizada é industrializada e fornecida pela empresa Tecnosul.

Métodos

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Geotecnia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Ensaio Especiais

a) Série de Flocculação

Foi conduzida a série para o compósito solo mais CCA, para 10 dosagens, com teores de resíduo variando de 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, 15%, 20%, 25%, 30% , em provetas de 250 ml. O método que foi empregado é o mesmo utilizado na COPPE/UFRJ (MACEDO, 2004 apud KAMINSKI, 2008)

b) Confeção dos Corpos de Prova

Foram moldados corpos-de-prova no aparelho mini MCV (Moisture Condition Value) com 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Foram criadas três réplicas para cada dosagem. Os moldes foram feitos com teor ótimo de umidade, que foi determinado pelo ensaio de compactação, com energia que forneceu a massa específica seca máxima (PEIXOTO et. al., 1986 apud KAMINKI, 2008).

c) Saturação dos Corpos de Prova

A medida que os corpos de prova ficaram prontos, sua base foi envolta por papel filtro e perflex, fixado por uma borracha (“O” ring), após este preparo, foram deixados saturar até constância de peso, cerca de 24 h. Após a saturação foram submetidos, ao ensaio de condutividade hidráulica, na prensa de compressão triaxial .

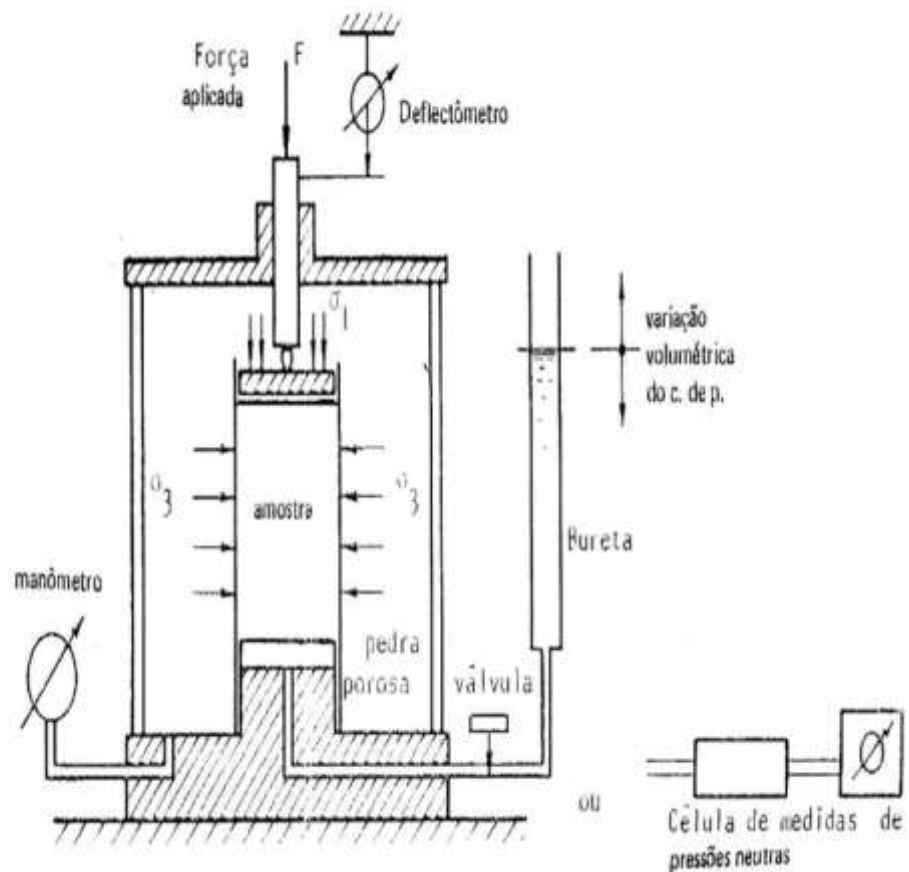
d) Ensaio de condutividade hidráulica na célula da prensa de compressão triaxial

Cada corpo de prova foi colocado na célula da prensa de compressão triaxial (Figura 3) e foram executados os ensaios de condutividade hidráulica .

O aparelho utilizado, esquema da figura 3, possui uma câmara cilíndrica, translúcida acoplada sobre um disco de metal, por uma bucha e um pistão. Esta câmara possui um pedestal onde deve ser colocada a amostra do solo previamente envolvida por uma membrana

de borracha impermeável, fixada por elástico, com finalidade de vedar a amostra do topo à base, evitando assim o contato da água com a câmara. Na base da amostra deve ser colocada uma placa porosa, conectada por tubulação à saída da câmara (TERZAGHI et. al., 1996 apud LUCAS, 2010).

Com a amostra acoplada, a câmara é hermeticamente fechada e preenchida por água, a qual distribui tensões confinantes a todas as direções da amostra, desencadeando em um estado hidrostático de tensões. A água percolará pelo solo e será direcionada a uma bureta, para leitura de seu volume. Através da variação volumétrica e da vazão, pode ser empregada a equação 6 para a obtenção do coeficiente de condutividade hidráulica (PINTO, 2000 apud LUCAS, 2010).



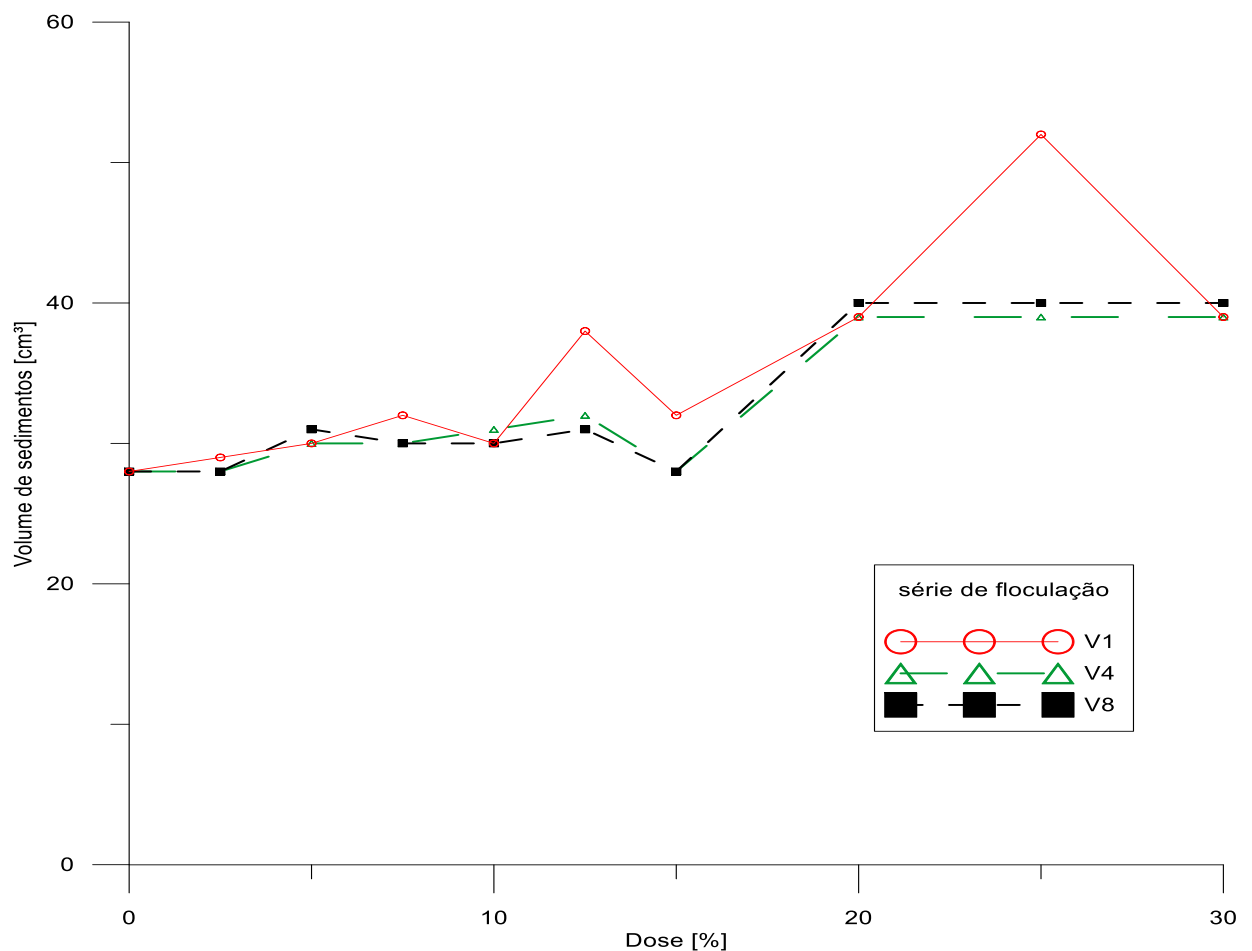
**Figura 3: Câmara compressão triaxial.**  
 Fonte: VARGAS 1981, apud LUCAS, 2010.

## Resultados e discussões

### Série de Flocação

Como as dosagens de CCA no solo variam de 0% a 30%, haverá um aumento de matéria dentro da proveta, mas para a precisão do ensaio precisa-se normalizar o volume para todas as provetas, normalização esta que foi obtida pela relação volume de sedimentos pela massa seca.

Com os valores do quociente da relação supracitada em função da dosagem, foi plotada a curva de floculação apresentada na figura 4:



**Figura 4: Curva de Floculação.**

A curva v1 é referente ao primeiro dia de leitura, v4 ao quarto dia de leitura e v8 ao oitavo dia. Através da análise da curva é possível perceber a estabilização do volume de sedimentos a partir do quarto dia, devido a sobreposição de v4 e v8.

O ponto máximo da curva, 20%, é interpretado como o ponto de dosagem ótima, pois a máxima variação volumétrica corresponde ao teor mínimo de reforço para tornar o solo estável.

### Ensaio de Condutividade Hidráulica

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica. Adotou-se como critério de estabilização do experimento a constância nos valores de vazão calculados durante o ensaio. A medida em que iam sendo obtidas as leituras, as mesmas eram lançadas nos gráficos vazão versus tempo e quando a curva se tornava horizontal, encerrava-se o experimento e calculava-se o valor de k através da equação (6).

#### Ensaio de Condutividade Hidráulica – Réplicas de Solo

A seguir serão apresentados os valores da leitura do volume em função do tempo, os gráficos de variação volumétrica em função do tempo, vazão em função do tempo e o coeficiente de condutividade hidráulica para os três corpos de prova com dosagem 0% CCA.

#### SR1 (Solo Réplica 1)

Na tabela 1 podem ser verificados os dados do ensaio de condutividade hidráulica para a primeira réplica de solo:

**Tabela 1: Título – Dados do ensaio SR1**

t (s)	V (cm <sup>3</sup> )	dV (cm <sup>3</sup> )	Q (cm <sup>3</sup> /s)
0	40,5	0	1,82X10 <sup>-1</sup>
60	29,6	10,9	6,50X10 <sup>-2</sup>
120	25,7	14,8	1,67X10 <sup>-2</sup>
240	23,7	16,8	5,00X10 <sup>-3</sup>
480	22,5	18	3,45X10 <sup>-3</sup>
900	21,05	19,45	2,50X10 <sup>-3</sup>
1800	18,8	21,7	1,83X10 <sup>-3</sup>
3600	15,5	25	1,39X10 <sup>-3</sup>
7200	10,5	30	1,24X10 <sup>-3</sup>
14400	1,6	38,9	1,24X10 <sup>-3</sup>

A seguir, nas figuras 5 e 6 podem ser observados os gráficos da variação volumétrica e da vazão do corpo de prova SR1:

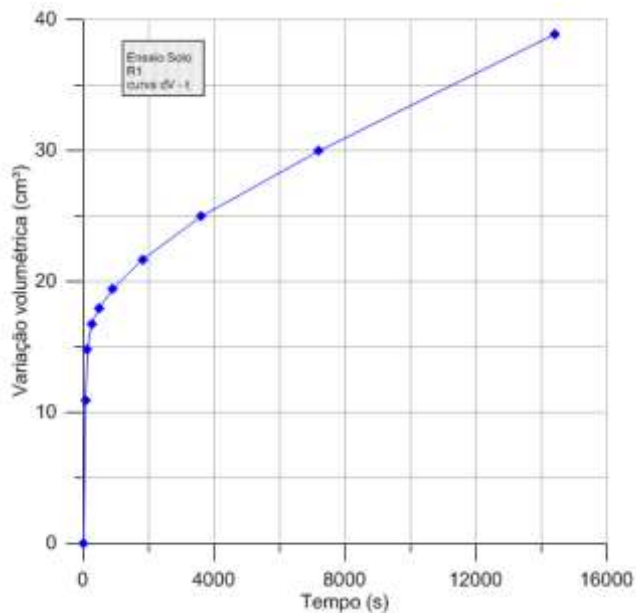


Figura 5: Variação volumétrica SR1.

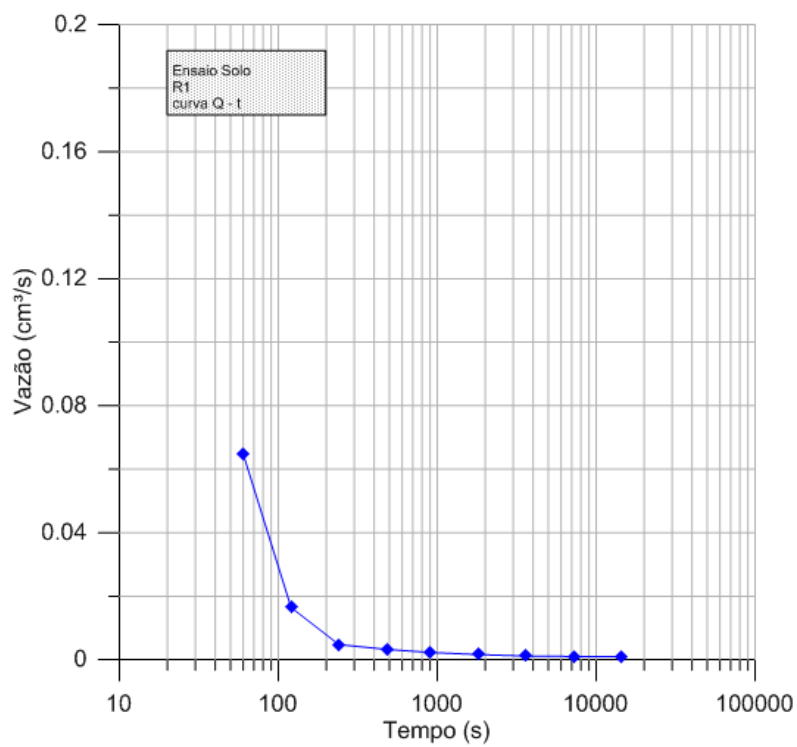


Figura 6: Vazão SR1.

O coeficiente de condutividade hidráulica do solo para a primeira réplica, com dosagem 0% de CCA é igual a  $1,33 \times 10^{-6}$  m/s.

Ensaio de Condutividade Hidráulica – Solo + Geomembrana

O ensaio de condutividade hidráulica foi realizado para três réplicas com geomembrana. Como não houve percolação d'água em nenhum dos ensaios, o coeficiente de condutividade hidráulica é zero, e os gráficos não serão exibidos.

Ensaio de Condutividade Hidráulica – Compósito Solo-CCA – Com densidade Máxima do solo

A seguir serão apresentados os valores das leituras do volume em função do tempo, os gráficos de variação volumétrica em função do tempo e vazão em função do tempo para os três corpos de prova do compósito Solo-CCA com 20% de CCA, confeccionados com a densidade máxima fornecida pelo ensaio de compactação do solo puro:

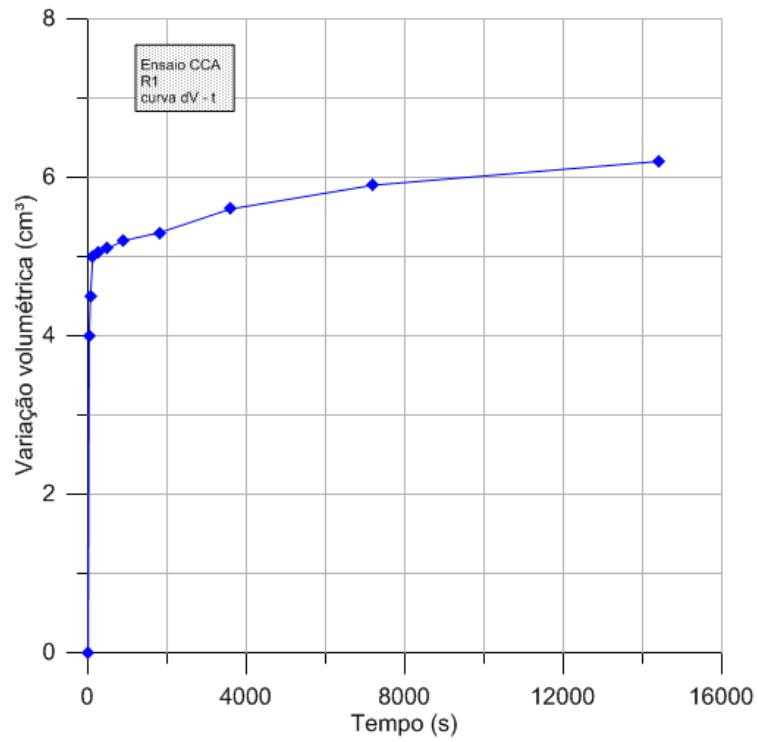
Solo-CCA – Réplica 1

Na tabela 2 estão apresentados os valores do ensaio de condutividade hidráulica para a primeira réplica solo mais CCA:

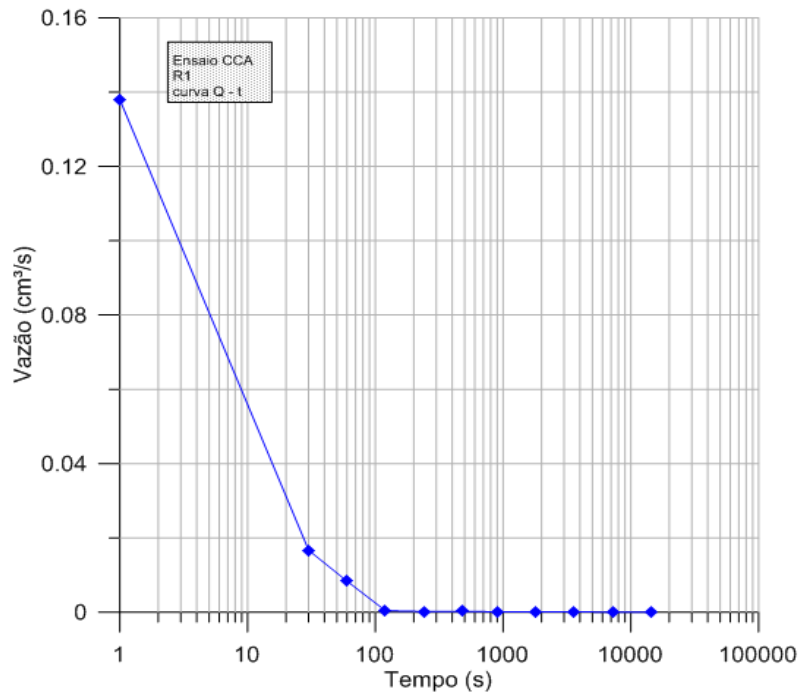
**Tabela 1: Título – Dados do ensaio SR1**

<b>t (s)</b>	<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ΔV (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Q (cm<sup>3</sup>/s)</b>
1	48,5	0	1,38X10 <sup>-1</sup>
30	44,5	4	1,67X10 <sup>-2</sup>
60	44	4,5	8,33X10 <sup>-3</sup>
120	43,5	5	4,17X10 <sup>-4</sup>
240	43,45	5,05	2,08X10 <sup>-4</sup>
480	43,4	5,1	2,38X10 <sup>-4</sup>
900	43,3	5,2	1,11X10 <sup>-4</sup>
1800	43,2	5,3	1,67X10 <sup>-4</sup>
3600	42,9	5,6	8,33X10 <sup>-4</sup>
7200	42,6	5,9	4,17X10 <sup>-4</sup>
14400	42,3	6,2	4,17X10 <sup>-4</sup>

Nas figuras 7 e 8 encontram-se os gráficos com as curvas de variação volumétrica e vazão para a primeira réplica do compósito solo mais CCA:



**Figura 7: Variação Volumétrica CCAR1**



**Figura 8: Vazão CCAR1**

O coeficiente de condutividade hidráulica do solo para a primeira réplica, com dosagem 20% de CCA é igual a  $5,60 \times 10^{-8}$  m/s.

Ensaio de Condutividade Hidráulica – Compósito Solo-CCA Com Densidade Máxima do Compósito

A seguir serão apresentados os valores das leituras do volume em função do tempo, os gráficos de variação volumétrica em função do tempo e vazão em função do tempo para os três corpos de prova do compósito Solo-CCA com 20% de CCA que foram confeccionados com densidade máxima do compósito, fornecida pelo ensaio de compactação.

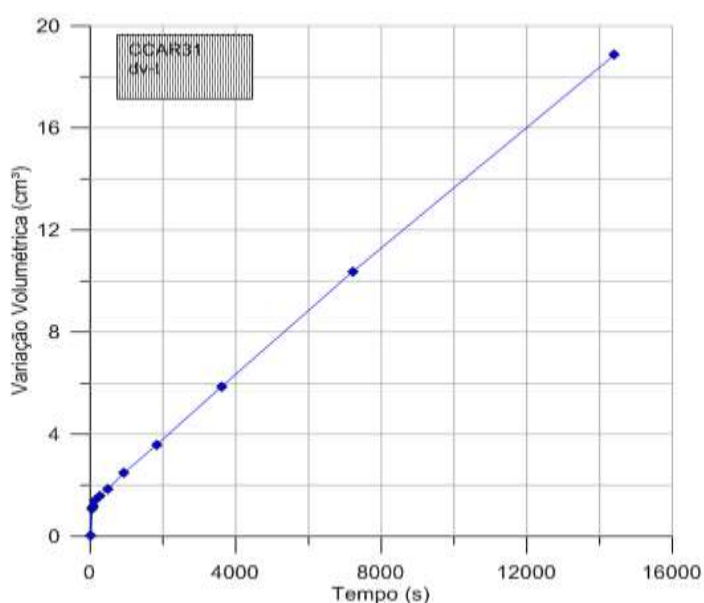
### Solo-CCA – Réplica 3

Na tabela 3 estão apresentados os valores do ensaio de condutividade hidráulica para a terceira réplica solo mais CCA:

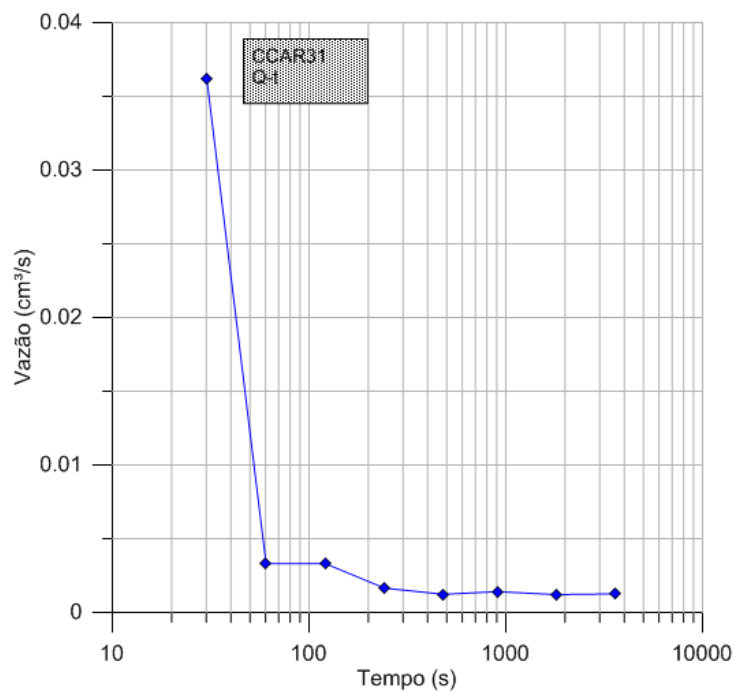
**Tabela 1: Título – Dados do ensaio SR1**

t (s)	V (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Q (cm <sup>3</sup> /s)
1	40,15	0	
30	39,1	1,05	$3,62 \times 10^{-2}$
60	39	1,15	$3,33 \times 10^{-3}$
120	38,8	1,35	$3,33 \times 10^{-3}$
240	38,6	1,55	$1,67 \times 10^{-3}$
480	38,3	1,85	$1,25 \times 10^{-3}$
900	37,7	2,45	$1,43 \times 10^{-3}$
1800	36,6	3,55	$1,22 \times 10^{-3}$
3600	34,3	5,85	$1,28 \times 10^{-3}$

Nas figuras 9 e 10 encontram-se as curvas de variação volumétrica e vazão para a terceira réplica do compósito solo mais CCA:



**Figura 9: variação Volumétrica CCAR31**



**Figura 10: Vazão CCAR31**

O coeficiente de condutividade hidráulica do solo para a terceira réplica com densidade máxima do compósito e dosagem 20% de CCA é igual a  $2,95 \times 10^{-7}$ .

#### Efeito Causado Pela Adição da CCA ao Solo

Na tabela 4 constam os valores dos coeficientes de condutividade hidráulica médio do solo e da CCA

Tabela 04: Efeito da CCA

Ensaio	V (m/s)	$\Delta V$ (m/s)	S
SR1	$1,33 \times 10^{-6}$	$1,418 \times 10^{-6}$	$7,75 \times 10^{-7}$
SR2	$2,23 \times 10^{-6}$		
SR3	$6,92 \times 10^{-7}$		
CCAR1	$5,60 \times 10^{-8}$	$2,130 \times 10^{-7}$	$1,42 \times 10^{-7}$
CCAR2	$2,49 \times 10^{-7}$		
CCAR3	$3,34 \times 10^{-7}$		
CCAR11	$5,72 \times 10^{-8}$	$1,538 \times 10^{-7}$	$1,01 \times 10^{-7}$
CCAR21	$1,44 \times 10^{-7}$		
CCAR31	$2,95 \times 10^{-7}$		
GEOR1	0	0	0
GEOR2	0		
GEOR3	0		

Em relação à curva de compactação a CCA adicionada ao solo provocou um aumento de 0,9% na massa específica seca máxima e um aumento de 2,10% na umidade ótima.

A CCA apresentou efeito positivo no solo em relação a sua permeabilidade, o solo acrescido pela cinza, compactado com a densidade máxima do solo puro obteve uma redução de 85% do coeficiente de condutividade hidráulica. Já o solo acrescido por CCA, compactado com a densidade máxima do compósito, obteve uma redução em relação ao solo natural de 89,17%. Ambas as reduções são significativas. Entretanto se comparado com o coeficiente solo-geomembrana que provoca uma redução de 100%, a CCA não é tão eficiente quanto.

### **Considerações finais**

A preocupação com a preservação do meio ambiente tange a busca por alternativas renováveis, que sejam tecnicamente viáveis para a indústria.

Atualmente os recursos utilizados para a impermeabilização do solo, partem de materiais não renováveis, e muitas vezes inviáveis economicamente, devido às áreas que necessitam de tal tratamento serem largamente extensas, como é o caso de aterros sanitários e estradas.

Através da pesquisa realizada constatou-se que a CCA residual, do processo de beneficiamento de arroz, quando adicionada ao solo forma um compósito significativamente menos permeável que o solo natural chegando a diminuir 89,17% da condutividade hidráulica do mesmo, além de provocar um aumento de 0,9% na massa específica seca máxima. Portanto a CCA pode tornar-se uma alternativa na substituição de materiais nobres e caros, em sistemas de contenção de contaminantes. Além do que esta prática pode reduzir o passivo ambiental que a CCA representa para a indústria de beneficiamento de arroz.

### **Referências**

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D1242-95 a: **Standard Test Methods for Resistance of Plastic to Abrasion**. Philadelphia, 1996.
- DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7ª Ed. Editora Cengage Learning, São Paulo, 2011.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA **Sistema brasileiro de classificação de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos.

JOSE, C.; ELLERT, N. **Levantamento geofísico na bacia do Alto Rio Turvo, SP: correlação entre dados hidrodinâmicos e geelétricos**. Bol. IG-USP, Sér. Cient., 1988, vol.19, p.87-110. ISSN 0102-6283.

KAMINSKI T. B. **Desempenho mecânico de compósito formado por solo e cinza de casca de arroz**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2008.

LUCAS J. F. R. **Obtenção da curva de retenção da água do solo pela câmara de compressão triaxial e pelo papel filtro**. Trabalho de Pós-Graduação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2010.

MINEROPAR – MINERAIS DO PARANÁ S.A. **Mineração na geração de emprego e renda – oportunidades de negócio com mineração**. Curitiba: SERT, 1998.

PORTAL DA TECNOLOGIA. **Ensaio de Infiltrabilidade e Permeabilidade**. Acesso em: 08/05/20012. Disponível em: <http://www.portaldetecnologia.com.br/tags/ensaio-de-permeabilidade/>.