

5 Apresentação e Discussão dos Resultados

5.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentadas as características físicas, químicas e mineralógicas dos materiais, obtidas a partir dos ensaios descritos no capítulo quatro ou através de ensaios realizados por outros autores.

Esta caracterização servirá como ponto de partida para explicar a resposta de cada material após executar os ensaios de compactação e permeabilidade, os quais também são aqui apresentados e discutidos.

5.2 Caracterização Física

5.2.1 Granulometria

Neste item, são apresentadas as curvas granulométricas obtidas para o solo, o composto orgânico e as misturas M1, M2 e M3; bem como as frações que compõem cada um dos materiais em estudo.

É importante mencionar que no caso do composto puro, a curva aqui plotada foi obtida a partir do método do peneiramento unicamente. Foram executados dois ensaios de granulometria conjunta (peneiramento e sedimentação) neste material, mas ambas as vezes, se verificou o afirmado por Antunes (2006): o defloculante utilizado (hexametáfosfato de sódio) não consegue separar os grumos de matéria orgânica, e ela, por ser um colóide, não precipita. Isto se viu confirmado experimentalmente pela espuma preta formada por partículas suspensas na água, no topo da bureta, dificultando as leituras com densímetro. Este problema ocorreu em maior escala nas misturas 3, 2 e 1 respectivamente, mas mesmo assim foi possível executar as leituras com o densímetro e plotar as curvas a partir da granulometria conjunta. A fonte de erro do método da granulometria conjunta aumenta proporcionalmente com o aumento do teor de composto orgânico contido na mistura.

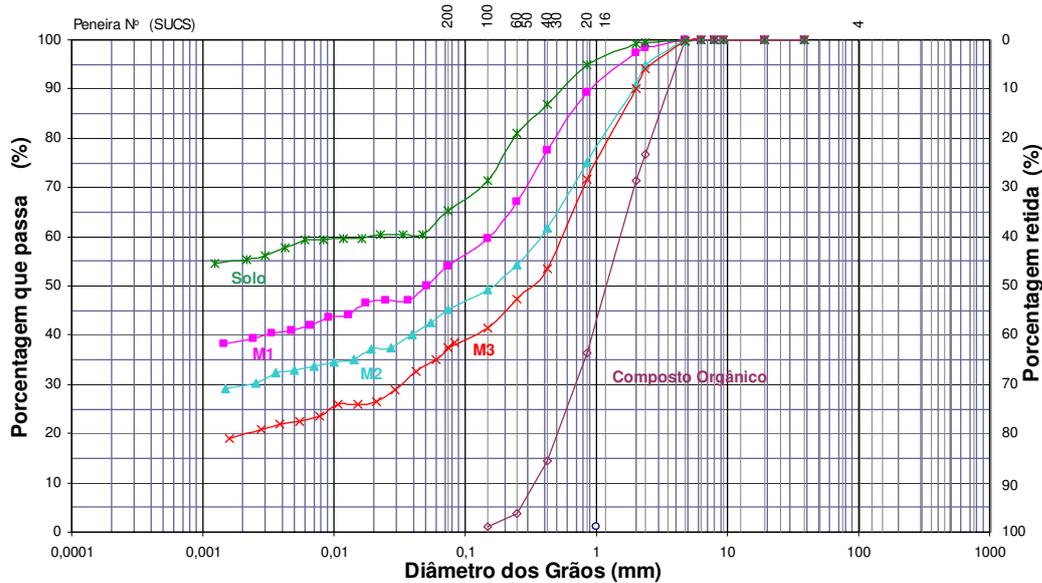


Figura 5.1-Curvas granulométricas dos materiais em estudo.

Nota-se que quanto maior a quantidade de composto orgânico na mistura, a fração fina é menos predominante. Isto pode ser explicado porque, como já foi dito anteriormente, as partículas de matéria orgânica ficam aglutinadas e não conseguem ser separadas com defloculante. Portanto, nos ensaios, estas agregações de partículas aparecem como grãos de maior diâmetro.

A seguir, apresenta-se um resumo das frações que compõem cada material.

Tabela 5.1-Resumo das características granulométricas dos materiais.

Amostra	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
Solo	0,84	8,82	14,07	15,5	5,52	55,25
M1	2,65	14,73	19,15	11,06	13,52	38,89
M2	9,14	23,46	15,72	7,92	14,06	29,7
M3	9,82	28,9	16,82	9,46	15,33	19,67

5.2.2 Densidade dos Grãos

A metodologia seguida para obter a densidade dos grãos foi a mesma para todos os materiais (NBR 6508/1984). A seguinte tabela apresenta os resultados obtidos:

Tabela 5.2-Valores de Gs obtidos experimentalmente

Solo	M1	M2	M3	Composto
2,688	2,495	2,377	2,22	1,938

Na Figura 5.2 pode-se visualizar graficamente que quanto maior a quantidade de composto adicionada, menor o peso específico dos grãos, de acordo com Ohu *et.al.* (1986):

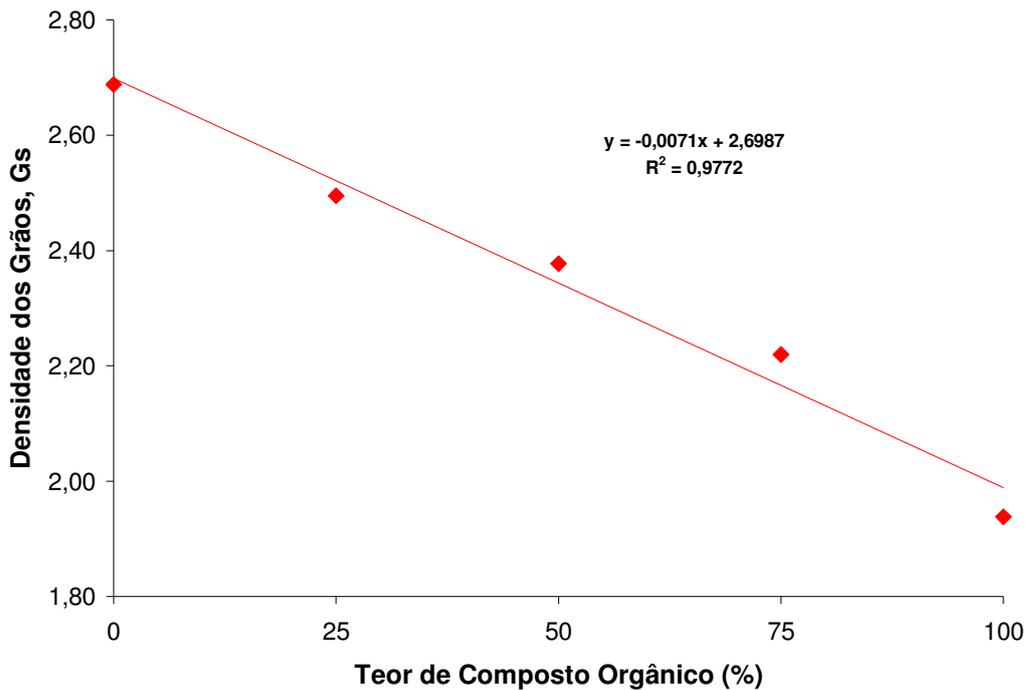


Figura 5.2-Densidade dos grãos vs teor de composto orgânico no material.

5.2.3 Limites de Consistência

Os limites de Atterberg (liquidez e plasticidade) foram obtidos a partir da execução dos ensaios especificados nas normas NBR 6459/1984 e NBR 7189/1984. Com estes dados foram calculados o índice de plasticidade (dado pela diferença de ambos os limites) e a atividade dos materiais segundo a proposta de Skempton (Equação 5.1):

$$I_a = \frac{IP}{\% < 2\mu\text{m}} \quad (5.1)$$

Tabela 5.3-Limites de consistência, índice de plasticidade e atividade.

	Solo	M1	M2	M3	Composto
Limite de Liquidez (LL)	58	60	66	-	-
Limite de Plasticidade (LP)	28	33	43	-	-
Índice de Plasticidade (IP)	30	27	23	-	-
Índice de Atividade (I_a)	0,54	0,69	0,76	-	-

O composto orgânico não apresentou plasticidade nenhuma, portanto, a execução dos ensaios para a obtenção dos limites de Atterberg tanto para ele como para a M3 (mistura com maior teor de matéria orgânica) não foi possível.

Pode-se observar na Figura 5.3 que quanto maior é o teor de solo, menor o limite de plasticidade e o limite de liquidez. Isto se deve à capacidade da matéria orgânica absorver uma maior quantidade de água. Contrariamente, o índice de plasticidade e a coesão aumentam com o acréscimo do solo nas misturas.

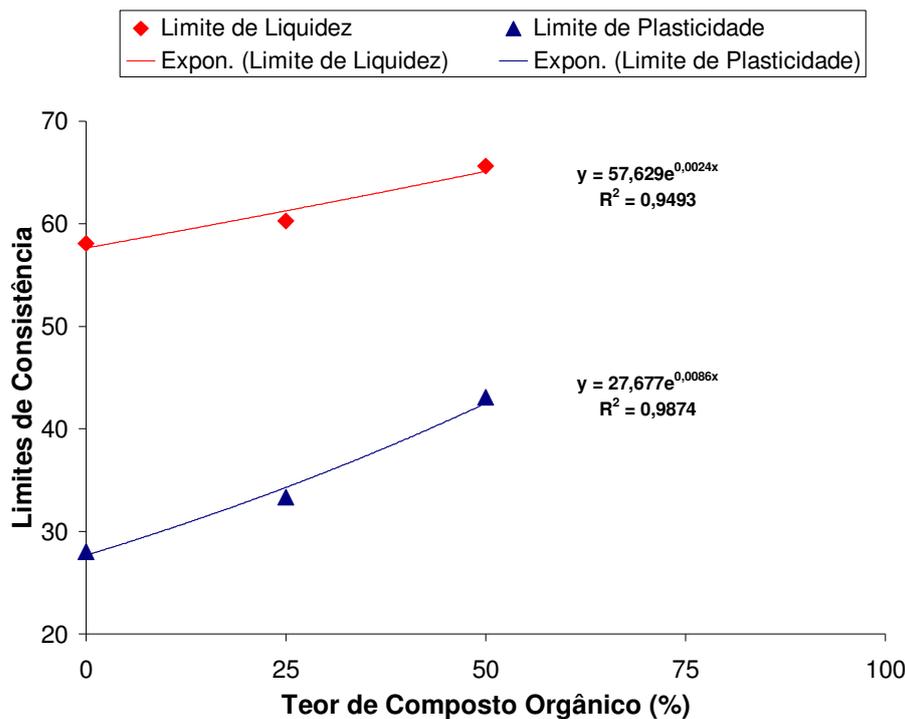


Figura 5.3-Limites de consistência versus teor de composto orgânico.

Quanto à atividade dos materiais em estudo, de acordo com a fração argila, um solo se classifica da seguinte forma:

- $I_a < 0,75$: inativo
- $1,25 > I_a > 0,75$: atividade normal
- $I_a > 1,25$: ativo

Utilizando o critério supracitado (Skempton), o solo apresentou uma atividade baixa, o que era de se esperar devido à predominância da caulinita; argilomineral de baixa capacidade de troca catiônica e cuja atividade é igual a 0,5; valor muito próximo do obtido para o solo. A M1 se enquadrou na mesma classificação do solo e a M2 entrou no intervalo de atividade normal (dados na Tabela 5.3). Aparentemente, quanto maior o teor de matéria orgânica, maior a atividade do material. Não foi possível utilizar a Equação 5.1 como critério de classificação para a M3 nem o composto puro, já que eles não apresentaram plasticidade. No entanto, segundo Antunes (2006) a matéria orgânica apresenta uma atividade maior que da argila, pois, as partículas possuem uma superfície específica maior e uma elevada capacidade de troca catiônica, ainda, a presença de ácidos húmicos e fúlvicos no composto orgânico, faz com que este seja altamente ativo.

5.2.4 Classificação

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo puro utilizado neste estudo foi classificado como CH (argila de alta plasticidade). Apenas este material pode ser classificado, pois as misturas e o composto orgânico não se enquadram nos sistemas de classificação existentes.

5.3 Caracterização Mineralógica

Soares (2005) realizou análises de microscopia óptica a partir de lâminas do solo indeformado do Campo Experimental II (Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6), identificando cristais de quartzo, agregados ferruginosos, granadas em alto grau de alteração e a predominância de uma matriz de argilominerais, compostos principalmente por caulinita.

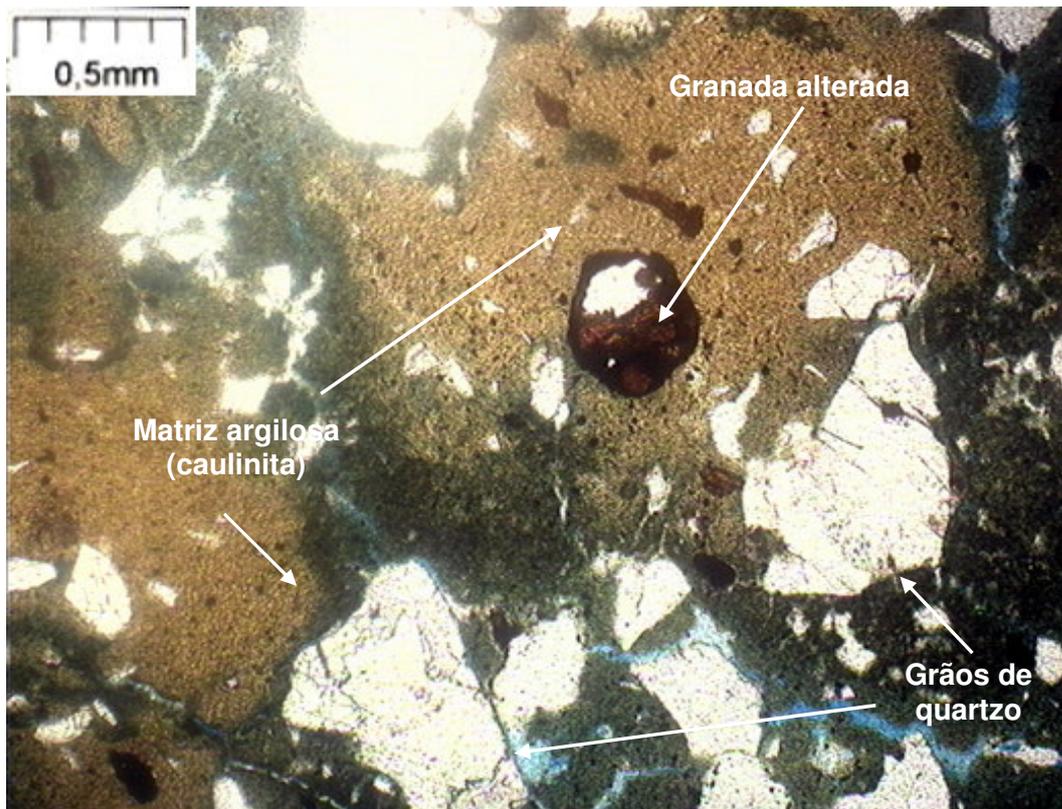


Figura 5.4- Presença da matriz argilosa com grãos de quartzo e granada muito alterada (Soares, 2005).

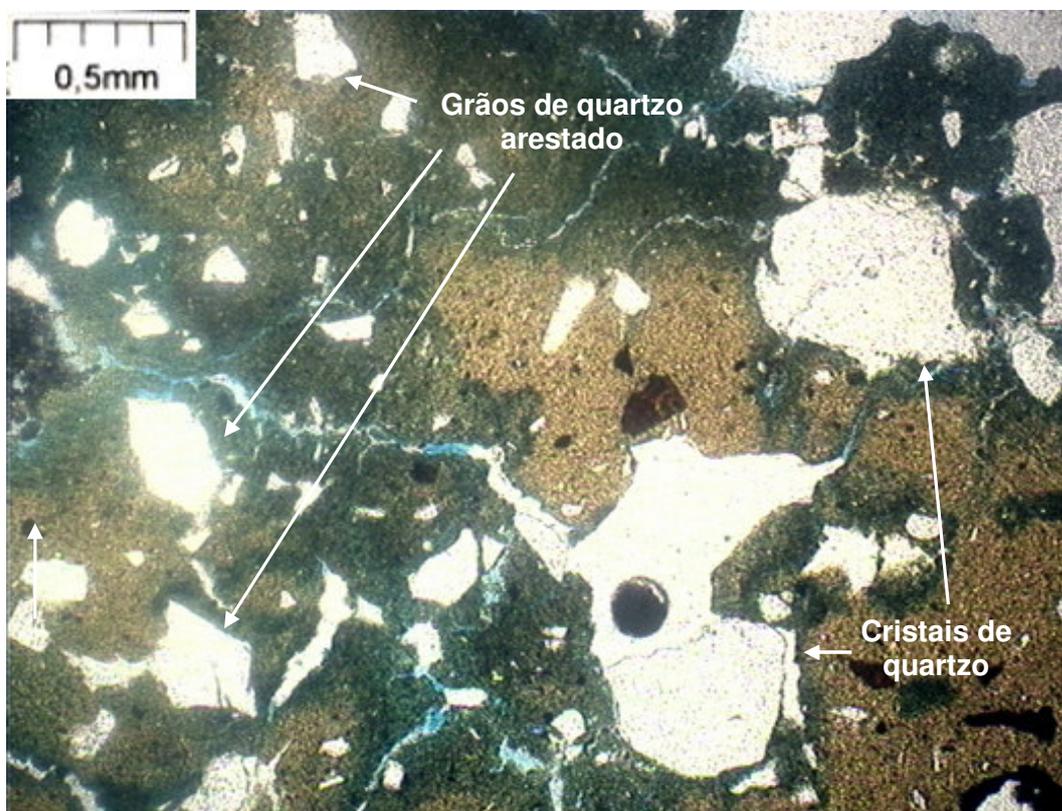


Figura 5.5- Grãos de quartzo arestados e cristais grandes de quartzo (Soares, 2005).

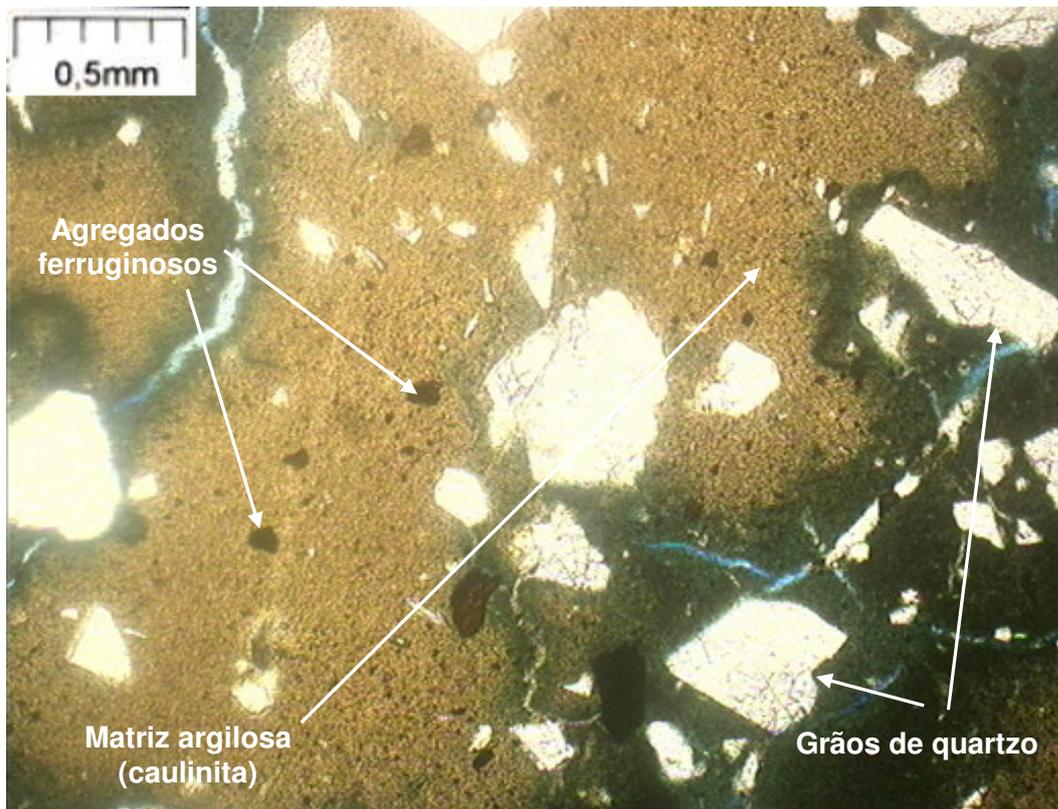


Figura 5.6-Grande área da matriz argilosa englobando alguns grãos de agregados ferruginosos e quartzo (Soares, 2005).

Para determinar a composição mineralógica do material, foi realizada uma difração de Raios-X em lâmina com o material passante na peneira #200, ou seja, com as frações silte e argila. Na figura a seguir, apresenta-se o difratograma obtido:

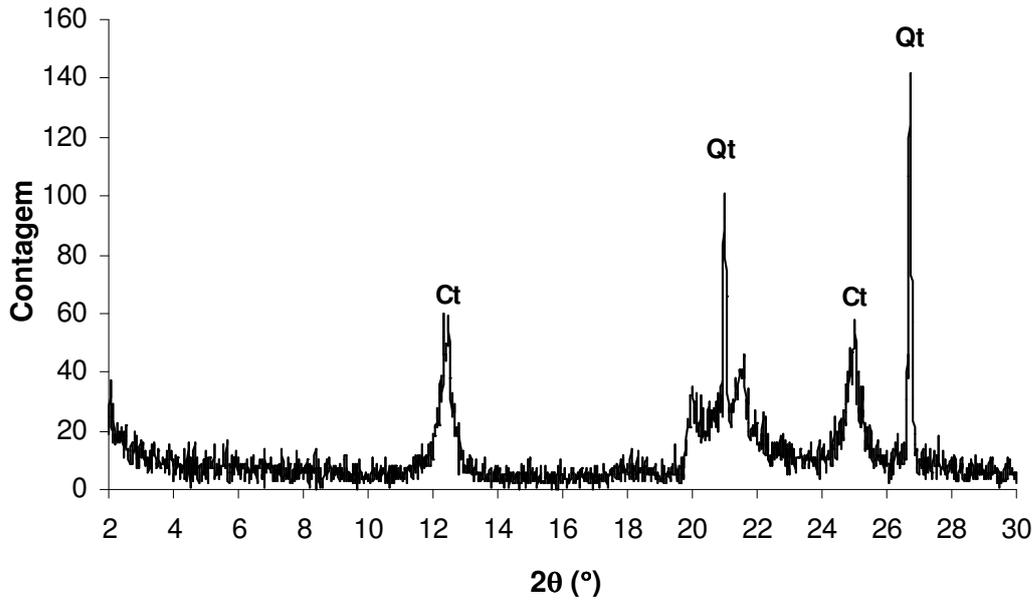


Figura 5.7-Difratograma da amostra de solo passante na peneira #200 (Legenda: Ct=Caulinita, Qt=Quartzo).

Na Figura 5.7 pode-se observar a predominância do argilomineral caulinita. Os resultados são congruentes com os obtidos por Moreira (1998), Beneveli (2002), Duarte (2004) e Soares (2005).

Como complemento das observações e análises realizadas por Soares (2005) e dos resultados obtidos a partir da difração de Raios-X, se apresenta a seguir uma tabela com os dados mineralógicos do solo do Campo Experimental II, extraídos do trabalho de Sertã (1986):

Tabela 5.4-Análise mineralógica do solo (Sertã, 1986).

Fração do solo	Mineral	Quantidade / observações
Pedregulho	Quartzo	Grãos arestados de coloração transparente a leitosa
	Granada alterada	Alguns fragmentos
Areia	Quartzo	Grãos arestados
	Granada muito alterada	Correspondem a aproximadamente 5% da amostra total
	Agregados Ferruginosos	
	Magnetita	Pequenos traços
Silte	Quartzo	Presença
	Caulinita	Presença
	Goetita	Presença
Argila	Caulinita	Presença marcante
	Goetita	Alguns traços

5.4 Caracterização Química

5.4.1 Solo

Os dados apresentados na Tabela 5.5 foram extraídos e adaptados por Soares (2005) do trabalho realizado por Duarte (2004). Mostram-se as análises químicas de capacidade de troca catiônica (CTC) e de ataque sulfúrico do solo.

Na Tabela 5.6, constam os dados da análise química total em porcentagem em peso obtidos por Sertã (1986).

Tabela 5.5-Análises químicas de capacidade de troca catiônica (CTC) e de ataque sulfúrico (Duarte, 2004).

Complexo Sortivo (meq/100g)							
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺	CTC	
0,00	0,4	0,11	0,15	1,3	3,3	5,3	
Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0,8%)					g/Kg	pH (1:2,5)	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ki	Kr	Água	KCL
179	204	103	11,1	1,49	1,13	4,3	4,0

Tabela 5.6-Análise química total em porcentagem em peso (Sertã, 1986).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
55,4%	22,0%	< 0,05%	< 0,10%	11,0%	1,30%	0,11%	0,01%

A predominância de SiO₂(%), Al₂O₃(%) e Fe₂O₃(%) no material indica que o mesmo é laterítico. Em contrapartida, a pequena quantidade de CaO, MgO, K₂O e Na₂O mostradas na Tabela 5.6 indicam que o solo em estudo se encontra altamente intemperizado. O índice Kr confirma este fato.

A partir da relação molecular sílica-alumina (Ki), pode-se inferir que o material está conformado predominantemente por caulinita, (argilomineral de baixa atividade) coerente com o valor de CTC para este tipo de material (Duarte, 2004). O solo pode se classificar como ácido, devido ao valor de pH.

5.4.2 Composto Orgânico

A caracterização química do composto, realizada pela EMBRAPA, apresenta-se na seção de apêndices. Na PUC-Rio foram realizados unicamente os ensaios de queima de matéria orgânica, baseando-se na norma NBR 13600, com pequenas variações nas temperaturas e tempos de permanência na mufla.

O ensaio que consistiu em secar o material por um período de 24 horas na estufa de 110 °C, para posteriormente ser colocado na mufla a uma temperatura de 500 °C por um período mínimo de 4 horas até atingir massa constante foi identificado como MO1. O ensaio identificado como MO2 também consistiu em secar o material por 24 horas a 110 °C, mas diferenciou-se no período de permanência na mufla, que foi de um mínimo de 6 horas até atingir massa constante, e a uma temperatura de 400 °C. Os detalhes de MO1 e MO2 forma explicados detalhadamente no capítulo de metodologias e procedimentos. Os resultados obtidos de ambos os ensaios foram bastante próximos e mostram-se a seguir:

Tabela 5.7-Teor de matéria orgânica do composto utilizado nas misturas.

Ensaio	MO1	MO2
a: massa da amostra seca na estufa de 110 °C (gramas)	39,85	38,61
b: massa da amostra queimada na mufla (gramas)	23,74	23,31
MO: teor de matéria orgânica (%)	40,41	39,69

Nota: os resultados mostrados para MO1 e MO2 são a média dos valores obtidos em três determinações.

Nas Figuras 5.8 e 5.9 se mostra o composto orgânico antes e depois da queima de matéria orgânica. Pode-se observar que o material original era de cor preta e depois de concluído o processo, ficou com uma cor esbranquiçada.



Figura 5.8-Recipientes com composto orgânico seco em estufa a 110°C antes de ser colocado na mufla.

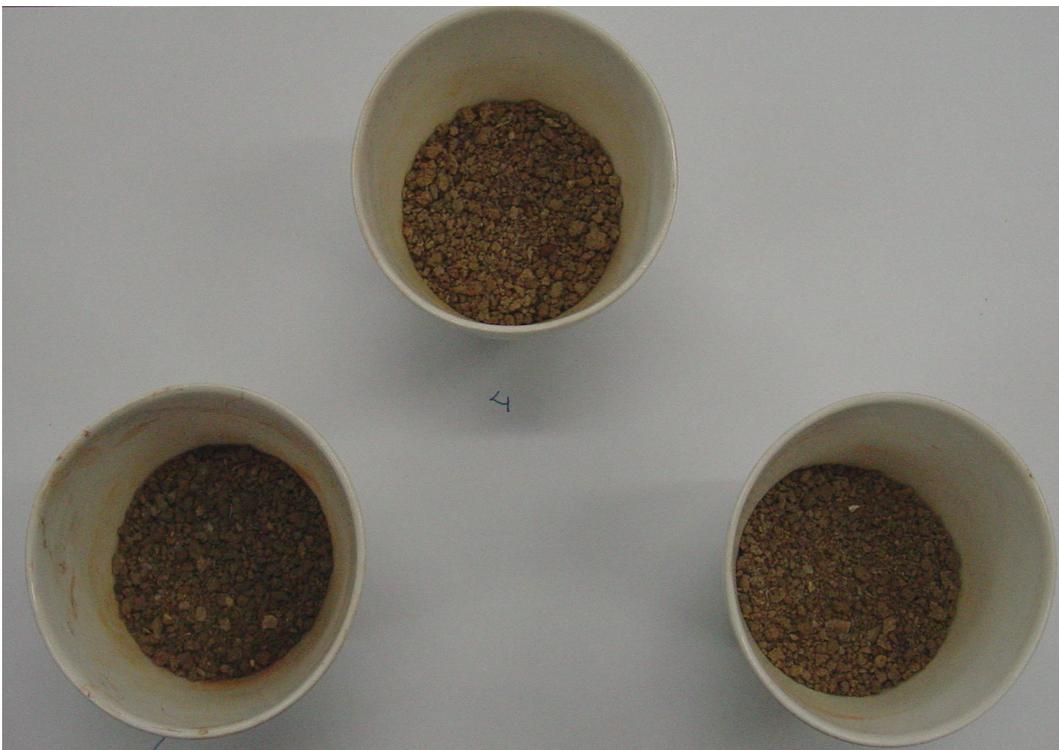


Figura 5.9-Recipientes com composto orgânico após ser submetido à queima na mufla.

5.5 Ensaio de Compactação

5.5.1 Proctor Normal

Nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 mostram-se as curvas de compactação obtidas a partir de sessenta ensaios com e sem reuso de material.

O objetivo principal destes ensaios foi definir a massa específica seca correspondente a três teores de umidade de compactação diferentes: umidade ótima, três por cento abaixo e três por cento acima desta umidade (w_{ot} , $w_{ot-3\%}$ e w_{ot+3}) para cada um dos materiais utilizados. Isto, para poder correlacionar os resultados do Proctor Normal com a definição de pressão equivalente nos ensaios de pisoteamento e para moldar corpos de prova com ambos os métodos de compactação, que possuam uma massa específica seca muito próxima, quando compactados na mesma umidade, para serem utilizados nos ensaios de permeabilidade.

Após a apresentação de cada curva de compactação, fornece-se uma tabela com os valores de umidade e massa específica seca respectiva para cada material, quando compactado com energia de Proctor Normal.

Curva Compactação Proctor Normal Solo

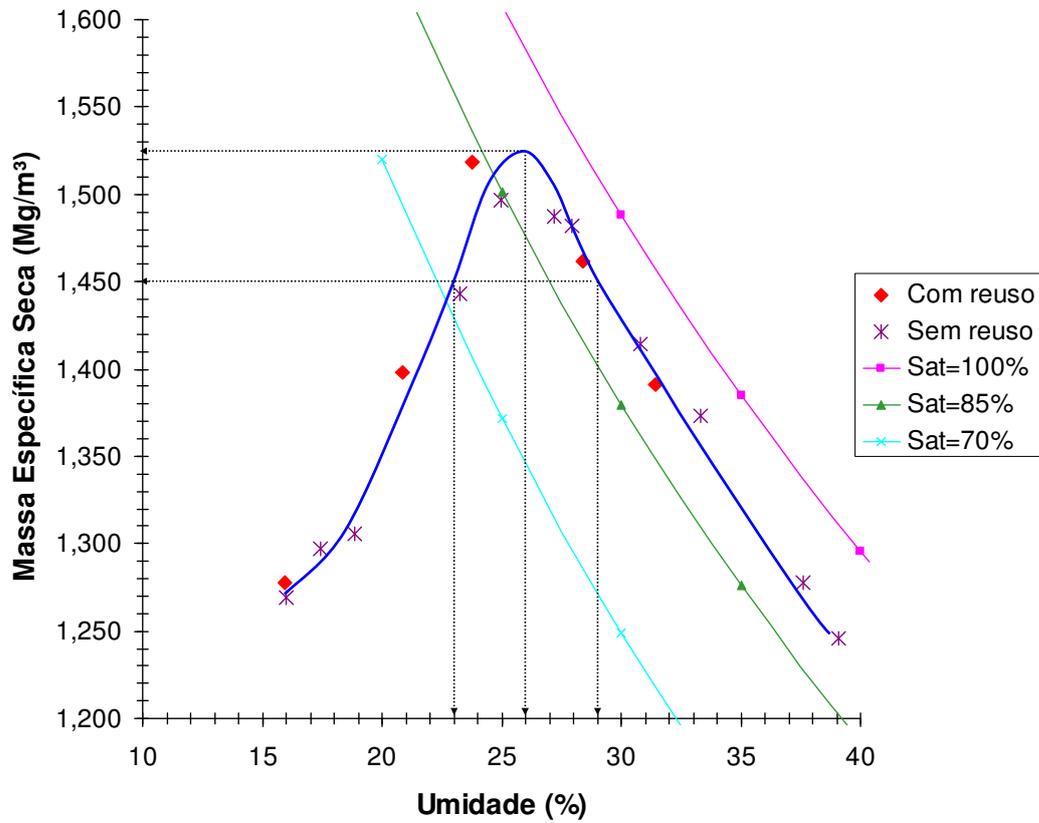


Figura 5.10-Curva de compactação Proctor Normal, Solo.

Tabela 5.8-Propriedades do solo quando compactado com Proctor Normal.

SOLO			
Umidade de compactação	$w_{ot-3\%}$	w_{ot}	$w_{ot+3\%}$
$w_o\%$	23	26	29
$\rho_d (Mg/m^3)$	1,45	1,525	1,45

Curva Compactação Proctor Normal M1

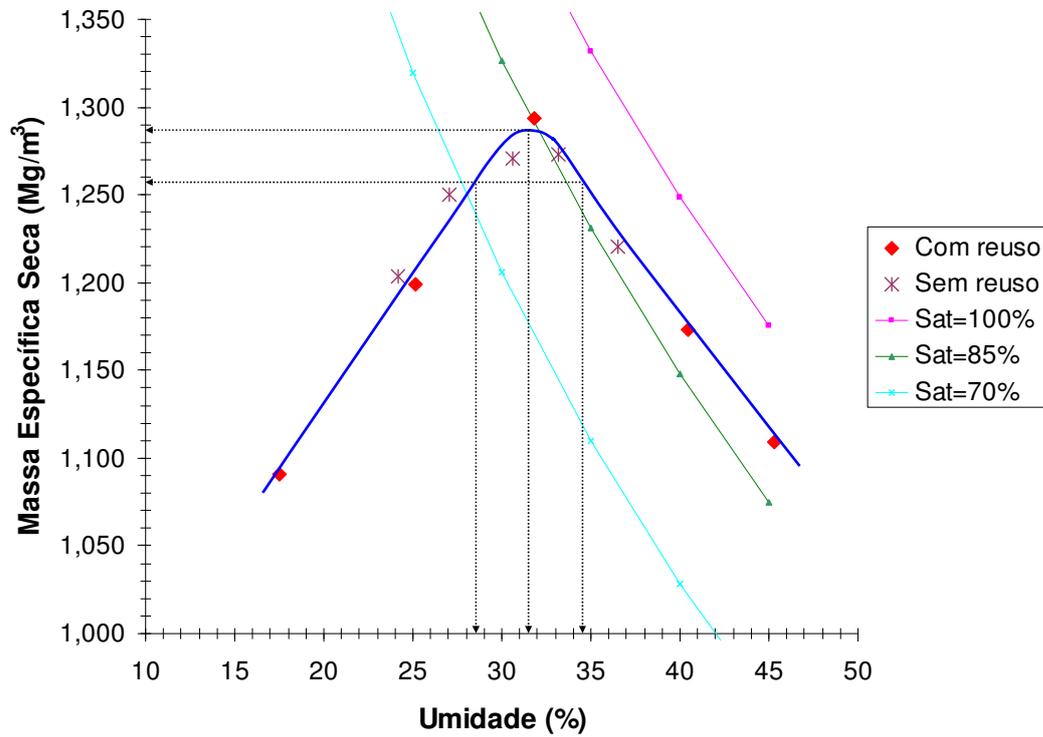


Figura 5.11-Curva de compactação Proctor Normal, M1.

Tabela 5.9-Propriedades da M1 quando compactada com Proctor Normal.

M1			
Umidade de compactação	$w_{ot-3\%}$	w_{ot}	$w_{ot+3\%}$
$w_o\%$	28,5	31,5	34,5
ρ_d (Mg/m ³)	1,254	1,286	1,254

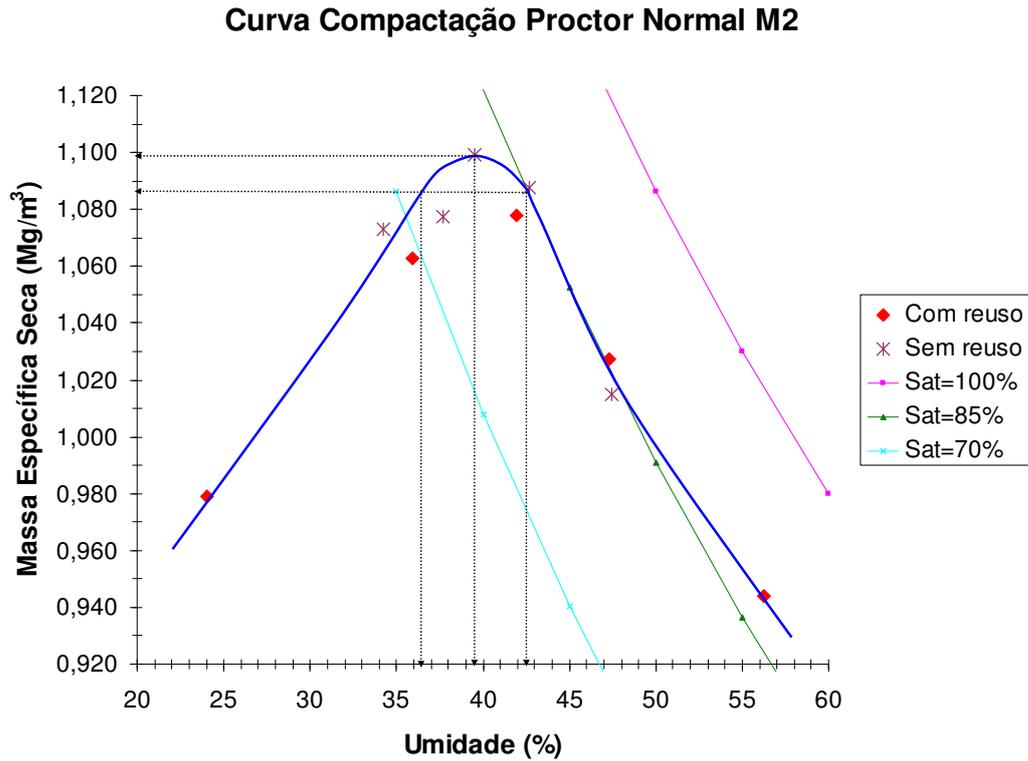


Figura 5.12-Curva de compactação Proctor Normal, M2.

Tabela 5.10-Propriedades da M2 quando compactada com Proctor Normal.

M2			
Umidade de compactação	$w_{ot-3\%}$	w_{ot}	$w_{ot+3\%}$
w_o %	36,5	39,5	42,5
ρ_d (Mg/m^3)	1,086	1,098	1,086

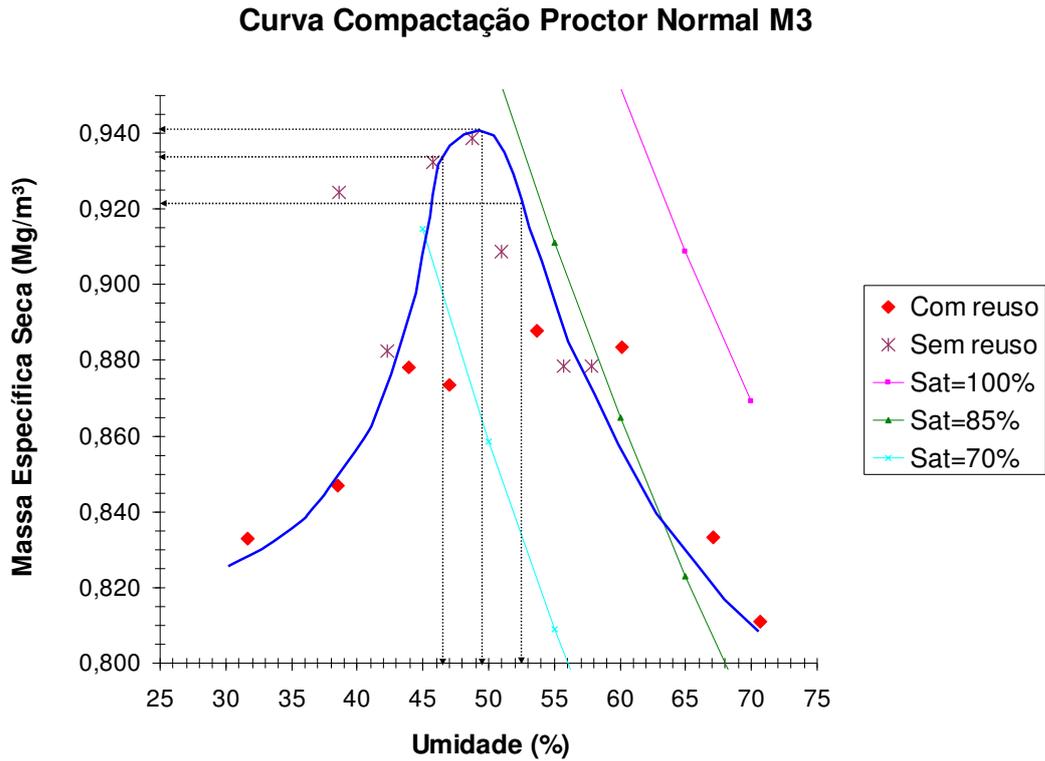


Figura 5.13-Curva de compactação Proctor Normal, M3.

Tabela 5.11-Propriedades da M3 quando compactada com Proctor Normal.

M3			
Umidade de compactação	$w_{ot} - 3\%$	w_{ot}	$w_{ot} + 3\%$
$w_o\%$	46,5	49,5	52,5
$\rho_d (\text{Mg}/\text{m}^3)$	0,934	0,941	0,921

Curva Compactação Proctor Normal Composto

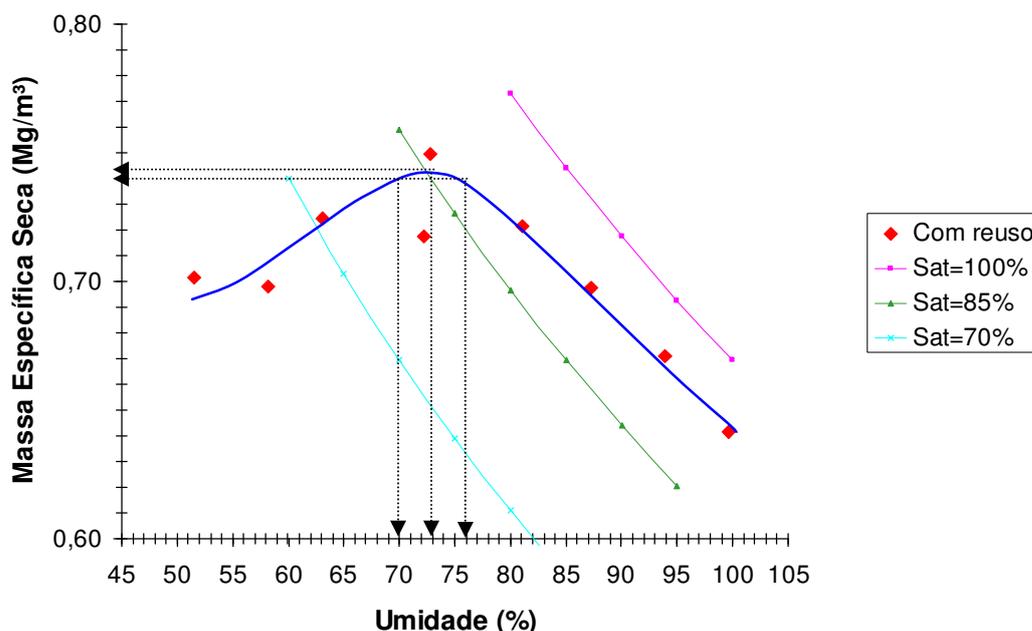


Figura 5.14-Curva de compactação Proctor Normal, Composto Orgânico.

Tabela 5.12-Propriedades do Composto Orgânico quando compactado com Proctor Normal.

Composto Orgânico			
Umidade de compactação	w_{ot-3}	w_{ot}	w_{ot+3}
$w_o\%$	70	73	76
ρ_d (Mg/m ³)	0,742	0,74	0,742

Pode-se observar que quanto maior a quantidade de composto orgânico presente nas misturas, maior a umidade necessária para atingir a massa específica seca máxima, o que era de se esperar, devido à alta capacidade de absorção de água que caracteriza a matéria orgânica. Por sua vez, o valor da massa específica também é menor. A diferença entre a massa correspondente à umidade ótima e as correspondentes às umidades três por cento acima e abaixo dela diminui com o aumento do teor de composto.

A curva de compactação de Proctor Normal apresentada na Figura 5.14 foi obtida a partir de ensaios com reuso de material para definir o comportamento do composto puro, porém, devido à dificuldade de extrair o corpo de prova do molde sem ele colapsar, bem como de rehidratar o material e controlar sua umidade, decidiu-se descartar o uso do mesmo no programa de ensaios do presente trabalho.

5.5.2 Pisoteamento

A partir dos valores de massa específica seca e de umidade de compactação obtidos por meio das curvas de compactação do Proctor Normal, foi possível estabelecer uma correlação entre os corpos de prova compactados pelo método anterior (dinâmico) com o método de pisoteamento (estático).

Para isto, cada material foi preparado com uma determinada umidade (w_{ot} , $w_{ot-3\%}$ ou $w_{ot+3\%}$). Mantendo este valor constante, executou-se o ensaio no compactador pneumático, aplicando diferentes pressões para obter as massas específicas secas correspondentes.

Finalmente, plotou-se um gráfico de massa específica seca *versus* pressão, onde os pontos resultantes de cada ensaio foram ajustados a regressões lineares, exponenciais, potenciais e logarítmicas, sendo as últimas as que geraram os melhores coeficientes de correlação (R^2).

As figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 mostram as curvas de massa específica seca *versus* pressão ou curvas de definição de pressão equivalente de cada material; obtidas dos ensaios de pisoteamento e ajustadas logaritmicamente. As setas associam o valor da massa específica seca correspondente ao Proctor Normal para cada umidade (w_{ot} , $w_{ot-3\%}$ e $w_{ot+3\%}$) com um valor de pressão (denominada pressão equivalente) a qual será aplicada para moldar os corpos de prova dos ensaios de permeabilidade.

Definição de Pressão Equivalente, Solo

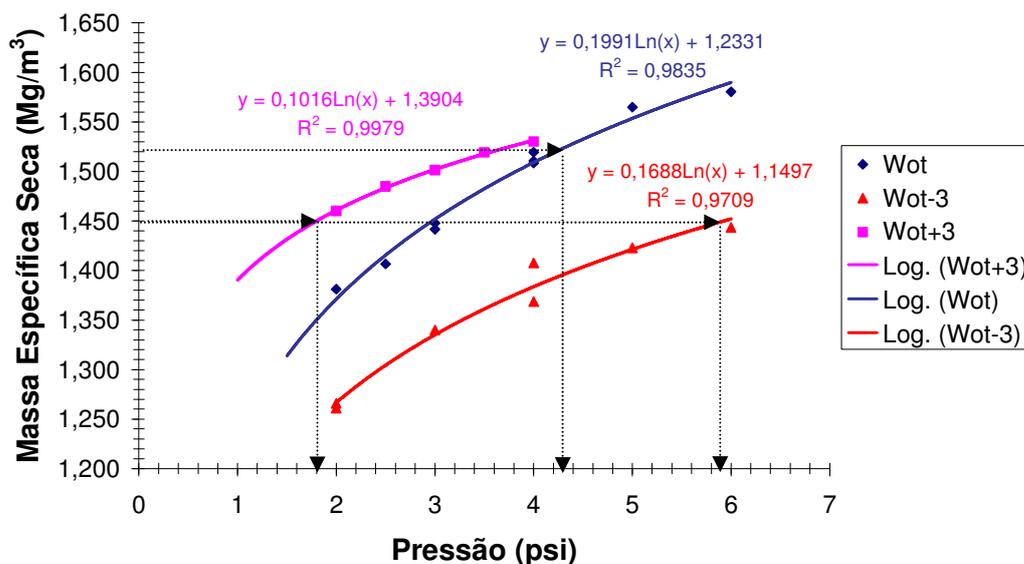


Figura 5.15-Definição de pressão equivalente com pisoteamento para o solo.

Definição de Pressão Equivalente, M1

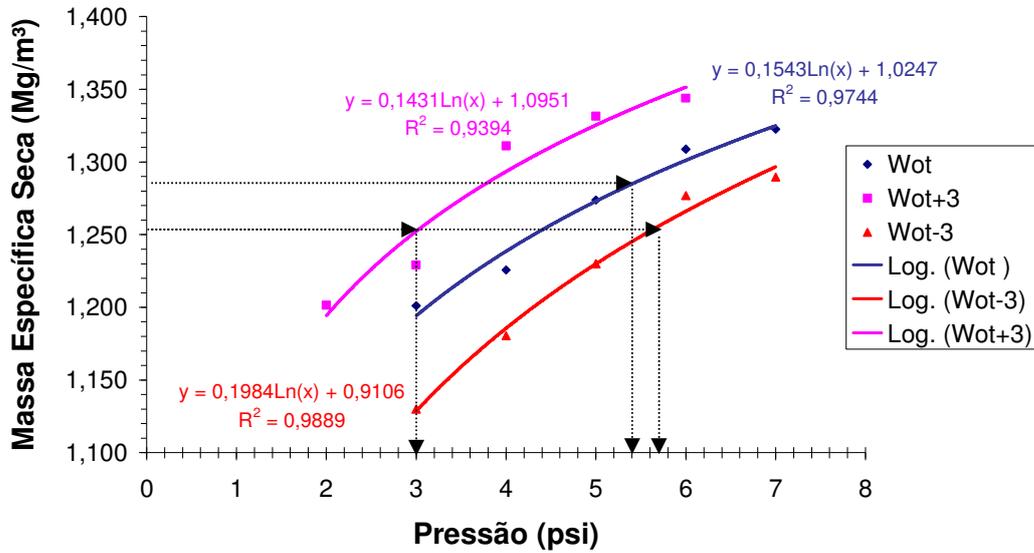


Figura 5.16-Definição de pressão equivalente com pisoteamento para M1.

Definição de Pressão Equivalente, M2

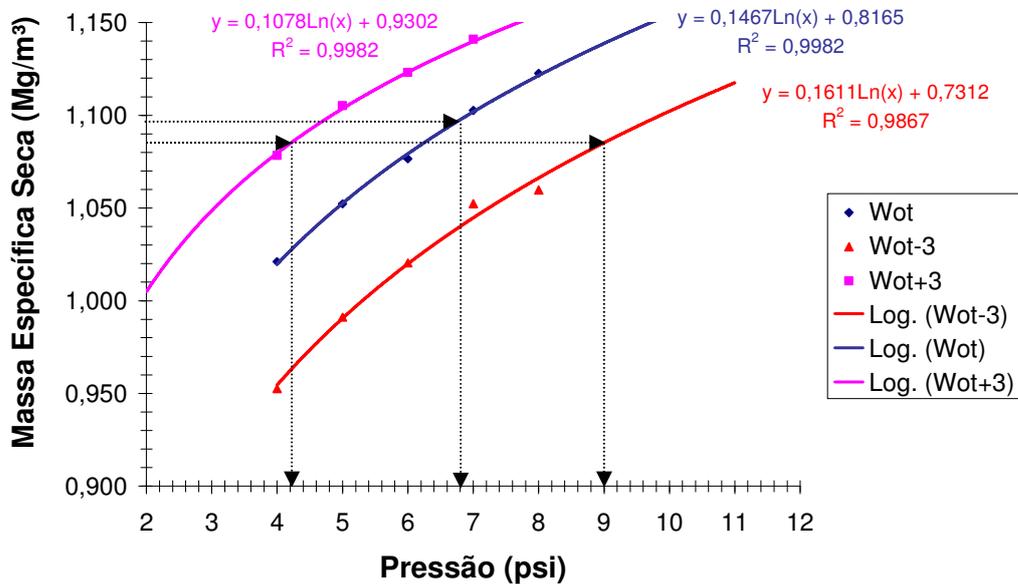


Figura 5.17-Definição de pressão equivalente com pisoteamento para M2.

Definição de Pressão Equivalente, M3

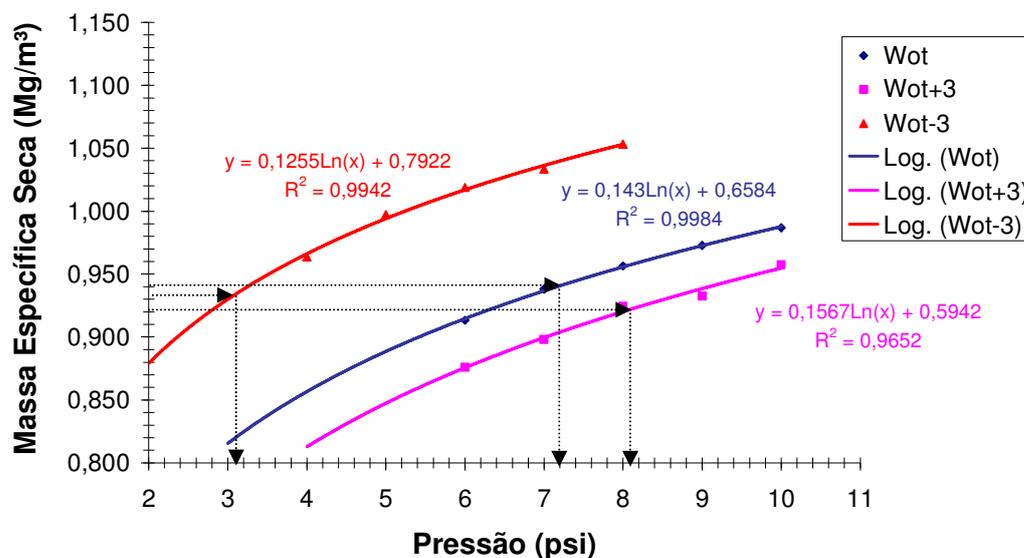


Figura 5.18-Definição de pressão equivalente com pisoteamento para M3.

Na Tabela 5.13 se apresenta o resumo dos resultados mostrados nos gráficos anteriores. A informação tabelada foi utilizada para efetuar a moldagem dos corpos de prova dos ensaios de permeabilidade.

Tabela 5.13-Pressão equivalente para as umidades $W_{ot-3\%}$, W_{ot} e $W_{ot+3\%}$ com as respectivas massas específicas secas.

Material	Parâmetros de moldagem	Umidade de compactação		
		$W_{ot-3\%}$	W_{ot}	$W_{ot+3\%}$
Solo	$W_o(\%)$	23	26	29
	$\rho_d (Mg/m^3)$	1,450	1,525	1,450
	Pressão (psi)	5,9	4,3	1,8
M1	$W_o(\%)$	28,5	31,5	34,5
	$\rho_d (Mg/m^3)$	1,254	1,286	1,254
	Pressão (psi)	5,7	5,4	3,0
M2	$W_o(\%)$	36,5	39,5	42,5
	$\rho_d (Mg/m^3)$	1,086	1,098	1,086
	Pressão (psi)	9,0	6,8	4,2
M3	$W_o(\%)$	46,5	49,5	52,5
	$\rho_d (Mg/m^3)$	0,934	0,941	0,921
	Pressão (psi)	3,1	7,2	8,1

Para definir as pressões equivalentes foram realizados numerosos ensaios e testes do equipamento utilizando diferentes umidades e faixas de pressão. A primeira série de testes foi executada com solo puro, com a finalidade de analisar o comportamento do material quando submetido à compactação por

pisoteamento bem como de adquirir sensibilidade do equipamento. Na faixa entre 20 e 30 psi, o comportamento do material na umidade ótima era como mostrado nas figuras seguintes:

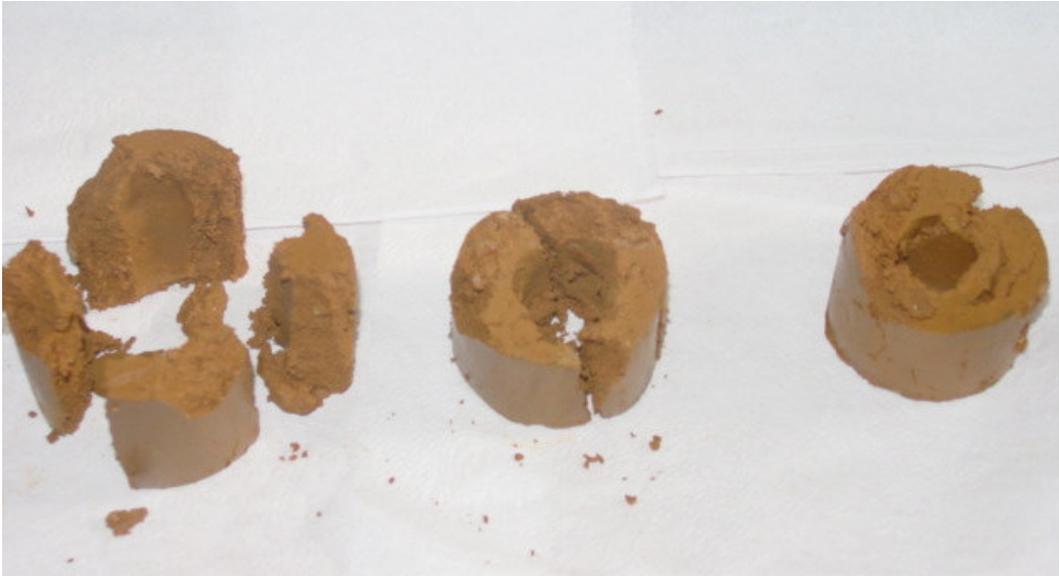


Figura 5.19-Corpo de prova deformado devido às elevadas pressões de pisoteamento.



Figura 5.20-Deformação do corpo de prova conseqüente da penetração do equipamento do compactador pneumático.



Figura 5.21-Vista superior do molde de pisoteamento com solo deformado devido às elevadas pressões de compactação.

Observou-se uma grande deformação no corpo de prova, produto da tensão cisalhante transmitida pelo equipamento no momento da penetração no solo. As deformações eram relativas à umidade de compactação: quando se acrescentava água no solo, este era mais fácil de moldar e os grumos mais fáceis de destruir (em concordância com Benson e Daniel, 1990), portanto as deformações ocorridas no material eram mais significativas. Isto se pode associar à perda de resistência ao cisalhamento do material quando se adiciona água (Lambe, 1958, Seed e Chan, 1959, Mitchell *et al.*, 1965).

Na faixa de 10 a 20 psi ocorreram também importantes deformações do tipo mostrado nas figuras anteriores, no entanto, diminuíram consideravelmente com respeito à faixa de pressão anterior. Dado o comportamento do material, definiu-se trabalhar com pressões ainda menores.

No intervalo de 2 a 10 psi, obteve-se um comportamento satisfatório do solo. O tipo de deformação foi o típico esperado em um ensaio de compactação, e não do tipo mostrado nas figuras anteriores. Além disso, as massas específicas obtidas eram similares às que se procurava atingir com respeito aos resultados do Proctor Normal.

O procedimento de tentativa e erro descrito anteriormente, foi realizado para cada um dos materiais até se obter um intervalo de pressões adequado com a energia de compactação do Proctor Normal para obter, nessa faixa, as curvas de pressão equivalente.

A partir da experiência realizada com o solo e as misturas em diferentes proporções identificaram-se alguns aspectos relevantes no processo de compactação que são explicados a seguir.

É importante mencionar que uma das maiores dificuldades na execução dos ensaios foi colocar as misturas nas umidades desejadas ($w_{ot-3\%}$, w_{ot} e $w_{ot+3\%}$). O composto orgânico, quando seca, perde a capacidade de se rehidratar rapidamente, portanto a quantidade de água a adicionar pode ser bem maior que a calculada. Ao mesmo tempo, homogeneizar tal umidade no material é também uma tarefa difícil, pois pelas suas características, a matéria orgânica fica aglutinada e a sua trabalhabilidade diminui. A forma em que se unem água e solo argiloso é distinta da união água-matéria orgânica. Quando partículas argilosas adsorvem água, tende-se a formar uma película de água em volta das partículas sólidas. No caso da matéria orgânica, esta película não se forma devido às suas características físico-químicas (Antunes, 2006). Devido à variabilidade nas umidades de compactação, houve problemas de repetitividade para atingir com precisão as mesmas massas específicas secas para ambos os métodos de compactação. A variabilidade dos dados foi maior nas misturas que possuem mais composto orgânico devido à natureza da matéria orgânica presente.

Diversos ensaios foram executados para definir a pressão equivalente correspondente a cada material, porém, os pontos foram descartados, pois as umidades nas quais as amostras encontravam-se não coincidiam com as desejadas. Nas curvas de pisoteamento (Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18) se apresentam unicamente os pontos que se ajustaram melhor às umidades desejadas.

Além do problema de repetitividade anteriormente descrito, um outro aspecto a ser levado em consideração é o tamanho do molde utilizado para executar os ensaios de pisoteamento. Segundo Kouassi *et al.* (2000), as dimensões do corpo de prova utilizado são uma desvantagem, pois limitam seu uso para estudos de permeabilidade e resistência, devido a aspectos de representatividade.

Os autores que têm se dedicado a investigar os fatores que influenciam na discrepância entre os valores da permeabilidade de campo e de laboratório em

camadas impermeabilizantes ou *liners*, (Mundell e Bailey, 1985; Day e Daniel, 1985; Hermann e Elsbury, 1987; Benson, Zhai e Wang, 1994; Dunn e Palmer, 1994), concordam que o problema principal na obtenção deste parâmetro em laboratório, consiste em ensaiar uma amostra que seja representativa da condição *in-situ*. Como no local da obra podem existir defeitos hidráulicos (trincas e fissuras, grumos maiores, etc.) conseqüentes de uma compactação pobre, secagem, entre outros, quanto maior for o tamanho do corpo de prova, maior a sua representatividade destas situações, que serão as que controlam o valor da permeabilidade.

No caso do presente estudo, o tamanho do molde de compactação pode ser visto como uma vantagem, pois para realizar o ensaio de pisoteamento é necessária uma quantidade reduzida de material e o tempo de execução é curto. Além disso, os alcances da tese limitam-se a comparar a condutividade hidráulica de amostras de laboratório moldadas com distintos métodos de compactação. As análises não visam determinar a condutividade hidráulica de uma camada impermeabilizante real, mas caso o ensaio fosse utilizado com este objetivo, as dimensões do molde aqui utilizado seriam desvantajosas, pois o efeito de escala teria uma influência importante.

As observações descritas anteriormente são indispensáveis para lograr uma adequada interpretação dos resultados e para serem levadas em consideração em futuros ensaios.

Desde o estudo de Mitchell *et al.* (1965), existe pouca informação na literatura a respeito de ensaios e equipamentos de laboratório que utilizem o pisoteamento e até hoje, não existe nenhuma norma que padronize este tipo de ensaio. A influência deste método de compactação em laboratório tem sido pouco estudada, se comparada com a do Proctor Normal, Proctor Modificado ou compactação estática.

Daniel (1984) confirma que os resultados da condutividade hidráulica obtidos em laboratório para corpos moldados com Proctor Normal são satisfatórios e se apresentam próximos aos valores do coeficiente de permeabilidade de campo quando a amostra ensaiada é representativa. Contudo, poderiam se obter resultados mais realistas se for possível comprovar que o compactador pneumático ou um equipamento análogo reproduz melhor o que acontece no campo, onde usualmente se compacta com pé de carneiro.

5.6 Ensaio de Permeabilidade

Foram moldados corpos de prova por meio do Proctor Normal e do pisoteamento, para as umidades $w_{ot-3\%}$, w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ para cada mistura e para o solo. Os ensaios de permeabilidade, como foi antes mencionado, foram executados em permeômetros de parede flexível, com carga constante, em corpos de prova previamente saturados por contrapressão. Admitiu-se o CP como saturado quando B atingiu um valor igual ou superior a 0,96.

A condutividade hidráulica de cada ensaio foi calculada a partir da média dos valores obtidos ao longo do primeiro trecho reto da curva de coeficiente de permeabilidade *versus* tempo onde a variação de volume permanece constante. O fluxo considerou-se constante para a maioria dos casos após os cinco primeiros minutos de ensaio.

O valor do gradiente hidráulico utilizado nos ensaios variou de 8,5 a 10, e a tensão efetiva em todos os casos foi de 10 kPa. Assumiu-se que o índice de vazios não varia no decorrer do ensaio.

Neste item, se apresentam as características iniciais dos corpos de prova, as condições dos ensaios, as curvas de variação de volume *versus* tempo, assim como as curvas k *versus* t (ambas na escala semi-logarítmica) e os resultados obtidos para cada material. Mostram-se também, relações de alguns índices físicos com o valor da condutividade hidráulica. Finalmente, faz-se um resumo e uma comparação entre o solo e as misturas, bem como da influência dos métodos de compactação.

5.6.1 Solo

O solo em estudo foi classificado como um CH segundo o SUCS, possui um limite de liquidez de 58, índice de plasticidade de 30 e limite de plasticidade de 28. Mais do que 50% das suas partículas são argilosas. Na tabela abaixo, mostram-se as características da moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de permeabilidade saturada:

Tabela 5.14- Características iniciais dos corpos de prova do solo para ensaios de permeabilidade.

Ensaio	Tipo de compactação	Umidade de Compactação	w _o %	ρ _d (Mg/m ³)	S _o %	e	n	H _{CP}
SoloA	Pisoteamento	w _{ot-3%}	22,44	1,412	66,72	0,904	47,48	7,83
SoloB	Pisoteamento	w _{ot}	25,11	1,512	86,76	0,778	43,75	7,86
SoloC	Pisoteamento	w _{ot+3%}	28,5	1,416	84,57	0,898	47,31	7,76
SoloD	Proctor Normal	w _{ot-3%}	22,43	1,392	64,76	0,932	48,23	7,00
SoloE	Proctor Normal	w _{ot}	25,03	1,511	86,32	0,779	43,80	6,97
SoloF	Proctor Normal	w _{ot+3%}	27,77	1,503	94,61	0,789	44,10	7,00

As características dos ensaios de permeabilidade executados e os resultados obtidos mostram-se a seguir:

Tabela 5.15- Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade no solo.

Ensaio	Umidade de Compactação	B	i	σ'	w _f %	k(cm/s)
SoloA	w _{ot-3%}	98,9	9,05	10	33,09	3,34e ⁻⁴
SoloB	w _{ot}	100,9	9,04	10	29,94	8,88e ⁻⁷
SoloC	w _{ot+3%}	100	9,18	10	33,29	5,26e ⁻⁷
SoloD	w _{ot-3%}	99,9	9,86	10	35,18	5,10e ⁻⁵
SoloE	w _{ot}	98,4	10,2	10	29,10	3,09e ⁻⁷
SoloF	w _{ot+3%}	99,2	9,94	10	30,34	1,77e ⁻⁷

O comportamento da condutividade hidráulica em função do tempo, para os corpos de prova moldados a partir do pisoteamento e para os moldados com Proctor Normal, nas três distintas umidades de compactação (w_{ot-3%}, w_{ot} e w_{ot+3%}), mostram-se na Figura 5.23 e na Figura 5.25 respectivamente.

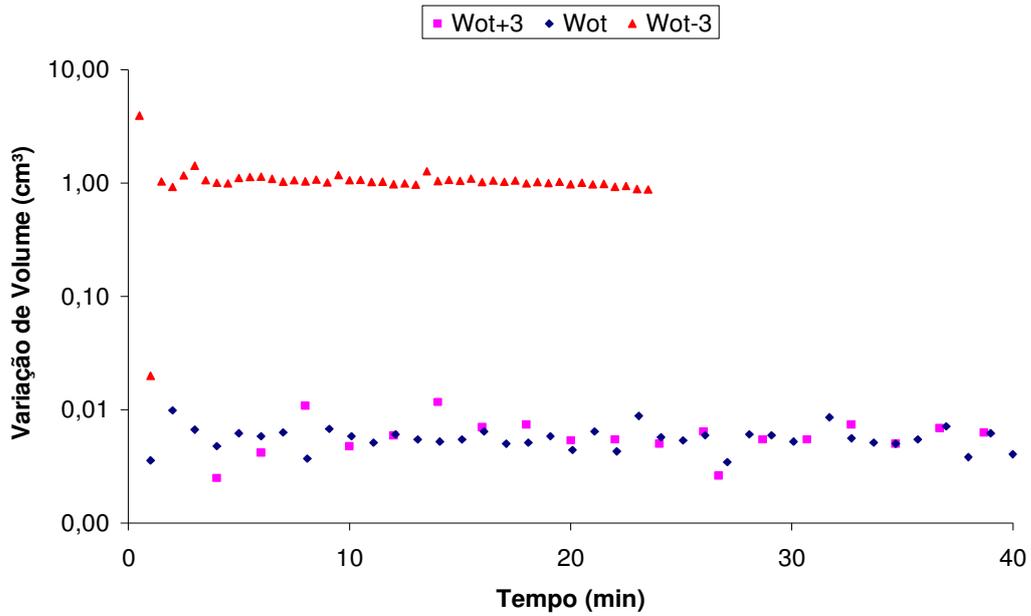


Figura 5.22-Varição de volume *versus* tempo, ensaio de permeabilidade do solo com corpos de prova moldados por pisoteamento.

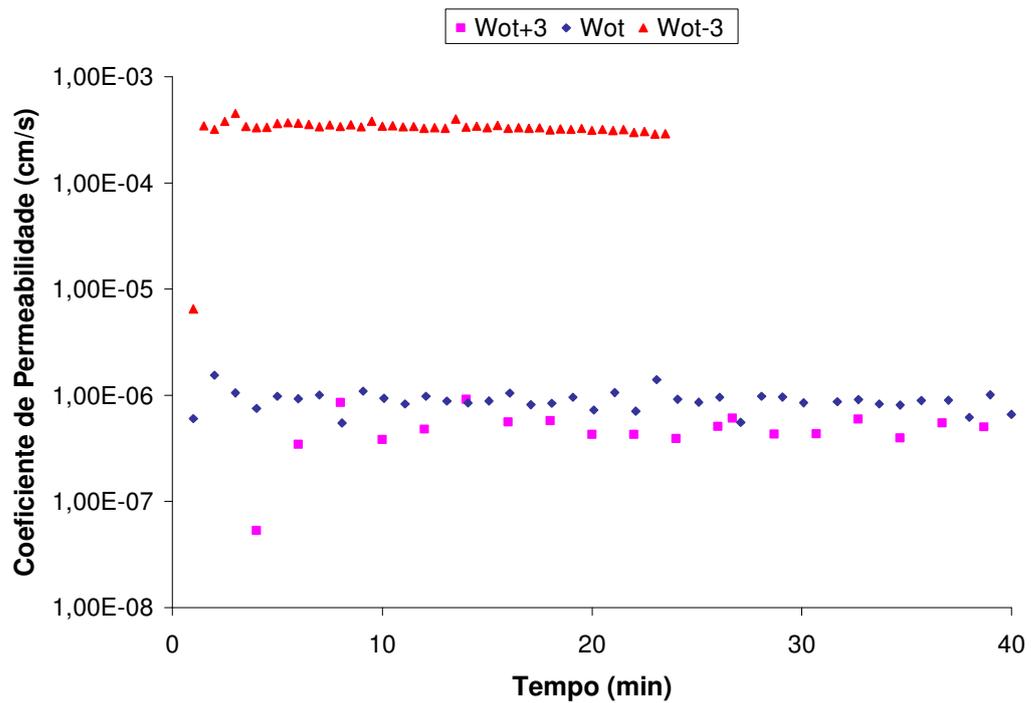


Figura 5.23-Coeficiente de permeabilidade *versus* tempo para corpos de prova de solo moldados com pisoteamento.

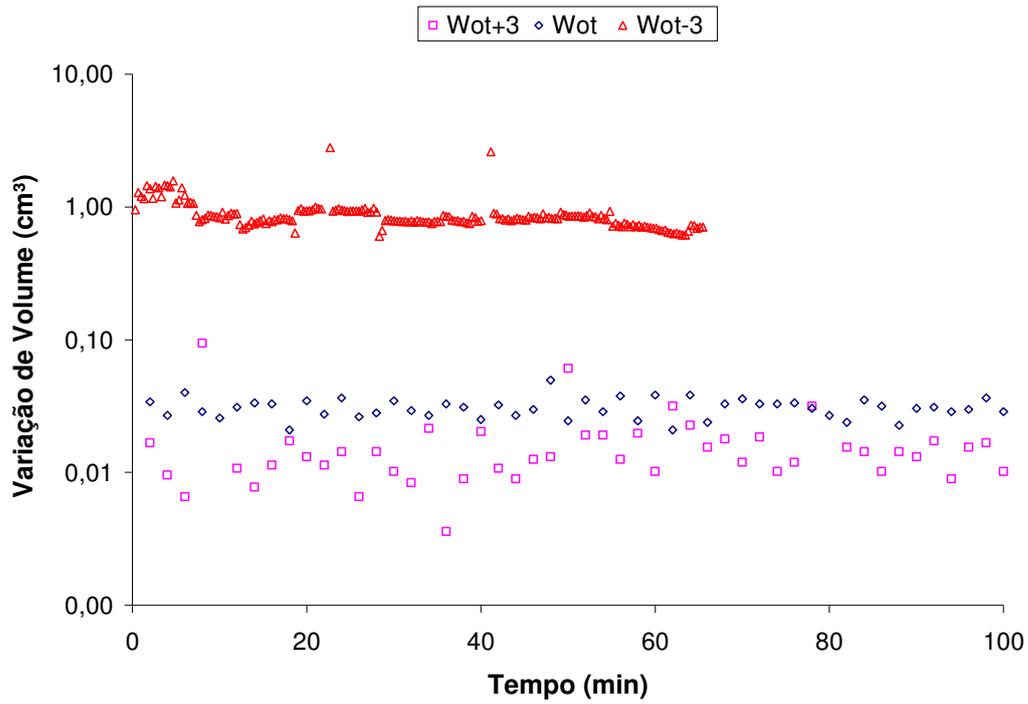


Figura 5.24-Variação de volume *versus* tempo, ensaio de permeabilidade do solo com corpos de prova moldados por Proctor Normal.

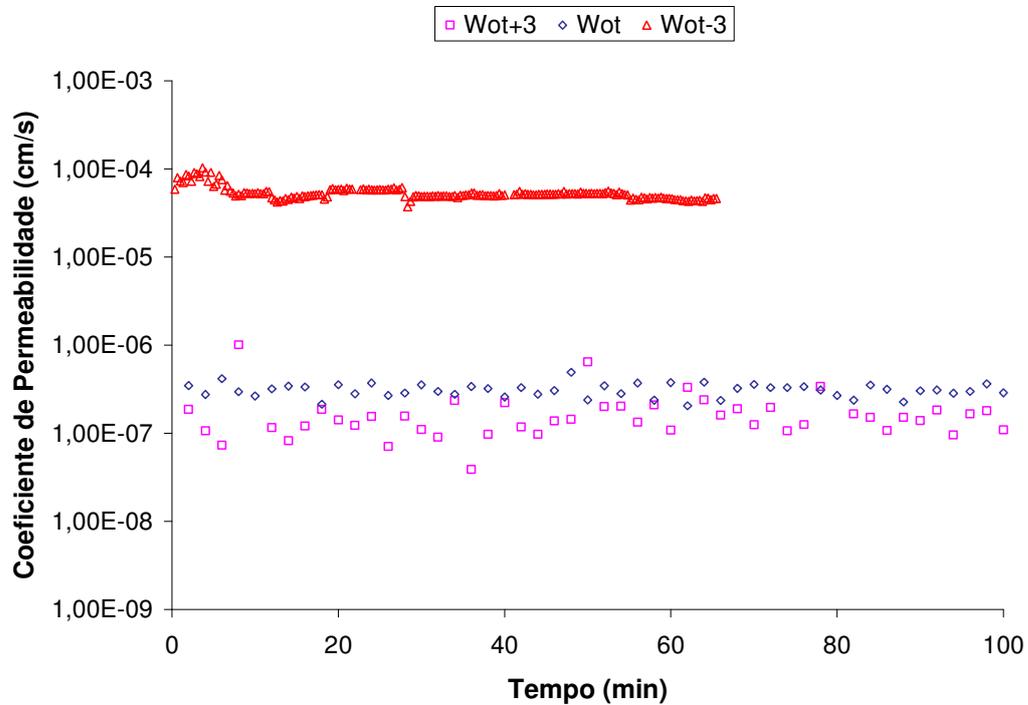


Figura 5.25-Coeficiente de permeabilidade *versus* tempo para corpos de prova de solo moldados com Proctor Normal.

A seguir apresentam-se alguns gráficos que permitem visualizar as relações entre índices físicos, condutividade hidráulica e condições de compactação dos corpos de prova ensaiados.

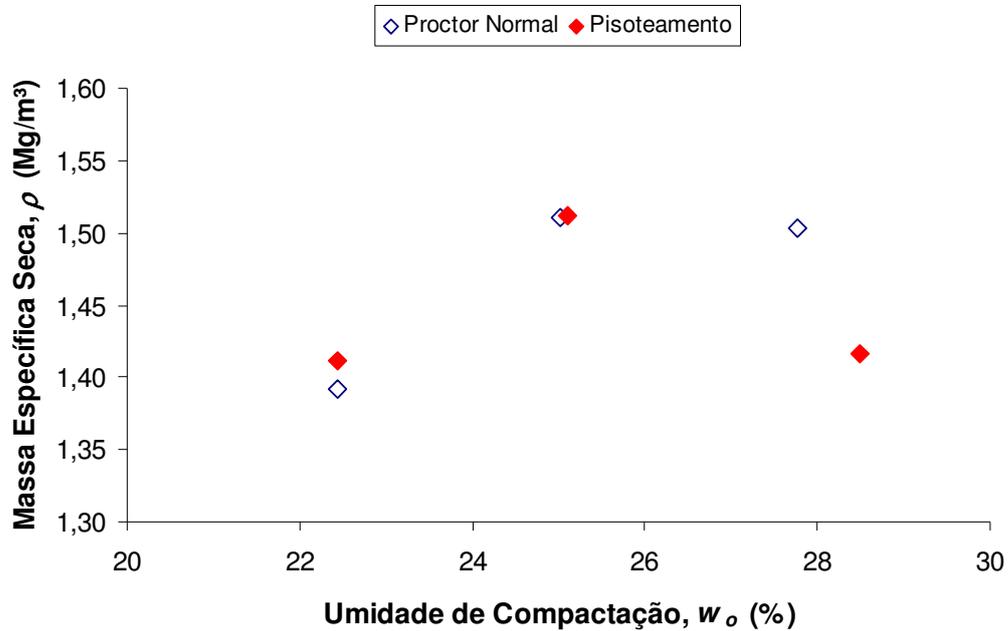


Figura 5.26-Massa específica seca *versus* umidade de compactação, solo.

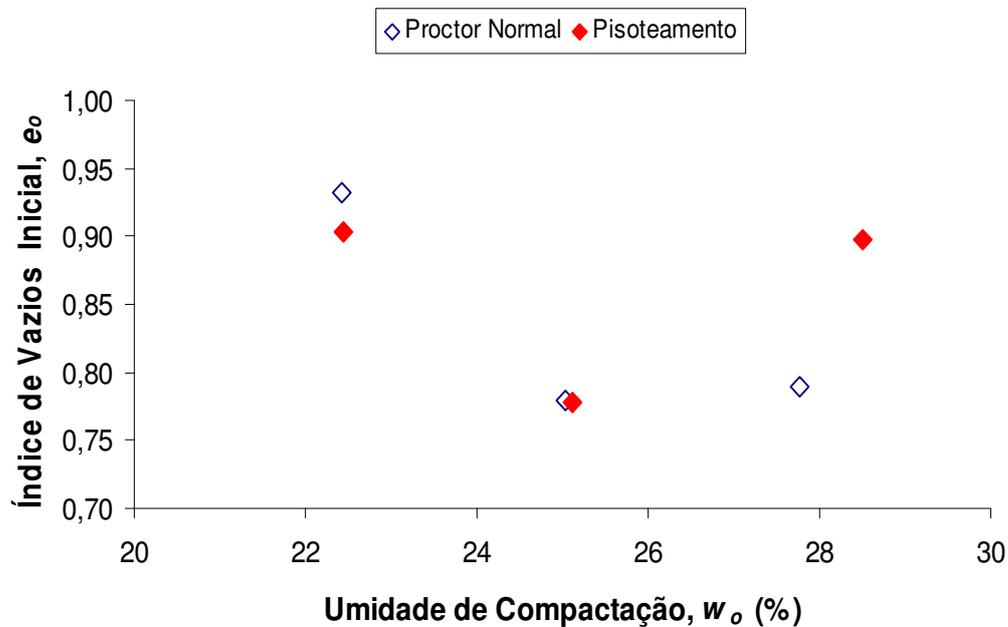


Figura 5.27-Índice de vazios *versus* umidade de compactação, solo.

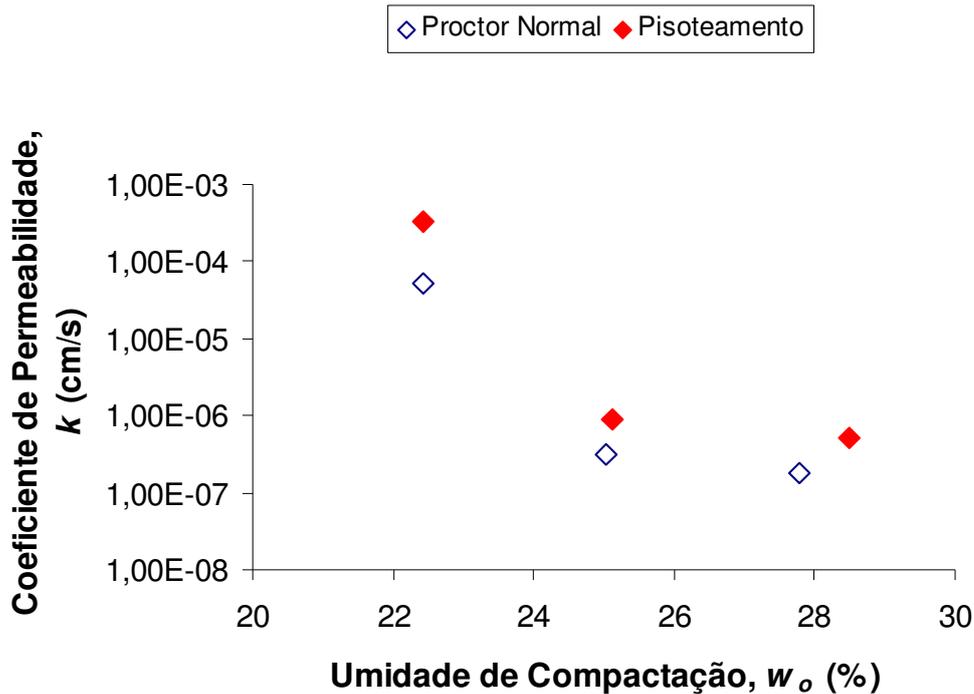


Figura 5.28-Coeficiente de permeabilidade *versus* umidade de compactação, solo.

A partir da Figura 5.26, verifica-se que as umidades de compactação w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ em ambos os métodos (Proctor Normal e pisoteamento) são praticamente as mesmas, gerando massas específicas muito próximas, como era desejado. No entanto, no caso da $w_{ot+3\%}$, houve uma pequena variação entre os valores de umidade para a moldagem. Conseqüentemente, a massa específica seca obtida a partir dos dois métodos não coincidiu quantitativamente.

Pode-se deduzir do gráfico mostrado na Figura 5.28 que, como era de se esperar, a permeabilidade dos corpos de prova moldados acima da umidade ótima tivessem uma permeabilidade menor, e os corpos compactados no ramo seco apresentassem os coeficientes maiores de permeabilidade, em concordância com as teorias básicas da influência da compactação na estrutura do solo e na condutividade hidráulica propostas por Lambe (1958) e Olsen (1962); e descritas por Hilf (1975), Hermann e Elsbury (1987) e Benson e Daniel (1990). Observou-se que a diferença entre os coeficientes de permeabilidade das amostras compactadas por impacto e pisoteamento entre as umidades w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ não foi muito significativa. No entanto, a diferença entre o valor de k para as amostras moldadas na $w_{ot+3\%}$ foi de duas ordens de grandeza maior que o valor das amostras compactadas nas umidades w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ com o Proctor Normal, e três ordens de grandeza maior que nas amostras compactadas nas mesmas umidades com pisoteamento.

Conclui-se então que o efeito na umidade de compactação é mais marcante no intervalo compreendido entre $w_{ot-3\%}$ e w_{ot} , e que, após a w_{ot} é atingida, não há variações muito significativas nos valores de k . A estrutura do solo, de acordo com os resultados obtidos de k , é eventualmente muito mais floculada no ramo seco que no ramo úmido, como era de se esperar.

Do ponto de vista do equipamento utilizado, observa-se na Figura 5.28, que o coeficiente de permeabilidade resultou ser menor quando o solo foi compactado com Proctor Normal do que quando compactado por pisoteamento. A diferença, se comparada para cada umidade de compactação a partir dos dados da Tabela 5.15, revela que é pequena (mesma ordem de grandeza) para w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ e um pouco maior (uma ordem de grandeza) para $w_{ot-3\%}$.

Autores como Hermann e Elsbury (1987); Benson e Daniel (1990) e Benson e Boutwell (2000), afirmam que a compactação com pé de carneiro no campo é a que induz maiores deformações no solo, resultando em uma melhor aderência entre camadas e em uma eliminação mais efetiva de grumos, que se espera dificultar a percolação transversal de um fluido através do solo.

Segundo Seed e Chan (1959), a deformação por cisalhamento e, conseqüentemente, o grau de dispersão no solo, aumentam para os distintos métodos de compactação na seguinte ordem: estático, vibratório, impacto e por pisoteamento. Mitchell *et al.* (1965), em concordância com os autores supracitados, quanto aos métodos de compactação e à influência deles na estrutura do solo, afirmam que quanto maiores as deformações induzidas, menor a permeabilidade, devido ao efeito provocado no arranjo das partículas. Entretanto, os resultados dos ensaios de laboratório executados no solo coluvionar com o compactador pneumático não seguiram a tendência proposta pelos autores supracitados.

5.6.2 **Mistura 1**

As características iniciais dos corpos de prova bem como as condições dos ensaios de permeabilidade para a M1 (75% de solo coluvionar e 25% de composto orgânico) são muito similares com as impostas nos ensaios realizados com solo puro. Estas se encontram resumidas nas Tabelas 5.16 e 5.17:

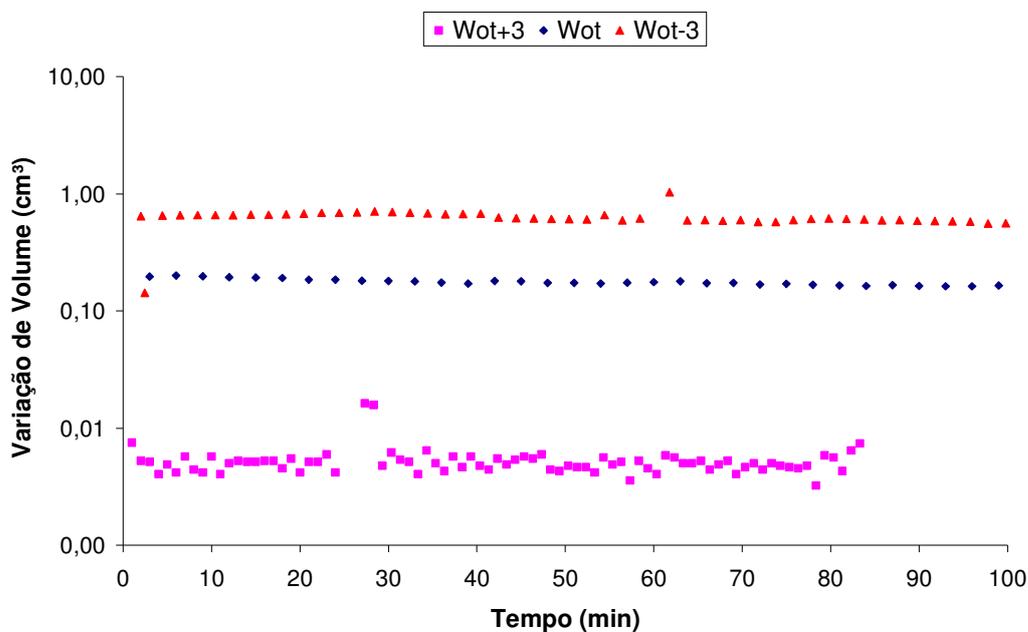
Tabela 5.16- Características iniciais dos corpos de prova de M1 para ensaios de permeabilidade.

Ensaio	Tipo de compactação	Umidade de Compactação	w _o %	ρ _d (Mg/m ³)	S _o %	e	n	H _{CP}
M1A	Pisoteamento	w _{ot-3%}	28,28	1,214	66,88	1,055	51,34	7,84
M1B	Pisoteamento	w _{ot}	31,25	1,243	77,37	1,008	50,19	7,76
M1C	Pisoteamento	w _{ot+3%}	34,02	1,225	81,83	1,037	50,92	7,84
M1D	Proctor Normal	w _{ot-3%}	26,2	1,102	51,74	1,263	55,81	7,00
M1E	Proctor Normal	w _{ot}	29,7	1,201	68,81	1,077	51,85	7,05
M1F	Proctor Normal	w _{ot+3%}	32,76	1,241	80,88	1,011	50,27	7,00

Tabela 5.17- Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade, M1.

Ensaio	Umidade de Compactação	B	i	σ'	w _f %	k(cm/s)
M1A	w _{ot-3%}	97,9	8,92	10	45,62	5,11e ⁻⁵
M1B	w _{ot}	98,4	8,74	10	42,01	8,85e ⁻⁶
M1C	w _{ot+3%}	99,15	8,93	10	42,40	8,42e ⁻⁷
M1D	w _{ot-3%}	96,4	9,80	10	49,41	3,62e ⁻⁴
M1E	w _{ot}	96,2	9,60	10	46,00	7,12e ⁻⁵
M1F	w _{ot+3%}	98,8	10,22	10	42,26	1,54e ⁻⁵

As curvas de variação de volume *versus* tempo e do coeficiente de permeabilidade *versus* tempo resultantes dos ensaios são apresentadas a seguir:

Figura 5.29-Variação de volume *versus* tempo, ensaio de permeabilidade da M1 com corpos de prova moldados por pisoteamento.

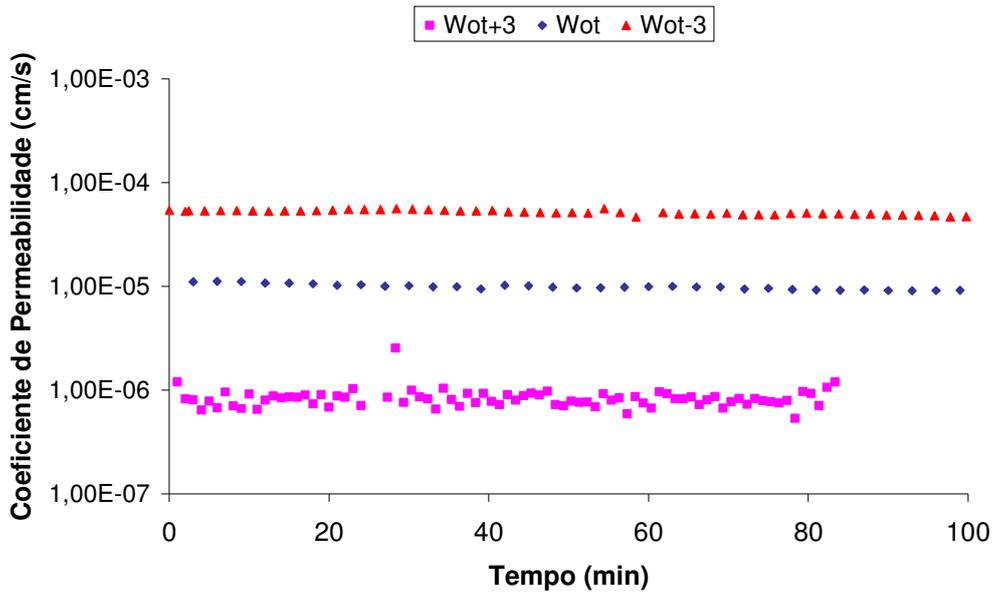


Figura 5.30-Coeficiente de permeabilidade *versus* tempo para corpos de prova da M1 moldados com pisoteamento.

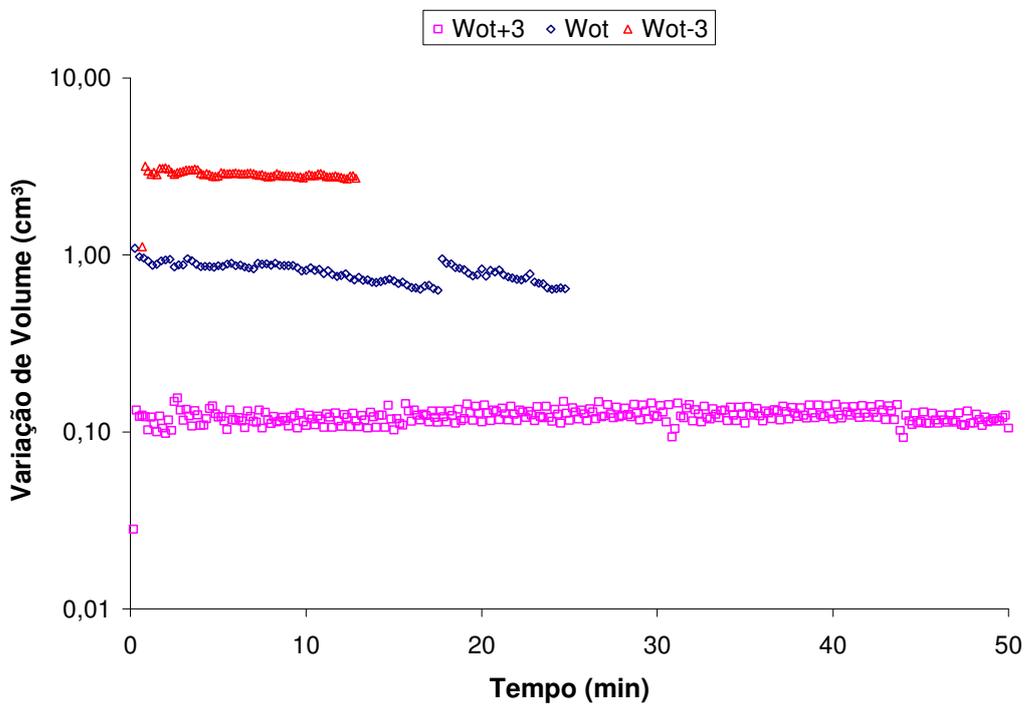


Figura 5.31-Variação de volume *versus* tempo, ensaio de permeabilidade da M1 com corpos de prova moldados com Proctor Normal.

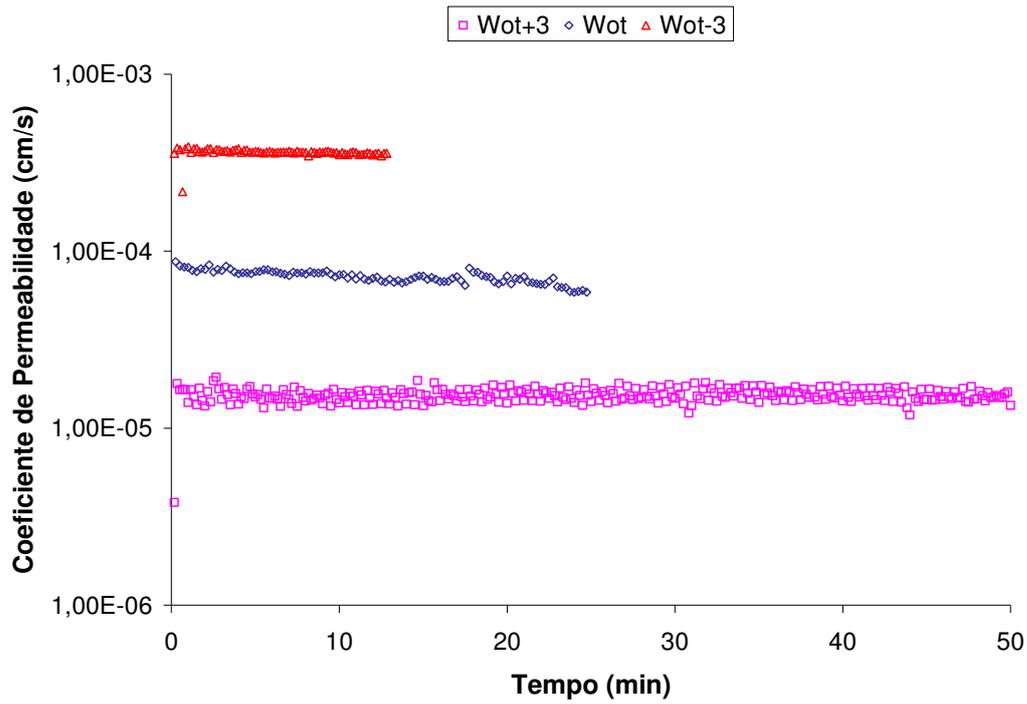


Figura 5.32-Coeficiente de permeabilidade *versus* tempo para corpos de prova da M1 moldados com Proctor Normal.

As relações de umidade de compactação com a massa específica seca, o índice de vazios e a permeabilidade dos corpos de prova moldados pelos diferentes métodos se apresentam na continuação:

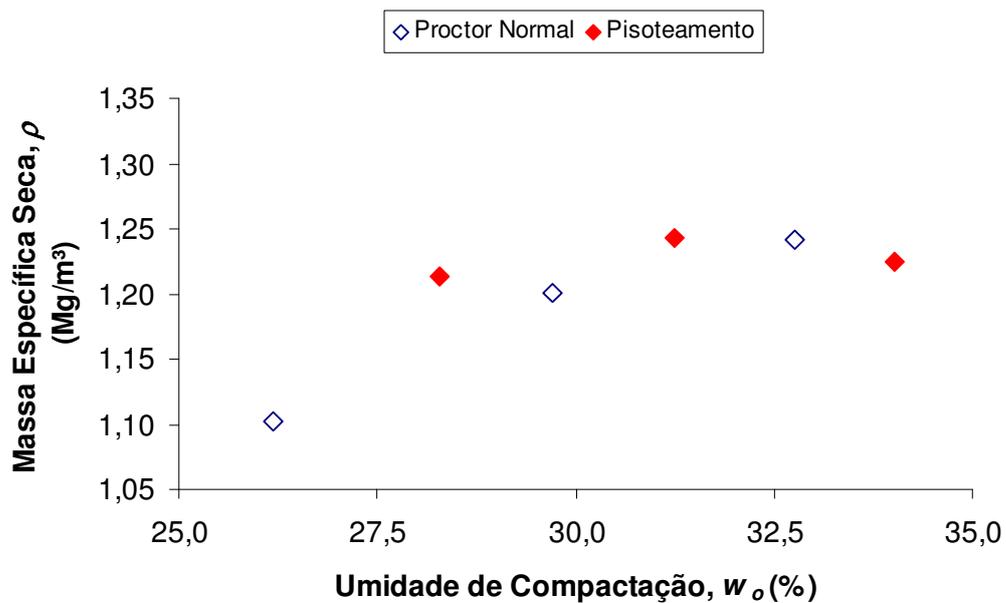


Figura 5.33-Massa específica seca *versus* umidade de compactação, M1.

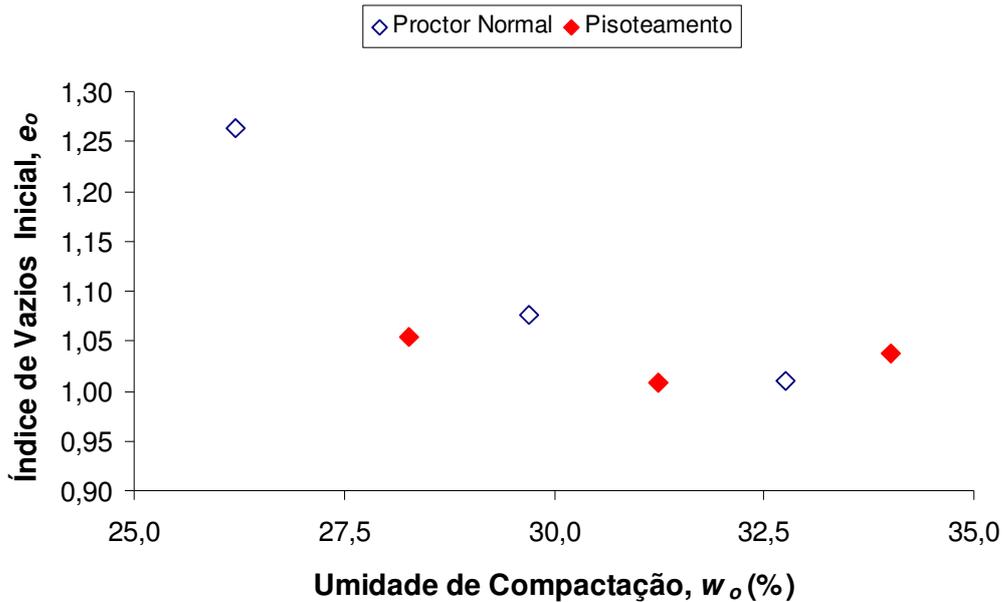


Figura 5.34-Índice de vazios *versus* umidade de compactação, M1.

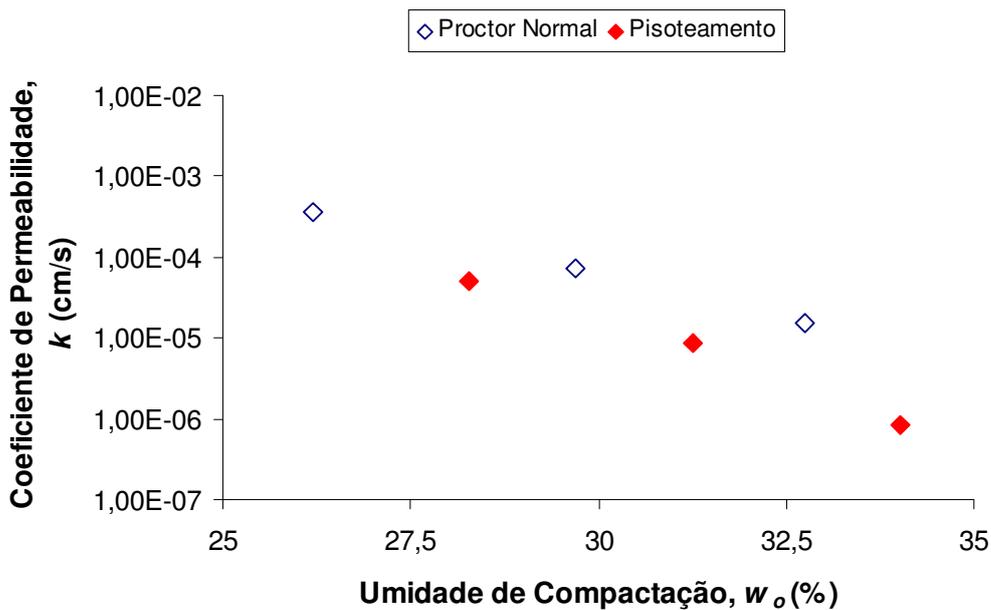


Figura 5.35-Coeficiente de permeabilidade *versus* umidade de compactação, M1.

Na Tabela 5.16 e na Figura 5.33 pode-se observar uma diferença entre os valores de w_o (%) usados durante a moldagem dos corpos de prova entre ambos os métodos de compactação e, conseqüentemente, diferentes massas específicas secas resultantes. Problemas na homogeneização de umidade do material assim como na absorção da água adicionada (ambos associados ao teor de matéria orgânica presente na mistura) dificultaram a obtenção dos

valores desejados. A consideração do fato anterior é de suma importância, pois isto representa uma fonte de discrepância e afeta a comparabilidade dos resultados para efeitos da determinação da influência do equipamento de compactação usado. Para emitir um critério mais acertado quanto a este aspecto, seria preciso realizar ensaios com umidades mais próximas. Contudo, serão analisados estes resultados no presente trabalho.

As curvas das Figuras 5.30, e 5.32 mostram, da mesma forma que o solo, um comportamento bastante uniforme de k no decorrer do ensaio.

Assim como para o solo, o valor de k foi em ordem crescente dos corpos de prova moldados no ramo úmido para os moldados no ramo seco, tanto no pisoteamento como no Proctor Normal. Porém, quanto ao método de compactação, aconteceu o efeito contrário que com o solo. As amostras compactadas com pisoteamento apresentaram uma permeabilidade menor que com o Proctor. No caso da M1, o comportamento do material se apresentou concordante com as afirmações de Mitchell *et al.* (1965) e Seed e Chan (1959).

5.6.3 Mistura 2

Na Tabela 5.18 se detalham as características iniciais dos corpos de prova da mistura 2, formada por 50% de solo coluvionar e 50% de composto orgânico.

Tabela 5.18- Características iniciais dos corpos de prova de M2 para ensaios de permeabilidade.

Ensaio	Tipo de compactação	Umidade de Compactação	$W_o\%$	ρ_d (Mg/m^3)	$S_o\%$	e	n	H_{CP}
M2A	Pisoteamento	$w_{ot-3\%}$	36,74	1,059	70,19	1,244	55,44	8,00
M2B	Pisoteamento	w_{ot}	39,34	1,077	77,49	1,207	54,68	8,00
M2C	Pisoteamento	$w_{ot+3\%}$	42,56	1,009	74,62	1,356	57,55	8,00
M2D	Proctor Normal	$w_{ot-3\%}$	35,87	0,929	54,68	1,559	60,93	7,25
M2E	Proctor Normal	w_{ot}	38,62	1,031	70,35	1,305	56,61	7,10
M2F	Proctor Normal	$w_{ot+3\%}$	42,56	0,999	73,35	1,379	57,97	7,20

Os valores de condutividade hidráulica bem como as condições da execução dos ensaios foram as seguintes:

Tabela 5.19-Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade, M2.

Ensaio	Umidade de Compactação	B	i	σ'	$W_f\%$	$k(\text{cm/s})$
M2A	$w_{ot-3\%}$	97,8	8,50	10	59,58	$6,72e^{-5}$
M2B	w_{ot}	98,9	8,60	10	56,82	$1,36e^{-6}$
M2C	$w_{ot+3\%}$	98,3	8,75	10	57,52	$4,47e^{-5}$
M2D	$w_{ot-3\%}$	98,8	9,60	10	65,18	$1,71e^{-4}$
M2E	w_{ot}	98,0	9,98	10	61,73	$5,87e^{-5}$
M2F	$w_{ot+3\%}$	97,2	9,90	10	59,67	$2,86e^{-5}$

As curvas de variação de volume *versus* tempo e coeficiente de permeabilidade *versus* tempo são apresentadas a seguir.

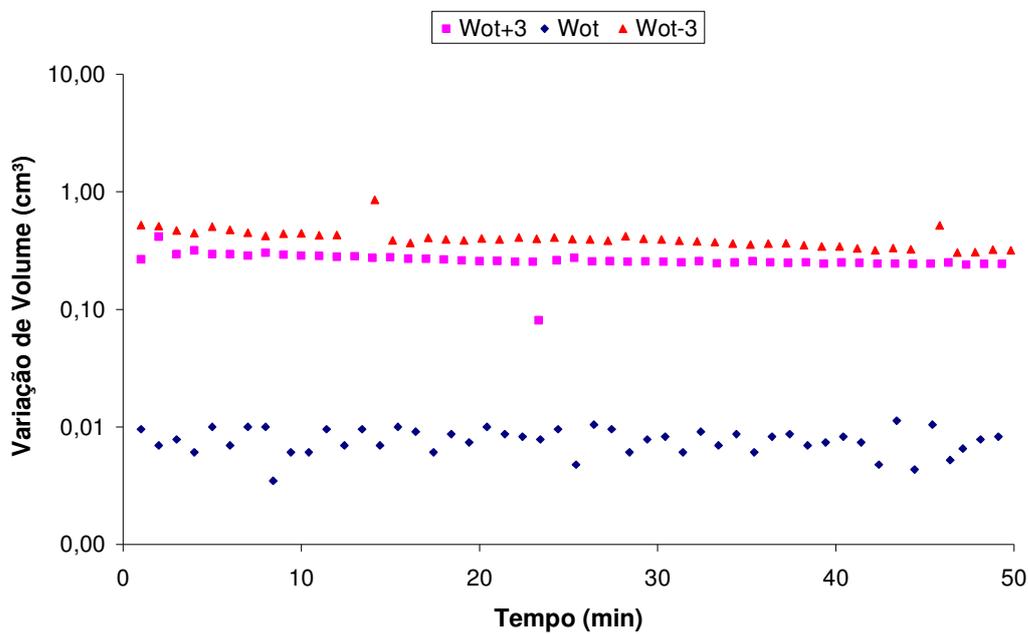


Figura 5.36-Variação de volume *versus* tempo, ensaio de permeabilidade da M2 com corpos de prova moldados por pisoteamento.

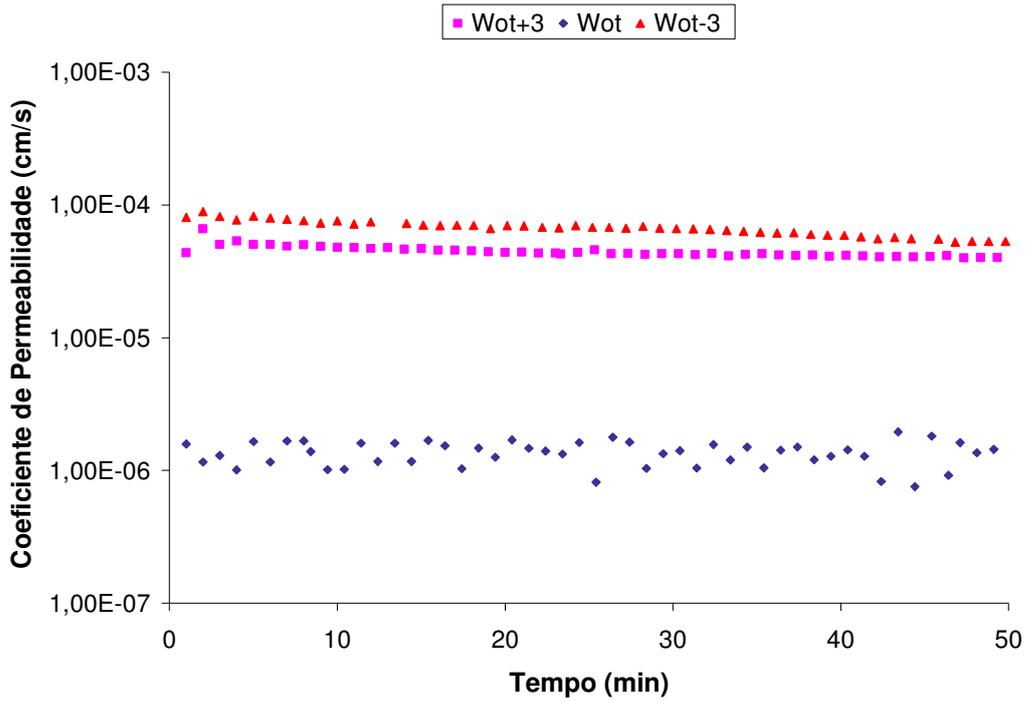


Figura 5.37-Coeficiente de permeabilidade *versus* tempo para corpos de prova da M2 moldados com pisoteamento.

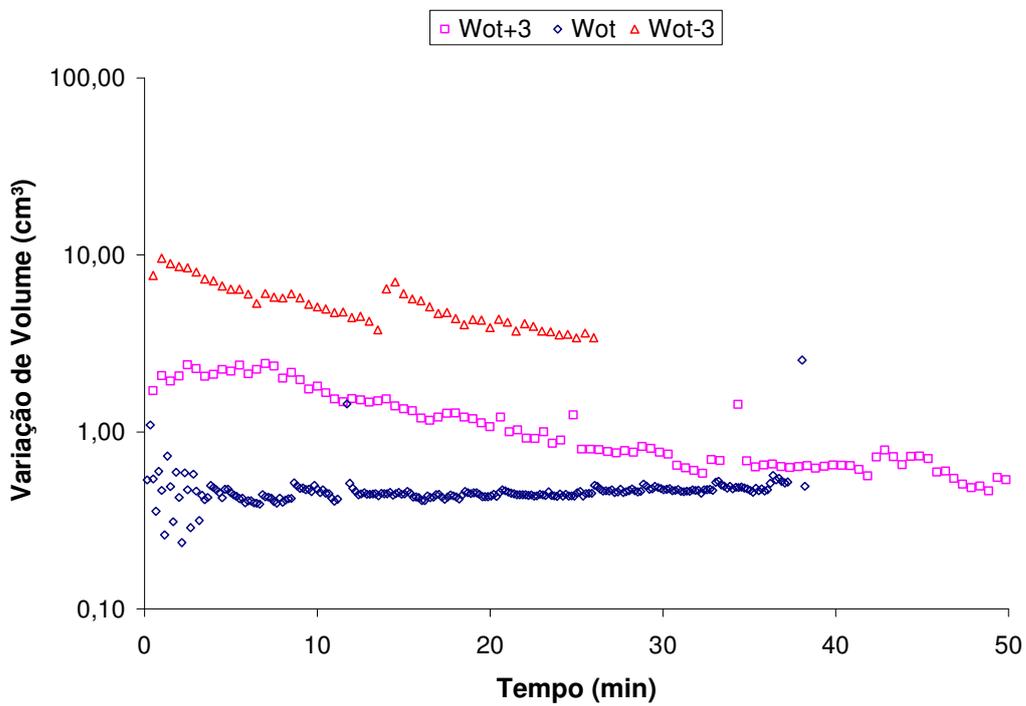


Figura 5.38-Variação de volume *versus* tempo, ensaio de permeabilidade da M2 com corpos de prova moldados por Proctor Normal.

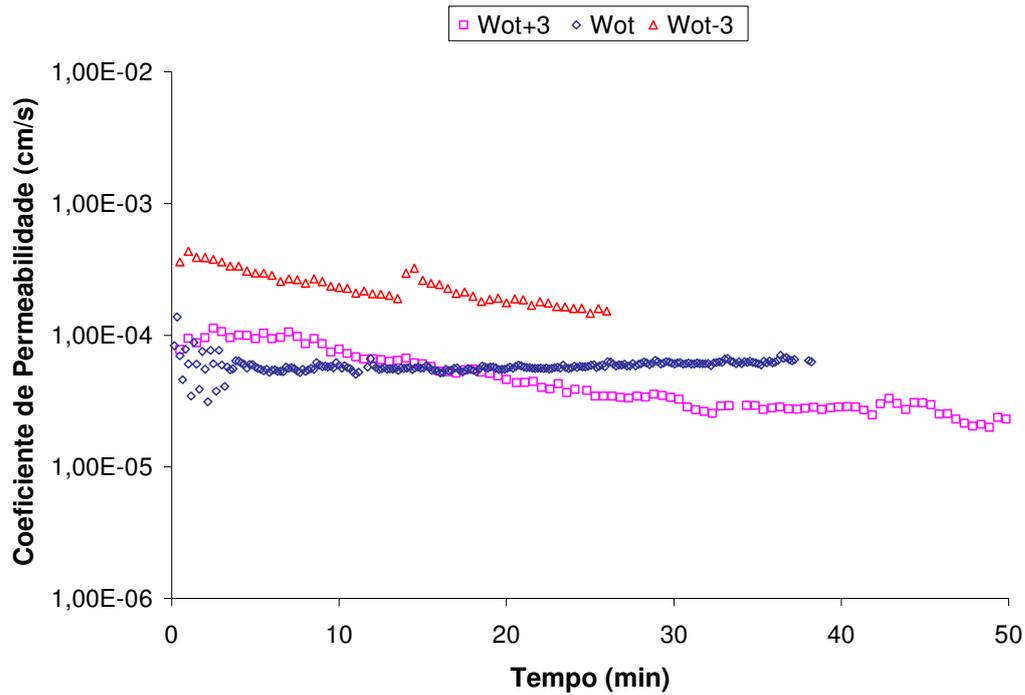


Figura 5.39-Coeficiente de permeabilidade *versus* tempo para corpos de prova da M2 moldados com Proctor Normal.

A seguir são apresentadas algumas relações gráficas entre os índices físicos, a umidade de compactação e a condutividade hidráulica da M2, tanto para os ensaios das amostras moldadas a partir do PN como do pisoteamento.

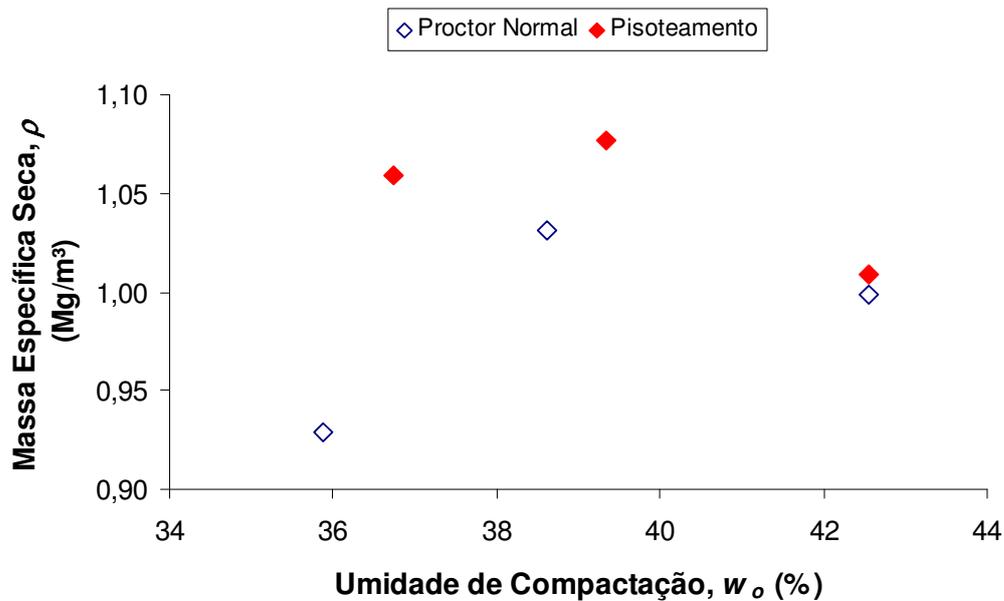


Figura 5.40-Massa específica seca *versus* umidade de compactação, M2.

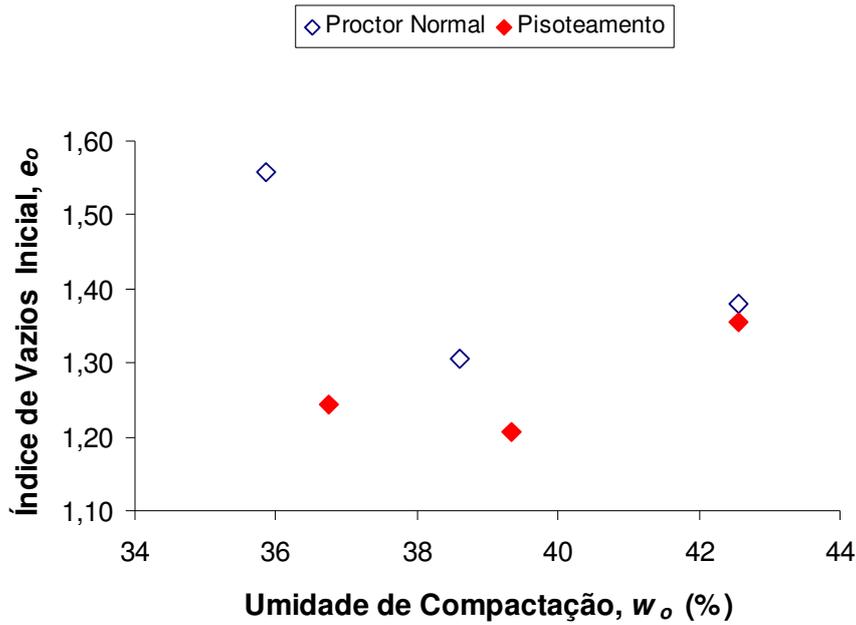


Figura 5.41-Índice de vazios *versus* umidade de compactação, M2.

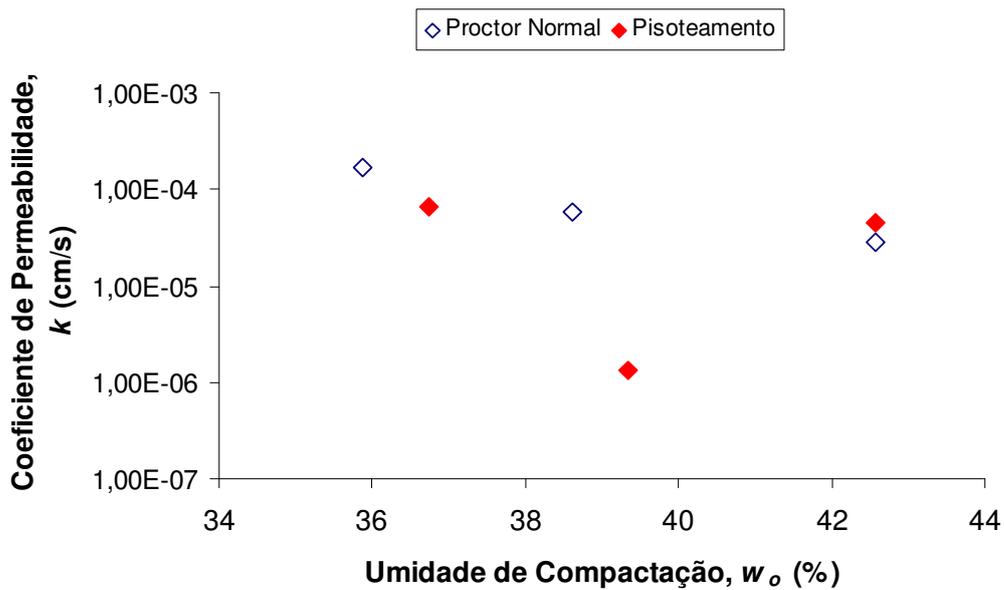


Figura 5.42-Coeficiente de permeabilidade *versus* umidade de compactação, M2.

Quando compactadas pelo método de impacto, as amostras se comportaram igualmente que o solo e M1, com a tendência usual do decréscimo de k conforme aumenta a umidade de compactação (Figura 5.42). Porém, notou-se um comportamento diferente com respeito aos outros ensaios de permeabilidade apresentados nesta seção, já que se observou uma dificuldade para atingir a estabilidade da permeabilidade e das variações de volume, no

início dos ensaios das amostras M2D ($w_{ot-3\%}$) e M2F($w_{ot+3\%}$), apresentados nas Figuras 5.38 e 5.39.

A curva da amostra correspondente à $w_{ot-3\%}$ (M2D), mostrada na Figura 5.39 é o resultado ao percolar 280 cm^3 em 26,5 minutos. A descontinuidade nos dados, observada no $t= 14,2 \text{ min}$, se deve a que nesse momento teve que ser realizado um esvaziamento do medidor de volume para continuar o ensaio. Após o esvaziamento foi necessário um certo tempo para a equalização das pressões no sistema, que se observa graficamente, ocorrer no período entre $t= 14,5 \text{ min}$ e $18,5 \text{ min}$. O trecho final da curva, compreendido entre $t= 18,5$ e $t= 26,5$ minutos, foi considerado como o trecho de permeabilidade constante. Fez-se esta consideração, pois a estabilidade pode ser verificada pelo fato da permeabilidade permanecer constante no valor correspondente antes da descontinuidade. A partir da média dos valores neste trecho, obteve-se $k= 1,71e^{-4} \text{ cm/s}$.

No ensaio da amostra M2F ($w_{ot+3\%}$), foi considerado como o trecho de condutividade hidráulica constante o compreendido entre $t= 25 \text{ min}$ e $t= 50 \text{ min}$.

A curva do ensaio da amostra M2E (w_{ot}) mostrou-se a mais estável de todas, porém, o valor de k foi calculado com a média dos valores a partir do $t= 5 \text{ min}$, permitindo excluir os valores produto da equalização do sistema ao início do ensaio.

Para os ensaios de permeabilidade com corpos de prova moldados com pisoteamento, não foi possível definir uma tendência ou relação entre a umidade de compactação e a condutividade hidráulica (Figura 5.42), pois o menor coeficiente de permeabilidade da série foi o correspondente à amostra M2B (w_{ot}), e não o do CP compactado no ramo úmido, o qual resultou ser mais permeável que o anterior. O valor de k para a amostra M2B foi uma ordem de grandeza menor com respeito a M2C ($w_{ot+3\%}$) e M2A ($w_{ot-3\%}$). Observou-se pouca diferença entre os valores de k obtidos para os ensaios correspondentes às umidades $w_{ot+3\%}$ e $w_{ot-3\%}$. No entanto, cumpriu-se que $k_{M2C} < k_{M2A}$.

5.6.4 Mistura 3

Nas Tabelas 5.20 e 5.21 se mostram as características dos corpos de prova e as condições e resultados dos ensaios de permeabilidade da M3 (25% de solo coluvionar e 75% de composto orgânico). As curvas típicas dos ensaios são apresentadas nas Figuras 5.43, 5.44, 5.47 e 5.48.

Tabela 5.20-Características iniciais dos corpos de prova de M3 para ensaios de permeabilidade.

Ensaio	Tipo de compactação	Umidade de Compactação	W _o %	ρ _d (Mg/m ³)	S _o %	e	n	H _{CP}
M3A	Pisoteamento	w _{ot-3%}	46,62	0,863	65,81	1,573	61,13	8,00
M3B	Pisoteamento	w _{ot}	50,00	0,862	70,46	1,575	61,17	8,14
M3C	Pisoteamento	w _{ot+3%}	51,96	0,914	80,77	1,428	58,82	8,10
M3D	Proctor Normal	w _{ot-3%}	46,73	0,796	58,02	1,788	64,13	7,20
M3E	Proctor Normal	w _{ot}	49,38	0,810	63,02	1,740	63,50	7,10
M3F	Proctor Normal	w _{ot+3%}	52,67	0,812	67,49	1,732	63,40	7,10

Tabela 5.21-Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade, M3.

Ensaio	Umidade de Compactação	B	i	σ'	W _f %	k(cm/s)
M3A	w _{ot-3%}	99,6	8,10	10	78,17	1,83e ⁻⁵
M3B	w _{ot}	97,3	8,48	10	81,11	1,95e ⁻⁴
M3C	w _{ot+3%}	98,6	8,28	10	72,43	2,17e ⁻⁵
M3D	w _{ot-3%}	98,7	9,62	10	79,53	3,52e ⁻⁵
M3E	w _{ot}	98,5	9,73	10	82,69	3,47e ⁻⁵
M3F	w _{ot+3%}	99,0	9,70	10	77,34	2,15e ⁻⁵

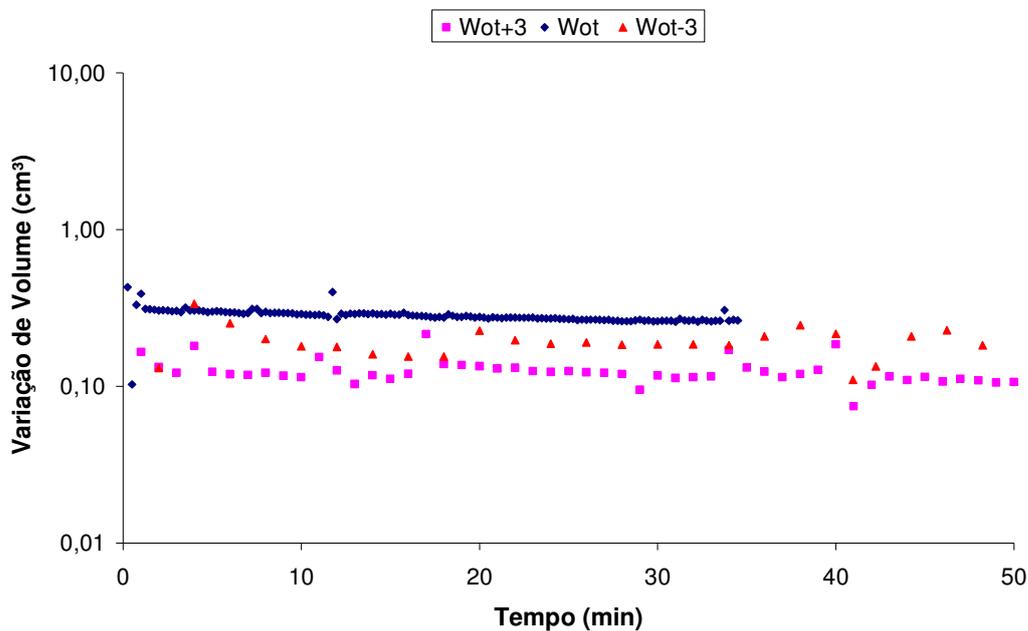


Figura 5.43-Variação de volume versus tempo, ensaio de permeabilidade da M3 com corpos de prova moldados por pisoteamento.

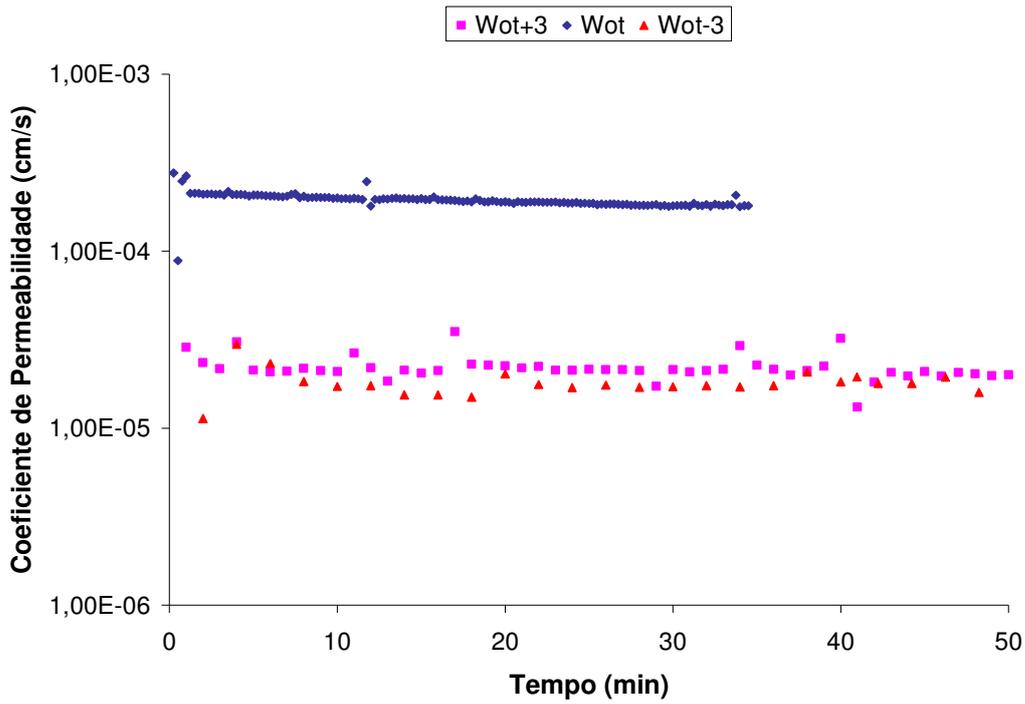


Figura 5.44-Coeficiente de permeabilidade *versus* tempo para corpos de prova da M3 moldados com pisoteamento.

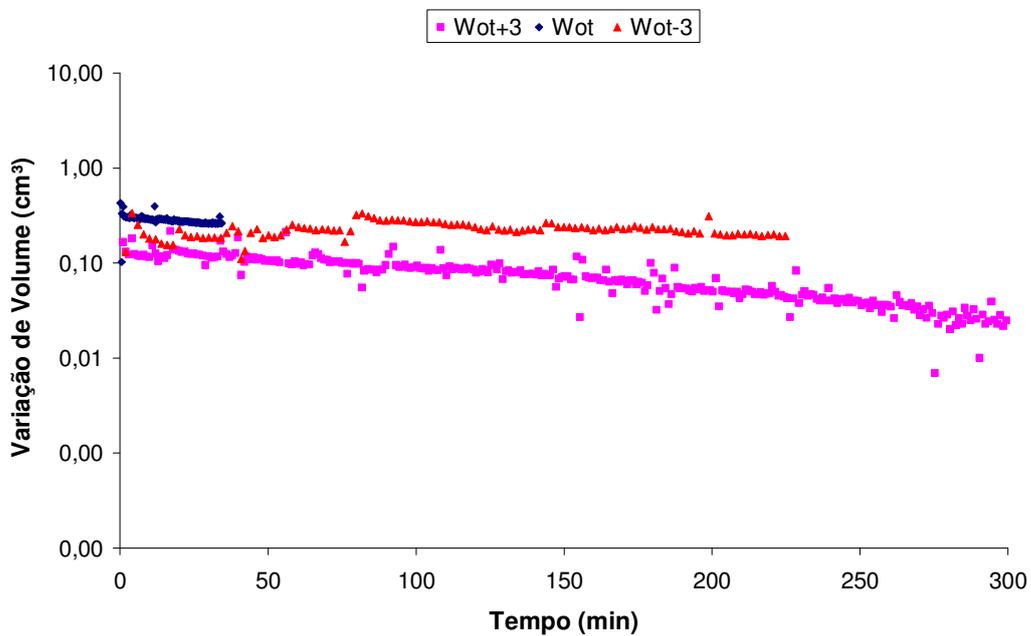


Figura 5.45-Gráfico de variação de volume *versus* tempo mostrado a maior escala, ensaio de permeabilidade da M3 com corpos de prova moldados por pisoteamento.

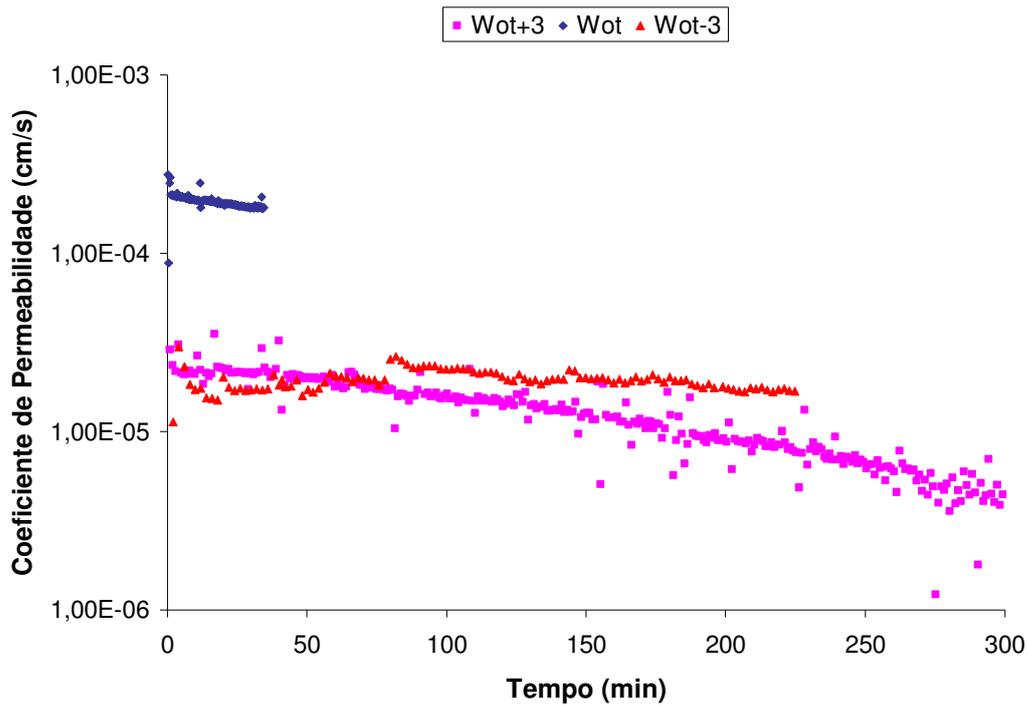


Figura 5.46-Gráfico de coeficiente de permeabilidade *versus* tempo mostrado a maior escala para corpos de prova da M3 moldados com pisoteamento.

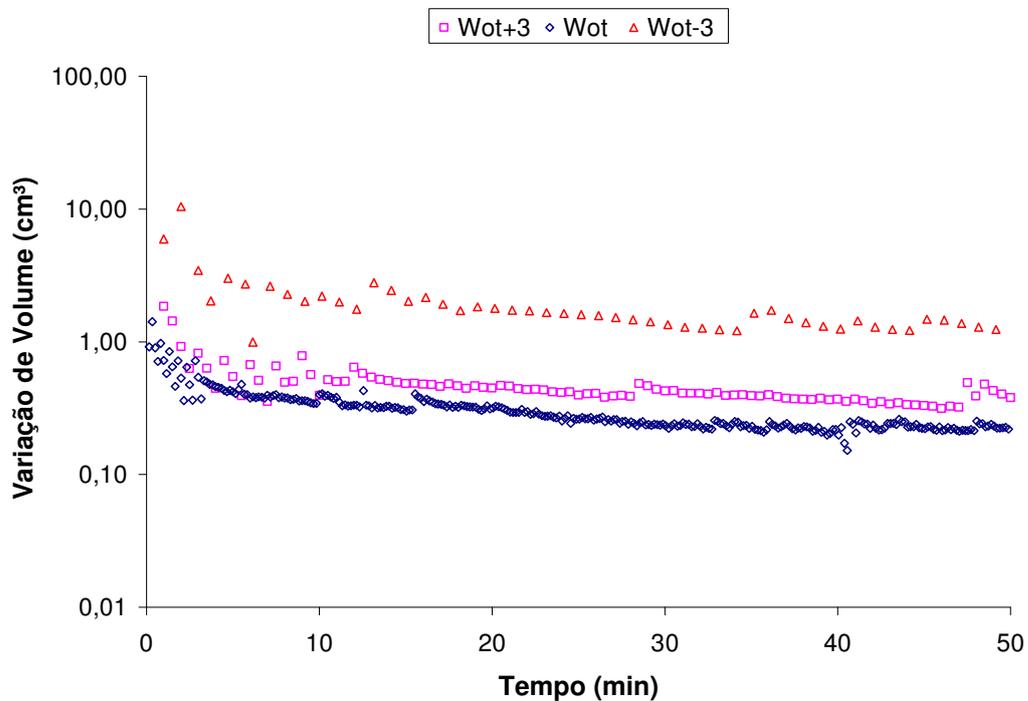


Figura 5.47-Varição de volume *versus* tempo, ensaio de permeabilidade da M3 com corpos de prova moldados por Proctor Normal.

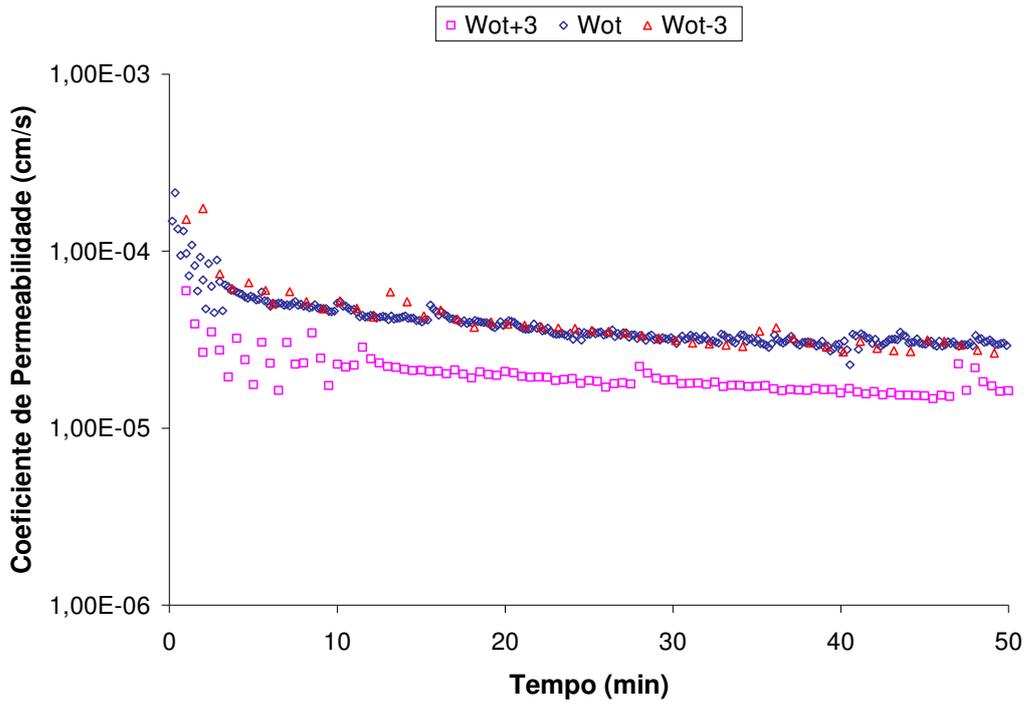


Figura 5.48-Coeficiente de permeabilidade *versus* tempo para corpos de prova da M3 moldados com Proctor Normal.

As relações entre a massa específica seca, índice de vazios e coeficiente de permeabilidade com a umidade de compactação da mistura 3 observam-se nas Figuras 5.49, 5.50 e 5.51 respectivamente.

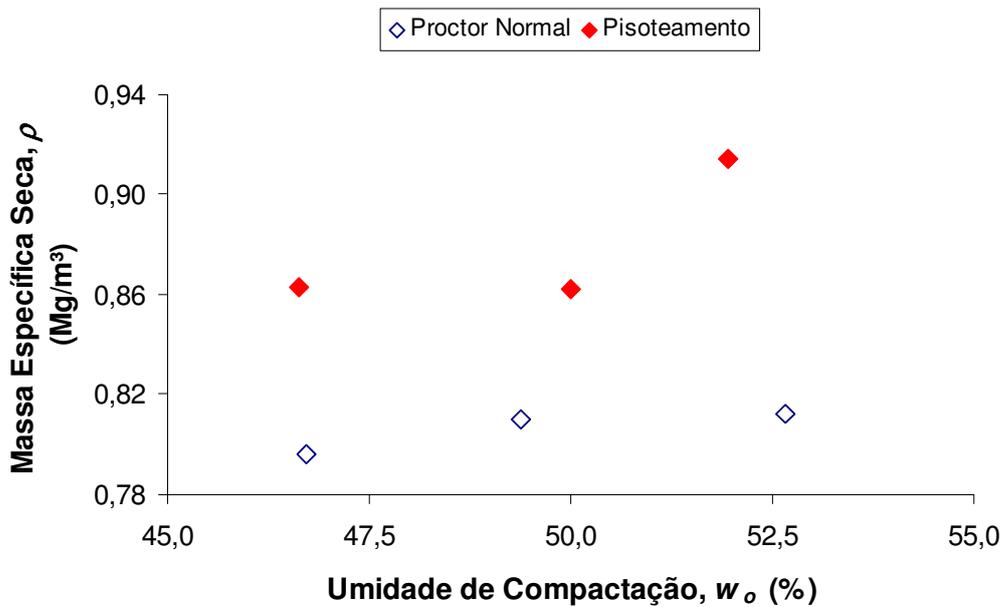


Figura 5.49-Massa específica seca *versus* umidade de compactação, M3.

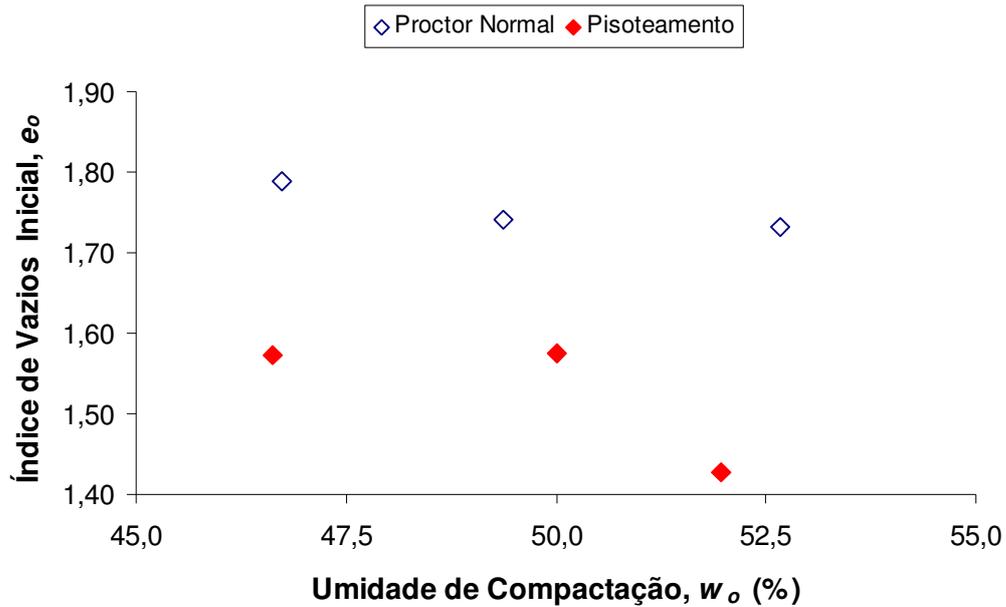


Figura 5.50-Índice de vazios *versus* umidade de compactação, M3.

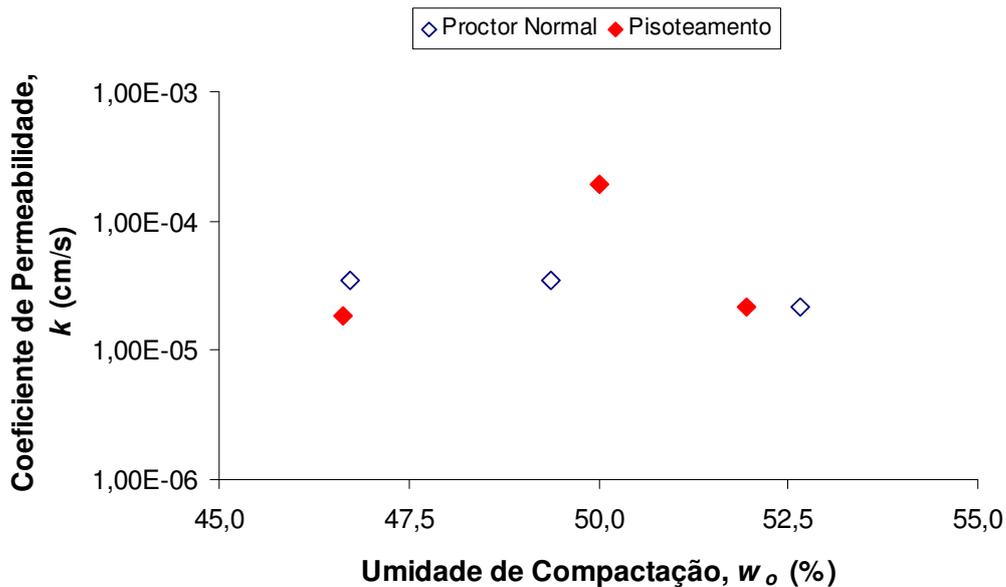


Figura 5.51-Coeficiente de permeabilidade *versus* umidade de compactação, M3.

Nas curvas das amostras moldadas por pisoteamento mostradas nas Figuras 5.43 e 5.44 se observa que para as três umidades de compactação em estudo as variações permanecem constantes ao longo do período mostrado nos gráficos ($t= 50$ min). Os valores correspondentes ao coeficiente de permeabilidade para cada caso aparecem na Tabela 5.21. No entanto, como se mostra nas Figuras 5.45 e 5.46, se prolongar os ensaios por mais tempo, pode acontecer o que se deu no caso do CP da $w_{ot+3\%}$ (ensaio da amostra M3C).

Neste, nota-se a queda brusca do valor de k com o decorrer do tempo, após ter permanecido constante por um período considerável. Extraindo os valores inicial e final da condutividade hidráulica a partir do gráfico mostrado na Figura 5.46, tem-se que os valores de k são $2,35e^{-5}$ cm/s e $4,42e^{-6}$ cm/s, no tempo inicial e final do ensaio respectivamente, podendo-se afirmar então, que a variação no valor da condutividade hidráulica foi significativa.

Graficamente, e em função da escala apresentada, parece que o CP compactado na w_{ot} também experimentou este comportamento, porém, o tempo ensaiado não foi tão prolongado para se verificar o problema de instabilidade mencionado acima e ocorrer uma variação importante na ordem de grandeza. No caso do CP compactado na $w_{ot-3\%}$, o valor do coeficiente hidráulico permaneceu constante, porém, no intervalo compreendido entre 82 e 115 minutos se observa um trecho instável. Isto se deve ao fato de que no $t=78$ min o ensaio foi interrompido e logo após reiniciado. Assim, no trecho mencionado, se observa a irregularidade nas leituras, provocada eventualmente pela equalização do sistema.

Quanto ao Proctor Normal, observam-se, nas Figuras 5.47 e 5.48, curvas com trechos constantes de variação de volume e de permeabilidade, que não apresentam graficamente retas tão bem definidas quanto os ensaios do solo e da M1, por exemplo. A equalização do sistema no início dos três ensaios, demorou um tempo maior que nos outros ensaios de permeabilidade executados neste trabalho. Portanto, os valores de k foram calculados com a média dos dados compreendidos entre $t=10$ min e $t=50$ min.

Assumindo que as hipóteses para o cálculo de k foram adequadas em todos os casos, pode-se afirmar que, assim como nos ensaios de permeabilidade da M2 moldados com pisoteamento, não foi possível definir uma tendência do comportamento k vs w_o para M3.

Nos ensaios dos corpos de prova moldados com PN, a tendência típica no comportamento k versus w_o foi observada. No entanto, é importante reparar que a diferença entre os valores obtidos (mostrados na Tabela 5.21) é desprezível, ou seja, poderia se dizer que a M3, quando compactada com PN, eventualmente não apresentou diferença na sua estrutura e conseqüentemente no valor de k .

5.6.5

Comparação conjunta dos resultados dos ensaios de permeabilidade dos materiais em estudo

Nos itens anteriores, os resultados dos ensaios de permeabilidade foram apresentados e discutidos para cada um dos materiais em estudo. A seguir, se mostram algumas relações entre o solo, M1, M2 e M3 nas diferentes umidades de compactação e com os diferentes métodos (Proctor Normal e pisoteamento) para discutir os efeitos dos anteriores fatores globalmente.

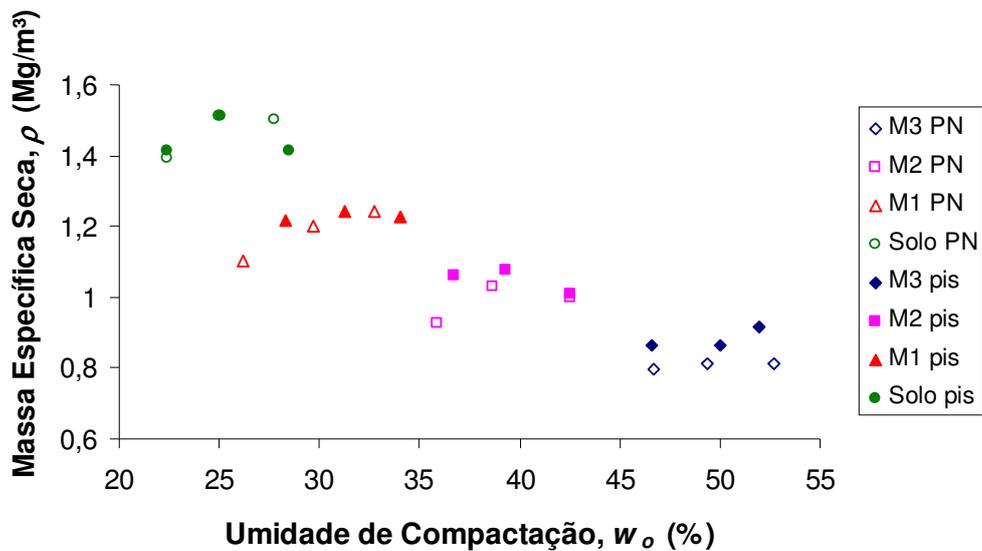


Figura 5.52-Massa específica seca versus umidade de compactação para o solo e as misturas M1, M2 e M3, compactadas nas umidades $w_{ot-3\%}$, w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ com Proctor Normal e pisoteamento.

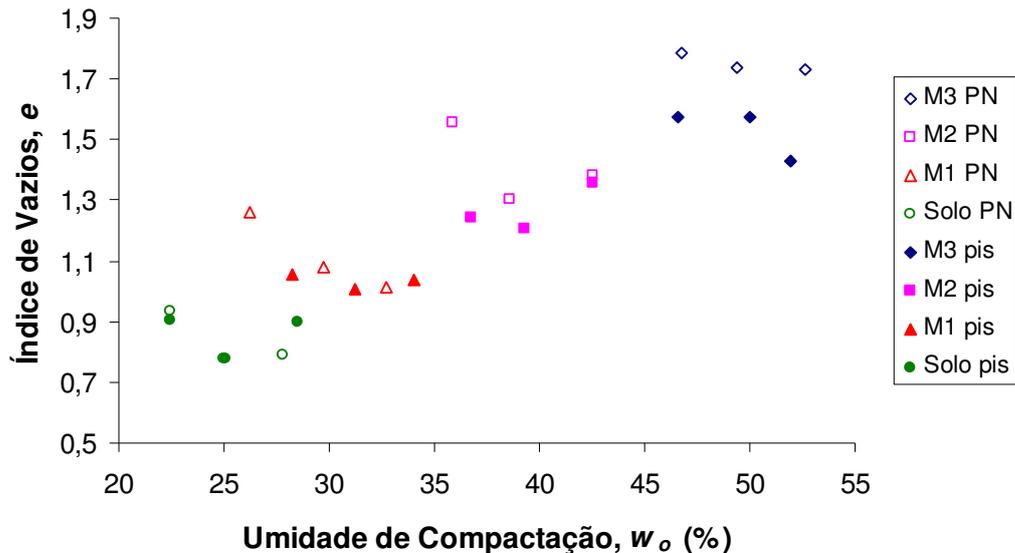


Figura 5.53-Índice de vazios *versus* umidade de compactação para o solo e as misturas M1, M2 e M3, compactadas nas umidades $w_{ot-3\%}$, w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ com Proctor Normal e pisoteamento.

Pode-se observar na Figura 5.52, que o valor da massa específica seca decresce com o aumento do teor de composto orgânico, porém a umidade de compactação aumenta como era de se esperar, já que a matéria orgânica possui menor peso específico e absorve uma maior quantidade de água.

As massas específicas secas dos corpos de prova utilizados nos ensaios de permeabilidade, produto de ambos os métodos de compactação, não são iguais. Isto porque quando o material é extraído do molde de compactação sofre uma expansão longitudinal. Como este efeito é inevitável, os ensaios de permeabilidade foram executados nas amostras expandidas. Observou-se que quanto maior o teor de composto orgânico, maior a expansão, devido à natureza da matéria orgânica. Este fato deve ser levado em consideração ao analisar os resultados obtidos. Uma comparação mais acurada dos resultados dos ensaios de permeabilidade seria possível se este efeito pudesse ser controlado. Outro fator que afeta a obtenção de massas específicas secas iguais e que deve ser considerado é o problema de repetitividade quanto à umidade. Como já foi explicado, uma das maiores dificuldades durante a execução dos ensaios foi atingir as umidades desejadas para compactar os materiais e conseguir a homogeneidade desta nos corpos de prova.

Observa-se que na série dos ensaios de M3 com pisoteamento, a massa específica seca máxima foi correspondente à $w_{ot+3\%}$, o que indica um possível

erro de execução ou problema durante o processo de moldagem. O mesmo aconteceu com o ponto compactado com Proctor Normal na $w_{ot+3\%}$ para M1.

Na Figura 5.53 aparece a relação entre o índice de vazios e a umidade de compactação dos corpos de prova, mostrando o comportamento contrário ao mostrado na Figura 5.52, na relação de ρ_d versus $w_o\%$. Quando compactados na umidade ótima, os materiais apresentam o menor índice de vazios e as maiores massas específicas secas (excetuando os pontos da M3 com pisoteamento na $w_{ot+3\%}$ e da M1 $w_{ot+3\%}$ com Proctor Normal).

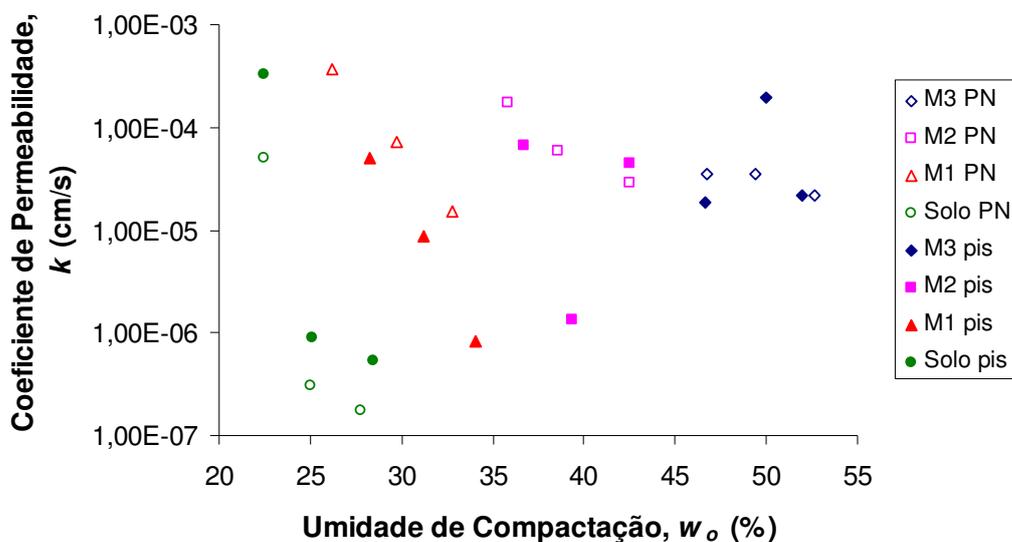


Figura 5.54-Coeficiente de permeabilidade *versus* umidade de compactação para o solo e as misturas M1, M2 e M3, compactadas nas umidades $w_{ot-3\%}$, w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ com Proctor Normal e pisoteamento.

Da Figura 5.54 verifica-se que todos os materiais, quando compactados por Proctor Normal cumpriram com a relação $k(w_{ot-3\%}) > k(w_{ot}) > k(w_{ot+3\%})$. O solo e M1, quando moldados por pisoteamento também satisfazem a relação anterior, concordando com as teorias de compactação explicadas por Hilf (1979). Já no caso da M2 e da M3, quando compactadas por pisoteamento, unicamente cumpre-se que $k(w_{ot-3\%}) > k(w_{ot+3\%})$. No entanto, a diferença entre ambos os valores é mínima. Quando moldada na w_{ot} , a condutividade hidráulica correspondente à M2 é a menor, e a correspondente à M3, é a maior entre todas as umidades de compactação ensaiadas no compactador pneumático. Este fato impossibilitou definir uma tendência de comportamento para os materiais anteriores.

Quanto ao método de compactação, para o solo, que é o material mais plástico e com maior teor de argila entre os estudados, o Proctor Normal gerou corpos de prova com menores coeficientes de permeabilidade. Para a M1, ocorreu o efeito contrário, sendo o método do pisoteamento o que proporcionou uma menor condutividade hidráulica ao material.

Para as misturas M2 e M3, não foi possível observar tão claramente, como no solo e na M1, a influência do método de compactação no valor de k .