

6 Resultados

A organização deste capítulo segue da seguinte forma; apresentação dos materiais classificados pela rocha de origem (caracterização), apresentação dos resultados dos ensaios hidráulicos, comentários gerais e análises.

A caracterização foi comparada no intuito de criar uma correspondência aos horizontes e graus de alteração dos solos de estudos anteriores.

6.1. Resultados da caracterização

6.1.1. Gnaisse Facoidal

O local, Costa Brava, dos ensaios de CB foi estudado anteriormente por Maciel (1991) e como parte do seu trabalho o autor caracteriza as propriedades hidráulicas K_{sat} e curva característica²⁷ (CC) que serão comparadas ao resultado do ensaio de infiltração monitorada na seção 6.3.1.1 (K_{sat}) e 6.7.2.1 (CC).

Devido às transformações do terreno, principalmente deslizamentos que ocorreram em 22 anos, não foi possível encontrar o mesmo perfil, Figura 46, para a comparação fiel com a presente dissertação. No entanto o solo estudado CB21/CB22 é parecido granulometricamente ao solo encontrado por Maciel (1991) nos níveis denominados 1 e 2 como pode ser observado na Figura 45 e na Tabela 10.

²⁷ Obtida através da placa de pressão

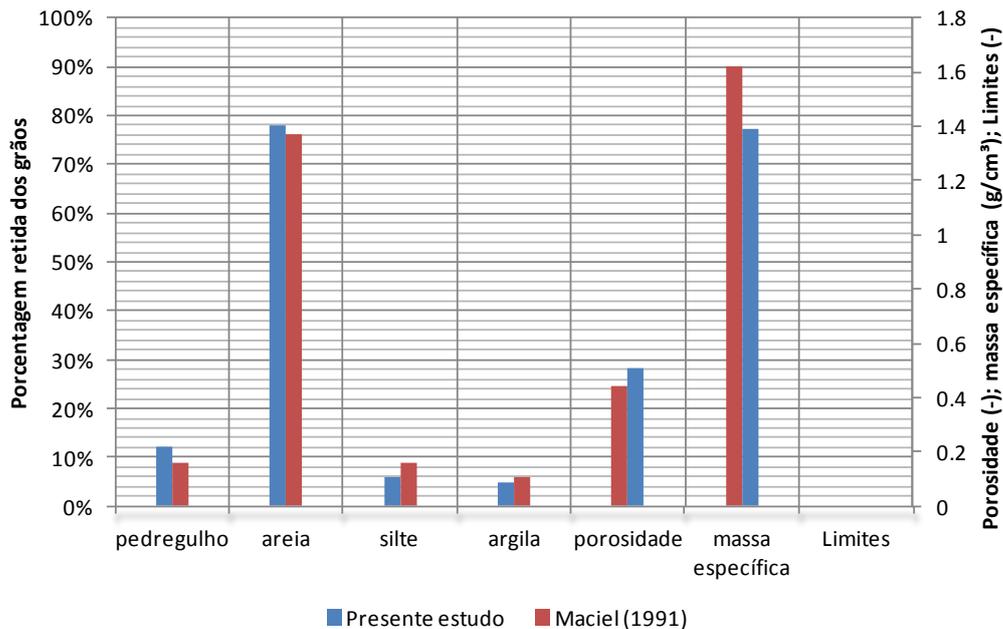


Figura 45 - Comparação da caracterização entre o presente estudo e Maciel (1991) - solo CB21

A porosidade e a massa específica apresentaram, porém valores diferentes. A porosidade variando de 0,38 a 0,44 no estudo de Maciel (1991) enquanto que no presente estudo obteve-se 0,51 (Tabela 10). A massa específica seca variando de 1,49 a 1,62 g/cm³ no estudo de Maciel contra 1,39 g/cm³ no presente estudo (Tabela 10). A diferença nos valores pode se dar pela diferença de volume das amostras utilizadas para a avaliação destes parâmetros ou simplesmente pela variação espacial (seção 6.4).

Já o solo CB1, foi considerado como de transição, Figura 46, e não se encontrou correspondência.

Tabela 10 - Caracterização do solo residual de Gnaisse Facoidal

Amostra	Granulometria ABNT (%)						Limites de Atterberg (%)			Gs	ρ_d (g/cm ³)	n porosidade
	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	LL	LP	IP			
CB21/ CB22	12	35	28.1	11.2	6.1	4.9	NL	NP	-	2.810	1.39	0.51
CB1	25.1	32.3	9.1	6	12.8	14.7	31.45	21.29	10.17	2.650	1.39	0.48
Residual Maduro *	3	25			7	65						
Nível 2*	10	76			8	6	NL	NP	-	-	1,62	0,38
Nível 1*	8	76			10.2	5.8	NL	NP	-	-	1,49	0,44

*Retirado de Maciel (1991)

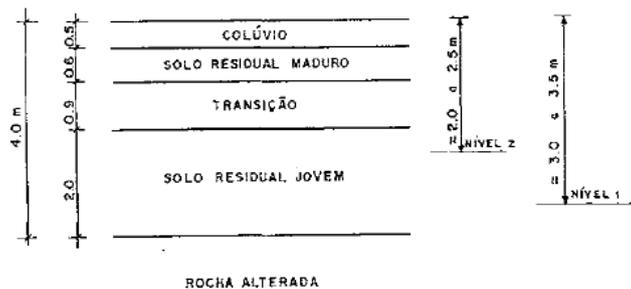


Figura 46 - Perfil encontrado por Maciel (1991)

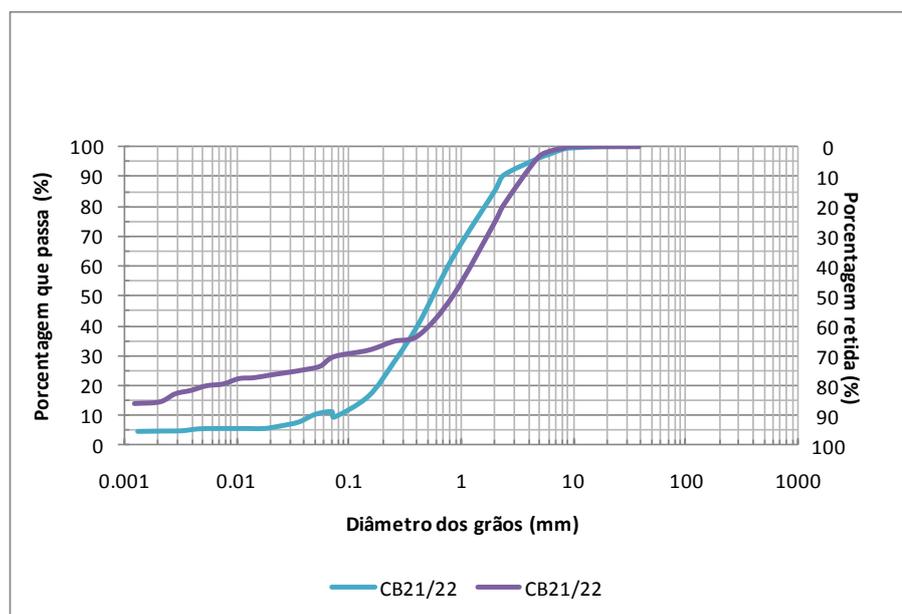


Figura 47 - Curva granulométrica de Gnaiss Facoidal

6.1.2. Granitóide

A ocorrência de solo residual foi estudado em três diferentes localidades, condomínio (CM), prainha (P) e campo do coelho (CO), todas no município de Nova Friburgo, estando os dois primeiros no distrito de conquista e o último no distrito de campo do coelho.

Os solos de CM e P foram recentemente estudados por Oliveira (2013) e por Escobar, Protasio, Portocarrero e Campos (2012), tendo algumas das informações futuramente apresentadas no estudo sido coletadas em cooperação com os autores ou obtidas destes trabalhos.

Destas informações; a caracterização e os ensaios de Guelph sido obtidos do trabalho dos últimos autores (Figura 50); e os ensaios de papel filtro de Oliveira (2013). A comparação destes resultados com o ensaio de infiltração monitorada é feita na seção 6.3.1.2 (K_{sat}) e 6.7.2.1 (CC).

A caracterização dos solos CM1/CM2, CM3, P23 foi obtida do trabalho de Escobar et. al (2012) sendo classificados pelos autores como residual jovem (nomenclatura: Condomínio SRJ), residual maduro (nomenclatura: Condomínio sem) e residual jovem (nomenclatura: Prainha II SRJ) respectivamente. As curvas granulométricas destes materiais são apresentadas na Figura 50.

Os solos CO1 e P21, após caracterização e inspeção de campo, foram classificados como: solo saprolítico e residual jovem, respectivamente (Tabela 11).

Houve pouca diferença nas propriedades encontradas para os solos residuais jovens (CM1/CM2/P23/P21) e maduro (CM3) da região onde a porosidade variou de 0,40 a 0,43 e a massa específica seca variou de 1,512 a 1,6 g/cm³ (Figura 48). A maior diferença foi o IP que apresentou alguma diferença de ~10% maior no solo residual maduro (CM3) (Tabela 11 e Figura 48).

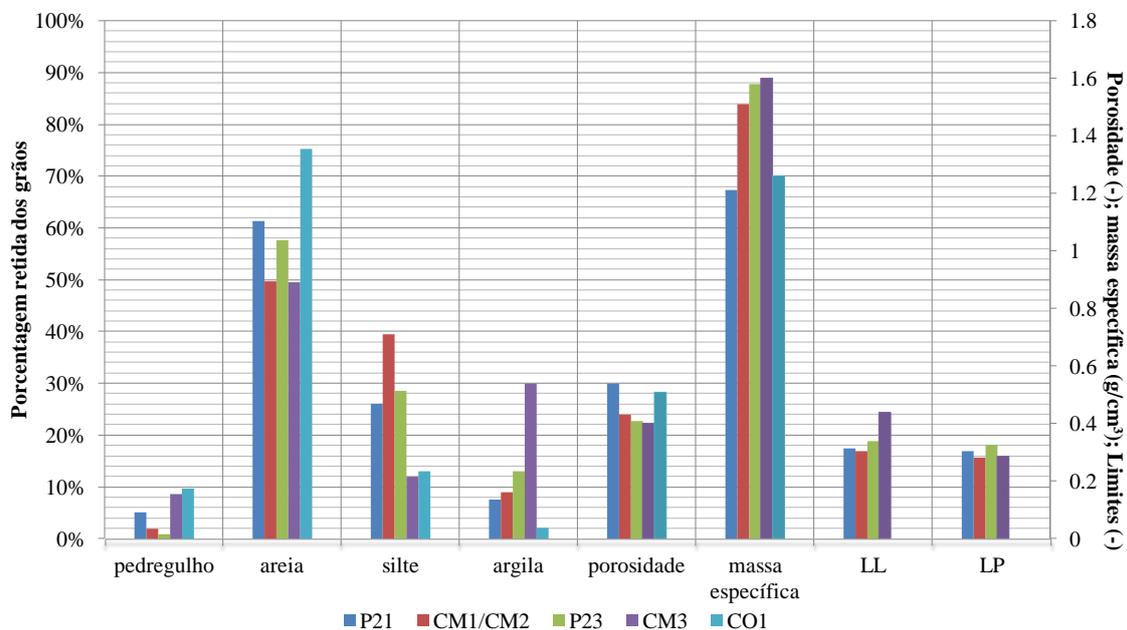


Figura 48 - Comparação da caracterização entre o presente estudo e Escobar et. al (2012) - solos P21; CM1/CM2; CM3; P23; CO1

A maior diferença dos valores observados entre o presente estudo e a revisão de Escobar et. al (2012) foram o da porosidade, acima da revisão, e massa

específica, abaixo da revisão. Tendo os solos do presente estudo, P21 e CO1, valores de 0,54 e 1,212 g/cm³; e 0,49 e 1,26 g/cm³ respectivamente (ver seção 6.2).

Em resumo geral os solos residuais jovens desta região (CM1/CM2/P23/P21) apresentaram bastante percentil de silte variando de 26,1 a 39,5%, enquanto o solo saprolítico (CO1) teve elevada percentagem de areia e pedregulho (84,9%), como também caracterizou-se pelo maior peso específico dos grãos (G_s), cor branca e minerais menos alterados (Tabela 11).

As curvas granulométricas podem ser vistas nas Figura 49 e Figura 50.

Tabela 11 - Caracterização do solo residual de Granitóide

Amostra	Granulometria ABNT (%)						Limites de Atterberg (%)			Gs	ρ _a (g/c)	n Porosi-
	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	LL	LP	IP			
P21	5	25	19,7	16,7	26,1	7,5	31,2	30,4	0,8	2,653	1,21	0,54
CO1/CO3	9,7	30,7	25,4	19,1	13	2,1	NL	NP	-	2,710	1,26	0,49 (CO1) 0,53 (CO3)
	Pedregulho	Areia			Silte	Argila						
CM1/CM2*	1,9	49,7			39,5	8,9	30,5	28,3	2,2	2,664	1,51	0,43
CM3*	8,6	49,5			11,9	30	44	28,5	15,5	2,645	1,60	0,4
P23*	0,9	57,6			28,5	13	33,8	32,6	1,2	2,695	1,58	0,41

*Retirado de Escobar e Protasio *et al.*. (2012)

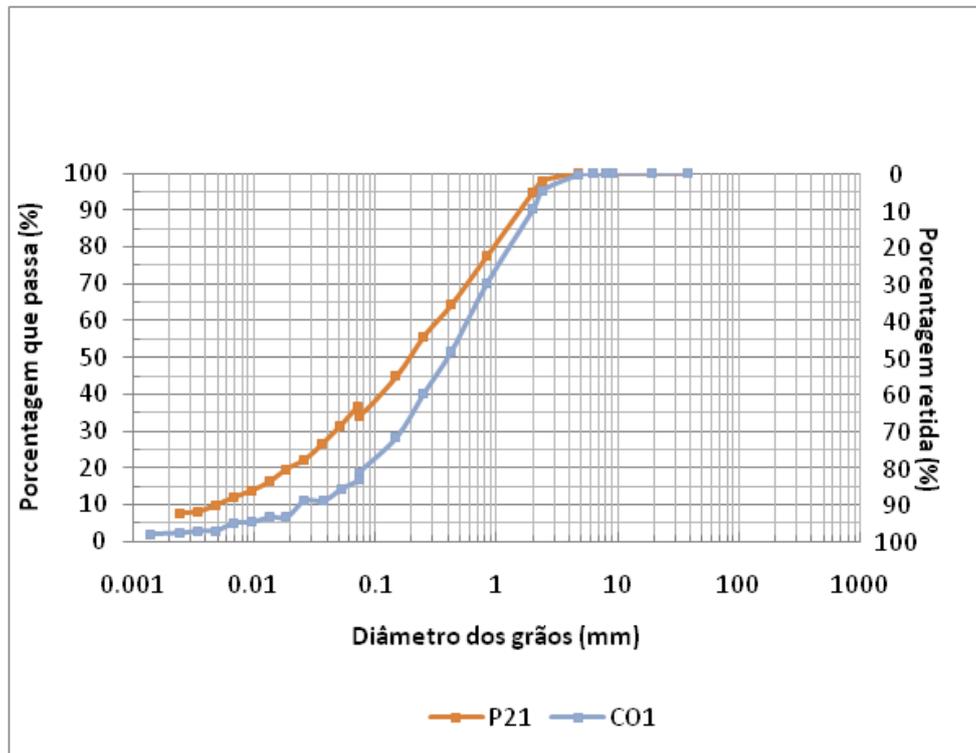


Figura 49 – Curva granulométrica de um tipo de granitóide

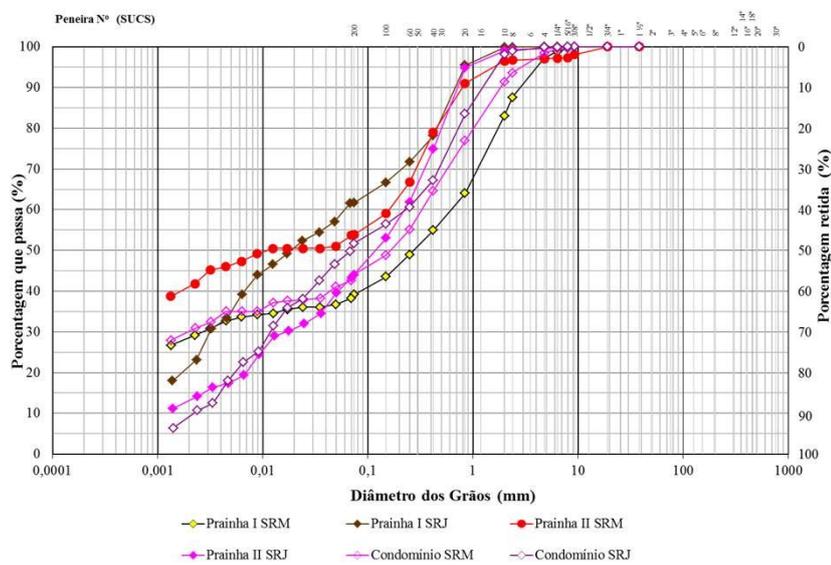


Figura 50 - Curva granulométrica de Escobar e Protasio *et al.* (2012)

6.1.3. Migmatito

A ocorrência de solo residual de migmatito foi recentemente estudada por Carvalho (2012)²⁸ em uma mineradora abandonada no município de Duque de Caxias. A autora diferencia os solos encontrados em duas parcelas: uma escura, chamada de melanocrática (M) e a outra clara, chamada de leucocrática (L). Neste presente estudo utilizou-se a mesma nomenclatura, no entanto não serão apresentados os resultados dos ensaios na região de solo leucocrático (L) já que não foram bem sucedidos²⁹.

O solo melanocrático (M) é um solo residual jovem basicamente silte-arenoso que apresenta pouca plasticidade (Tabela 12). Houve boa comparação dos índices físicos com o estudo de Carvalho (2012) conforme pode ser observado na Figura 51.

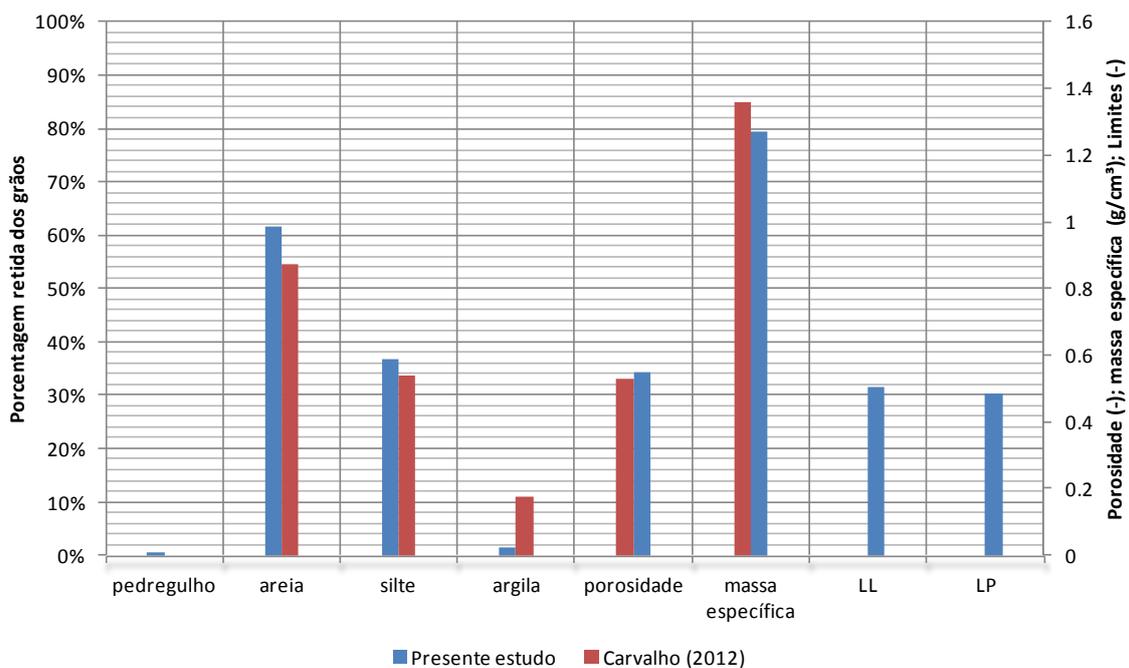


Figura 51 - Comparação da caracterização entre o presente estudo e Carvalho (2012) - solos M1 e M2

²⁸ A autora realiza além da caracterização física, uma análise química e estrutural do material deste solo.

²⁹ O solo Leucocrático, diferentemente de Carvalho (2012), foi erroneamente definido quando executados os ensaios, sendo classificado posteriormente como coluvionar. Sendo assim, não foram feitos ajustes das curvas do ensaio ($\Psi(t)$) em L, porém estes são apresentados no apêndice 3

A porosidade medida deste material foi bem alta (0,55) o que contribui para a redução da massa específica seca ($1,27 \text{ g/cm}^3$), estando os resultados de acordo com o trabalho de Carvalho (2012) como mostrado na Tabela 12. A diferença entre os estudos está nos limites de Atterberg que não foram encontrados em Carvalho (2012).

A cor do material, bem arroxeadada, sugere ser produto de alteração de minerais máficos, que são pesados e, portanto possuem alta densidade dos grãos (G_s) (Tabela 12), além de sofrerem maior intemperismo químico.

As curvas granulométricas podem ser vistas na Figura 52.

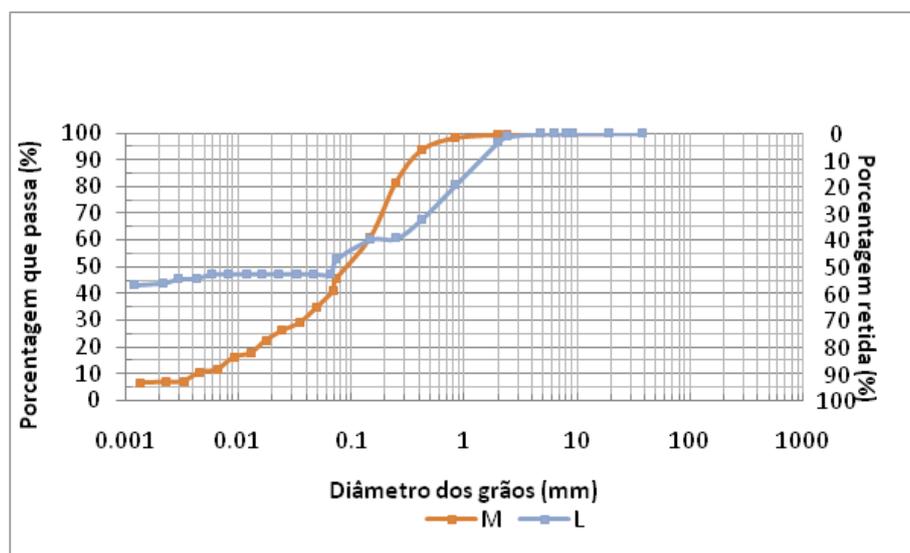


Figura 52 – Curva Granulométrica de Migmatito

Tabela 12 - Caracterização do solo residual de Migmatito – Melanocrático e Leucocrático

Amostr a	Granulometria ABNT (%)						Limites de Atterberg (%)			G_s	ρ_d (g/cm^3)	n porosidad e
	Pedregulh o	Areia Gross a	Areia Médi a	Arei a Fina	Silt e	Argil a	LL	LP	IP			
M1	0,4	3,8	24,4	33,4	36,6	1,3	50,3	48,3	2	2,843	1,27	0,55
L	3,2	23,4	12,9	13,1	3,5	43,9	68,42	43,39	25,02	2,699	-	-
	Pedregulho	Areia			Silte	Argila						
DC*	0	54,6			33,6	10,8	-	-	-	2,84	1,36	0,53

*Média de Carvalho (2012)

6.1.4. Biotita Gnaisse

A ocorrência³⁰ de solo residual de Biotita Gnaisse foi sugerida, em encontro verbal, pela professora geóloga H. Polivanov e pelo professor geotécnico F. Antunes e se localiza em uma mineradora no município de Campo Grande (CG).

Neste local foram estudados os horizontes, jovem e de transição para o maduro e apesar de não terem sido realizados ensaios de infiltração monitorada no horizonte maduro propriamente dito, este também se apresenta caracterizado no presente trabalho (Tabela 13).

O material ensaiado em CG1 foi classificado como residual jovem, e sua textura majoritariamente arenosa (85,6%) não conferiu limites de Atterberg ao solo conforme a Tabela 13.

O solo do ensaio CG3 foi classificado como solo de transição por apresentar ainda a cor mais próxima do solo residual jovem (cinza), porém com característica mais homogênea, sendo ao final, comprovado na caracterização pela maior presença de material argiloso (2,7% (CG1) < 7,8% (CG3) < 48% (CGM)). A alteração do material pode ser observada através das curvas da Figura 53. Quando comparados os solos CG3 ao CG1 observa-se que apesar do formato semelhante das curvas da Figura 53 há um aumento significativo na porcentagem de material fino; areia fina e silte, e queda no percentil de material grosseiro; pedregulho, areia grossa e areia média. Esse efeito talvez possa ser explicado pela velocidade de transformação dos minerais, mais rápida, para o caso entre primários e secundários e mais lenta para o caso entre secundários e terciários ou seja sugere uma transformação mais lenta dos grãos mais finos menores que 0,3 mm. Já quando comparados as curvas de CG3 e CGM observa-se somente um aumento do material fino, teor de argila, sendo a manutenção da quantidade de material grosseiro explicado pela amostragem, que pode ter sido feita próxima a um veio de quartzo, comumente encontrado na região. Observa-se também queda de quase metade na atividade do material de CG3 para CGM (0,39 e 0,72).

A porosidade e a massa específica seca do material GG3 não foram medidas, e para a retro-análise utilizou-se do valor obtido no solo residual maduro (vermelho), CGM.

³⁰ Não foram encontrados estudos complementares da área.

No solo CGM não foram feitos nenhum EIM por problemas na execução do ensaio³¹.

Em resumo, pode-se dizer que apesar de horizontes diferentes a pequena diferença entre Gs (2,74/2,69) e n (0,505/0,499) produziu quase nenhuma diferença na massa específica seca de 1,35 e 1,33 g/cm³ entre o jovem e o maduro.

Tabela 13 - Caracterização do solo residual de Biotita Gnaiss

Amostr a	Granulometria ABNT (%)						Limites de Atterberg (%)			Gs	ρ_d (g/c)	n porosidad
	Pedregulh o	Areia Gross a	Areia Médi a	Arei Fina	Silt e	Argil a	LL	LP	IP			
CG1	4,1	38,1	31,8	15,7	7,6	2,7	NL	NP	-	-	1,33	0,505
CG3	0,4	16,5	26,4	30	18,9	7,8	35,6	30	5,6	2,740	1,35	0,499
CGM	6	11,5	16,5	8,5	9,5	48	49,7	30,5	19,1	2,691	1,35	0,499

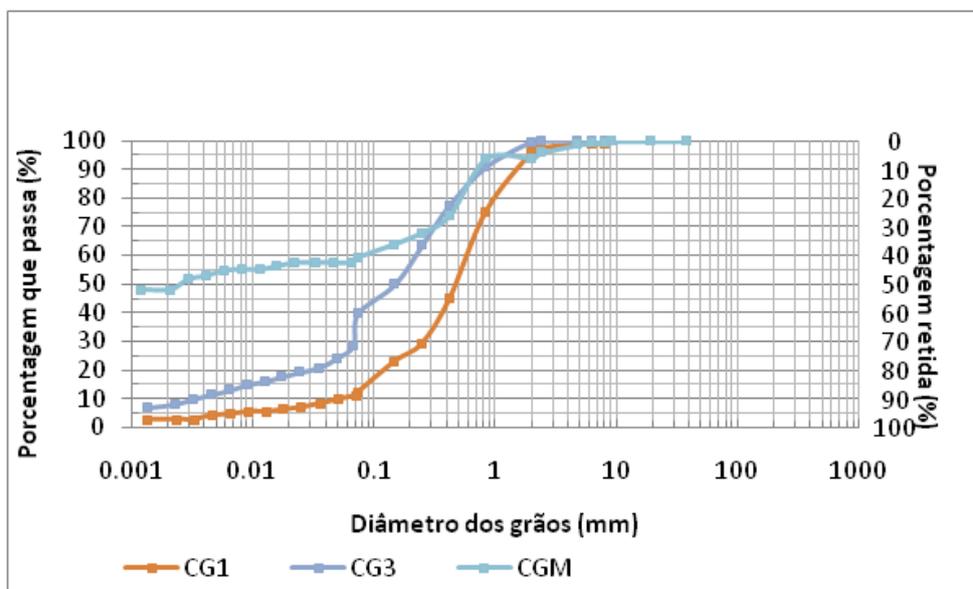


Figura 53 - Curva granulométrica - Biotita Gnaiss

6.1.5. Alcalina

A ocorrência de solo residual de rocha Alcalina foi estudada anteriormente por Buback (2008) e Carvalho (2012) em uma mineradora na localidade de Tanguá (T). No presente estudo escolheu-se por realizar os ensaios em outro local, Rio Bonito (R), onde também há ocorrência desta rocha. Neste foram realizados

³¹ Quebra da cápsula porosa

dois ensaios em um talude de corte, sendo um em solo residual jovem e o outro em solo residual maduro.

O solo da base do talude (RB) foi classificado como residual jovem e teve percentil alto de areia, 64,6 %, como mostrado na Tabela 14. A grande quantidade de pedregulho (14,9%) foi associado a um material branco e opaco de tamanho médio de 1 cm, podendo ser nefelina do complexo intrusivo de Tanguá/Rio Bonito ou quaisquer feldspato ou feldspatóide (Figura 25, página 48). A porosidade medida foi de 0,41, estando abaixo da média dos outros solos estudados.

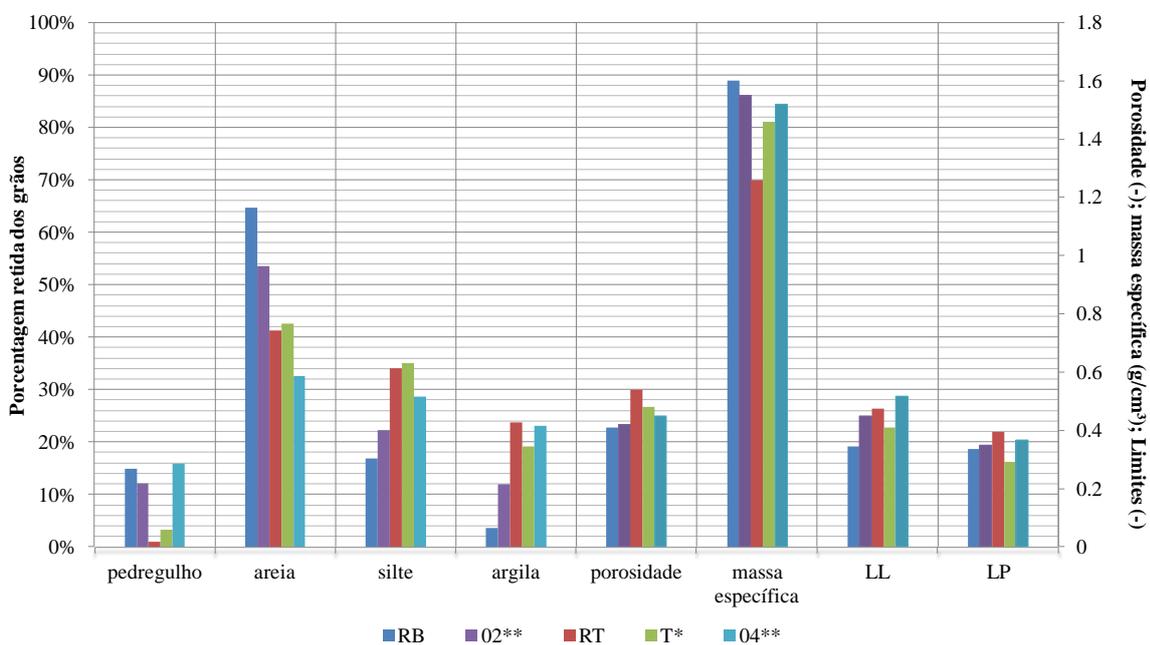


Figura 54 - Comparação da caracterização entre o presente estudo, Buback (2008) e Carvalho (2012) - solos RB; RT; 02; 04 e T

No entanto, apesar da boa conformidade com os valores de LP (34,91%), Buback (2008) encontra IP igual a 9,96% que foi muito superior ao do presente estudo como mostra a tabela Tabela 14.

O solo RT, foi classificado residual de transição e apresentou-se em conformidade à amostra 4 de Buback (2008) e à amostra T de Carvalho (2012) como mostrado na Figura 54. A comparação entre as porosidades mostrou que seu valor de 0,54 (RT) esteve acima da revisão que foi de 0,45 e 0,48 para a amostra 04 de Buback (2008) e T de Carvalho (2012) respectivamente (Tabela 14). De forma geral, observou-se valores abaixo da média para a porosidade dos solos residuais Alcalinos chegando a valores baixos como 0,41 (Tabela 14).

A textura destes solos (RT/T/004) foi bem semelhante, salvo a quantidade superior de pedregulho encontrada no estudo de Buback (2008), de 15,8%, contra 0,9% e 3,2% de RT e T respectivamente.

As curvas granulométricas podem ser vistas na Figura 55.

Tabela 14 - Caracterização da Rocha Alcalina

Amostr a	Granulometria ABNT (%)						Limites de Atterberg (%)			Gs	ρ_a (g/c m ³)	n porosidad e
	Pedregulh o	Areia Gross	Areia Médi	Arei a Fina	Silt e	Argil a	LL	LP	IP			
RB	14,9	38,1	15	11,5	16,9	3,5	34,4	33,6	0,8	2,741	1,60	0,41
RT	0,9	15,1	7,3	18,9	34	23,8	47,5	39,5	8,0	2,740	1,26	0,54
	Pedregulho	Areia			Silte	Argila						
T*	3,2	42,6			35	19,2	40,9	29,2	11,6	2,728	1,46	0,48
02**	12,1	53,6			22,3	12	44,86	34,91	9,96	2,680	1,55	0,42
04**	15,8	32,6			28,6	23	51,8	36,63	15,19	2,750	1,52	0,45

*Obtido de Carvalho(2012)

** Obtido de Buback (2008)

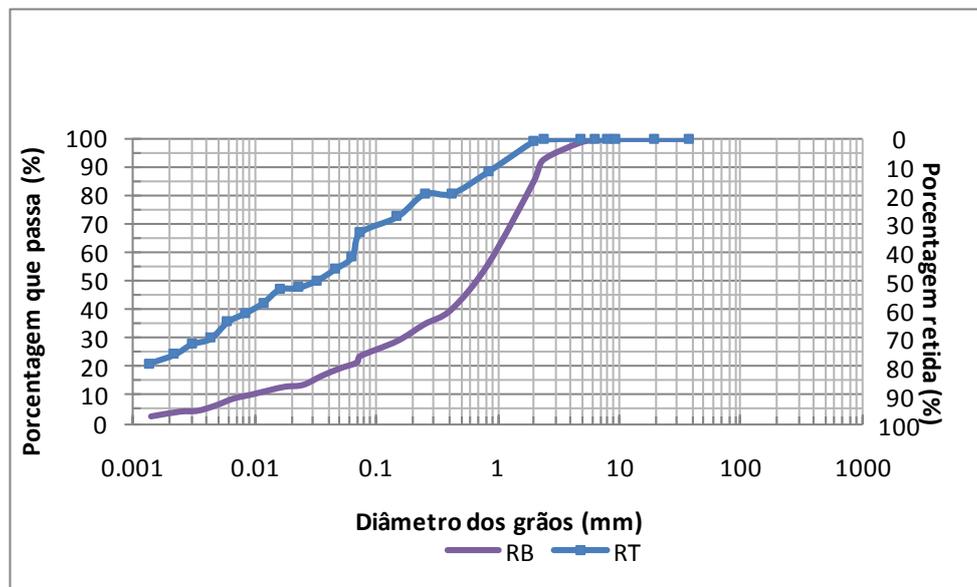


Figura 55 - Curva granulométrica de rocha alcalina

6.1.6. Gnaiss Kinzigito

O gnaiss Kinzigito pode ser encontrado no campus da PUC-Rio e diversos estudos foram feitos no local, especialmente e atualmente no Campo experimental II, para caracterizá-lo; como exemplo: Campos (1984), Sertã (1986) e Diniz (1998). Diferentemente da maioria dos solos residuais encontrados no Rio de

Janeiro este perfil³² apresenta-se em grandes espessuras. Por esse motivo e por não haver um talude de corte exposto não foi possível atingir a profundidade necessária para chegar-se aos solos residuais e o presente estudo foi realizado em colúvio.

Em Diniz (1998) são obtidas as funções de condutividade hidráulica dos primeiros horizontes do Campo Experimental II e será usado como comparação ao Ensaio de infiltração monitorada (EIM) na seção 6.3.3. No campo experimental II foram caracterizadas três amostras referentes aos ensaios PM, PT1 e PT2; localizadas respectivamente no meio da encosta (PM), no topo da encosta sob o primeiro horizonte (PT1) e no topo sob o segundo horizonte (PT2).

A macroestrutura³³ presente nestes três solos é muito importante para as funções hidráulicas, pois apresentam macroporos em grumos de argílicos e também forte presença de enraizamento.

O percentil de finos encontrados no presente trabalho foi muito superior ao encontrado por Sertã, cujo primeiro horizonte caracterizado foi a 1 metro de profundidade. Os solos PM e PT1 se mostraram bastante semelhantes (Tabela 15) e são basicamente o mesmo horizonte, um colúvio de baixa plasticidade e marcados pela presença do argilomineral caulinita (Tabela 15).

Tabela 15 - Caracterização Gnaisse Kinzigito/Colúvio

Amostr a	Granulometria ABNT (%)						Limites de Atterberg (%)			Gs	r _d (g/cm ³)	n porosidad e
	Pedregulho %	Areia Gross a	Areia Médi a	Arei a Fina	Silt e	Argil a	LL	LP	IP			
PM	0,1	0,2	14,7	17,4	2,8	64,8	43,9	32,1	11,7	-	-	-
PT1	2,2	14	13,9	10,7	5,2	54	40,41	33,75	6,67	2,715	1,238	0,54
PT2	0,3	0,2	0,4	5	8	86,1	57,36	35,75	21,61	-	-	-

³² Os argilominerais presentes encontrados no estudo de Sertã (1986) foram em sua maioria caulinita e em seguida ilita. A ρ_t variou de 1,74 a 1,44 (g/cm³), com queda do valor com a profundidade, diferente do resultado de Sandroni e Maccarini (1981).

³³ Esse aspecto também foi observado por Diniz (1998) e neste estudo o autor observa a macroestrutura mais detalhadamente através de um tomógrafo.

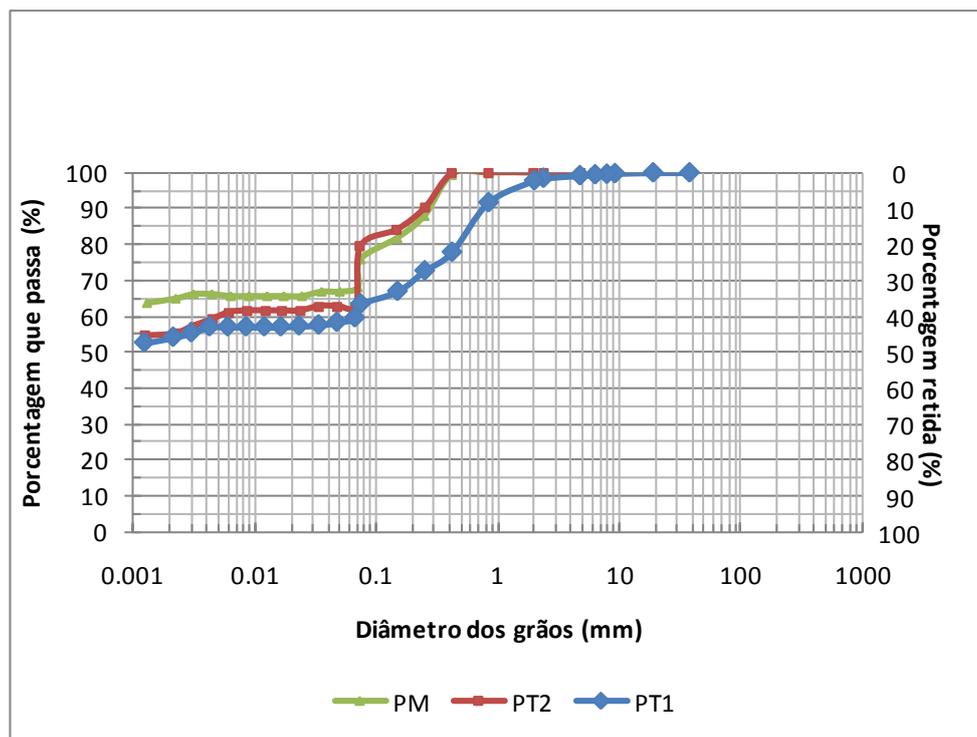


Figura 56 Curva granulométrica de colúvio/Kinzigito

6.2. Comentários gerais; Caracterização Física

Os valores de índice de vazios³⁴ encontrados, em alguns casos, foram significativamente maiores aos encontrados na literatura, como mostrado na Figura 57. A situação é mais discrepante quando são comparados aos valores obtidos no presente estudo e Sandroni (1973) que são aproximadamente da mesma região. O autor acredita que a diferença de volume, 85cm³ de anéis de cisalhamento direto contra 35cm³ de pequenos anéis indeformados, utilizado nas medidas contribua para esta discrepância, fora também o fator de variabilidade espacial. No entanto, o valor da porosidade encontrado no ensaio de permeabilidade saturada do local M1 (n=0,59; e=1,48) não comprovou tal hipótese sendo superior ao encontrado pela metodologia dos anéis (n=0,55; e=1,22). Outra diferença encontrada foi que a distribuição dos índices de vazios da literatura é normal, diferentemente do estudo provavelmente pela baixa quantidade de amostras .

³⁴ Esta propriedade do solo será tratada em termos de índice de vazios nesta seção, pois este índice varia mais do que a porosidade.

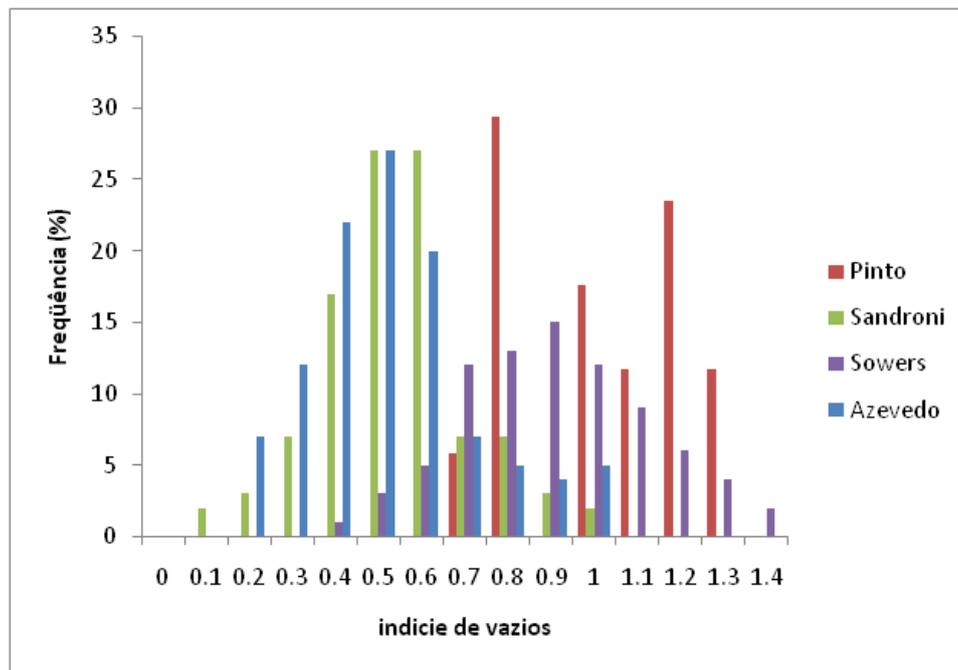


Figura 57 - Histograma de índice de vazios, Sandroni e Pinto representam os valores do Grande Rio – Adaptado de Sandroni (1973)

6.3. Resultados de campo e laboratório

Nesta seção são comentados os resultados dos parâmetros hidráulicos não saturados e a revisão dos dados de permeabilidade saturada obtidos em campo e em laboratório.

Os ensaios de papel filtro serão apresentados de forma gráfica na seção 6.7.2.1 juntamente com as considerações sobre a adição de informações extra a função objetivo.

A influência e a variação dos parâmetros obtidos pode ser visualizada tanto nos gráficos da seção 6.4 como nas análises de infiltração da seção 6.6. Os gráficos dos subconjuntos das curvas das propriedades hidráulicas separados por local e rocha estão apresentados no apêndice 5.

6.3.1. Resultado do ensaio de infiltração monitorada

6.3.1.1. Gnaisse Facoidal

Os solos residuais de Gnaisse Facoidal, foram jovem (CB21 e CB22) e de transição para o maduro (CB1) como descrito na seção 6.1.1. As séries temporais e a geometria usada nos ensaios desta região podem ser vistos nas Figura 58 e Figura 59.

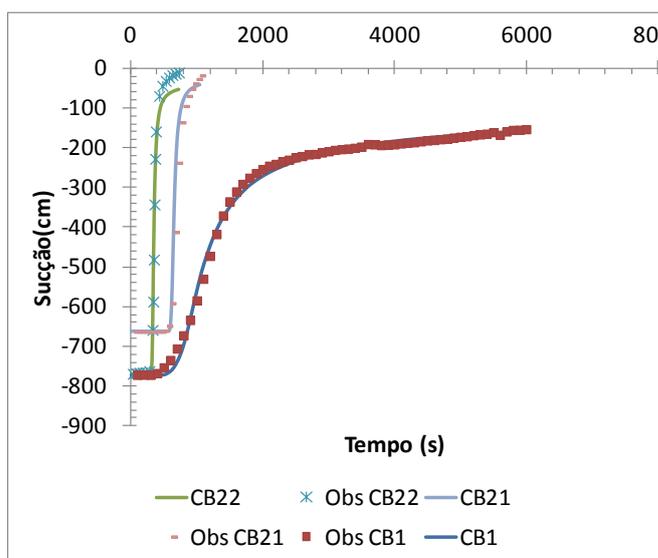


Figura 58 - Série temporal - Resultado do EIM - Gnaisse Facoidal - Clube Costa Brava

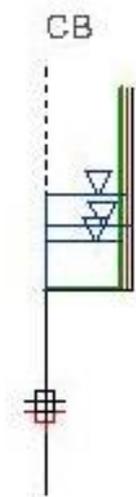


Figura 59 - Geometria do ensaio em CB

Os ensaios CB1 e CB21/CB22 apresentaram formato de curva característica e curva de condutividade hidráulica diferentes como pode ser visto no apêndice 5, principalmente associados ao “valor de entrada de ar” (ver seção 2.2.3) de ~314 cm para CB1 e média de ~50cm para CB21 e CB22, considerando os valores como $1/\alpha \Psi_{VG}$.

Os solos CB21 e CB22 são saprolíticos e os resultados obtidos nestes solos atestam a reprodutibilidade do ensaio, visto que tiveram uma grande proximidade física, 1 metro, e todos os parâmetros estimados foram semelhantes conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Reprodutibilidade do ensaio em solo saprolítico - CB21; CB21

	α (cm-1)	n	ksat (cm/s)
CB21	2,25E-02	2,68	9,93E-04
CB22	1,81E-02	2,76	2,45E-03

Quanto à condição inicial de ensaio os valores se apresentaram acima da média com 78 KPa para o ensaio CB1, 69,5 e 77 KPa para o ensaio CB21/CB22 respectivamente.

Maciel (1991) realizou 12 ensaios de permeabilidade saturada em laboratório nos solos do Clube Costa Brava nos quais procurou-se verificar o efeito da anisotropia destes solos. Maciel (1991) encontrou pouca variação na permeabilidade entre todos os solos estudados, dois residuais jovens³⁵ e um maduro, com média de K_{sat} igual a $3,15 \times 10^{-4}$ cm/s entre todas as amostras e orientações. Entre os solos residuais jovens a média foi de K_{sat} igual a $2,47 \times 10^{-4}$ cm/s.

Ao compararmos os valores de K_{sat} da revisão ao Ensaio de Infiltração Monitorada do presente estudo encontramos valores muito semelhantes para o solo residual de transição ($1,29 \times 10^{-4}$ cm/s) e valores com uma ordem de grandeza acima para os solos residuais jovens (média de $1,72 \times 10^{-3}$ cm/s) como mostra a Tabela 24.

6.3.1.2. Granitóide

Os solos residuais de Granitóide foram jovens (P21, P23, CM1/CM2) e maduro (CM3) como descrito na seção 6.1.2. As séries temporais e a geometria usada nos ensaios desta região podem ser vistos nas Figura 60 e Figura 61.

³⁵ O solo que apresentou maior anisotropia foi o menos alterado

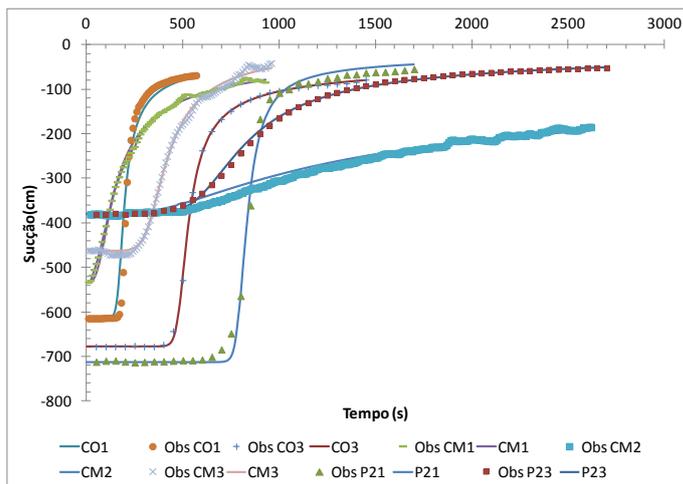


Figura 60 - Série temporal - Resultado do EIM – Granitóide – Nova Friburgo

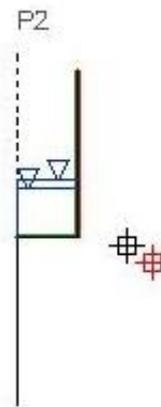


Figura 61 - Geometria dos ensaios em P2 - as outras geometrias podem ser vistas no apêndice 2

Apesar dos ensaios em P/CM e CO terem sido feitos em diferentes locais acredita-se que representem a mesma litologia uma vez que a coloração exposta dos materiais rompidos sugere, através da cor, que os materiais possam fazer parte de um perfil tipo, apresentado na seguinte ordem: branco (solo saprolítico), rosado (residual jovem), e amarelado (residual maduro), seguindo do material menos alterado ao mais alterado.

Os ensaios de CM atestam a reprodutibilidade do ensaio e apresentaram valores de α ($1,05 \times 10^{-3}$ a $6,35 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$) e n (1,18 a 1,31) muito semelhantes para todos os três ensaios no local, sendo eles: dois jovens (CM1 e CM2) onde as propriedades obtidas podem ser vistas na Tabela 17 e um maduro (CM3).

Tabela 17 - Reprodutibilidade do ensaio em solo saprolítico - CM1; CM2

	α (cm-1)	n	ksat (cm/s)
CM1	1,20E-03	1,18	5,05E-04
CM2	1,05E-03	1,2	7,33E-06

Já os valores de K_{sat} apresentaram pouca diferença³⁶ entre um o solo residual jovem (CM1) e o maduro (CM3), sendo o último levemente mais

³⁶ Esse efeito pode ter ocorrido pela influência da carga elevada aplicada ao contorno de CM3 que foi de 20 cm contra 10 cm para o ensaio CM1. No entanto não foram coletados dados suficientes para dissertar sobre a influência da carga hidráulica no EIM.

permeável ($5,05 \times 10^{-4}$ e $5,78 \times 10^{-4}$ cm/s respectivamente), o que não era o de se esperar. Apesar disso nos ensaios de Guelph realizados na região junto com Oliveira (2013) obteve-se valores de K_{sat} muito semelhantes aos supracitados ($5,75 \times 10^{-4}$ cm/s para CM1 e $1,21 \times 10^{-4}$ cm/s para CM3³⁷) como pode ser visto na Tabela 24.

O valor de K_{sat} obtido nos solos residuais jovens variou bastante como mostrado na Tabela 17 sendo a causa não identificada e atribuída à variação espacial da propriedade. A princípio, como o ensaio foi feito em condição radial, acreditava-se em fluxo preferencial em direção oposta ao ponto de observação (tensiômetro) o que seria comprovado através heterogeneidades. Contudo após inspeção (destruição) do local de ensaio não foram encontradas evidências de significativas que comprovassem a hipótese. Os ensaios em P representam o mesmo solo residual dos em CM (página 57) e seu espaçamento é descrito no capítulo 4. Os dois ensaios na face P do talude apresentaram variabilidade maior do que os encontrados em CM, mas acredita-se que tal diferença se deva à qualidade de colúvio do solo P21. Este ensaio, por este motivo, apresenta K_{sat} , α e n acima da média da região enquanto por outro lado o ensaio P23, residual jovem, tem valores próximos aos ensaios de CM (Tabela 17 e Tabela 18), mais uma vez atestando a reprodutibilidade do ensaio (como na seção 6.3.1.1) (* exceto α).

Tabela 18 - Reprodutibilidade do ensaio em solo maduro e jovem – CM3; P23

	α (cm-1)	n	K_{sat} (cm/s)
CM3	6,35E-03	1,31	5,78E-04
P23	9,90E-03	1,3	1,69E-04

O solo de CO1, saprolítico, (85% de areia e pedregulho (Tabela 11)) teve parâmetros superiores em relação aos outros solos estudados na região de Nova Friburgo com α , n e K_{sat} no valor de $1,0 \times 10^{-2}$ cm⁻¹; 1,54 e $1,32 \times 10^{-3}$ cm/s respectivamente. Esse resultado é muito semelhante ao visto na seção 6.3.1.1 para

³⁷ No resultado do Guelph a duas cargas em CM3, os resultados foram negativos (Φ e α' , -0,0096 e -0,198 respectivamente), sendo que o valor de K_{sat} apresentado acima é referente ao ensaio a uma carga (5cm). Os autores Reynolds e Elrick (1985) sugerem os seguintes possíveis problemas associados a valores negativos, sendo: erro de medição quanto à chegada ao regime permanente, variação espacial das propriedades do solo em microescala, erro na medição das vazões por bolhas de ar e ar ocluso no solo.

o solo saprolítico de Gnaiss facoidal, porém acredita-se que o parâmetro n seja menor (1,5 x 2,7) pela presença reduzida de pedregulhos, 15% a menos.

O solo CO3 em teoria não representaria o mesmo horizonte de CO1, podendo até ser um colúvio ou residual maduro, mas mesmo assim não apresentou grandes variações nos parâmetros em relação a CO1 exceto por n que aumentou de 1,54 em CO1 para 2,02 em CO3.

Outras considerações sobre os parâmetros da curva característica serão feitas futuramente na seção 6.7.2.1.

6.3.1.3. Migmatito

Os solos residuais de Migmatito foram dois solos residuais jovens (M1 e M2) como descrito na seção 6.1.3. As séries temporais e a geometria usada nos ensaios desta região podem ser vistos nas Figura 62 e Figura 63.

No local M1, além do ensaio de EIM foram extraídas amostras indeformadas utilizadas em um ensaio de permeabilidade triaxial e em um ensaio de papel filtro. Este último será tratado na seção 6.7.2.1.

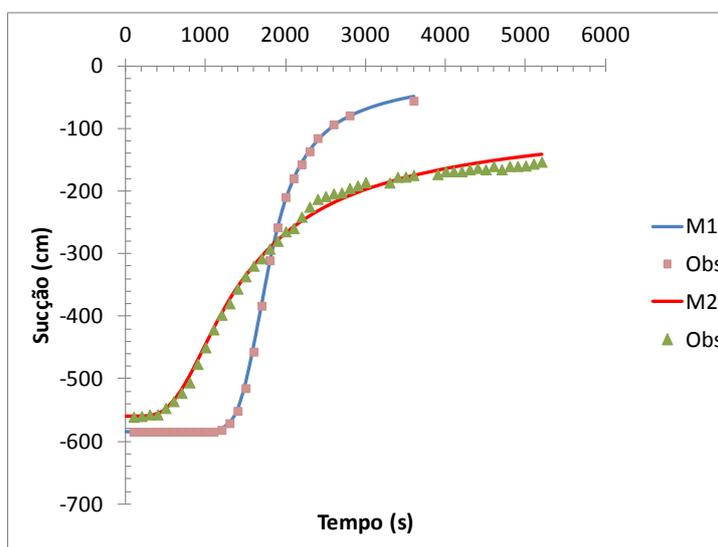


Figura 62 Série temporal - Resultado do EIM – Migmatito – Duque de Caxias

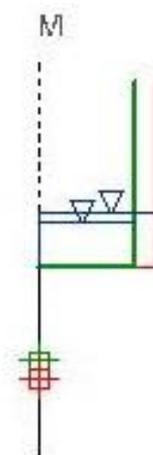


Figura 63 - Geometria dos ensaios em M

Os dois ensaios em M, pouco espaçados como descrito na seção 5.2.3.1, mostraram pouca variação nos parâmetros estimados conforme a Tabela 19 e assim como em CB e CM também atestam a reprodutibilidade do ensaio.

Tabela 19 - Reprodutibilidade do ensaio em solo maduro e jovem – M1; M2

	α (cm-1)	n	ksat (cm/s)
M1	8,99E-03	1,28	3,09E-04
M2	2,66E-03	1,23	3,37E-05

Quanto ao parâmetro K_{sat} a variação de 89% entre M1 e M2 é considerada normal no quesito variabilidade espacial³⁸. Com o ensaio de Guelph, em um terceiro ponto, obteve-se K_{sat} de $2,02 \times 10^{-4}$ cm/s valor este, semelhante ao encontrado no Ensaio de Infiltração Monitorada. O resultado de K_{sat} em laboratório, obtido em câmara triaxial, foi de $8,00 \times 10^{-7}$ cm/s. Já em Carvalho (2012), para este mesmo solo e em ensaio oedométrico, obteve K_{sat} de $2,00 \times 10^{-6}$ cm/s. Estes valores indicam que para este tipo de solo há uma variação de duas a três ordens de grandeza em relação aos valores de laboratório e campo. Este efeito de escala, diferentemente do solo residual de Migmatito, não foi encontrado no residual de Gnaiss Facoidal (seção 6.3.1.1).

6.3.1.4. Biotita Gnaiss

Os solos residuais de Biotita Gnaiss foram jovem (CG1), colúvio (CG2) e de transição (CG3) como descrito na seção 6.1.4. As séries temporais e a geometria usada nos ensaios desta região podem ser vistos nas Figura 64 e Figura 65.

³⁸ Segundo Reynolds e Elrick (1989), em ensaios PG, há reportes na literatura de 65% a 600% de variações em K_{sat} para os limites de areias e argilas respectivamente.

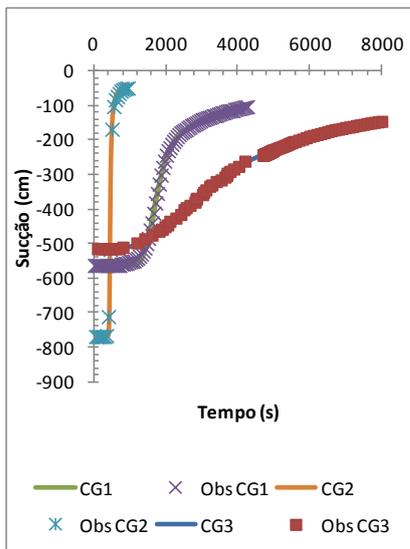


Figura 64 Série temporal - Resultado do EIM – Biotita Gnaiss – Campo Grande

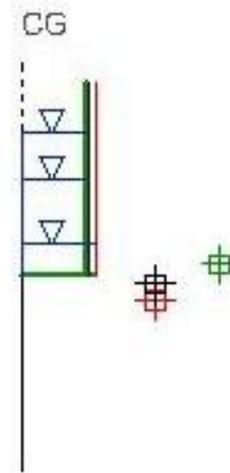


Figura 65 – Geometria do ensaio em CG

O solo CG1, residual jovem, apresentou o parâmetro n (1,81) acima dos valores encontrados para os outros solos residuais jovens do estudo, enquanto α e K_{sat} ficaram próximos da média (Tabela 24), $8,41 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ e $1,19 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, respectivamente.

Os parâmetros obtidos em CG2, semelhante a um solo saprolítico, comprovaram a hipótese de que seria um colúvio recém escorregado.

O solo CG3, de transição, apresentou parâmetros de um solo residual maduro típico ($2,62 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$, 1,15 e $2,31 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ para α e n K_{sat} , respectivamente).

6.3.2. Alcalina

Os solos residuais de rocha Alcalina foram um solo residual jovem (RB) e um solo residual de transição (RT) como descrito na seção 6.1.5. As séries temporais e a geometria usada nos ensaios desta região podem ser vistos nas Figura 66 e Figura 67.

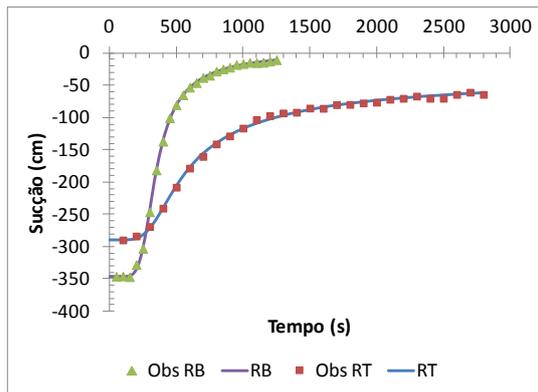


Figura 66 Série temporal - Resultado do EIM – Alcalina – Rio Bonito

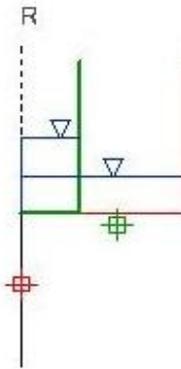


Figura 67 - Geometria dos ensaios em R

Os ensaios em R se mostraram um padrão diferente aos outros ensaios do estudo e da revisão bibliográfica. Quanto à forma da curva característica o solo RT (residual de transição), apesar da textura mais fina apresentou parâmetros mais próximos das areias em comparação ao solo RB, mais arenoso, que apresentou comportamento mais próximo das argilas (Tabela 20). No entanto os valores de K_{sat} parecem condizentes às suas texturas e inclusive o resultado do valor do ensaio de Guelph ($3,43 \times 10^{-5}$ cm/s) no solo RT foi muito semelhante ao obtido no Ensaio de Infiltração Monitorada (Tabela 20 e Tabela 24). Além do Guelph o valor de K_{sat} também é condizente ao valor encontrado em ensaio oedométrico por Carvalho (2012) que foi de $1,75 \times 10^{-6}$ cm/s (Tabela 24).

Tabela 20 – Resultado do Ensaio de Infiltração Monitorada nos solos RB; RT – Alcalina – Rio Bonito

	$a(\text{cm}^{-1})$	n	k_{sat} (cm/s)
RB	5,34E-03	1,16	3,52E-04
RT	4,68E-03	1,45	5,92E-05

Da revisão bibliográfica entrou-se valores distintos para os parâmetros da faixa úmida da curva característica³⁹, tanto pela característica bimodal encontrada como pela diferente localização⁴⁰ das amostras ensaiadas.

A revisão feita em Carvalho (2012) apresentou valores de $0,139 \text{ cm}^{-1}$ e $3,39$ para α e n respectivamente no trecho úmido da curva característica bimodal, que são valores bem diferentes ao encontrado no presente estudo (Tabela 20). A

³⁹ Trecho abortado no Ensaio de Infiltração Monitorada

⁴⁰ A revisão em Tanguá e o presente estudo em Rio Bonito

retroanálise dos parâmetros de Carvalho (2012) foi refeita utilizando-se o programa RETC e retirando-se a parte acima de 100 KPa da curva característica, tornando a curva característica unimodal e equivalente a curva obtida no Ensaio de Infiltração Monitorada. Obteve-se nessa análise⁴¹, quando fixado θ_s em 0,37 uma queda abrupta no valor do parâmetro α para $0,002 \text{ cm}^{-1}$ e no parâmetro n para 1,2 enquanto que quando θ_s fixado em 0,48 foram encontrados 0,08 e 1,12 respectivamente. Esse fenômeno significa na prática que a curva é forçada a passar por pontos de umidade na parte mais próxima da saturação da curva característica, que nem sempre é bem representada pelo método do papel filtro utilizado. Conclui-se que apesar de uma comparação pobre devido aos motivos citados no primeiro parágrafo os valores dos parâmetros do solo RB apresentam certa conformidade com a revisão com $0,0048 \text{ cm}^{-1}$ e 1,16 para α e n respectivamente, principalmente para o parâmetro n .

6.3.3. Gnaisse Kinzigito/Colúvio

Os solos encontrados na região são provavelmente coluvionares como descrito anteriormente na seção 6.1.6. Segundo Diniz(1998), que realizou uma avaliação da permeabilidade não saturada na região, a Condutividade hidráulica do solo sofreu forte influência da macroporosidade e enraizamento presente neste solo. O EIM mostrou resultados semelhantes para a K_{sat} encontrada no estudo de Diniz (1998) a profundidades rasas e, apesar da textura argilosa o solo da região apresentou valores na faixa de 10^{-3} cm/s (Tabela 24).

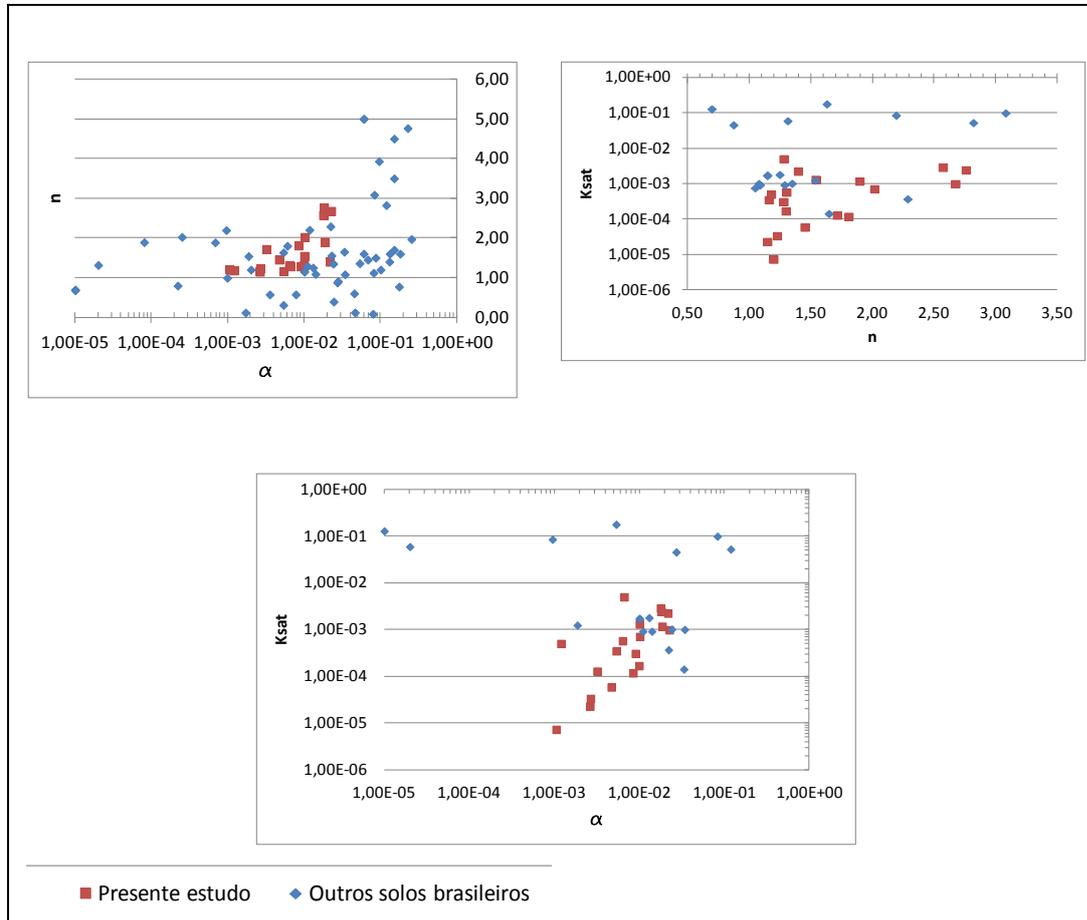
6.4.Comentários gerais; Parâmetros hidráulicos

Como citado anteriormente nas descrições específicas de cada solo o autor considera que o ensaio gerou baixos valores de α e n (Tabela 21), e um dos

⁴¹ Os parâmetros da curva característica são notoriamente correlacionados. Sendo assim o valor de θ_s irá influenciar diretamente no valor dos outros parâmetros. Como em Carvalho (2012) o valor encontrado deste parâmetro foi de 0,37 sendo bem inferior ao valor da umidade volumétrica saturada média encontrada no presente estudo, 0,48 decidiu-se por retroanalisar novamente os pontos da curva característica de Carvalho (2012) utilizando-se um novo valor de umidade volumétrica saturada.

efeitos pode ser visualizado mais adiante nesta seção em que as curvas características apresentam formato pouco íngreme.

Tabela 21 – Revisão Bibliográfica comparativa com os solos Brasileiros



Um resultado oposto foi encontrado no estudo de Gribb *et al.* (2004) através de uma comparação entre o método de campo do permeâmetro de cone e o método multi-estágio (vazão de saída). Sendo ambos os ensaios inversos, foi possível notar que o primeiro gerou valores de n superiores. Segundo Gribb *et al.* (2004) este fato pode ser atribuído ao fluxo rápido que ocorre no ensaio de campo (permeâmetro de cone). O autor do presente trabalho também acredita que haja influência do posicionamento do tensiômetro em relação à fonte de água, ou seja da geometria. Nesta linha de pensamento, Simunek *et al.* (1998b) também verificaram a influência do tipo de experimento⁴² no conjunto de parâmetros gerados pois será singular a forma de como atuam os parâmetros hidráulicos em

⁴² Supondo o uso de modelo acoplado (ex: van-Genuchten-Maulem) e ensaios com problema inverso

que ora o experimento será mais dependente da curva de condutividade hidráulica (ex: caso infiltrômetro de disco) ora de mais dependente da curva característica (ex: caso vazão de saída acumulada).

No mesmo estudo, Simunek *et al.* (1998b) não reproduziram o padrão de infiltração acumulada medida quando usados os parâmetros obtidos em laboratório (caso: placa de pressão), que foram obviamente diferentes dos obtidos através da análise inversa de campo (caso: infiltrômetro de tensão) (Figura 68).

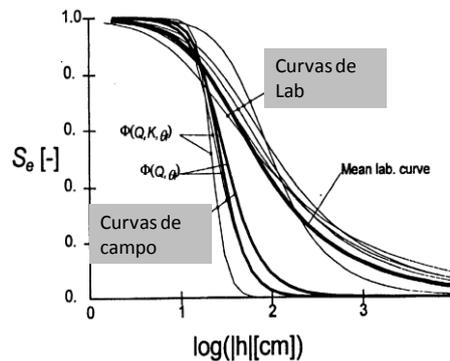


Figura 68 - Diferenças nas CC obtidas em ensaios de laboratório (direto) e campo (inverso). Simunek, 1998b

Quanto à reprodutibilidade do ensaio alguns solos do mesmo local e suposto horizonte foram ensaiados e apesar de apresentaram certa variação nos parâmetros o Ensaio de Infiltração Monitorada foi considerado reprodutível. As variações nestes parâmetros podem ser explicadas: pela variação espacial das propriedades (ver seção 5.5.2.1), desconfiança na representatividade dos parâmetros para sucções acima da inicial (ver seção 3.1.2), configuração espacial do ensaio (ver seção 5.4.2), carga aplicada (Figura 70) e altos coeficientes de correlação (Tabela 22). Dentro do tópico de variação espacial um agente influente seria o uso da mesma porosidade para ensaios em locais diferentes, mas no mesmo horizonte.

Do ponto de vista numérico, os altos coeficientes de correlação encontrados no estudo (Tabela 22) indicam que a solução não é única nos parâmetros retroanalizados e a partir de estimativas iniciais diferentes chega-se a um conjunto de parâmetros levemente diferente, com um mínimo não pouco definido, porém no mesmo vale da função objetivo (Tabela 23) (ver identificabilidade seção 2.4.2).

Tabela 22 - Coeficientes de correlação obtidos no EIM

	αn	αk	nk	Tensiômetro		αn	αk	nk	Tensiômetro
CG1	-0.922	0.982	-0.973	R	P23	0.412	0.587	-0.348	R
CG2	-0.662	0.92	-0.902	R	P21	-0.285	0.691	-0.888	R
CG3	0.953	0.995	0.955	R	RB	0.985	0.999	0.987	H
CO1	-0.627	0.906	-0.888	R	RT	0.953	0.988	0.931	R
CO3	-0.701	0.901	-0.933	R	CM1	0.971	0.996	0.973	V
CB1	0.276	0.452	-0.638	V	CM2	0.993	0.996	0.98	R
CB21	0.541	-0.231	-0.942	H	CM3	0.954	0.997	0.957	R
CB22	0.489	-0.312	-0.98	H	PM	0.833	0.927	0.683	V
M1	0.635	0.937	0.516	H	PBL	-0.772	0.964	-0.908	R

Tabela 23 - Parâmetros retroanalizados a partir de estimativas iniciais diferentes

Solo	Estimativa inicial			Parâmetros retroanalizados			F(p*)
	a(cm ⁻¹)	n	ksat (cm/s)	a(cm ⁻¹)	n	ksat (cm/s)	
CM3	8.00E-03	1.46	9.90E-04	6.35E-03	1.31	5.78E-04	1.84E-03
	2.40E-02	1.27	1.48E-03	5.28E-03	1.25	4.82E-04	1.79E-03
RB	5.00E-03	1.16	3.65E-04	5.34E-03	1.16	3.52E-04	2.32E-04
	2.60E-02	1.44	1.52E-03	8.29E-03	1.24	5.64E-04	1.75E-03
M1	8.00E-03	1.9	2.65E-04	8.99E-03	1.28	3.09E-04	2.66E-04
	2.80E-02	1.51	8.37E-04	2.14E-02	1.54	5.76E-04	4.05E-02

As curvas de retenção, em grau de saturação relativa (S_e) e umidade volumétrica, estão mostradas na Figura 69. Os formatos das curvas apresentaram-se bem variáveis sendo seus limites representados pelos solos CB21 e CM1/CM2 (Figura 69) e são controlados principalmente pelo parâmetro n que influi na inclinação das curvas (Figura 3).

Os valores das propriedades do modelo de Van Genuchten obtidas estão na faixa de, 10^{-3} a $2,25 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ para os valores de α , 1,15 a 2,76 de n e $5,03 \times 10^{-3}$ a $7,33 \times 10^{-6}$ de K_{sat} em cm/s e podem ser observados na Tabela 24 assim como os valores médios que foram $7,51 \times 10^{-3}$, 1,38 e $4,29 \times 10^{-4}$ respectivamente.

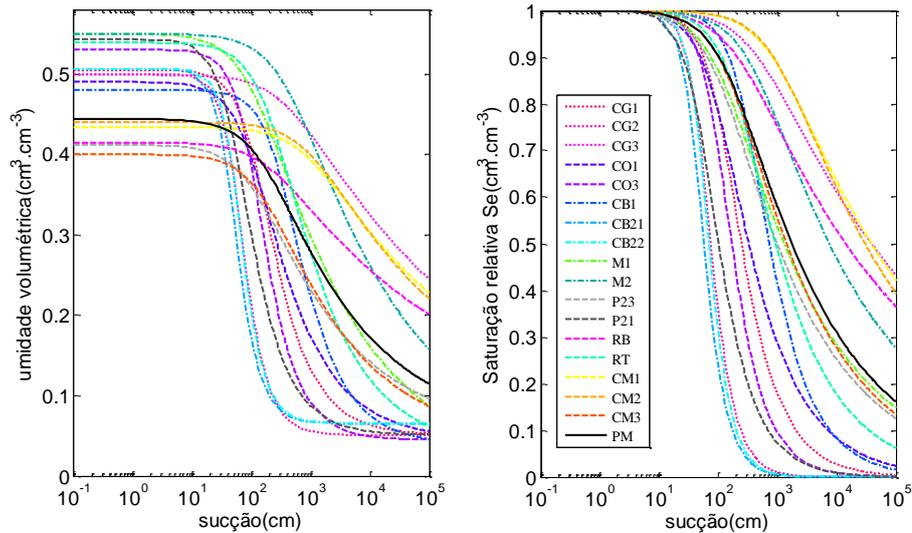


Figura 69 - CC discriminada por solo

Através da Figura 69 percebe-se que o valor de entrada de ar variou de ~10 cm a ~100 cm o que estaria de acordo com Aubertin *et al.* (1998) ($\Psi_{90} = \Psi(0,9\theta_s)$) e diferente da estimativa $\Psi_{VG} [1/\alpha]$ (ver seção 2.1.1). Os solos com baixos valores de entrada de ar se mostram quase inteiramente na faixa onde a sucção é menor que 900 cm (cavitação), que é a confiança máxima dos parâmetros para o uso do tensiômetro. (ver 2.5.2 identificabilidade).

Tabela 24 – Quadro resumo dos parâmetros obtidos em campo pelo EIM.

Solo	θ_r	θ_s	$a(\text{cm}^{-1})$	n	$ksat (\text{cm/s})$
CG1	0,051	0,51	8,41E-03	1,81	1,19E-04
CG2	0,051	0,5	1,77E-02	2,58	2,90E-03
CG3	0,051	0,5	2,62E-03	1,15	2,31E-05
CO1	0,045	0,49	1,00E-02	1,54	1,32E-03
CO3	0,045	0,53	1,01E-02	2,02	7,14E-04
CB1	0,039	0,48	3,18E-03	1,72	1,29E-04
CB21	0,065	0,51	2,25E-02	2,68	9,93E-04
CB22	0,065	0,51	1,81E-02	2,76	2,45E-03
M1	0,007	0,55	8,99E-03	1,28	3,09E-04
M2	0,007	0,55	2,66E-03	1,23	3,37E-05
P23	0,051	0,41	9,90E-03	1,3	1,69E-04
P21	0,051	0,54	1,85E-02	1,9	1,18E-03
RB	0,078	0,42	5,34E-03	1,16	3,52E-04
RT	0,03	0,54	4,68E-03	1,45	5,92E-05
CM1	0,078	0,43	1,20E-03	1,18	5,05E-04

CM2	0,078	0,44	1,05E-03	1,2	7,33E-06
CM3	0,038	0,40	6,35E-03	1,31	5,78E-04
PM	0,051	0,44	6,61E-03	1,28	5,03E-03
V máx	0,078	0,55	2,25E-02	2,76	5,03E-03
V min	0,007	0,40	1,05E-03	1,15	7,33E-06
V Médio	0,051	0,5	7,51E-03	1,38	4,29E-04

Quanto à carga, observou-se a tendência de aumento de K_{sat} quanto maior fora a carga aplicada observado principalmente através dos ensaios de mesma localidade vistos na Figura 70, que foram estabelecidos nas Tabelas 16, 17, 18 e 19.

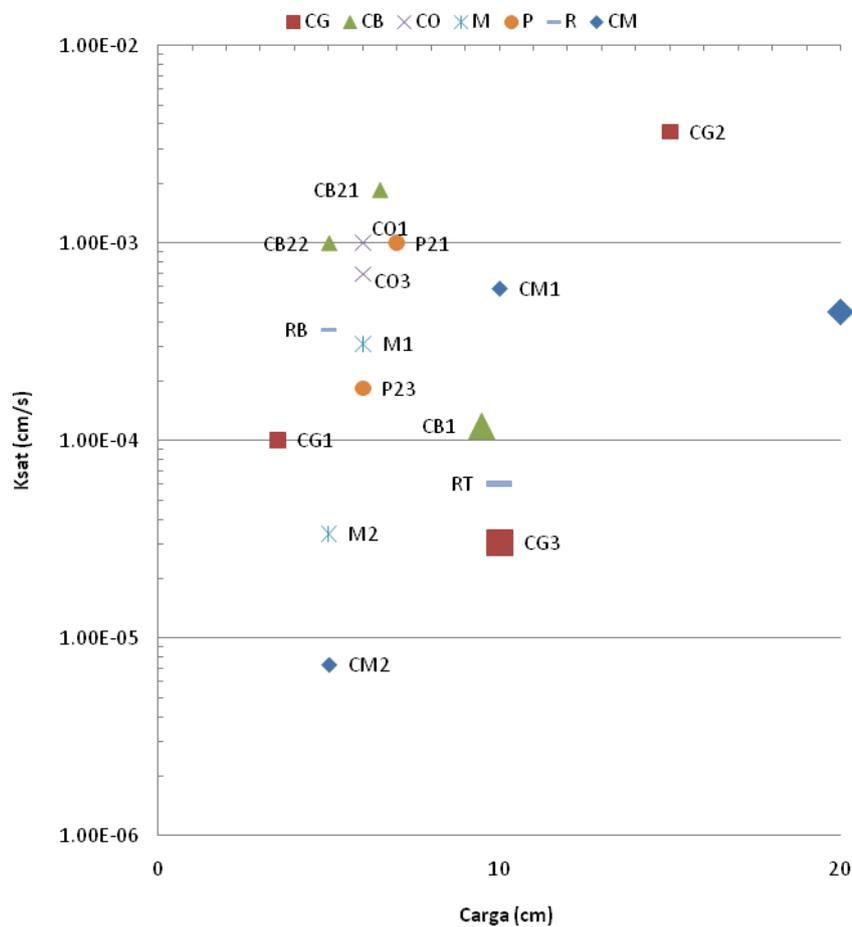


Figura 70 - Relação da permeabilidade saturada com a carga aplicada

Para Reynolds e Elrick (1985), no ensaio do permeâmetro de Guelph, a magnitude da carga aplicada influi na qualidade dos resultados aos quais são mais favoráveis à K_{sat} quando h (carga) é alto e, melhores para Φ_m (potencial mátrico ou efeito da capilaridade) quando h é baixo. Outro ponto importante que foi

observado em ensaios de empocamento pelos autores White e Sully (1987), Reynolds e Elrick (1985), Talsma (1987) é a insensibilidade do parâmetro α' , constante da exponencial do modelo de Gardner, à textura do solo, que segundo estes é dominado pela sua estrutura. (*Apud* Reynolds e Elrick, 1989). Na prática esta informação sugere que os parâmetros retro-analisados possam não ser representativos da textura do solo e sim de sua estrutura, o que poderia ser uma das explicações a diferença de K_{sat} obtidos entre campo e laboratório e da concordância entre os valores do Guelph e do EIM descritas na seção 6.3 e resumida na Figura 71.

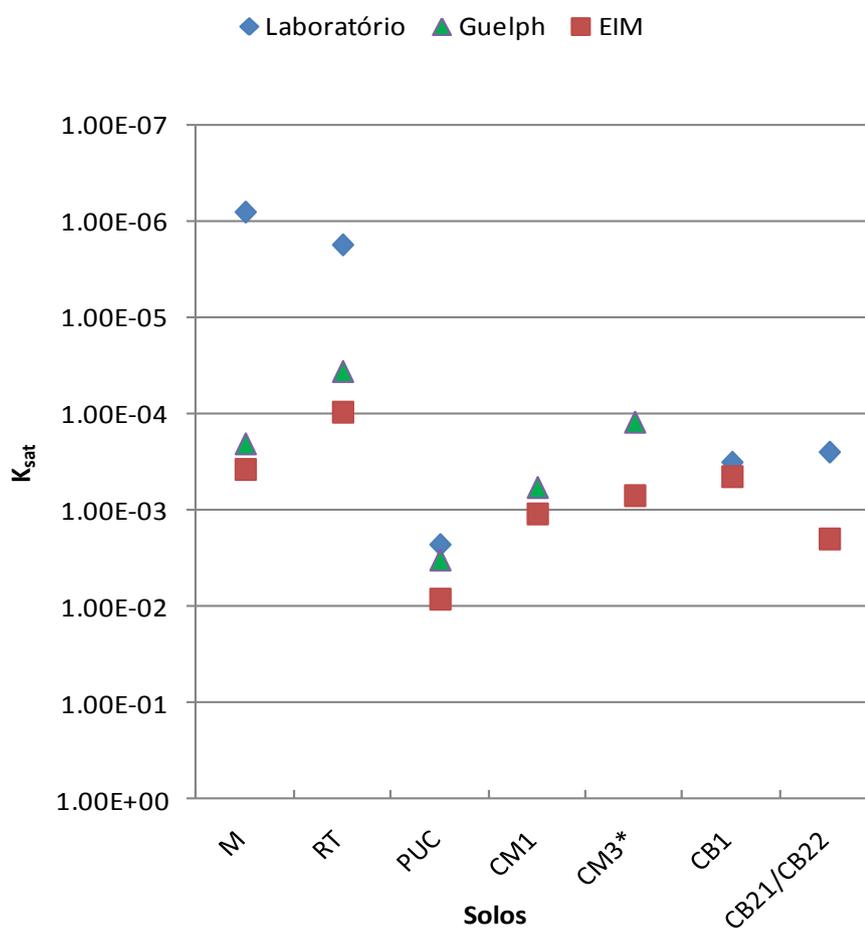


Figura 71 - Figura comparativa de K_{sat} (Laboratório x Guelph x EIM)

Algumas diferenças observadas em K_{sat} são vistas nos solos do CM2 e CG2 e podem ser explicadas respectivamente; a primeira devido a um fluxo preferencial em um veio menos intemperizados (seção 6.3.1.2) (fluxo em direção oposta ao ponto de observação o que teria retardado a frente de infiltração) e a ao último ter sido realizado em uma zona de colúvio recente (seção 6.3.1.4) (recém

escorregado). Na Figura 70 os pontos com marcadores maiores indicam os solos residuais maduros e apresentaram-se concentrados na faixa de 10^{-4} cm/s a 2×10^{-5} cm/s de K_{sat} , exceto o ensaio CM a carga 20 cm.

6.4.1.

Considerações práticas do ensaio de infiltração monitorada

As considerações sobre a metodologia consistem no: tempo de execução, qualidade do ensaio, e consumo de água e no tempo de instalação.

A maior parte destas considerações é função da geometria, sendo o tempo de execução do ensaio pela razão óbvia de que a frente de infiltração deve passar pelo tensiômetro para que sejam feitas as leituras; a qualidade do ensaio pela sensibilidade dos parâmetros variar conforme o ponto observado escolhido (ver seção 2.5.1) e o consumo pela área de contato entre solo e água e o volume inicial para preenchimento da cava (ex: para 6 e 16 cm de diâmetro e carga 10 cm o volume inicial varia de 280 ml para 2L). Em muitos ensaios o processo de reabastecimento do reservatório pode ter causado efeitos de subestimar a K_{sat} uma vez que pode haver aprisionamento de bolhas de ar durante o processo de drenagem (Reynolds e Elrick, 1989).

A Tabela 25 mostra que a qualidade de R e V pode ser duvidosa, sendo a primeira pelo pouco estudo prévio sobre a sensibilidade do ensaio e pelos resultados altos de coeficientes de correlação e a segunda pela maior probabilidade de perda do ensaio pela ocorrência de fluxo preferencial entre o tensiômetro e o solo. O tempo de execução de instalação do ensaio é maior para os ensaios V e H, sendo o primeiro pelo cuidado na instalação do tensiômetro e o segundo pela necessidade da abertura de uma cava auxiliar, como citado anteriormente.

Tabela 25- Aspectos relevantes sobre a geometria dos ensaios

	tempo de instalação	qualidade do ensaio	consumo de água*
R	médio	duvidosa	baixo
V	médio a alto	duvidosa a alta	alto
H	alto	alta	baixo

*Varia com a geometria porém há uma gama maior de escolhas

Uma forma de melhorar o ensaio é adicionando ao procedimento a coleta de umidades tanto no início como ao final do ensaio (adiantado na seção 4.2), e se possível, nos pontos de leitura de sucção do tensiômetro. Estes pontos podem ser futuramente usados como informação adicional na retroanálise, e este assunto será tratado a seguir na seção 6.7.2.1.

Na questão prática relacionada à textura do solo; como alguns dos ensaios foram feitos em solos residuais que tendiam a um saprólito com porcentagem de 4 a 14,7 % de pedregulho e 74,3 a 85,6% de areia, nestes, houve dificuldades na cravação do tensiômetro. A ausência de coesão nestes solos, em alguns dos casos, gerou colapso na parede do furo o que não impediu a realização do ensaio porém pode tê-lo alterado.

6.5. Avaliações comparativas segundo algumas classificações

6.5.1. Avaliação da textura dos solos

Como mencionado na introdução, os métodos para a obtenção das propriedades hidráulicas dos solos são custosos em tempo e recurso. Uma tentativa para estimar tais propriedades seria correlacioná-las às propriedades básicas dos solos (funções de pedotransferência, PTF), comumente descritas como em função da distribuição do tamanho de partículas, densidade seca ou conteúdo de matéria orgânica. (ex. Ayra & Paris, 1981; Ahuja *et al.*, 1985; Saxton *et al.*, 1986; Fredlund *et al.*, 1997 e Arya, 1999, Wösten *et al.*, 2001 Tomasella *et al.*, 2003; Huang *et al.*, 2006).

Estas funções se dividem em dois grupos, as que estimam a umidade volumétrica diretamente⁴³ a partir das propriedades dos solos dada uma sucção e as que obtêm parâmetros de modelos, como as equações de Brooks e Corey (1964), ou van Genuchten (1980). (Liao, *et al.*, 2011). Em geral essas funções são obtidas através de métodos matemáticos e estatísticos; como regressões (Rawls e Brakensiek 1985; Rawls *et al.*, 1991; Vereck *et al.* 1989, 1990 *Apud* Radcliffe e Simunek, 2009) ou análises de redes neurais (Schaap *et al.* 1998; Schaap and Leji, 2000 *Apud* Radcliffe e Simunek, 2009).

No presente estudo foram analisadas as formulações propostas por Wösten *et al.*, 1999⁴⁴ (*Apud* Wösten *et al.*, 2001), programa Rosetta⁴⁵ (redes neurais),.. Na formulação de Zapata (1999), que inclui somente dados do índice de plasticidade e do material passado na peneira 200, foram obtidas algumas boas previsões, e por estarem relacionados ao modelo de Fredlund e Xing não serão apresentados. Não foram encontrados resultados satisfatórios em ambas, exceto no programa Rosetta para os solos destacados em amarelo da Tabela 26.

⁴³ Sabe-se que embora conveniente esse procedimento pode gerar grandes erros como previstos por Schaap *et al.* (1998) e Shaap e Leji (1998), que encontraram RMSE (root mean square error) na ordem de 0,108 e 0,741 para umidade volumétrica e $\log(K_s)$ respectivamente. Ou seja são formas de quantificar o erro entre o valor dos parâmetros (ou propriedades) previstos pelo modelo baseado nas propriedades básicas dos solos e os valores das medido em ensaios.

⁴⁴ Derivada da base de dados de 5521 solos europeus, HYPRES. Foram usados dados de 4030 solos para a construção da função de pedotransferência de Wosten, *et al.*, 2001.

⁴⁵ versão 1.1 desenvolvido por Schaap

Tabela 26 - Diferença entre parâmetros obtidos pelo Rosetta e o EIM

Amostra	Δ Escala normal			Δ Escala log	
	α (cm ⁻¹)	n	ksat (cm/s)	α (cm ⁻¹)	ksat (cm/s)
CB1	-777%	12%	-547%	-94%	-81%
CB21	-60%	12%	-360%	-20%	-66%
CB22	-98%	14%	-86%	-30%	-27%
CG1	-374%	-32%	-4772%	-68%	-169%
CG2	-32%	51%	91%	-12%	105%
CG3	-1223%	-33%	-5450%	-112%	-174%
CM1	-1722%	-19%	52%	-126%	32%
CM2	-1975%	-17%	-3216%	-132%	-152%
CM3	-278%	3%	74%	-58%	59%
CO1	-358%	-21%	-212%	-66%	-49%
CO3	-353%	7%	-476%	-66%	-76%
M1	-197%	-12%	-375%	-47%	-68%
M2	-903%	-16%	-4254%	-100%	-164%
P21	-41%	27%	80%	-15%	70%
P23	62%	10%	89%	42%	95%
PM	-271%	7%	97%	-57%	147%
RB	-385%	-24%	-332%	-69%	-64%
RT	-125%	-4%	-359%	-35%	-66%

Ainda nesta tabela observam-se variações significativas do parâmetro α em relação à literatura (Gonçalves, 2011), que se baseia nos dados de porcentagem de areia, silte, argila e massa específica seca (redes neurais de Schaap *et al.*, 1998, Figura 72).

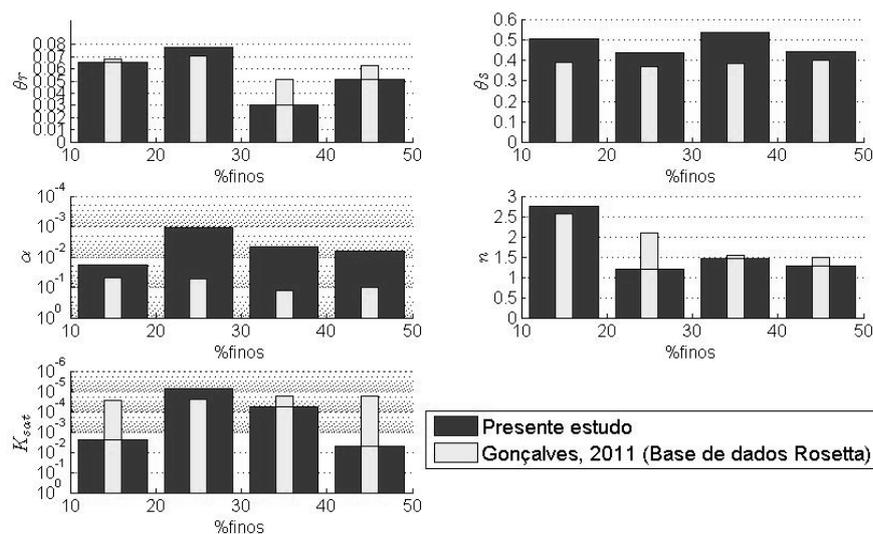


Figura 72 - Diferença nos valores médios dos parâmetros obtidos (fonte: roseta adaptado Gonçalves *et al.*, 2011)

6.5.2. Avaliação com a rocha de origem e SUCS

Todos os horizontes, maduros e jovens, foram plotados com respeito à sua rocha de origem e podem ser vistos na Figura 73.

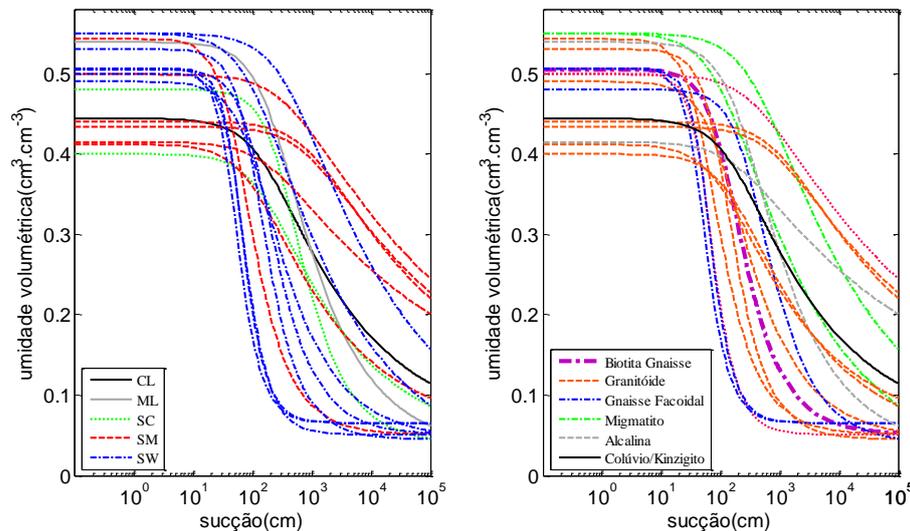


Figura 73 - CC separada por rocha de origem e classificação SUCS

O observado através desta figura é de que os materiais menos alterados se encontraram no limite inferior e parecem ter influência da rocha de origem em relação à produção da fração grosseira (SW), por exemplo, no Gnaiss Facoidal e Granitóide (solos saprolíticos).

A ressalva vale para o solo de Biotita Gnaiss que está nesta faixa mas não representa o mesmo pois é um colúvio recém escorregado .

As rochas que produziram mais finos; Migmatito, Biotita Gnaiss e Alcalina, são principalmente as areias siltosas* e argilosas´ (SM* e SC´ da Figura 73), e tiveram menor variação da umidade com o aumento da sucção (comportamento argiloso e maiores IP, Figura 74). Uma explicação da característica textural e comportamental se deve em parte à mineralogia, que no caso das rochas mais básicas, Migmatito (melanocrático) e Biotita Gnaiss, além de apresentarem maior porcentagem de finos, também tenderam a refletir maiores limites de Atterberg (Figura 73 e Figura 74). Na Figura 73 também é possível observar também que solos com porosidade menores tiveram curvas mais suaves.

Como citado anteriormente, houve bastante variação nos parâmetros dos solos estudados, mas para apresentá-los de forma sintética e gráfica, o autor tenta agrupá-los de forma construtiva em supostos horizontes conforme a Figura 75, estipulando para tanto a seguinte ordem; preto, amarela e azul, formulando gradação do mais maduro para o mais jovem. Vale ressaltar, contudo, que não foram classificados como tal sob o aspecto textural. Os parâmetros obtidos nestes grupos não permitem generalizar solos com classificação geotécnica semelhante a apresentada na Figura 75 uma vez que foram separados de forma visual justamente pela ineficiência em agrupar os parâmetros pela classificação geotécnica.

A Figura 73 mostra que as CC dos solos do estudo não apresentaram nenhum padrão bem definido segundo o SUCS ou seja, há grande variação nos parâmetros. Ainda nessa figura é possível observar que os solos são na maioria areias bem graduadas (SW) ou areias siltosas (SM), sendo solos residuais jovens ou saprolíticos.

As outras curvas; de areias argilosas (SC), de silte inorgânico (ML) e argila inorgânica (CL), foram de solos maduro, transição e colúvio sendo eles: CM3 (SC/maduro) que é semelhante às curvas SM; CB1 (SC/transição) que é semelhante às curvas SW; RT que é semelhante as curvas SW (ML/maduro) e por fim PM (CL/colúvio) que é semelhante às curvas SM.

Carta de plasticidade

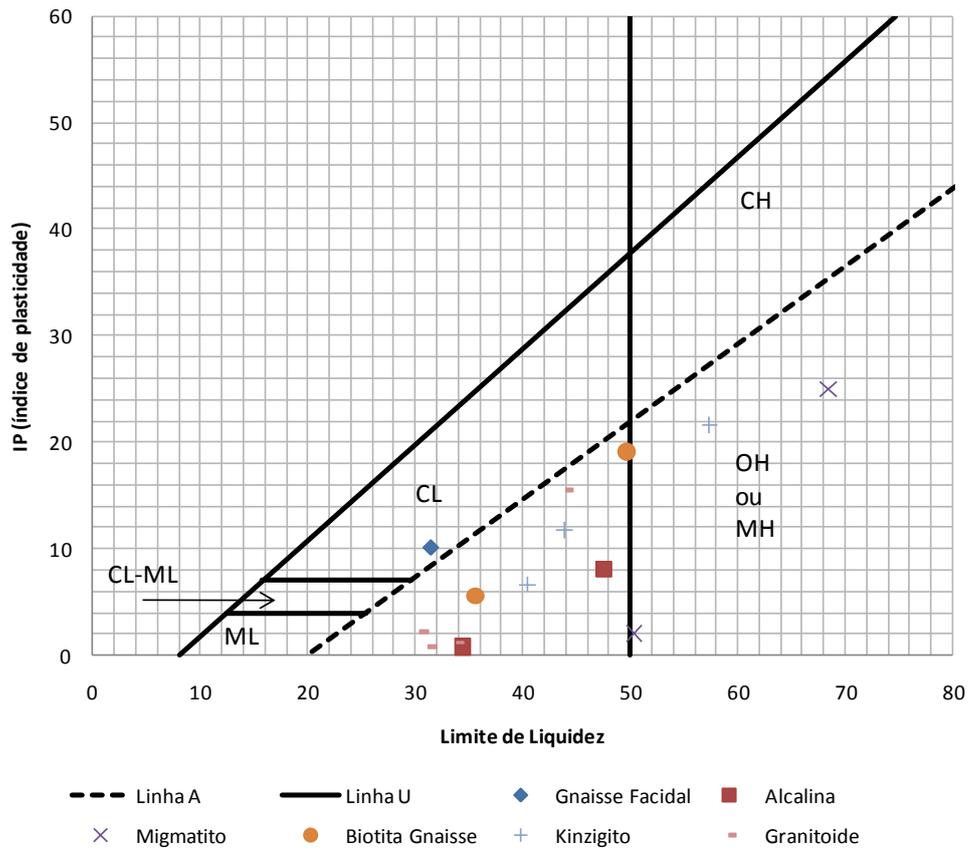


Figura 74 - Carta de plasticidade

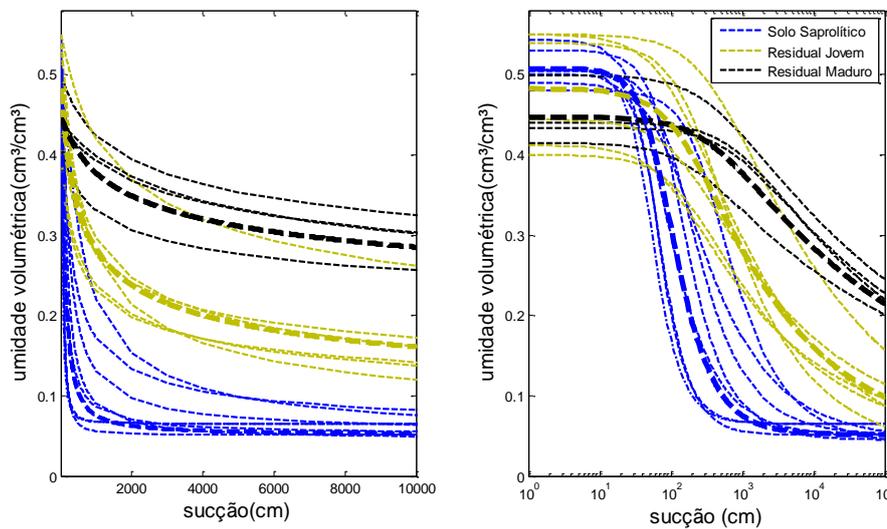


Figura 75 - Separação da CC em grupos

6.6. Estudos de infiltração sob precipitação em 1D

Diversos estudos buscaram estabelecer a distribuição superficial e subsuperficial da água (umidade) durante um evento de chuva. (Bonell *et al.*, 1981; Tsaparas *et al.*, 2003; Rahardjo *et al.*, 2005).

Tsaparas *et al.* (2003) demonstraram através de um talude instrumentado que a infiltração depende não somente do montante de precipitação mas também da condição inicial de poro-pressões e de eventos anteriores. Rahardjo *et al.*, (2005)⁴⁶ encontraram, em um talude residual, através de simulações de precipitação que a água infiltrada está entre 40 e 100% da precipitação ao qual é fortemente influenciada pelo montante de precipitação (seção 6.6.1, 6.6.2 e 6.6.3). Para estes pesquisadores a chuva limite cuja infiltração foi máxima, ficou entre 10 e 18 mm de precipitação, acima disto há *runoff* (escoamento superficial). Sendo assim, para visualizar as causalidades da distribuição de umidade ao longo de um perfil sob um regime de infiltração é interessante, além de uma análise paramétrica, observar as condições iniciais e de contorno. Santos (2004) realiza um estudo parâmetro no modelo de Fredlund e Xing (1994) e apesar de parâmetros diferentes ao modelo de van Genuchten, usado no presente trabalho, pode-se chegar a conclusões semelhantes quanto a influência de seus análogos.

A partir dos dados obtidos em campo foram feitas simulações 1D com o programa *hydrus 1D* afim de identificar o comportamento em um perfil pouco espesso comumente encontrado nas encostas do Rio de Janeiro. As condições de contorno e inicial impostas foram; ao topo condição atmosférica com regime de chuva mostrado na Figura 76 e, na base, condição de fluxo zero (impermeável), e ao solo; no caso 1 (seção 6.6.1, 6.6.2), sucção uniforme de 400 cm e; no caso 2, saturação de 60% (seção 6.6.4).

⁴⁶ Outro aspecto importante encontrado foi a possibilidade da formação de poro-pressões positivas e um nível de água suspenso.

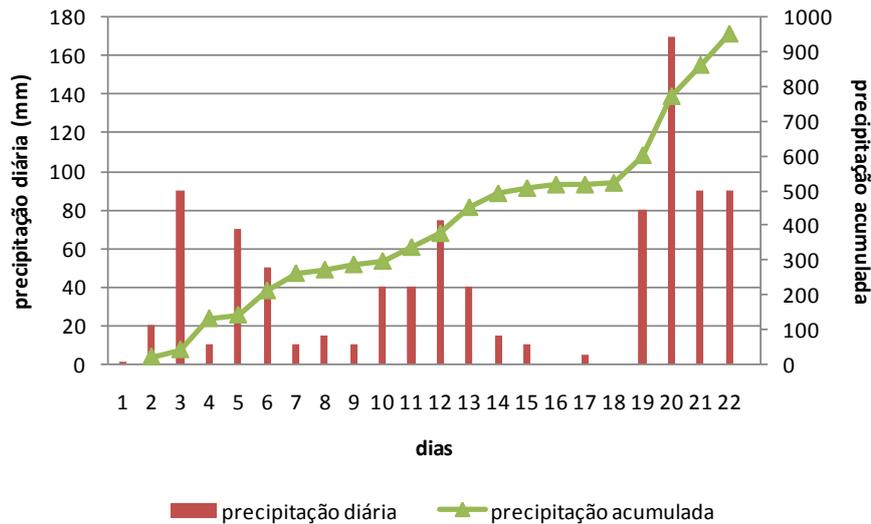


Figura 76 - Precipitação usada na simulação referente a fevereiro de 1988 na vista chinesa

O estudo apresentado usará os parâmetros médios da separação por grupos de alteração da Figura 75 que estão apresentados na Tabela 27. Como os solos residuais maduros foram pouco amostrados e os parâmetros não produziram bons resultados, saturando no terceiro dia, essa análise não será apresentada.

Tabela 27 - Valores médios usados na análise

	θ_r	θ_s	$a(\text{cm}^{-1})$	n	$ksat (\text{cm/s})$
Residual Maduro	0,071	0,447	0,0026	1,17	2,22E-04
Residual Jovem	0,038	0,483	0,0065	1,31	1,03E-03
Solo Saprolítico	0,0515	0,5075	0,014	2,12	1,12E-03

Como citado na seção 6.4 e 6.7.2.1, há a possibilidade do conjunto de parâmetros obtidos não ser o único que representa a curva da série temporal ($\Psi(t)$) do ensaio de infiltração monitorada (EIM), e como comentado em na seção 6.4 o parâmetro α , principalmente, parece ter ficado abaixo do esperado para as respectivas texturas. Ainda na seção 6.4 comentou-se sobre o trabalho de Simunek *et al.* (1998b) que não encontra resultados semelhantes para os parâmetros obtidos para o ensaio direto, de laboratório, e inverso, de campo. Acredita-se que os parâmetros obtidos no presente trabalho sirvam para representar a condição de infiltração em regime de chuva visto que as condições de fluxo entre ensaio e chuva são semelhantes, no entanto, diversos outros fatores⁴⁷ podem contribuir

⁴⁷ Beven & Germann (1982) e Kutilek e Nielsen (1994) reforçam este fato ao defender a dependência de fluxos preferenciais e suas características (*Apud* Coppola, 2009)

para uma análise errada da distribuição de umidade ou sucção em um perfil em escala de campo⁴⁸.

6.6.1. Análise- Residual Jovem

O solo residual jovem foi representado por seus parâmetros médios e suas propriedades hidráulicas podem ser vistas na Tabela 27. Observa-se através da Figura 77 que o solo saturou-se completamente após oitavo dia de precipitação (Figura 76, seção 6.6), e a partir do sexto dia já haviam poropressões positivas no perfil. A sucção do topo do perfil, que é proporcional à capacidade de infiltração do solo e à precipitação atuante, se manteve ativa durante a simulação e variou para os seis primeiros dias: 244, 175 e 74 cm (Figura 77). Isto foi consequência da relativa alta condutividade hidráulica ($\sim 10^{-4}$ cm/s) não saturada e da baixa média de precipitação pelo efeito de distribuição diária.

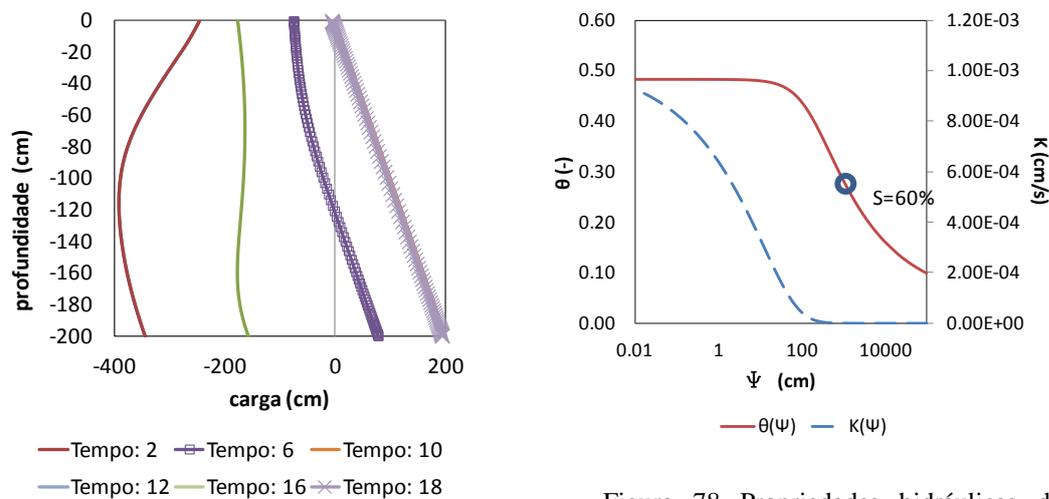


Figura 78 Propriedades hidráulicas dos solos residuais jovens (média dos parâmetros)

Figura 77 - Frente de umedecimento no solo residual jovem (média dos parâmetros)

Em estudo paramétrico, os resultados do estudo de Santos (2004) mostraram que em relação à curva característica quanto menor o parâmetro de inclinação da curva, m , e maior o parâmetro a , correspondente à entrada de ar, mais rápido é o avanço da frente de umedecimento. Em relação a curva de condutividade

⁴⁸ Mertens, *et al.* (2005) e Oliver e Smettem (*Apud* Mertens, *et al.* 2006)

hidráulica o autor concluiu que quanto mais suave a curva, menor parâmetro m , maior é o avanço da frente de umedecimento e mais distribuída a frente estará ao longo do perfil.

As explicações para a influência destes parâmetros são relacionadas a proximidade entre a umidade inicial e a condição de saturação, como exemplo quanto maior for o valor de entrada de ar a curva característica estará deslocada para a direita (Figura 3) (ou seja um valor de sucção maior representará uma umidade maior) ou quanto mais suave for a curva pois a umidade será maior ao longo de sua extensão, e também pode-se considerar sob o aspecto da velocidade com que a umidade irá se aproximar a condição de saturação sendo melhor visualizada nas Figura 79 e Figura 80 nos círculos grandes. As figuras mostram que para a curva característica que a velocidade aumentará próximo ao valor de entrada de ar pois a tangente diminui $\frac{d\theta}{d\psi}$ e para a curva de condutividade hidráulica a curva mais suave irá manter por mais tempo uma condutividade hidráulica maior por também manter uma menor tangente $\frac{dK}{d\psi}$.

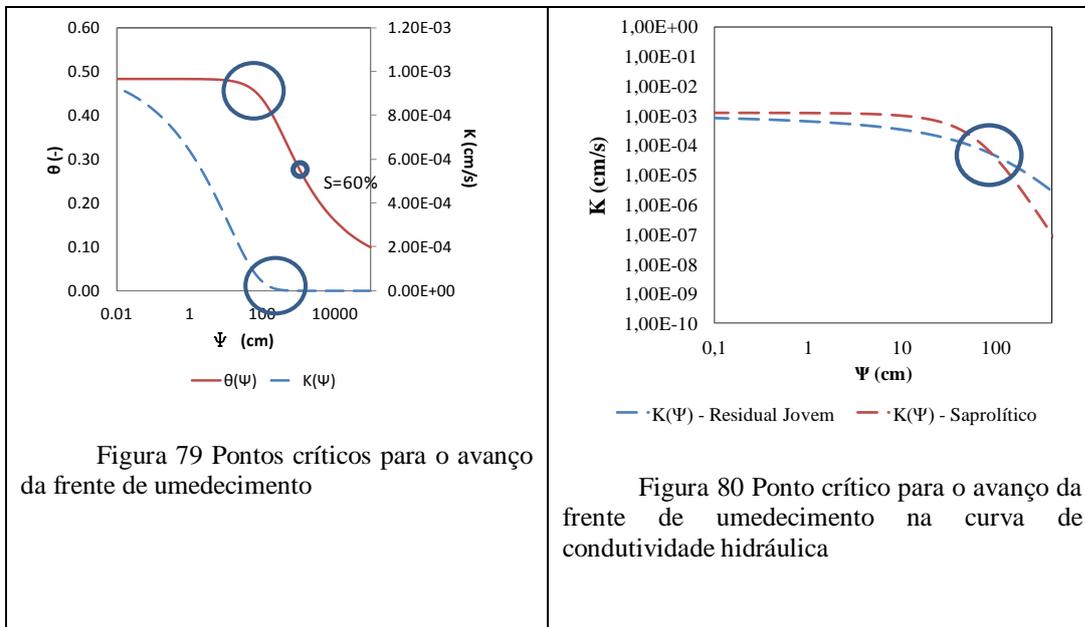


Figura 79 Pontos críticos para o avanço da frente de umedecimento

Figura 80 Ponto crítico para o avanço da frente de umedecimento na curva de condutividade hidráulica

A analogia entre o modelo de Fredlund e Xing (1994) e o modelo de van Genuchten (1980) é m para n e a para α . Como, no modelo de van Genuchten, o valor de entrada de ar próximo a sua inversa ($\Psi_{ar} \approx 1/\alpha$) e temos que quanto menor for este parâmetro mais rápido será o avanço da frente de umedecimento.

Como dito anteriormente na seção 6.5.1, solos com parâmetros baixos da curva característica são solos mais argilosos, o que implica que este tipo de solo, através destes parâmetros, deve apresentar um avanço mais rápido da frente de umedecimento. No entanto é notório que solos mais argilosos apresentam infiltração mais lenta em relação a solos arenosos, sendo assim a frente de umedecimento, se for lenta, irá depender principalmente dos outros três parâmetros, K_{sat} e da capacidade de infiltração, $\theta_s - \theta_r$.

O baixo valor no parâmetro α (alto valor de entrada de ar), observado no trabalho, causou uma distribuição de umidade quase homogênea no perfil como pode ser visualizado na Figura 77 e representado por Santos (2004) (Figura 81) como o perfil tipo 2 (comportamento tipo argiloso). O como tratado no parágrafo anterior o, comportamento da frente de umedecimento é dependente da condição inicial visto que define a posição nas curvas das propriedades hidráulicas e, portanto a velocidade (taxa) de seu avanço.

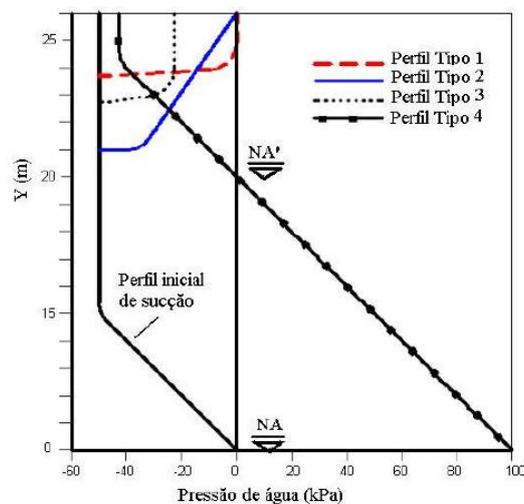


Figura 81 - Tipos de perfis de umidade encontrados em análises de infiltração 1D segundo Santos (2004)

6.6.2. Análise solo Saprolítico

A análise no solo saprolítico assim como no solo residual jovem foi feita com os parâmetros médios dos ensaios conforme a Tabela 27. A maior demora do aparecimento de poropressões positivas, que só ocorrem no décimo oitavo dia, é

consequência do menor valor de entrada de ar e das curvas de umedecimento serem mais abruptas (distribuição não homogênea de umidade).

A característica da frente de umedecimento é usualmente encontrada em materiais mais arenosos (perfil 3, da Figura 81) onde há um alto valor do parâmetro n que torna acentuada a inclinação das curvas das propriedades hidráulicas.

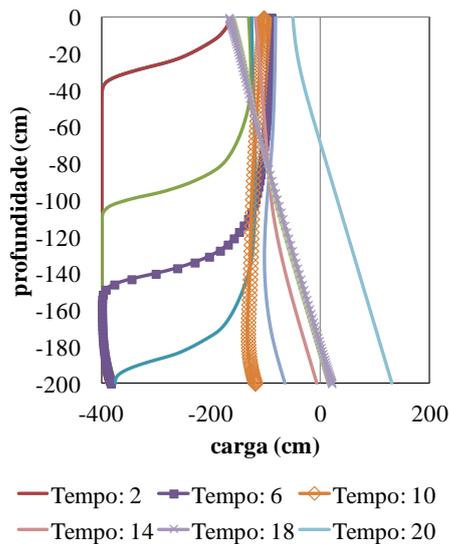


Figura 82 – Frente de umedecimento no solo saprolítico (média dos parâmetros)

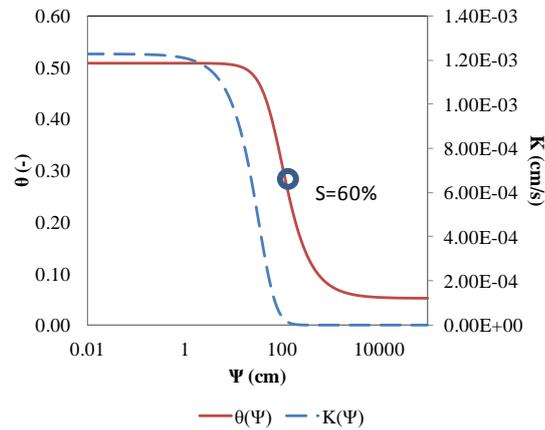


Figura 83 - Propriedades hidráulicas dos solos saprolíticos (média dos parâmetros)

6.6.3. Análise sob chuva torrencial

Para finalizar as análises é interessante observar o comportamento da umidade no solo em um caso também real porém de intensidade extrema, como a chuva torrencial ocorrida no distrito de Quitandinha, Petrópolis, nos dias 17 e 18 de março de 2013, visualizada no histograma plotado a cada quinze minutos da Figura 84. Para facilitar a comparação com os demais estudos, o perfil e condição inicial utilizada foram idênticos as análises anteriores.

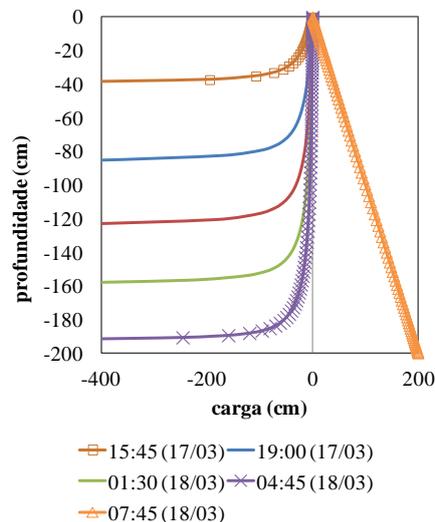
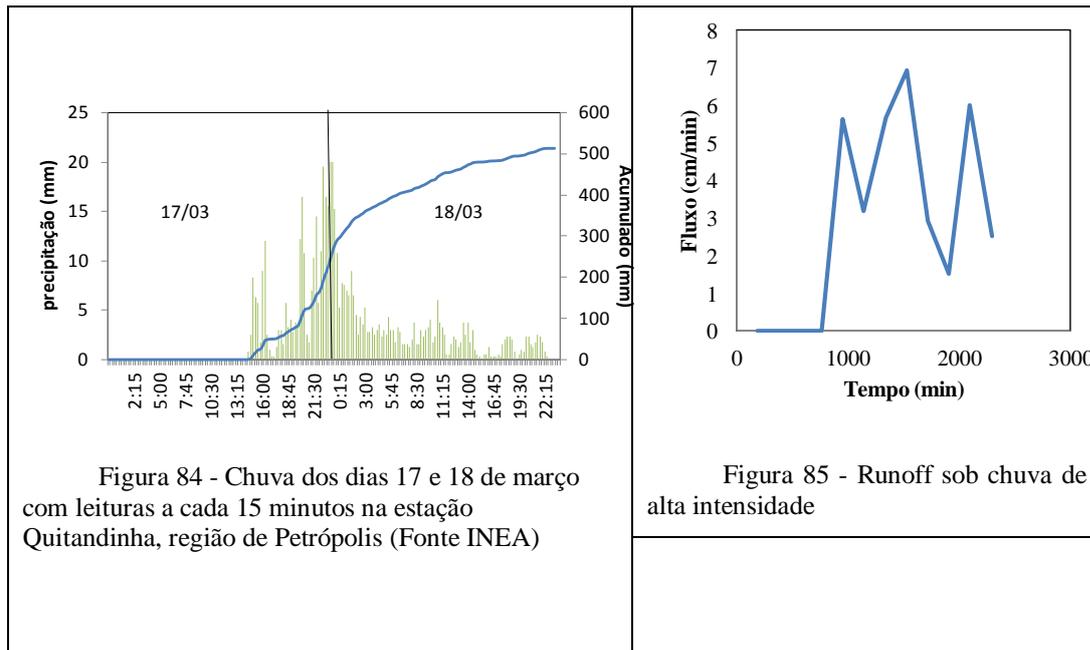


Figura 86 - Frente de umedecimento do solo saprolítico sob chuva intensa com medidas a cada quinze minutos

O efeito devastador da chuva contínua fez com que o solo ficasse saturado com uma precipitação acumulada de apenas 400 mm, enquanto que na precipitação diária distribuída em 22 dias de um acumulado de 950 mm esse resultado não foi observado. O tempo para que o solo ficasse saturado também foi bem reduzido e ocorreu em 12 horas (Figura 86).

Além da quantidade de água infiltrada o *runoff* foi bem intenso chegando a um fluxo de 7 cm por minuto (Figura 85), quando a precipitação chegou a 1,33 mm por minuto entre meia noite e 1 hora da manhã do dia 18/03. (Figura 84).

6.6.4. Comentários Gerais Análise de infiltração

Os solos estudados mostraram-se propensos a gerar poropressões positivas com a chuva mensal apresentada na Figura 76, sendo o solo saprolítico o que consumiu mais tempo para produzir esse efeito. Intuitivamente se diria que deveriam ter efeitos contrários porque solos tipicamente com comportamento arenoso são mais drenantes e, portanto a infiltração de água no solo saprolítico deveria ser mais rápida. Uma explicação possível para o resultado nos solos residuais do presente estudo é de que a condutividade hidráulica tenha sido influenciada principalmente pela estrutura heterogênea dos solos, portanto valores altos. Os outros parâmetros do modelo de certa forma se encontram condizentes a textura como visto na seção 6.5.1.

Concluiu-se que alta condutividade hidráulica saturada encontrada para os outros solos define a distribuição de umidade aparentemente incomum. Pode-se observar na Figura 87 que ao se aumentar a condutividade hidráulica de um solo qualquer do estudo a curva da série temporal em um nó de observação escolhido muda sensivelmente. Ao contrário de quando compara-se as séries temporais dos parâmetros médios, Figura 88, e observa-se pouca distinção entre as mesmas.

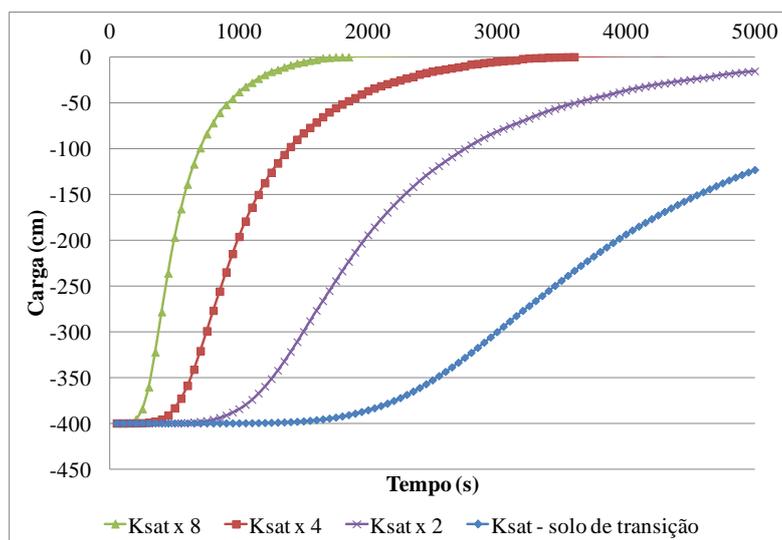


Figura 87 – observação em um nó da influência da condutividade hidráulica na série temporal

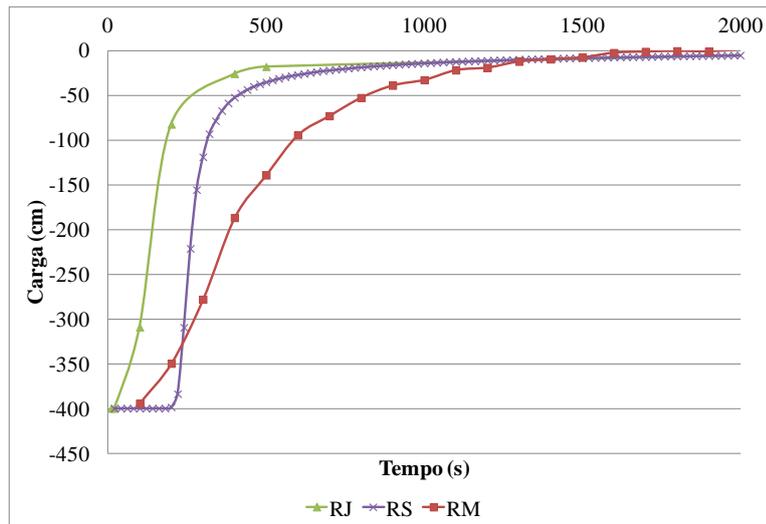


Figura 88 – observação em um nó da influência dos parâmetros α e n

No intuito de verificar outra condição de igualdade para o estágio inicial, propôs-se uma análise em função do grau de saturação (60%) que trabalha com a forma normalizada das curvas das propriedades hidráulicas e, portanto há anulação dos efeitos dos parâmetros α e θ_s , uma vez que parte de um ponto semelhante graficamente nas curvas (em relação ao formato) e estes são parâmetros de translação (Figura 3 e Figura 83). Sendo assim vê-se um comportamento mais próprio para cada tipo de solo, estando o residual jovem com uma frente de umedecimento mais lenta que o solo saprolítico. Neste caso ambos os solos têm saturação total da coluna no décimo oitavo dia.

As conclusões são: a infiltração é fortemente influenciada pela condição inicial de sucção/umidade no solo e que o parâmetro alfa aproxima ou afasta da condição de saturação; a análise com condição inicial idêntica nem sempre é a melhor comparação entre o comportamento dos solos, pois sofre influência de mais parâmetros; a condutividade hidráulica saturada é o parâmetro mais influente na distribuição da umidade ao longo do tempo; um mês chuvoso produziu poropressões positivas para estes tipos de solo e perfil (200 cm de espessura), porém nem sempre foi capaz de saturá-lo; e a chuva de grande intensidade saturou o perfil em poucas horas, mostrando-se a mais perigosa.

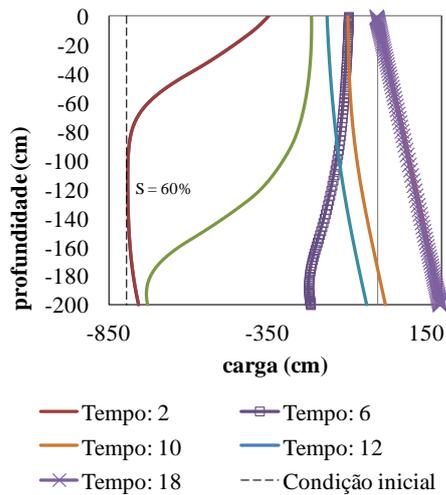


Figura 89 - Frente de umedecimento do solo residual com condição inicial de saturação do material (60%)

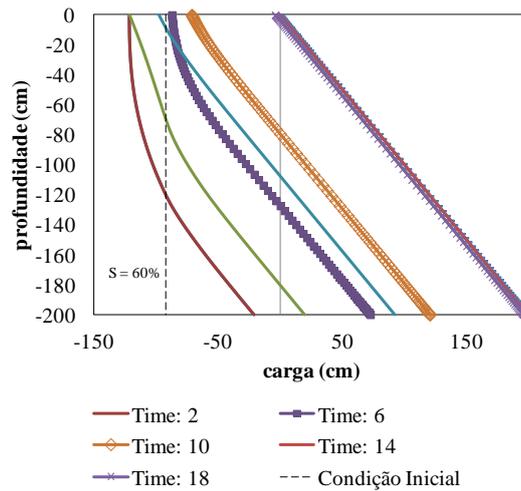


Figura 90- Frente de umedecimento do solo saprolítico com condição inicial de saturação do material (60%)

6.7.

Considerações sobre a definição do problema de EIM

O ensaio de infiltração monitorada (EIM) além dos equipamentos explanados na seção 4.2 exige também um pós-processamento que consiste de uma ferramenta de análise de fluxo 2D assimétrica com capacidade de resolver o problema inverso. Nesta seção serão abordados os temas referentes ao pós-processamento e considerações sobre o problema inverso.

6.7.1.

Avaliação na possibilidade da retroanálise 1D

Nesta seção foram escolhidas diversas configurações, verticais e horizontais, para a realização do ensaio. Com o intuito de simplificar o problema nestas configurações, em que o tensiômetro é posicionado sob o eixo de simetria, foram estimados os parâmetros através das análises 2D e 1D e verificou-se a diferença entre os mesmos. A vantagem da análise 1D em relação à análise 2D (3D axissimétrica) é o custo computacional reduzido, cuja velocidade de processamento é no mínimo 3 vezes mais rápida do que a 2D⁴⁹. Apesar de notória

⁴⁹ FAQ do site <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?h3d-faq-01-10#k5>, 2012

a definição 2D do problema a ser resolvido no EIM a seção torna-se interessante por mostrar que pouca variação na geometria do ensaio já pode tornar o problema mais próximo ao fluxo 1D e talvez possa facilmente ser adaptado a esta condição de análise.

Os resultados mostraram que a variação entre os parâmetros retro-analisados em 1D e em 2D, apresentados na Tabela 28, estão na faixa de até 76 %, para o parâmetro, K_{sat} , 42% para o parâmetro α e 67% para o parâmetro n . O autor considera como muito altas as variações dos parâmetros, principalmente no parâmetro n , por ser a mais significativa no comportamento do solo e estar contida numa faixa estreita ~1.15 a 2.5 (para os solos estudados). As variações dos outros parâmetros não são tão significativas pela variabilidade em ordens de grandeza dos mesmos apesar de também inaceitáveis.

Observa-se na Tabela 28 que os valores de n tendem a ser maiores na análise 1D mostrando variações positivas e o parâmetro K_{sat} menores, mostrando variações negativas. Já para o parâmetro não α não houve aparente tendência.

Na análise procurou-se estabelecer relações de causalidades entre a geometria e os parâmetros retroanalisados. Especulou-se que as razões carga/profundidade e raio/carga poderiam influenciar nos conjuntos de parâmetros obtidos seja, no primeiro caso, pela superfície do terreno servir de condição de contorno para a frente de infiltração ou ,no segundo caso, por aumentar a parcela de fluxo radial (efeito de capilaridade) quanto menor for o raio em relação a carga.

A Figura 91 mostra que não há aparente influência da condição de contorno para a preferência do fluxo. Já a Figura 92 mostra que o aumento do raio em relação a carga fornece melhores estimativas, com menores diferenças entre as análises 1D e 2D, o que de fato representa o aumento da parcela gravitacional no fluxo como previsto nas soluções analíticas de permeâmetros de carga constante (Elrick e Reynolds, 1992). O autor considera que nenhuma das análises 1D foram satisfatórias porém a tendência de redução da diferença nos parâmetros estimados com o aumento da razão raio/carga sugere que outras geometrias possam tornar o ensaio acessível à análise 1D ou caso usem instrumentos para forçar o fluxo unidimensional (ex. condição de contorno com anéis). (ver seção 3.2.4.3).

Tabela 28 - Variação dos parâmetros retroanalizados em 1D em relação a 2D

	α (cm-1)	n	ksat (cm/s)	Configuração
PM	-32%	67%	-58%	V
CM1	-16%	40%	-65%	H
M1	-19%	7%	-24%	H
CB1	-42%	47%	-68%	V
RB	34%	12%	-1%	H
P21	42%	53%	-76%	H

Variação nos parâmetros 1Dx2D

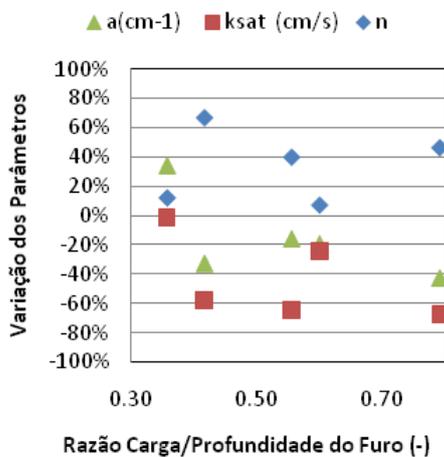


Figura 91 Influência da razão carga/profundidade na variação dos parâmetros.

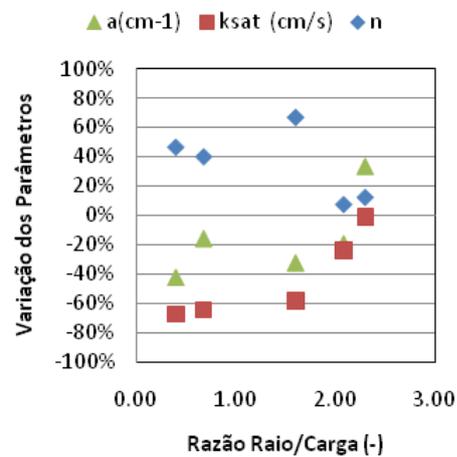


Figura 92 Influência do raio em relação a carga na variação dos parâmetros

6.7.2. Influência de dados adicionais

6.7.2.1. Adição de dados da curva característica

Uma das grandes dificuldades do problema inverso é a identificação dos parâmetros, visto que é um problema mal posto. Diversos autores buscam confeccionar uma função objetivo ótima para o problema, onde se aumentem os valores de confiança sem, no entanto, penalizar o tempo e custo do ensaio. Em estudo numérico, Simunek e van Genuchten (1996) estabeleceram que problemas retro-analisados somente com função objetivo em sucção seriam suficientes para a obtenção de bons parâmetros, muito embora dados de umidade contribuiriam

significativamente para a identificação de um mínimo (ex. umidade acumulada em Zou *et al.*, 2001 ou umidade final e TDR em Simunek *et al.*, 1999)

Neste intuito, os ensaios de papel filtro (PF) obtidos na literatura (nomeados de PF Oliveira (2013) e PF Maciel (1991)) e medidos foram plotados junto as curvas obtidas nas retroanálises e são mostrados na Figura 93.

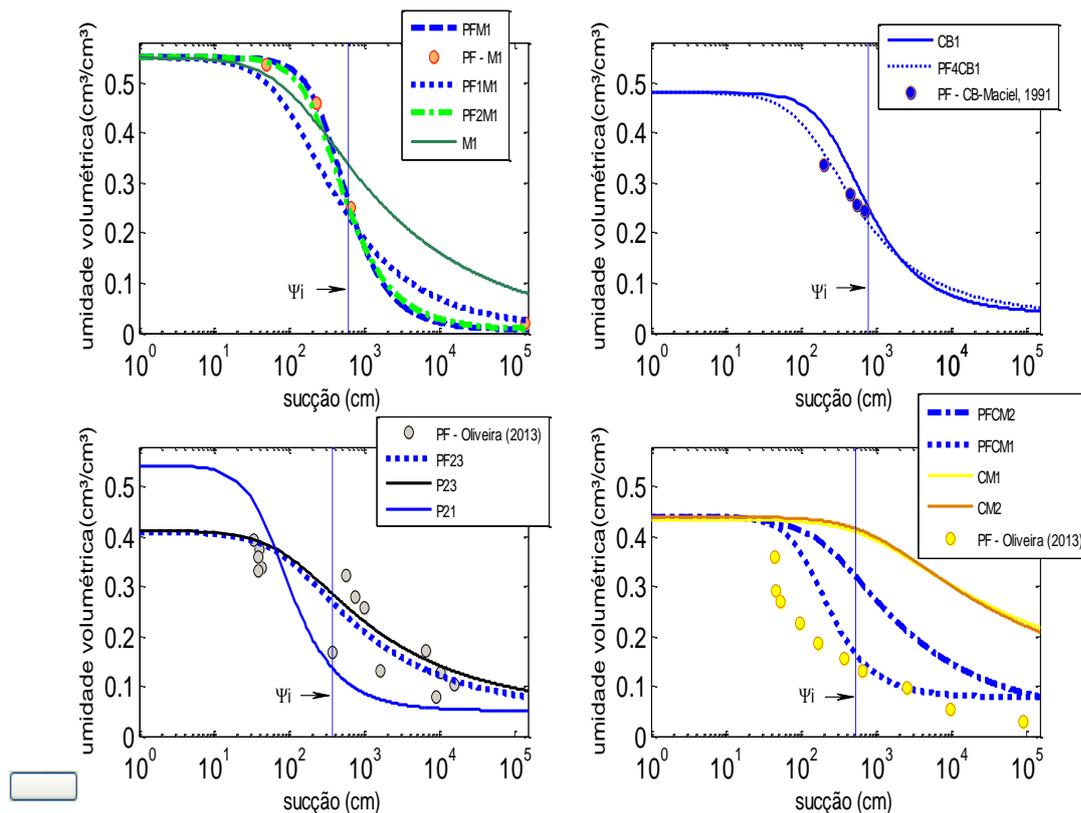


Figura 93 - Função objetivo com e sem os pontos da curva característica do PF

Observa-se na Figura 93 que de certa forma os valores obtidos na retroanálise são coerentes, muito embora deva-se ter cautela, pois os solos retirados da literatura podem apresentar-se tendenciosos, principalmente pelo desconhecimento preciso dos locais ensaiados e a possibilidade de ocorrerem variações em decorrência da distribuição espacial. Isto poderia gerar variabilidade nas propriedades sendo observado ao contrastar-se os solos CM1/CM2 e P21/P23.

No gráfico da Figura 93 as curvas coloridas e contínuas, P21, P23, M1, CB1, CM1 e CM2 são os resultados dos ensaios EIM e na vertical as condições iniciais (Ψ_i) dos mesmos.

Para a análise⁵⁰ desta seção foram plotadas as curvas PFP23, PFCM1, PFCM2, PFM1 e PFMACIEL (Figura 93) que são as curvas com adição de informações a priori à retro-análise onde, além da série temporal ($\Psi(t)$) todos os pontos da curva característica obtidos nos ensaios de papel filtro são adicionados à função objetivo⁵¹.

Analisando a quantidade de pontos da curva característica que servem de informação adicional adequada, plotou-se as curvas do local de residual de migmatito (M^{52}) com o acréscimo de 1 e 2 pontos da curva característica de M1, tendo a respectiva nomenclatura: PF1M1 e PF2M1. Nesta análise, observou-se melhora nos coeficientes de correlação entre M1 e PF1M1 (adição de um ponto) e piora entre M1 e PF2M1 (adição de dois pontos) (Tabela 29), isto pode ser explicado pela perda de qualidade da função objetivo⁵³ e R^2 em PF2M1 com mostrado na Tabela 30. Ainda nesta tabela conclui-se que a solução em M1 não foi única, pois outro conjunto de parâmetros (PF1M1) forneceu um bom ajuste e com baixos valores da função objetivo (Tabela 30). Como consequência, o resultado obtido no EIM (M1) poderia estar “errado” (mal definido) o que implicaria na necessidade de adição de $y^*(\text{dados})$ a função objetivo ou na melhora do algoritmo para a análise das incertezas (ver seção 3.2).

Tabela 29 - Coeficientes de correlação com pontos da CC do PF na função objetivo

	an	ak	nk
M1	0,635	0,937	0,516
PF1M1	0,089	0,897	-0,355
PF2M2	-0,814	0,905	-0,758
P23	0,412	0,587	-0,348
PFTP23	-0,519	0,947	-0,559
CB1	0,276	0,452	-0,638

⁵⁰ Um dos ensaios de papel filtro (TP1) não foi analisado pela aparência sugestiva da presença de macroporos (descrito por Diniz, 1998) e comportamento de curva bimodal o qual não se aplica, ainda, a técnica de ensaio, pela necessidade de mais parâmetros serem retro-analisados. Apesar disso a literatura apresenta estudos feitos para esse tipo de comportamento como em Zurmühl e Durner (1998) e com obtenção de bons parâmetros exceto no caso em que a função bimodal aparece pouco definida.

⁵¹ Ambas as informações com o mesmo peso

⁵² A caracterização dos ensaios realizados em M (M1/M2) e o ensaio de papel filtro foi feita com base no ponto M1.

⁵³ A qualidade do ajuste pode ser definida ou como a função objetivo para cada variável dependente, no caso em termos de $\Psi(t)^*$ e $\Psi(\theta)^*$ e sob a formulação em termos de somatório dos resíduos ao quadrado, quanto menores os resíduos melhor o ajuste.

CC4CB1	-0,992	0,889	-0,884
CM1	0,971	0,996	0,973
CM2	0,993	0,996	0,980
PFCM1	-0,592	0,966	-0,690
PFCM2	-0,504	0,986	-0,597

Tabela 30 - Parâmetros com adição de pontos da CC na função objetivo

	θ_r	θ_s	$a(\text{cm}^{-1})$	n	$ksat$ (cm/s)	R^2	$\Psi(t)^*$	$\Psi(\theta)^*$
M1	0,03	0,55	8,99E-03	1,28	3,09E-04	0,9998		
PF1M1	0,03	0,55	1,01E-02	1,47	3,27E-04	0,9998	0,0006852	0,0007412
PF2M1	0,03	0,55	3,57E-03	1,9	9,00E-05	0,978	0,1035	0,02416
P23	0,051	0,41	9,90E-03	1,3	1,69E-04	0,9992		
PFTP23	0,051	0,41	1,00E-02	1,35	1,69E-04	0,999	0,001725	0,1842
CB1	0,039	0,48	3,18E-03	1,72	1,29E-04	0,9967		
PF4CB1	0,039	0,48	6,37E-03	1,51	2,69E-04	0,951	0,1624	0,1173
CM1	0,078	0,43	1,20E-03	1,18	5,05E-04	0,997		
CM2	0,078	0,44	1,05E-03	1,2	7,33E-06	0,9924		
PFCM1	0,078	0,44	7,57E-03	2	1,00E-03	0,8727	1,912	0,7889
PFCM2	0,037	0,44	4,13E-03	1,35	4,09E-05	0,9976	0,0682	0,5918

*Função objetivo

É interessante notar que o valor adicionado da curva característica do ensaio do papel filtro à PF1M1 foi o par de valores (-138150 cm, 0,0197 (-)), que está muito acima da capacidade de observação do tensiômetro, que representa a faixa do ensaio de infiltração monitorada, e que segundo Velloso (2000) e Leong e Rahardjo (1997) era de se esperar que houvesse outra solução ou seja, mudança nos parâmetros. No entanto, Velloso (2000) esperava que quaisquer conjuntos de parâmetros fornecessem um resultado confiável para a sucção inferior à condição inicial do ensaio (independente de pontos adicionais) o que, na prática (M1, PF1M1 e PF2M2), não se cumpriu como pode ser observado no trecho superior da figura do canto superior esquerdo da Figura 93. Contudo acredita-se que a principal causa para isto possa ter sido o alto valor de correlação entre α e K_{Sat} do ensaio M1 (Tabela 29 e Tabela 30), o que não refuta a hipótese anterior e sim questiona a qualidade do ensaio.

Quanto à quantidade de pontos da curva característica de laboratório, ainda na Figura 93, vê-se que os parâmetros e o formato da curva quase não variam entre PFM1 (somente PF de laboratório) e PF2M1, o que mostra que a adição de

todos os pontos (4) ou 2 pontos encontraram a mesma solução cujo ajuste é quase idêntico e portanto uma maior quantidade de informação não seria útil neste caso e para este algoritmo de otimização e função objetivo.

A técnica do papel filtro utilizada para a obtenção das informações extras para o problema inverso do EIM é questionável na qualidade, pois a precisão da variável dependente, sucção, pode estar associada ao tempo de obtenção da mesma, que neste método (PF) é feita em dias (ver 3.1.3.1) enquanto no tensiômetro em segundos (tempo da passagem da frente de infiltração). Este ponto também foi observado em experimentos de infiltração por Simunek, 1999 e Wang *et al.*, 1998, ao constatarem que as leituras dos tensiômetros se estabilizavam antes do conteúdo de umidade (TDRs). Ou seja, poros menores continuavam a receber umidade muito tempo após a passagem da frente de infiltração, subestimando a relação umidade x tensão (observações fora do equilíbrio, bolhas de ar oclusas etc) (*Apud* Simunek, 1999).

O ensaio CB1 mostra concordância com a revisão feita em Maciel (1991) (PFCB1) que caso os θ_s fossem iguais dariam ajustes quase idênticos (ver seção 5.5.2.3). O autor, portanto, considera o ensaio CB1 satisfatório dada a margem de erro associada principalmente à locação do ensaio visto que os trabalhos de Pinto (2013) e Maciel (1991) têm defasagem de mais de 20 anos.

Os ensaios em P e CM mostraram um bom ajuste aos dados de laboratório em P23 (curva PF23 Figura 93) e um péssimo ajuste a todos os outros (P21, CM1, e CM2). O solo P21 talvez não tenha sido representado pela sua grande heterogeneidade observada em campo e pela distância do ponto amostrado por Oliveira (2013).

Os solos CM1 e CM2 apesar de terem obtido valores idênticos para a curva característica no EIM, apresentam K_{sat} muito diferentes. Um bom ajuste aos dois casos quando adicionados os valores de curva característica do papel filtro (PFCM1, PFCM2) não foi possível sendo o melhor o da curva PFCM2. Nestes casos o uso do ensaio de papel filtro não coincidiu de forma aceitável com o EIM.

Nesta seção do presente trabalho, pode-se dizer que alguns bons resultados foram obtidos (PF1M1, PF23 e PF4CB1) e porém não em todos (FF2M2, P21,

CM1 e CM2). Outros tantos bons⁵⁴ e maus⁵⁵ resultados com adição de informações adicionais são encontrados na literatura.

A dualidade de informações faz com que o autor sugira somente a adição de dados relacionados às variáveis obtidas em campo e sob mesmo equipamento (ex. umidade relacionada à profundidade do tensiômetro ou infiltração acumulada sugestão apresentada nas seções 4.2 e 6.4.1). Sugere-se ainda, devido à quantidade de incertezas que, caso se venha a desejar acrescentar informações a priori na solução do problema inverso, sejam utilizados outros critérios para a tomada de decisão quanto à melhor solução. Esta escolha representa, por exemplo, o uso de funções multi-objetivos com a opção pelo melhor conjunto ao final (ex: fazendo uso dos *tradeoffs* da otimização de Pareto). Um exemplo do supracitado por ser visto em Mertens *et al.* (2004) com o uso de uma das funções objetivo sendo uma parcela penalizadora para o desvio da média dos parâmetros de laboratório (outros ver Mertens *et al.* 2006, Wöling *et al.*, 2008).

6.7.2.2. Adição de K_{sat} (Guelph e laboratório)

Como citado anteriormente, Wöling *et al.* (2008) encontraram resultados pobres com o uso de ensaios de laboratório como informação prévia para a retro-análise dos parâmetros em um problema 1D com função objetivo em $\Psi(t)$, que segundo o autor foi atribuído ao efeito de escala.

No presente estudo também foi comprovada a inadequação do uso da permeabilidade medida em laboratório que ficou menor em 3 ordens de grandeza como mostrado na Figura 71 e Tabela 31.

⁵⁴ Bohne *et al.* (1993), com ensaios infiltração e função objetivo baseada na curva característica de laboratório, campo e na infiltração acumulada.

⁵⁵ Os autores observaram variações entre os ensaios de campo e laboratório nos ensaios inversos. Simunek *et al.* (1998) com curva característica obtida através de placas de pressão e Wöling *et al.* (2008) com K_{sat} de laboratório

Tabela 31- Quadro comparativo de K_{sat} (Laboratório x campo direto e inverso)

	Laboratório (cm/s)	Guelph (cm/s)	Média EIM (cm/s)
M1	8,00E-07	2,02E-04 ⁵⁶	1,71E-04
RT	1,75E-06 (Carvalho, 2012)	3,43E-05	5,92E-05
PUC	2,25E-03	1,00E-03 (Diniz, 1998)	5,03E-03
CM1	-	5,76E-04 (Escobar e Protasio, <i>et al.</i> , 2012)	5,05E-04
CM3*	-	1,21E-04 (Escobar e Protasio, <i>et al.</i> , 2012)	5,78E-04
CB1	3,15E-04 (Maciel, 1991)	-	1,29E-04
CB21/CB22	2,47E-04 (Maciel, 1991)	-	1,72E-03

O ensaio de Guelph se mostrou concordante com quase todas as K_{sat} obtidas no EIM, então, esse ensaio parece suficientemente bom para obtenção deste parâmetro, mas deve-se ter cautela para cada caso visto que este parâmetro apresenta altos valores de coeficiente de correlação e somente os poucos ensaios do presente trabalho podem não representar todos os casos. Gribb *et al.* (2004) ao compararem diversos tipos de ensaio (carga variável, permeâmetro de cone, multi-estágio) concluíram que o permeâmetro de Guelph seria o ensaio que geraria maiores valores de K_{sat} .

6.7.3. Análise de sensibilidade para configuração radial

Na maioria dos casos a configuração radial não produziu baixos coeficientes de correlação, no entanto o ensaio P23 apresentou resultados contrários como mostrado na Tabela 22. A análise de sensibilidade foi conduzida e observou-se que os baixos coeficientes de correlação se devem a alta sensibilidade dos 3 parâmetros estimados (Figura 94) e que o ensaio poderia ter sido de duração 2 vezes menor pois a sensibilidade se encontra alta na faixa de ~500 a 1300 segundos (Figura 95).

⁵⁶ O ensaio de Guelph foi feito em uma localidade próxima aos ensaios M1 e M2 porém não durante o mesmo ensaio como os RT, CM1 e CM3.

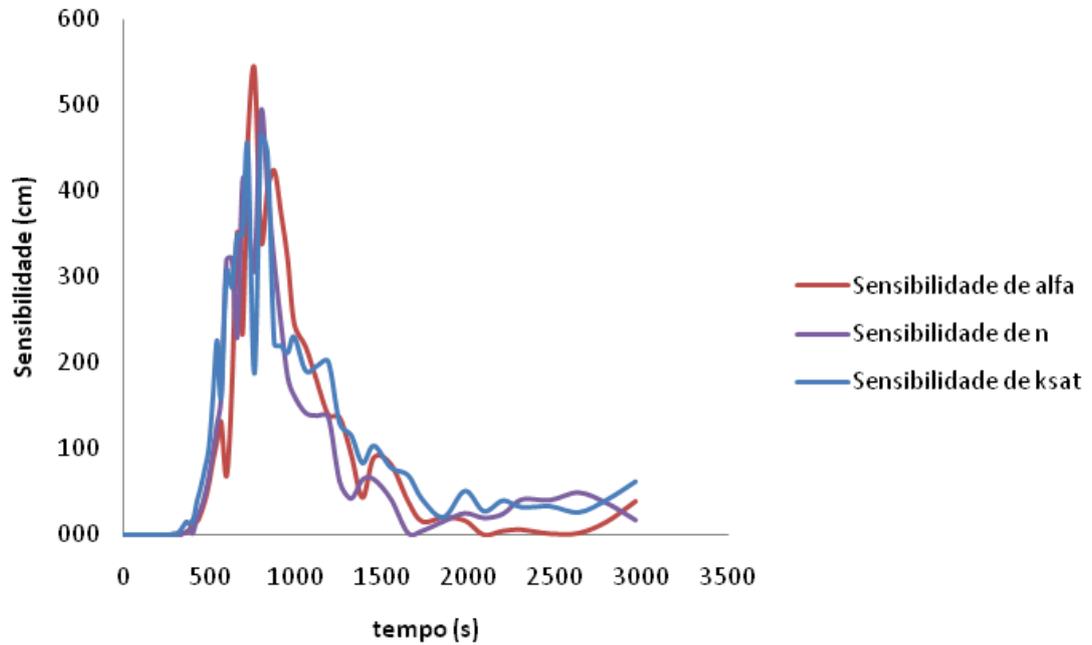


Figura 94 - Análise de sensibilidade radial – solo P23

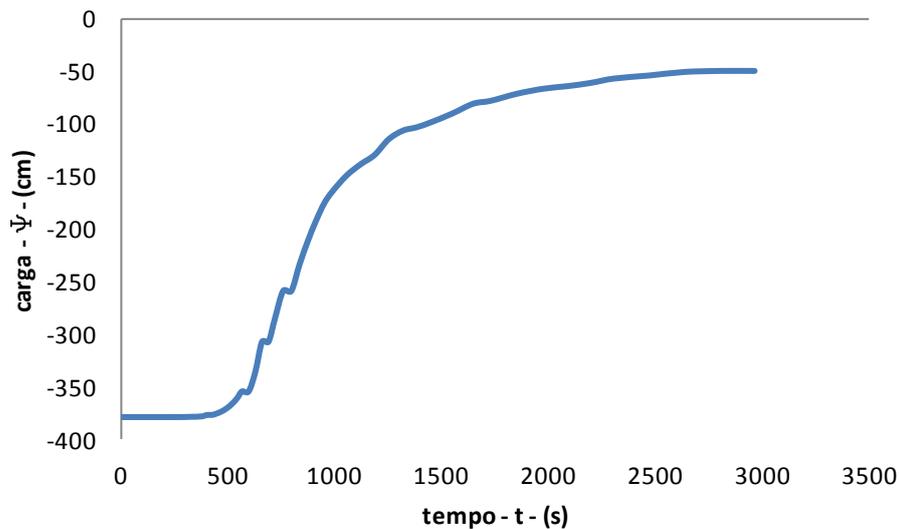


Figura 95 - Curva $\Psi(t)$ do ensaio radial do solo P23

6.7.4. Avaliação do teor de umidade saturada e porosidade

A variação do parâmetro θ_s , que é obtido independentemente, foi analisado numericamente a fim de identificar sua influência nos parâmetros retro-analisados. Este estudo foi feito com o intuito de afirmar a importância da escolha de como esse parâmetro (θ_s) será analisado/interpretado. Neste trabalho utilizou-

se de θ_s igual a porosidade (n), mas em muitos estudos esse valor é diferente, principalmente se o ensaio foi conduzido na trajetória de umedecimento, que é regido pela “porosidade efetiva” (ex: Figura 2):. Gerscovich e Sayão (2002) usam valores de θ_s como $0,9n$ e $0,95n$ em ensaios que envolvem trajetória de umedecimento e umedecimento/secagem respectivamente e estão de acordo com Aubertin *et al.* (1998).

O estudo, Tabela 31, mostrou que uma variação até 8% θ_s , salvo para o solo CM1, não se produz grandes discrepâncias nos parâmetros retro-analisados. Conclui-se com a análise que a obtenção técnica (ex: tamanho dos anéis indeformados, tomografias etc) e interpretação (avaliação direta em relação a porosidade, sob alguma proporção ou outra) de θ_s deve manter-se nesta faixa.

Outro ponto que pode ser comentado é de que quando θ_s e θ_r são obtidos independentemente eles irão fazer parte da configuração do problema pois indicam a quantidade de água suportada pelo solo. Essa atitude influenciará nos parâmetros obtidos na retro-análise, (ver seção 2.51) alterando a qualidade do resultado pois produzem coeficientes de correlação distintos como mostrado na Tabela 31.

Tabela 33 – Efeito da variação do parâmetro θ_s nos coeficientes de correlação e parâmetros

Solos	Variação de θ_s	Variação dos coeficientes de correlação			Variação dos parâmetros		
	$\Delta\theta_s$	$\Delta\alpha n$	$\Delta\alpha k$	Δnk	$\Delta\alpha$ (cm^{-1})	Δn	ΔK_{sat} (cm/s)
CG1	-12%	-7%	-1%	-3%	-1%	2%	-15%
CG2	-11%	46%	7%	10%	24%	-27%	26%
CG3	56%	3%	0%	4%	-20%	-3%	32%
CO1	-12%	-15%	-71%	-27%	0%	19%	-24%
CO3	-19%	10%	-1%	4%	12%	-13%	-3%
CB1	-8%	32%	12%	-20%	1%	0%	-8%
CB21	9%	35%	167%	5%	-19%	-8%	1%
CB22	-19%	56%	213%	-11%	-45%	-38%	-24%
P21	8%	15%	-6%	-5%	0%	0%	9%
P23	-18%	82%	-75%	5%	21%	4%	-16%
RB	4%	-1%	0%	-1%	-1%	0%	4%
CM1	1%	-24%	-3%	-27%	16%	2%	17%
CM3	115%	-5%	0%	-6%	-63%	-15%	-22%