

6 Investigação Experimental: Propriedades Hidráulicas

A capacidade de retenção de água é avaliada nesse capítulo. Esta propriedade dos solos é determinada através do método do papel filtro e do ensaio de porosimetria de mercúrio para todos os níveis de intemperismo estudados. Também é apresentado o ensaio de resistividade elétrica. A característica de resistividade e condutividade elétrica dos solos é influenciada pelo teor de umidade, estrutura e composição dos solos e, portanto, esse parâmetro pode ser utilizado para distinguir propriedades dos solos. A relação entre resistividade e a sucção dos solos é analisada.

6.1. Curvas de Retenção

Uma propriedade fundamental dos solos não saturados, relacionada à sua habilidade em reter água quando em diferentes níveis de umidade, é descrita pela curva de retenção de água ou curva característica. A determinação da curva característica em laboratório pode ser realizada através de diferentes técnicas com relativa facilidade. Usualmente os métodos utilizados na determinação da sucção são divididos em dois grupos: (1) diretos, quando a energia negativa da água é aplicada diretamente e (2) indiretos, quando a sucção é obtida a partir de um parâmetro ou propriedade do solo ou propriedade de outro material em contato com ele.

A placa de sucção, a centrífuga e o aparelho de membrana de pressão constituem alguns métodos diretos e, entre os métodos indiretos estão o método de equilíbrio de vapor, a técnica osmótica e do papel filtro. Os métodos de determinação da sucção podem ser usados para medir tanto pressão absoluta quanto pressão relativa, dependendo da técnica de calibração. No entanto, é comum a determinação da sucção como pressão relativa. A pressão relativa define-se como a diferença entre a pressão absoluta e a pressão atmosférica. Em instrumentos que medem a pressão relativa, como piezômetros e manômetros, a pressão de água no solo estará sob tensão apenas quando os

valores de sucção forem superiores, em módulo, à pressão atmosférica (i.e., 101,3 kPa) (Marinho, 1997). Neste valor, a água nos sistemas de medição começa a cavitatar, e este é um dos maiores problemas associados à determinação da sucção. Cavitação é o nome que se dá ao fenómeno de vaporização de um líquido pela redução da pressão, durante seu movimento a uma temperatura constante. A cavitação impede a correta determinação da pressão negativa nos instrumentos convencionais. Algumas técnicas determinam a sucção total, outras determinam sucção matricial ou ambas, como é mostrado na Tabela 6.1. Medidas diretas de sucção só são possíveis com tensiômetros e psicrômetros e nas faixas descritas na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 – Técnicas utilizadas para determinação da curva característica em solos.

Técnica	Componente da sucção medida	Faixa de sucção medida (kPa)
Placas de sucção	Matricial	0 – 70
Placas de pressão	Matricial	0 – 1.500
Centrífuga	Total	-
Membrana de pressão	Total	-
Equilíbrio de vapor	Total	3.000 – 300.000
Dessecador Osmótico	Total	-
Sensor de condutividade térmica	Matricial	0 – 400
Papel filtro	Total e matricial	10 – 30.000
Medidor de potencial	Total	0 – 300.000

Tabela 6.2 – Instrumentos utilizados para determinação da sucção em solos.

Tensiômetros convencionais	Matricial	0 – 70
Micro tensiômetros	Matricial	0 – 1.500
Psicrômetros	Total	100 – 10.000

A determinação através da placa de sucção (ou panela de pressão) é feita através da imposição da sucção no corpo-de-prova do solo através da técnica de translação de eixos e uma placa de sucção (Richards, 1941). O equipamento consiste de uma câmara metálica contendo duas partes que são unidas através de parafusos e anéis de vedação que asseguram a estanqueidade do sistema. A parte inferior contém uma pedra porosa de alta entrada de ar e duas válvulas,

sendo uma ligada a uma bureta graduada e a outra a um reservatório utilizado para a saturação da amostra. Na parte superior é colocada uma tampa acrílica para evitar a evaporação da água da amostra. A Figura 6.1 apresenta um esquema desse equipamento.

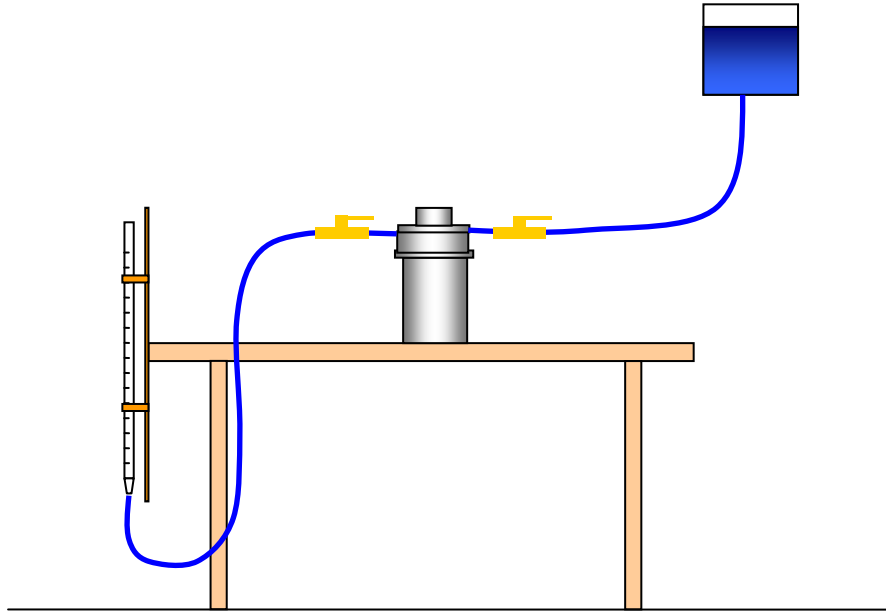


Figura 6.1 – Esquema da placa de sucção.

Esse sistema permite que a sucção matricial seja aplicada na amostra mantendo-se a pressão do ar em zero (igual à pressão atmosférica) e a pressão da água em um valor ligeiramente negativo. Inicialmente abre-se a válvula ligada ao reservatório até a inundação da amostra. A seguir, fecha-se a entrada de água do reservatório e permite-se a equalização do nível de água da bureta com o nível de água da amostra (sucção igual a 0 kPa). Após equalização, abaixa-se a bureta até atingir a altura correspondente ao nível de sucção desejado para o ensaio. O teor de umidade da amostra e o seu volume são obtidos manualmente depois de atingido o equilíbrio da amostra com a sucção imposta. A placa de sucção não permite a aplicação de pressões negativas acima de 90 kPa.

O sistema de placa de pressão pode ser usado para a determinação da sucção matricial de solos não saturados diretamente aplicando-se a técnica de translação de eixos. Tal procedimento é utilizado para prevenir problemas associados à cavitação (Hilf, 1956). Esta técnica translada a origem da referência da pressão de água da pressão atmosférica para a pressão de ar imposta na câmara. A técnica de translação de eixos permite que a pressão de água seja medida, ou controlada, usando um disco cerâmico com finos poros

(disco de alta entrada de ar). O disco de alta entrada de ar age como uma membrana semi-permeável que separa a fase ar da fase de água. A separação das fases é possível quando o valor de entrada de ar do disco poroso é maior que a sucção matricial do solo. Um sistema de placa de pressão típico é mostrado na Figura 6.2.

O corpo-de-prova é colocado na câmara de pressão acima do disco de valor de alta entrada de ar, que deve ser previamente saturado. A pressão de ar é aplicada acima do corpo-de-prova e a pressão de água é aplicada abaixo do corpo-de-prova. A diferença entre as pressões é igual à sucção matricial imposta no corpo-de-prova. Uma condição de equilíbrio é atingida quando não há variação na quantidade de água dentro do corpo-de-prova.

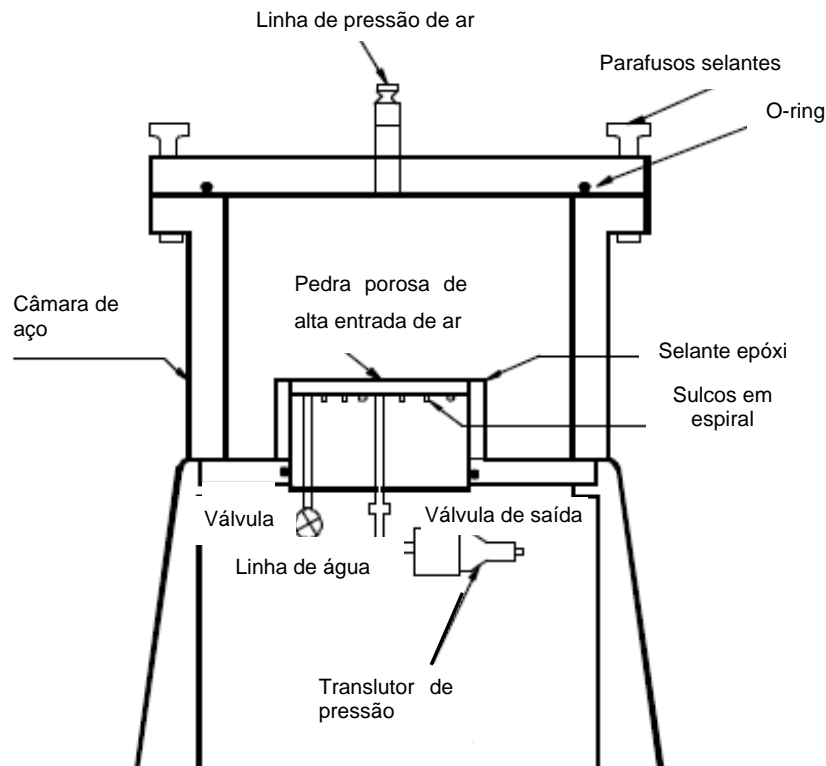


Figura 6.2 – Sistema de placa de pressão (Vanapalli *et al.*, 2002).

A utilização da centrífuga para impor valores de sucção em solos, baseia-se no princípio de aumentar o campo gravitacional para causar a drenagem “natural” do solo com um nível d’água conhecido e abaixo do corpo-de-prova. O campo gravitacional é aplicado ao corpo-de-prova que está sobre uma pedra cerâmica saturada. A base da pedra cerâmica tem um nível d’água em

condições de pressão atmosférica. O teor de umidade do corpo-de-prova após atingir o equilíbrio gravitacional é similar ao obtido em processo de drenagem em condições de campo. A Figura 6.3 demonstra o princípio de medição de sucção através do método da centrífuga (Khazode *et al.*, 1999 e 2000).

A sucção no corpo-de-prova pode ser calculada pela equação abaixo, proposta por Gardner (1937, *apud* Khazode *et al.*, 2000).

$$\psi = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} (r_2^2 - r_1^2) \quad \text{(Equação 6.1)}$$

Onde ψ é a sucção no corpo-de-prova; r_1 é a distância radial até a superfície livre da água; r_2 é a distância radial até o centro do corpo-de-prova; ω é a velocidade angular; ρ é a densidade do fluido.

A equação 6.1 define uma relação linear entre a sucção e o raio centrifugal. A sucção é função da diferença dos quadrados dos raios r_1 e r_2 e da velocidade angular.

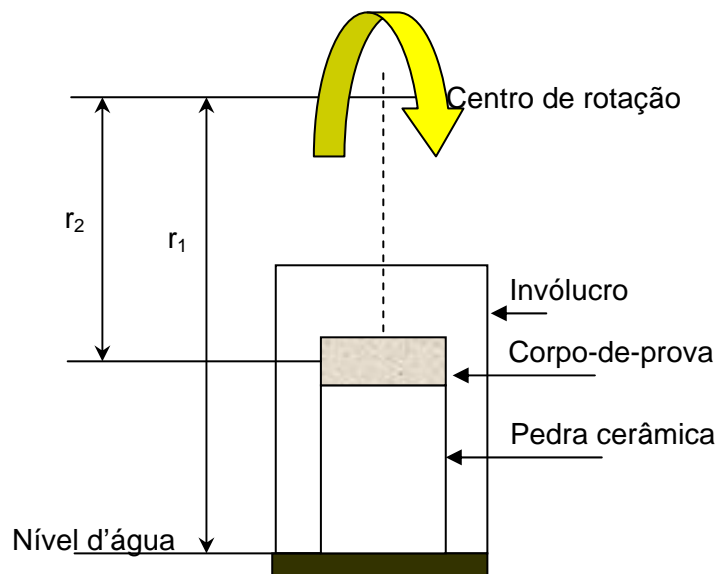


Figura 6.3 – Princípio de medida de sucção através da centrífuga (Khazode *et al.*, 1999 e 2000).

Os tensiômetros convencionais são aparelhos utilizados na medição de sucção matricial na faixa de 0 a 90 kPa. Eles são compostos de uma pedra porosa de alta entrada de ar de 1 bar (101,3 kPa) conectada a um vacuômetro através de um pequeno tubo preenchido com água (Figura 6.4). Teoricamente, o

tensiômetro convencional é capaz de medir valores de sucção iguais à pressão atmosférica. No entanto, a cavitação pode ocorrer com valores de sucção abaixo deste valor (e.g Fredlund e Rahardjo, 1993).

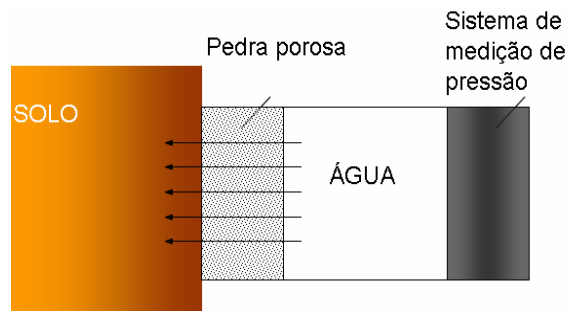


Figura 6.4 – Componentes básicos de um tensiômetro.

Mini-tensiômetros capazes de medir sucções de até 1200 kPa foram desenvolvidos no Imperial College (Ridley e Burland, 1993). O princípio de funcionamento desses instrumentos consiste em evitar a cavitação com um pequeno reservatório de água entre a pedra porosa de alta entrada de ar e o diafragma, mantendo a fase de água contínua (Figura 6.5). A medida de sucção é baseada nas condições de equilíbrio entre a poro-pressão no solo e no reservatório de água.

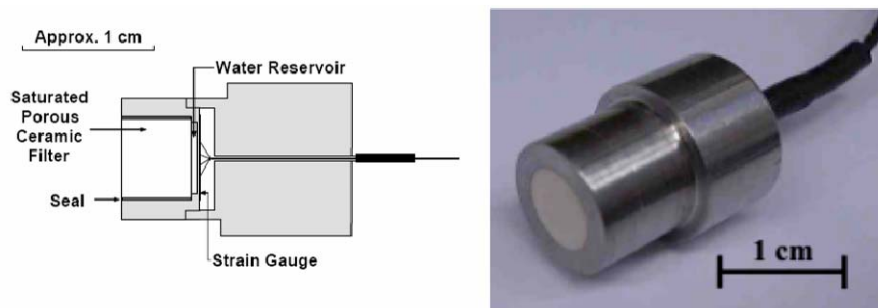


Figura 6.5 – Esquema do mini-tensiômetro desenvolvido pelo *Imperial College* (www.geo-observations.com).

A utilização do psicrômetro para determinar a sucção total do solo se baseia na medida da umidade relativa da fase ar dos poros do solo quando as condições de equilíbrio são atingidas. O solo, quando em equilíbrio com ar em seu entorno, terá uma sucção proporcional à umidade relativa do ar. O psicrômetro opera baseado na medida da diferença de temperatura entre uma superfície não-evaporativa (i.e., bulbo seco) e uma superfície evaporativa (i.e. bulbo úmido). A sucção total é relacionada à umidade relativa de acordo com a relação termodinâmica apresentada na equação abaixo, para a temperatura de 20°C (Richards, 1965 *apud* Vanapalli *et al.*, 2002):

$$\psi = -135022 \cdot \ln(RH) \quad \text{(Equação 6.2)}$$

Onde, ψ = sucção total; RH = umidade relativa.

Atingir total equilíbrio em umidades relativas é difícil devido a condensação de vapor d'água que pode aparecer devido a pequenas variações na temperatura (Fredlund e Rahardjo, 1988 *apud* Vanapalli *et al.*, 2002). Um ambiente com temperatura controlada em 0,001°C é necessário para atingir uma precisão de 10 kPa na medida da sucção total (Edil e Motan, 1984 *apud* Vanapalli *et al.*, 2002).

Uma forma de se estabelecer a sucção total em uma amostra de solo se dá através do método de equilíbrio de vapor (e.g. Jucá, 1990; Röhm, 1997). Nesse método, a amostra de solo fica exposta a uma atmosfera com teor de umidade controlado por soluções salinas ou ácidas de potenciais conhecidos, ou seja, a sucção é controlada através da umidade relativa do ambiente. Normalmente é utilizado um dessecador de vazios ou outro recipiente hermético (Figura 6.6). A relação entre a densidade de soluções de ácido sulfúrico e umidades relativas (Aitchison e Richards, 1965 *apud* Jucá, 1990) e soluções de cloreto de sódio e umidades relativas (Baker *et al.*, 1973 *apud* Jucá, 1990) são apresentadas na Tabela 6.4 e na Tabela 6.5. Neste processo o tempo de estabilização é relativamente longo, sendo que em processos de umedecimento varia de 100 a 250 dias e em processos de secagem até 100 dias (Blight, 1966 *apud* Jucá, 1990). Tanto as soluções de ácido sulfúrico quanto as soluções de cloreto de sódio apresentam o mesmo resultado, no entanto o cloreto de sódio é de mais fácil utilização.

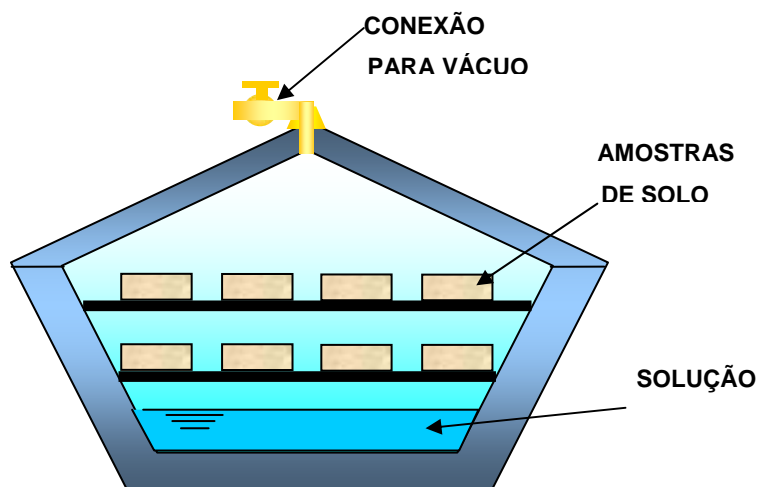


Figura 6.6 – Dessecador de vazios para controlar o teor de umidade pela pressão de vapor.

Tabela 6.3 – Potenciais de água de uma solução de cloreto de sódio em função da temperatura e molalidade (Juca, 1999).

Molalidade	grs. de NaCl / 1000 g. de água	Potenciais de água (MPa)		
		20°.C	25°.C	30°.C
0,05	2,922	0,23	0,24	0,24
0,1	5,844	0,46	0,47	0,48
0,2	11,688	0,92	0,93	0,95
0,3	17,532	1,37	1,39	1,42
0,4	23,376	1,83	1,86	1,89
0,5	29,22	2,28	2,33	2,36
0,6	35,064	2,75	2,8	2,85
0,7	40,908	3,21	3,27	3,33
0,8	46,752	3,68	3,75	3,82
0,9	52,596	4,16	4,24	4,31
1	58,44	4,64	4,73	4,82
1,1	64,284	5,12	5,23	5,33
1,2	70,128	5,62	5,73	5,84
1,3	75,972	6,11	6,24	6,36
1,4	81,816	6,61	6,75	6,89
1,5	87,66	7,12	7,27	7,42
1,6	93,504	7,64	7,8	7,96
1,7	99,348	8,16	8,33	8,49
1,8	105,192	8,69	8,87	9,06
1,9	111,036	9,22	9,42	9,62
2	116,88	9,76	9,97	10,18

Tabela 6.4 – Potenciais de água de uma solução de ácido sulfúrico em função da temperatura e molalidade (Juca, 1999).

Densidade da solução (gr./cc)	Umidade Relativa (%)	Sucção (a 20°C)	
		S (MPa)	≈ pF (log h)
1,025	98,00	2,84	4,45
1,030	97,60	3,42	4,53
1,035	97,20	3,99	4,59
1,045	96,40	5,16	4,70
1,055	95,60	6,33	4,79
1,070	94,40	8,11	4,90
1,085	93,00	10,21	5,00
1,105	91,30	12,80	5,10
1,125	89,30	15,92	5,19
1,145	86,80	19,91	5,29
1,170	82,90	26,38	5,41
1,195	79,00	33,16	5,51
1,220	75,10	40,28	5,60
1,250	69,30	51,59	5,70
1,275	63,70	63,44	5,79
1,305	56,20	81,07	5,90
1,340	48,00	103,25	6,01
1,375	39,90	129,25	6,10
1,415	31,20	163,85	6,21
1,455	23,50	203,72	6,30
1,500	16,10	256,89	6,40
1,545	10,20	321,13	6,50
1,590	5,50	408,02	6,60
1,640	2,70	508,11	6,70
1,695	1,00	647,84	6,80
1,750	0,30	817,21	6,90
1,790	0,07	1021,93	7,00

Um procedimento alternativo para a determinação da curva característica é a aplicação de sucção através de soluções salinas, chamada de técnica osmótica. Nesse método a amostra de solo é colocada em contato com uma membrana semi-permeável, que a separa de uma solução aquosa com moléculas de polietilenoglicol (PEG). Uma vez que as moléculas de água podem cruzar a membrana semi-permeável e as moléculas de PEG não podem, uma sucção osmótica é aplicada ao solo através da membrana. Como a transferência de moléculas de água ocorre na fase líquida, a técnica osmótica aplica no solo

uma sucção matricial. A vantagem desta técnica é sua simplicidade, além da facilidade de se alcançar altos valores de sucção. A desvantagem é devido à fragilidade da membrana e sua sensibilidade ao ataque de bactérias (Delage, 2002).

Os sensores de condutividade térmica são úteis para a medida de sucção durante longos períodos com o auxílio de um sistema de aquisição de dados. O sensor consiste em um bloco cerâmico poroso que contém um elemento sensível à temperatura e um mini-aquecedor. O mini-aquecedor, ao centro, gera uma quantidade controlada de calor que é dissipada ao longo do bloco em função do seu teor de umidade, o qual é dependente da sucção matricial do solo circundante. Uma maior dissipação ocorrerá quanto maior for o teor de umidade do bloco. Ou seja, é possível determinar a sucção do solo se for conhecida uma função entre a sucção e a condutividade térmica do bloco cerâmico. As medidas de condutividade térmica são obtidas pela dissipação de calor no bloco poroso. (Vanapalli *et al.*, 2002). Os sensores de condutividade térmica apresentam-se como uma boa alternativa para medidas de sucção em campo na faixa de 0 a 400 kPa. Shuai *et al.* (2002) observaram que variações de temperatura têm uma influência significativa nos valores medidos de condutividade térmica. No entanto, para eliminar este efeito pode-se utilizar uma equação de correção como sugerido por Vanapalli *et al.* (2002).

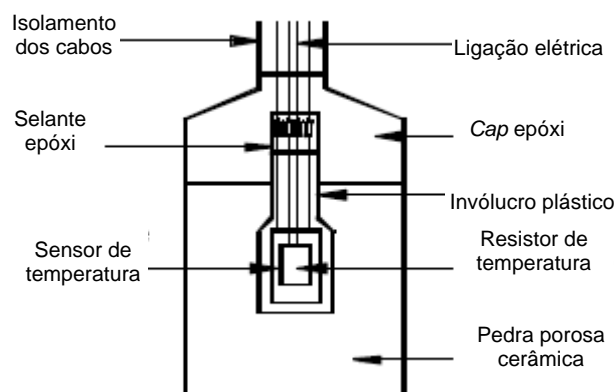


Figura 6.7 – Sensor de Condutividade Térmica AGWA-II (Vanapalli *et al.*, 2002).

Um medidor de potencial determina a sucção total de um material através do conceito “chilled mirror concept” (Thakur *et al.*, 2006). O equipamento consiste de uma câmara selada com um espelho, um sensor do ponto de saturação (dew point) (célula fotoelétrica), um sensor de temperatura, um termômetro infravermelho e um agitador. Um corpo-de-prova de

aproximadamente 6 cm³ é colocado dentro da câmara e entra em equilíbrio com o ar dentro do ambiente. Em equilíbrio, o potencial do ar na câmara é igual à sucção da amostra. O agitador é utilizado para acelerar o equilíbrio, que normalmente ocorre em 15 minutos. A relação entre a sucção total e a pressão de vapor do ar é expressa pela equação de Kelvin:

$$\psi = \frac{RT}{\chi} \ln \frac{p}{p_0} \quad \text{(Equação 6.3)}$$

onde R é a constante universal dos gases, T é a temperatura do corpo-de-prova, χ é a massa molecular da água ($\chi=18$), p é a pressão de vapor do ar e p_0 é a pressão de vapor de saturação.

A célula fotoelétrica detecta a condensação no espelho e o sensor de temperatura registra a temperatura na qual a condensação ocorre. O termómetro infravermelho é utilizado na determinação da temperatura do corpo-de-prova. A precisão do equipamento é de 0,1 MPa (Thakur *et al.*, 2006; Sreedep e Singh, 2006).

O método do papel filtro baseia-se no princípio que dois materiais porosos quando colocados em contato irão ceder ou absorver água até que o equilíbrio entre os dois seja alcançado. Um solo, com alguma umidade, quando é colocado em contato com um papel filtro, com umidade menor, faz com que esse último absorva certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de pressão. Tendo-se a relação entre sucção e umidade do material poroso, ou seja, a curva de calibração, a sucção do solo pode ser obtida. O estado de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém conteúdos de umidade diferentes. A sucção do solo é determinada colocando-se o papel filtro em contanto com o solo, para se medir a sucção matricial, ou colocando-se o papel filtro próximo ao solo, mas não em contato direto, para se determinar a sucção total.

Dois papéis filtro têm sido mais utilizados para a determinação de sucção: *Whatman* no. 42 e *Schleicher & Schell* no. 589. As curvas de calibração em função da umidade para o papel *Whatman* no. 42 (Chandler *et al.*, 1992) são:

• Sucção (kPa) = $10^{(6,05 - 2,48 \log w)}$, para umidade (w) do papel filtro superior a 47 %;

• Sucção (kPa) = $10^{(4,84 - 0,0622 w)}$, para umidade (w) do papel filtro igual ou inferior a 47 %.

Para o papel *Schleicher & Schell* no. 589 (ASTM D5298-92) as curvas de calibração, também em função da umidade, são:

• Sucção (kPa) = $10^{(1,882 - 0,01202 w)}$, para umidade (w) do papel filtro superior a 54 %;

• Sucção (kPa) = $10^{(5,056 - 0,0688 w)}$, para umidade (w) do papel filtro igual ou inferior a 54 %.

O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para a obtenção correta da sucção. Marinho (1994) recomenda um tempo de estabilização de 7 dias para a medição de sucção matricial e de 15 dias para sucção total acima de 250 kPa. Entre 100 e 250 kPa o tempo de estabilização seria de 30 dias. Existem casos onde o papel é atacado por fungos durante o processo de equilíbrio, provocando uma degeneração do papel e alterando suas características. No entanto, na maioria dos casos não é necessário nenhum tratamento anti-fungicida quando o tempo de equilíbrio é de no máximo 15 dias (Hamblin, 1981 *apud* Marinho, 1994; Chandler e Gutierrez, 1986 *apud* Marinho, 1994).

Uma comparação entre vários métodos de controle de sucção é apresentada por Fleureau *et al.* (1993 *apud* Delage, 2002) (Figura 6.8). Os ensaios foram conduzidos em uma pasta de caulinita. Uma boa concordância é observada no processo de secagem, embora com alguns problemas para altas sucções talvez relacionados a ar ocluso nas amostras (Delage, 2002).

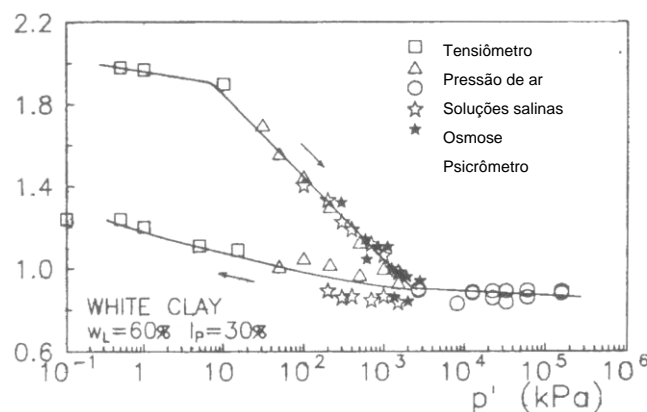


Figura 6.8 – Comparação entre diferentes técnicas de controle de sucção (Fleureau *et al.*, 1993 *apud* Delage, 2002).

Uma tendência recente apresentada pela literatura técnica é a utilização conjunta de diferentes técnicas para a obtenção de curvas características de sucção. Para baixas sucções (até cerca de 10 kPa) tem sido freqüente o uso da placa de pressão. Para sucções intermediárias, até cerca de 500 kPa, tem-se utilizado a técnica da translação de eixos, e para sucções maiores a técnica do papel filtro (Machado e Zuquette, 2004).

Também a partir do ensaio de intrusão de mercúrio pode ser determinada a curva característica solo-ar que apresenta similaridades com a curva característica solo-água (Aung *et al.*, 2001). Existem, no entanto, algumas diferenças fundamentais entre os valores de sucção obtidos no ensaio de placa de pressão e no ensaio por intrusão de mercúrio. No ensaio de porosimetria o líquido utilizado, mercúrio, é um líquido não molhante, enquanto que no ensaio com a placa de pressão a água é um líquido molhante. Disto resulta que os valores de sucção obtidos a partir da intrusão de mercúrio são somente devidos à ação da capilaridade. Isto acontece porque a molécula de mercúrio é apolar e, portanto, não pode apresentar o fenômeno de adsorção (Aguilar, 1990; Aung *et al.*, 2001). Na Figura 6.9 é apresentada um diagrama esquemático da interface ar-água e mercúrio-ar em um poro de solo. No ensaio de placa de pressão mede-se a quantidade de água no solo resultante de uma aplicação de pressão de ar, e no ensaio de intrusão de mercúrio mede-se a quantidade de mercúrio inserida nos poros preenchidos inicialmente por ar.

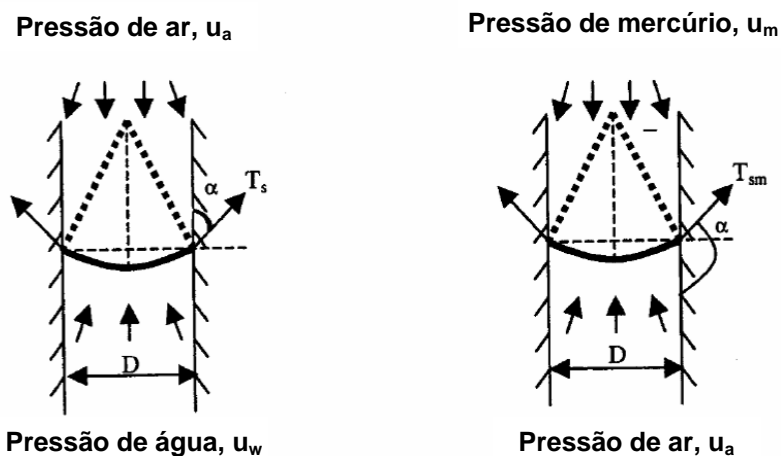


Figura 6.9 – Esquema da interface ar-água e mercúrio-ar (Aung *et al.*, 2001).

Inúmeros pesquisadores já apresentaram comparações entre a curva característica solo-ar obtida do ensaio de porosimetria e a curva característica solo-água (Purcell, 1949; Regab *et al.*, 1982; Prapaharan *et al.*, 1985 *apud* Aung

et al., 2001). As duas curvas obtidas não são iguais devido à existência de interação água-partícula na curva característica convencional e que não está presente no ensaio de porosimetria, mas equivalentes em alguns aspectos como o diâmetro do poro no valor de entrada de ar e a inclinação das curvas no trecho linear (Aung *et al.*, 2001).

6.1.1.

O Método do Papel Filtro: Resultados Experimentais

6.1.1.1.

Amostras Indeformadas

No presente estudo, optou-se pela determinação das sucções através da técnica com papel filtro, pois esse procedimento destaca-se pela relativa simplicidade e pelo fato de ser possível trabalhar com elevados níveis de sucção. Enquanto técnicas como tensiômetros ou translação de eixos permitem a medição de sucções de até 1500 kPa, o papel filtro pode alcançar 29 MPa (por exemplo, Chandler *et al.*, 1992, Marinho, 1995; Marinho, 1997). Assim, foram determinadas as curvas de retenção para os solos Branco, Amarelo, Laranja, Vermelho e Marrom pelo método do papel filtro.

Os corpos de prova para a determinação da sucção foram moldados em anéis plásticos de 47 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Foi utilizado um corpo de prova para cada ponto da curva de retenção. A partir da umidade natural, os corpos de prova foram umedecidos ou secados para se obter diferentes teores de umidade. Para cada tipo de solo estudado foram moldados aproximadamente 30 corpos de prova.

Para a determinação da sucção matricial o papel filtro foi colocado em contato direto com o corpo de prova de solo. A determinação da sucção total envolveu um anel de acrílico de espessura de 2 mm para separar o papel filtro do solo. O procedimento de ensaio contemplava, inicialmente, a colocação dos papéis filtro retirados da caixa em ambas as faces da amostra, sendo uma face para determinação da sucção matricial e a outra face para a determinação da sucção total. O conjunto era firmemente envolto por várias camadas de filme plástico, completando-se seu isolamento com papel alumínio. Adicionalmente, as amostras foram seladas em sacos plásticos. No intuito de reduzir variações térmicas, acondicionava-se o corpo de prova em uma caixa de isopor, que por sua vez era mantida em sala com temperatura controlada (± 20 C). Cada

conjunto corpo-de-prova – papel filtro permaneceu 14 dias em estabilização. Após esse tempo, o conjunto era aberto e os papéis filtros colocados em sacos plásticos para não terem sua umidade alterada pelo contato com o ar. Na seqüência, os sacos plásticos contendo os papéis filtro eram pesados em uma balança eletrônica de alta resolução (0,0005 g). Após a pesagem, os papéis filtro eram removidos dos sacos plásticos e colocados em estufa a 60°, por um período mínimo de 2 horas. Uma vez secos, os papéis eram novamente transferidos para os sacos plásticos e pesados, de modo a se obter a sua umidade. Para o cálculo das sucções, foram adotadas as curvas de calibração do papel filtro *Whatman no. 42* sugeridas por Chandler *et al.* (1992).

Ao final do ensaio, os corpos de prova eram pesados e tinham sua geometria determinada para possibilitar o cálculo dos índices físicos. Nas figuras 6.10 a 6.14 são apresentados os resultados obtidos para as curvas de retenção dos solos para a sucção matricial em função da umidade gravimétrica.

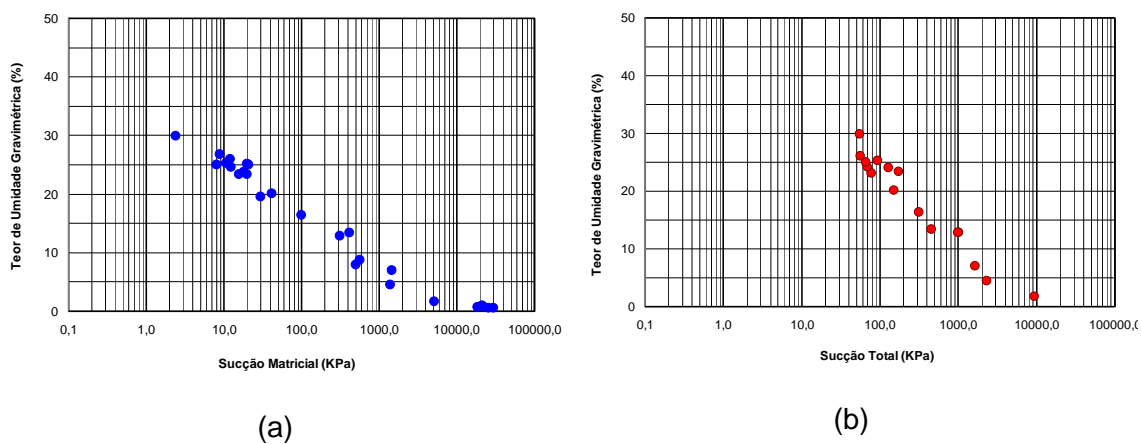


Figura 6.10 – Curva de retenção do solo Branco utilizando o método do papel filtro. (a) Sucção Matricial. (b) Sucção Total.

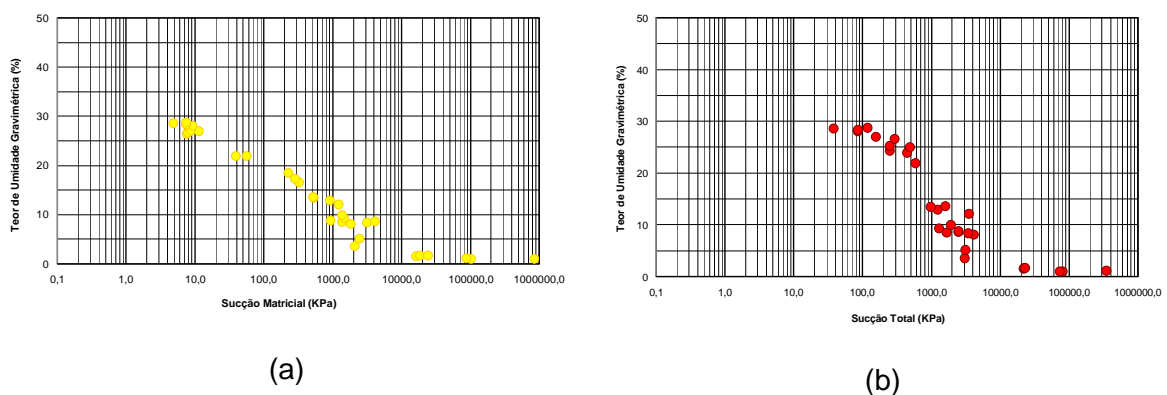
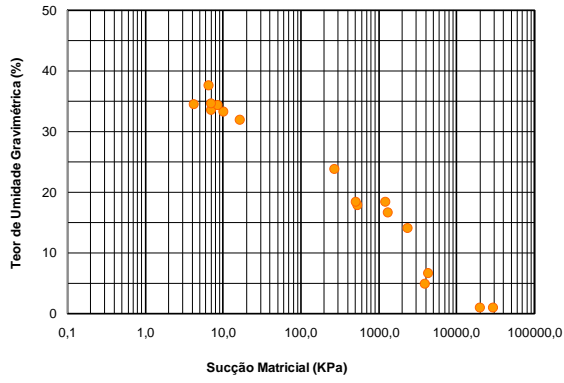
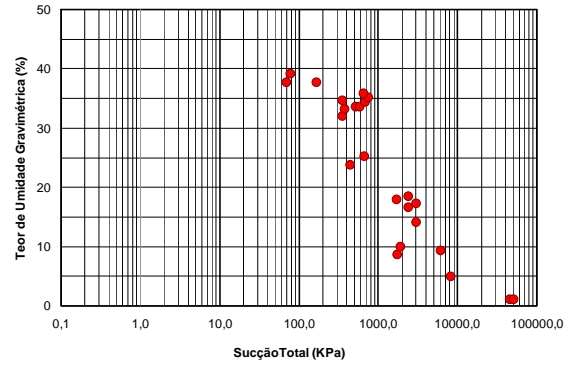


Figura 6.11 – Curva de retenção do solo Amarelo utilizando o método do papel filtro. (a) Sucção Matricial. (b) Sucção Total.

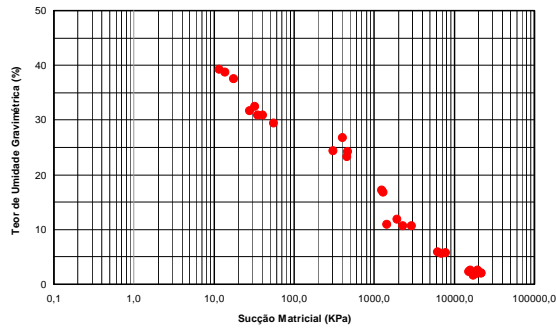


(a)

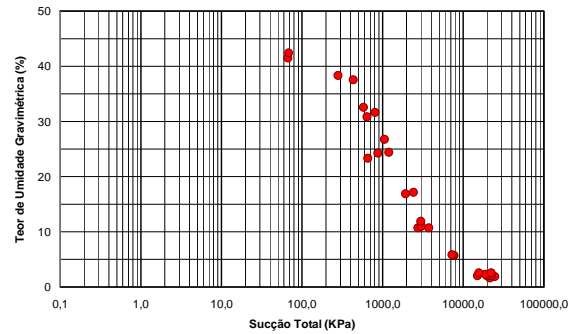


(b)

Figura 6.12 – Curva de retenção do solo Laranja utilizando o método do papel filtro. (a) Sucção Matricial. (b) Sucção Total.

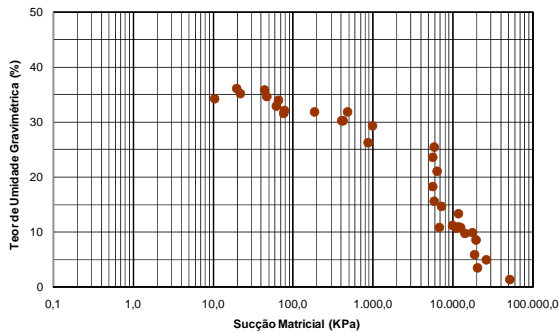


(a)

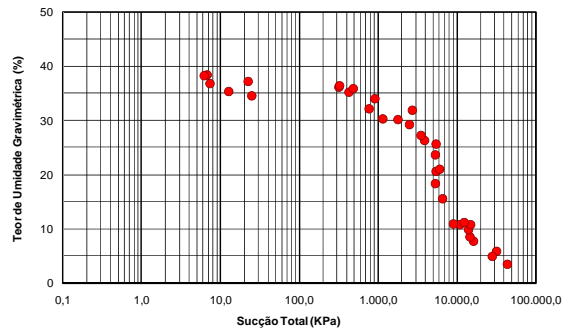


(b)

Figura 6.13 – Curva de retenção do solo Vermelho utilizando o método do papel filtro. (a) Sucção Matricial. (b) Sucção Total.



(a)



(b)

Figura 6.14 – Curva de retenção do solo Marrom utilizando o método do papel filtro. (a) Sucção Matricial. (b) Sucção Total.

Para as curvas de sucção matricial foi ajustada a equação sugerida por Fredlund e Xing (1994) e a equação de van Genuchten (1980) nos dados obtidos em laboratório para os solos Branco, Amarelo, Laranja, Vermelho e Marrom.

Um dos parâmetros de ajuste das curvas de sucção é o teor de umidade gravimétrica saturado. Esse parâmetro foi definido a partir tanto dos dados dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de determinação de sucção, quanto nos ensaios de compressão simples e compressão diametral apresentados e analisados no Capítulo 8. Os valores médios de índice de vazios e peso específico dos grãos utilizados para a obtenção do teor de umidade considerando o grau de saturação igual a 100% estão apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.5 – Teor de umidade gravimétrica médio para o grau de saturação igual a 100% para os solos estudados.

Solo	Grau de Saturação (%)	Índice de Vazios	Peso Específico Real dos Grãos	Teor de Umidade para S=100% (%)
Branco	100	0,813	2,700	30,1
Amarelo	100	1,010	2,713	37,2
Laranja	100	1,253	2,754	45,5
Vermelho	100	1,252	2,731	45,8
Marrom	100	1,016	2,695	37,7

Na Figura 6.15 são apresentados os ajustes obtidos para o solo Branco. Os parâmetros das equações de Fredlund e Xing (1994) e van Genutchen (1980) são apresentados na Tabela 6.6. Para ambas as equações obteve-se um bom ajuste com fatores de correlação iguais a 0,99 e 0,98 para Fredlund e Xing (1994) e van Genutchen (1980) respectivamente.

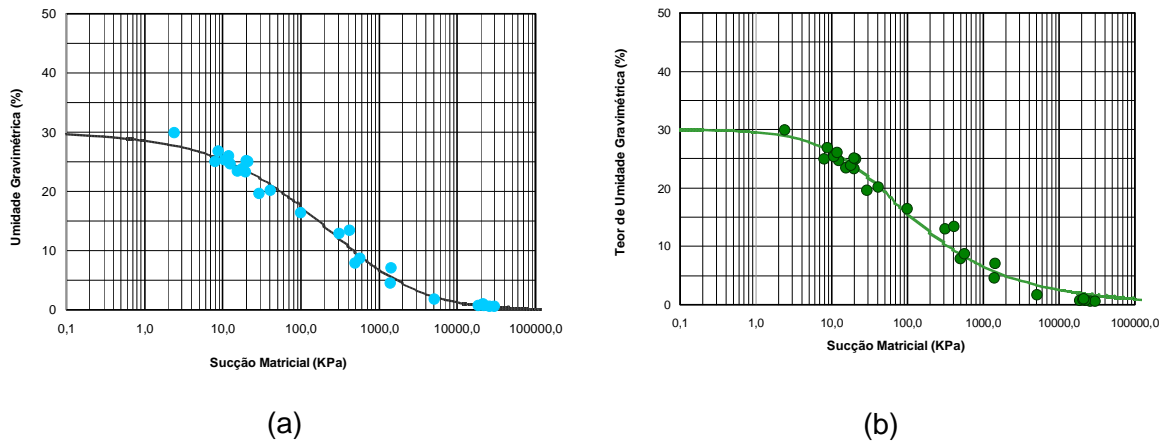


Figura 6.15 – Ajuste da curva de retenção do solo Branco. (a) Fredlund e Xing (1994). (b) van Genutchen (1980).

Tabela 6.6 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Branco.

Fredlund e Xing (1994)		van Genutchen (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}^m} \right]$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	30,10	θ_r	0,00
Cr	19999,22	θ_s	30,10
n	0,54	α	0,04
m	4,30	n	1,00
a	561,49	m	0,41
R^2	0,99	R^2	0,98

Os ajustes das equações efetuados para o solo Amarelo são apresentados na Figura 6.16 e na Tabela 6.7. A equação de van Genutchen (1980) não proporcionou um bom ajuste nos dados dos ensaios e o coeficiente de correlação foi de 0,93. O coeficiente de correlação para a equação de Fredlund e Xing (1994) foi de 0,98.

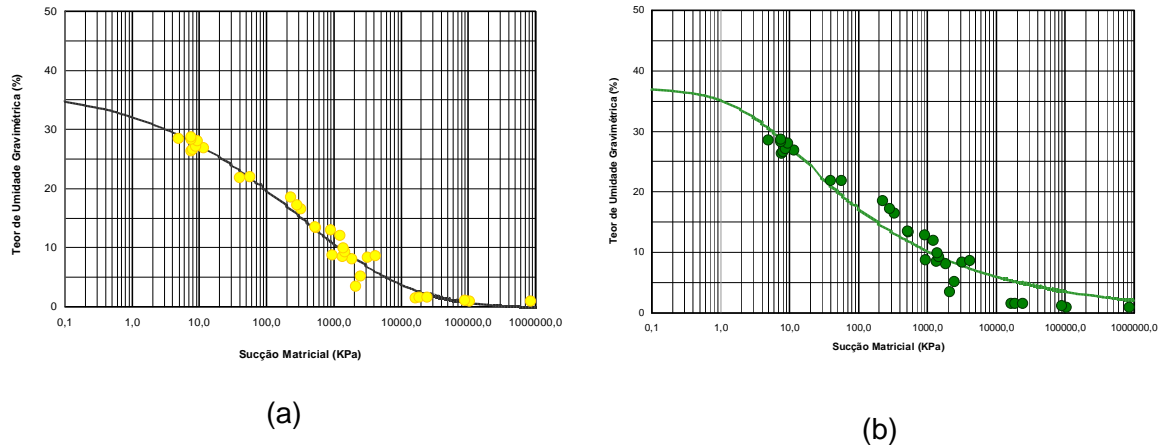


Figura 6.16 – Ajuste da curva de retenção do solo Amarelo. (a) Fredlund e Xing (1994). (b) van Genutchen (1980).

Tabela 6.7 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Amarelo.

Fredlund e Xing (1994)		van Genutchen (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}^m} \right]$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	37,20	θ_r	0,00
Cr	100000,00	θ_s	37,20
n	0,34	α	0,27
m	6,57	n	1,00
a	4000,00	m	0,23
R^2	0,98	R^2	0,93

As equações e os parâmetros de ajuste de Fredlund e Xing (1994) e van Genutchen (1980) para o solo Laranja são mostrados na Figura 6.17 e na Tabela 6.8. Como pode ser observado na figura, não obteve-se um bom ajuste para a proposta de van Genutchen (1980).

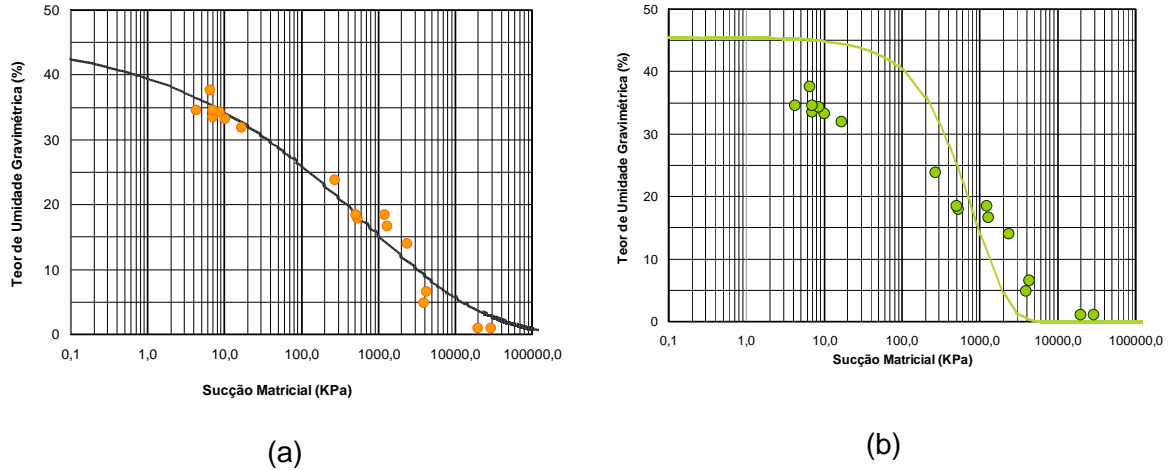


Figura 6.17 – Ajuste da curva de retenção do solo Laranja. (a) Fredlund e Xing (1994).
(b) van Genutchen (1980).

Tabela 6.8 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Laranja.

Fredlund e Xing (1994)		van Genutchen (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}^m} \right]$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	45,50	θ_r	0
Cr	98097,21	θ_s	45,50
n	0,31	α	2,94E-05
m	13,10	n	1,00
a	98097,21	m	40,88
R^2	0,97	R^2	0,59

Na tentativa de um melhor ajuste para o solo Laranja, optou-se por deixar o parâmetro teor de umidade saturada sem um valor pré-definido e determinaram-se através de mínimos quadrados novamente os parâmetros de ajuste para as duas equações. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 6.18 e na Tabela 6.9.

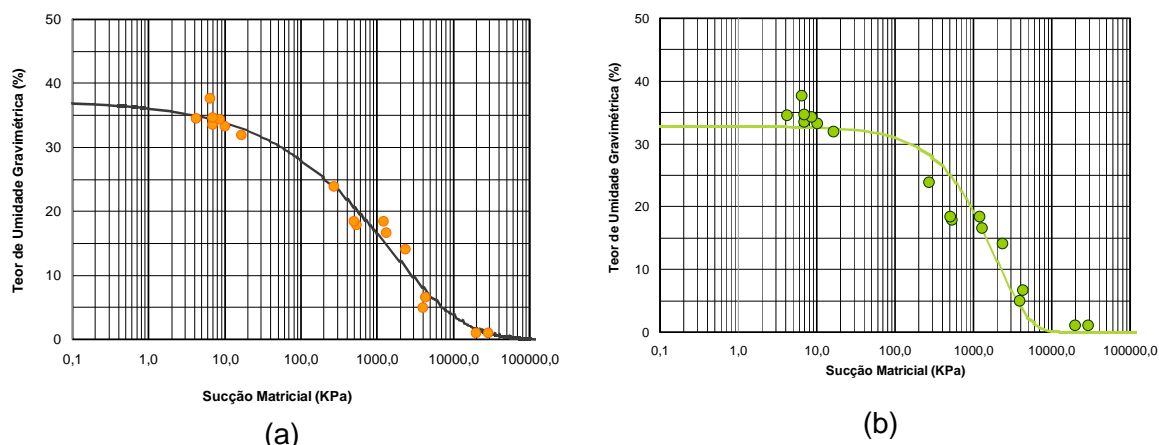


Figura 6.18 – Ajuste da curva de retenção do solo Laranja desconsiderando valor do teor de umidade saturado definido previamente. (a) Fredlund e Xing (1994). (b) van Genutchen (1980).

Tabela 6.9 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Laranja, desconsiderando valor do teor de umidade saturado definido previamente.

Fredlund e Xing (1994)		van Genutchen (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}^m} \right]$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	37,32	θ_r	0
Cr	98097,21	θ_s	32,82
n	0,47	α	1,34E-05
m	20,22	n	1
a	98097,21	m	40,91
R^2	0,98	R^2	0,94

Observa-se que o valor do teor de umidade saturada (θ_s) inicialmente definido como 45,5% mudou para 37,32% no ajuste de Fredlund e Xing (1994) e para 32,82% no ajuste de van Genutchen (1980). Com essa mudança o coeficiente de correlação foi de 0,98 e 0,94 respectivamente.

Na Figura 6.19 são apresentados os ajustes obtidos para o solo Vermelho. Os parâmetros das equações de Fredlund e Xing (1994) e van Genutchen (1980) são apresentados na Tabela 6.10. Obteve-se um bom ajuste com o fator de correlação igual a 0,98 para Fredlund e Xing (1994). Para a equação de van Genutchen (1980) o fator de correlação obtido foi de 0,93.

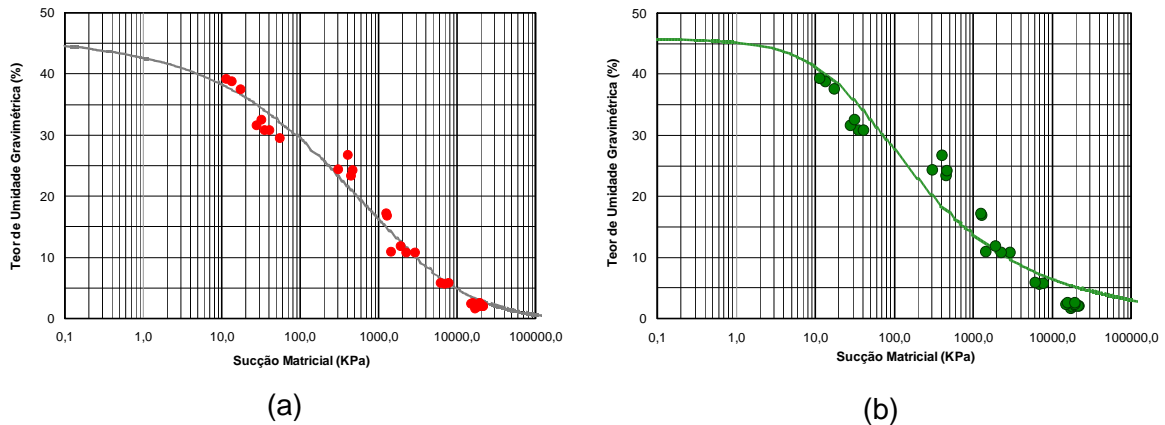


Figura 6.19 – Ajuste da curva de retenção do solo Vermelho. (a) Fredlund e Xing (1994). (b) van Genutchen (1980).

Tabela 6.10 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Vermelho.

Fredlund e Xing (1994)		van Genutchen (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}^m}\right]$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	45,80	θ_r	0,00
Cr	100000,00	θ_s	45,80
n	0,41	α	0,04
m	6,52	n	1,00
a	5000,06	m	0,33
R^2	0,98	R^2	0,93

O solo Vermelho aparenta possuir dois valores para a entrada de ar no solo. Deste modo, o ajuste da curva de sucção seria no formato bi-modal, como mostra a Figura 6.20. Com essa configuração, o solo Vermelho apresenta uma entrada de ar para o valor de sucção de 16 kPa e uma nova entrada de ar quando a sucção atinge o valor de 400 kPa. O ensaio de porosimetria de mercúrio identificou duas famílias de picos para o solo Vermelho, sendo o mais

pronunciado na região de diâmetro 2 μm e o segundo na região de 8 μm . Os solos Amarelo e Laranja também apresentam duas famílias de picos, e não apresentam a distribuição bi-modal na curva característica.

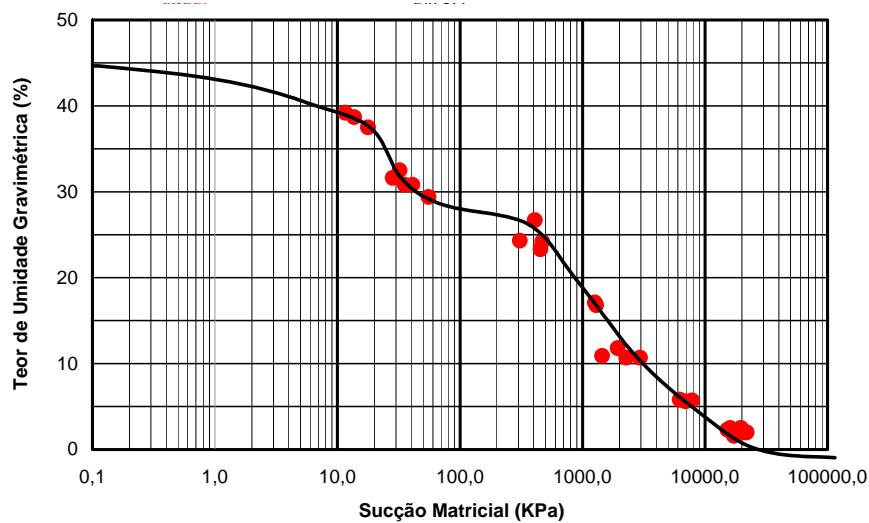


Figura 6.20 – Ajuste da curva de retenção do solo Vermelho em formato bimodal

Na Figura 6.21 são apresentados os ajustes obtidos para o solo Marrom. Os parâmetros das equações de Fredlund e Xing (1994) e van Genuchten (1980) são apresentados na Tabela 6.11. Para a proposta de Fredlund e Xing (1994) obteve-se um fator de correlação igual a 0,94 e para a equação de van Genuchten (1980) o fator de correlação obtido foi de 0,88.

Os ajustes não foram tão precisos porque a curva característica obtida tem três pontos de inflexão. Essa é uma característica que sugere a existência de uma distribuição tri-modal dos poros. Conforme determinado pelo ensaio de porosimetria de mercúrio (Capítulo 5), para o solo Marrom observa-se a ocorrência de três famílias de poros. A primeira família de poros, no limite entre mesoporos e microporos, apresenta diâmetro aproximadamente igual a 0,45 μm , e a segunda e a terceira, na região dos macroporos, de diâmetros aproximados iguais a 50 e 110 μm .

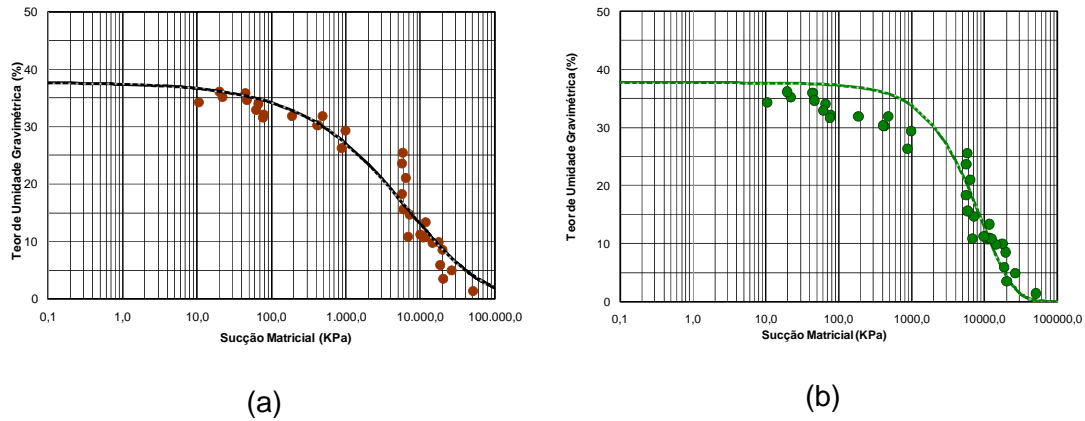


Figura 6.21 – Ajuste da curva de retenção do solo Marrom. (a) Fredlund e Xing (1994).
(b) van Genutchen (1980).

Tabela 6.11 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Marrom.

Fredlund e Xing (1994)		van Genutchen (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}^m} \right]$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	37,70	θ_r	0,0
Cr	99.708,46	θ_s	37,70
n	0,55	α	0,0
m	6,10	n	1,00
a	30.000,00	m	45,72
R^2	0,94	R^2	0,88

Na Figura 6.22 são apresentados os pontos de sucção obtidos do ensaio com o papel filtro e o ajuste proposto considerando três entradas de ar para o solo Marrom.

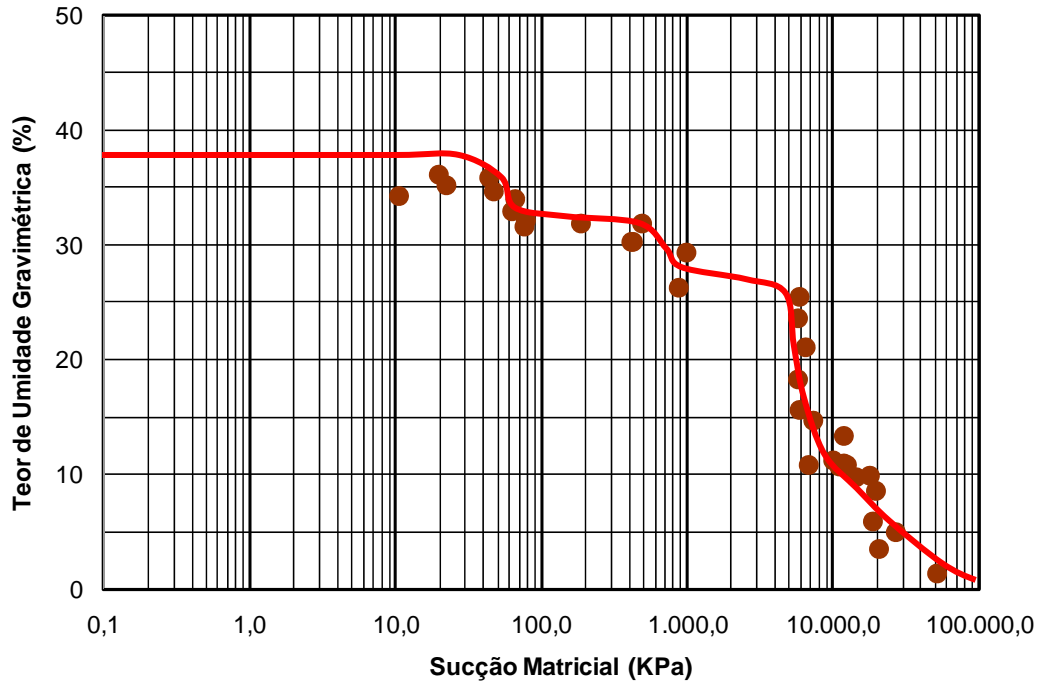


Figura 6.22 – Ajuste da curva de retenção do solo Marrom em formato trimodal.

Na Tabela 6.12 são resumidos alguns dados obtidos dos ajustes das curvas de retenção para a sucção matricial. A entrada de ar corresponde à sucção definida pela interseção da linha horizontal, traçada pela parte inicial da curva, e a linha tangente que passa pelo seu ponto de inflexão (ver Capítulo 2). Também está descrita a capacidade de sucção C , definida como sendo a inclinação da curva característica:

$$C = \frac{\Delta w}{\Delta \log(\text{sucção})}. \quad \text{(Equação 6.4)}$$

Tabela 6.12 – Valores característicos das curvas de retenção dos solos indeformados.

Solo	Teor de umidade residual (%)	Teor de umidade saturada (%)	Teor de umidade na entrada de ar (%)	Entrada de ar (kPa)	Capacidade de sucção (%)
Branco	1	30,1	26	17	10
Amarelo	4	37,2	30	7	8
Laranja	2,5	45,5	33	80	15
Vermelho	0,5	45,8	40,5 / 27,5	16 / 400	27,5 / 20
Marrom	5	37,7	36 / 31 / 25	40 / 500 / 5000	27 / 16 / 61

A Figura 6.23 apresenta a relação entre a capacidade de sucção e o limite de liquidez. Para o solo vermelho e para o solo Marrom, que tem dois e três segmentos lineares foi considerado o primeiro segmento para o traçado do gráfico. A capacidade de sucção é diretamente proporcional ao limite de liquidez das amostras. O coeficiente de correlação entre esses dois parâmetros é de 0,859. Os solos mais intemperizados, que apresentam maior teor de finos, possuem maior capacidade de sucção do que os solos menos intemperizados.

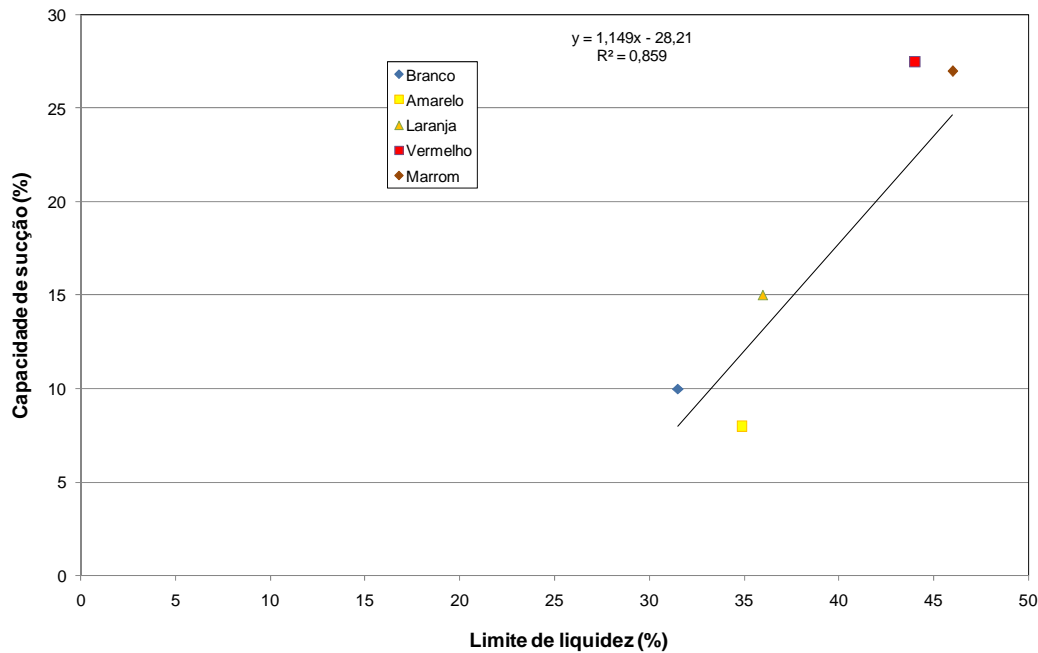


Figura 6.23 – Relação entre a capacidade de sucção e o limite de liquidez para as amostras indeformadas.

Para facilitar a comparação dos valores de sucção matricial e total de todos os solos, os valores foram reproduzidos em um único gráfico. Na Figura 6.24 estão apresentados os dados de sucção matricial em função do teor de umidade gravimétrica dos solos Marrom, Vermelho, Laranja, Amarelo e Branco. Na Figura 6.25 estão os dados de sucção total em função do teor de umidade.

O solo Branco apresenta níveis de sucção inferiores aos dos demais solos e o solo Marrom apresenta valores de sucção superiores, tendo os solos Vermelho, Laranja e Amarelo valores intermediários. Os maiores níveis de sucção do solo Marrom advêm da maior quantidade de partículas finas apresentada por esse solo, produto da elevada intemperização do mesmo.

Em campo, de acordo com os teores de umidade natural determinados para as amostras coletadas, o solo Marrom apresenta valor de sucção em torno

de 5.600 kPa, o solo Vermelho entre 100 e 400 kPa, os solos Laranja e Amarelo entre 10 e 40 kPa, e o solo Branco entre 100 e 200 kPa.

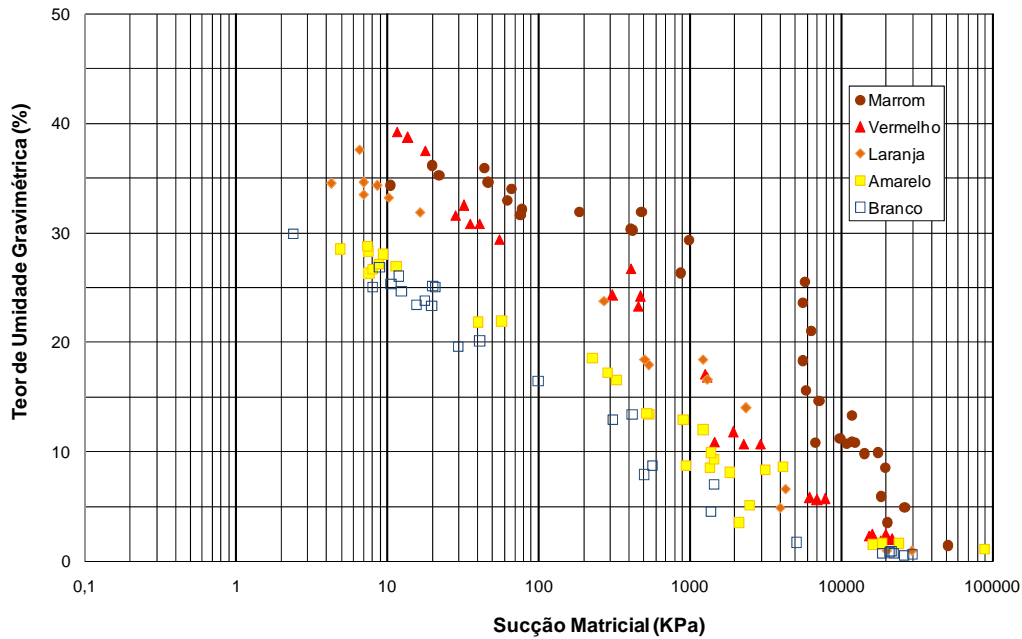


Figura 6.24 – Comparação entre os dados de sucção matricial dos solos indeformados.

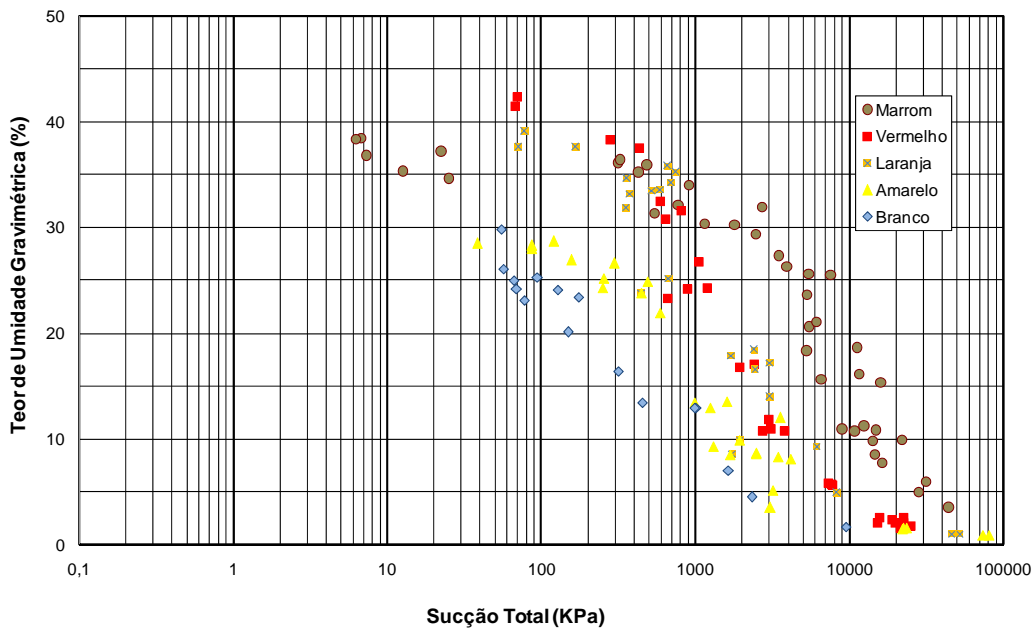


Figura 6.25 – Dados de sucção total dos solos indeformados.

Para se ter uma idéia do nível de sucção osmótica que poderia ser esperado neste material, foi feito um gráfico de onde simplesmente se subtraiu os valores de sucção matricial dos de sucção total apresentados para os solos estudados. Foram utilizadas apenas as amostras para as quais havia

determinações de sucção total e matricial. O resultado pode ser visto na Figura 6.26.

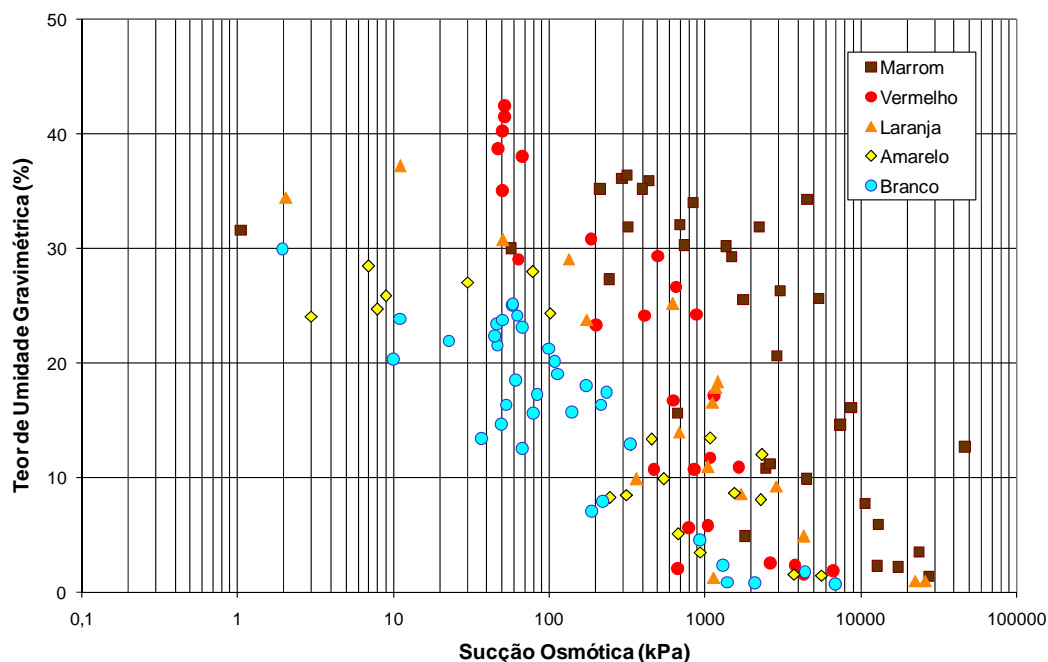


Figura 6.26 – Valores de sucção osmótica.

Observa-se na Figura 6.26 que os valores de sucção osmótica apresentam grande variação com o teor de umidade. Com a diminuição do teor de umidade ocorre um aumento da sucção osmótica para todos os solos. O solo Branco (pontos azuis) apresenta valores de sucção osmótica entre 2 e 7.000 kPa, o solo amarelo (pontos amarelos) apresenta variação deste mesmo parâmetro entre 3 e 5.600 kPa. Para o solo Laranja (pontos laranjas) os valores de sucção osmótica encontram-se entre 2 e 26.000 kPa, enquanto a variação para o solo Vermelho (pontos vermelhos) situa-se entre 47 e 6.800 kPa. O solo Marrom (pontos marrons) apresenta valores para a sucção osmótica entre 1 e 47.000 kPa.

De acordo com os solos do perfil estudado, o aumento do intemperismo parece aumentar a sucção osmótica. A sucção osmótica é função da quantidade de sais presentes no solo. De acordo com as análises químicas realizadas nos solos estudados, o solo Branco apresenta em torno de 20 mg/l de cloreto, enquanto que o solo Marrom apresenta em torno de 5 mg/l (ver Figura 6.36), mas a sucção osmótica do solo Marrom é superior à do solo Branco. No entanto, os cloretos no solo Branco, solo pouco intemperizado, podem estar precipitados e no solo Marrom, dissolvidos. O solo Laranja, que também apresenta altos teores de sucção osmótica tem em torno de 23 mg/l de cloretos.

Além da obtenção das curvas características, o estabelecimento de relações entre índices físicos, obtidos dos corpos-de-prova utilizados para a determinação da sucção, proporcionou dados interessantes sobre o comportamento dos solos estudados. Nas tabelas 6.13 a 6.17 são apresentados os índices físicos dos corpos-de-prova utilizados para a determinação das curvas características. Vale ressaltar que cada determinação de sucção foi realizada em um corpo-de-prova diferente. Da Figura 6.27 à Figura 6.31 são apresentadas as variações do índice de vazios com o teor de umidade e com a sucção matricial dos solos Branco, Amarelo, Laranja, Vermelho e Marrom. Embora se note a tendência da diminuição do índice de vazios com o teor de umidade e com o aumento da sucção matricial, a dispersão dos parâmetros não permite identificar qual seria um limite de contração dos solos.

Além da heterogeneidade dos materiais estudados, a dificuldade da determinação da geometria dos corpos-de-prova, devido à existência de grãos maiores e conseqüente rugosidade das paredes dos corpos-de-prova, resulta em índices físicos dispersos. Este fato é também majorado pelas pequenas dimensões dos corpos-de-prova.

A maior dispersão ocorre no solo Branco. O índice de vazios desse solo para teores de umidade inferiores a 5% varia entre 0,523 e 1,026. Os outros solos apresentam menor variação. Para a mesma faixa de teor de umidade o solo Amarelo apresenta variação do índice de vazios entre 0,9 e 1,1, tendo um corpo-de-prova com um valor de índice de vazios igual a 1,5, notadamente fora da tendência desse solo. Para o solo Laranja a variação está entre 1,1 e 1,32. Nesse solo, no teor de umidade 18,4% há uma amostra com índice de vazios de apenas 0,6, essa também notadamente fora da tendência do solo. Para o solo Vermelho o índice de vazios, em baixos teores de umidade situa-se entre 0,7 e 1,0. E para o solo Marrom em torno de 1,0, com um corpo-de-prova com 0,6.

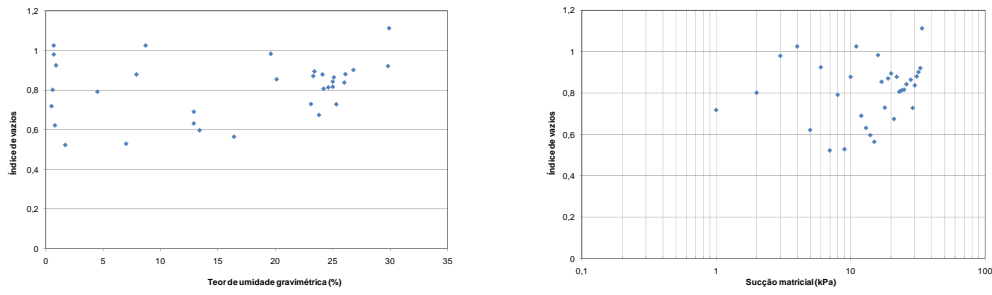


Figura 6.27 – Variação dos índices físicos para o solo Branco.

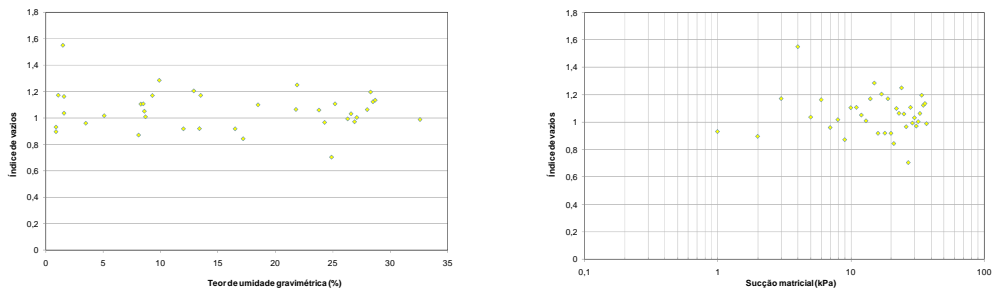


Figura 6.28 – Variação dos índices físicos para o solo Amarelo.

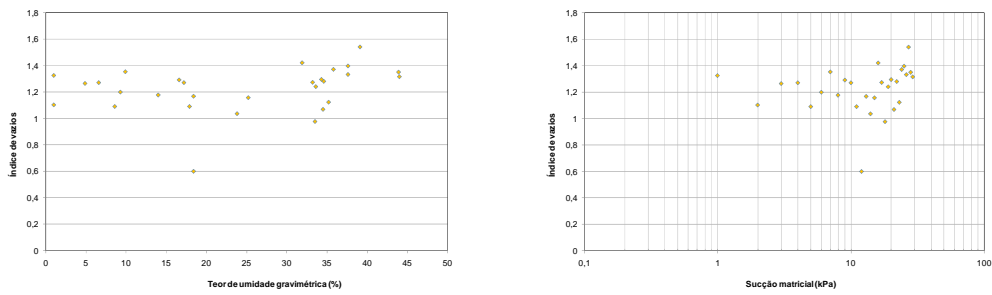


Figura 6.29 – Variação dos índices físicos para o solo Laranja.

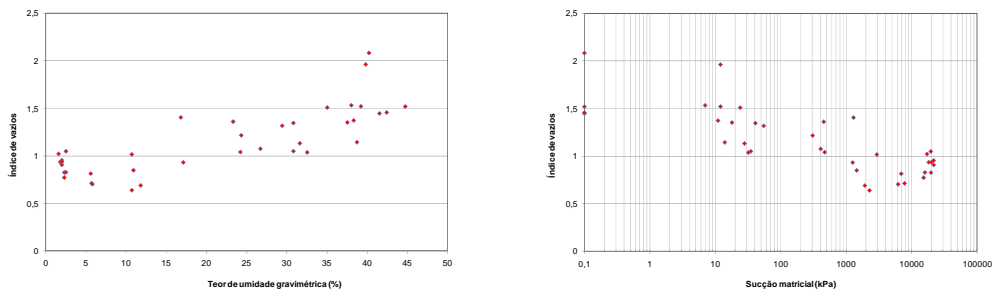


Figura 6.30 – Variação dos índices físicos para o solo Vermelho.

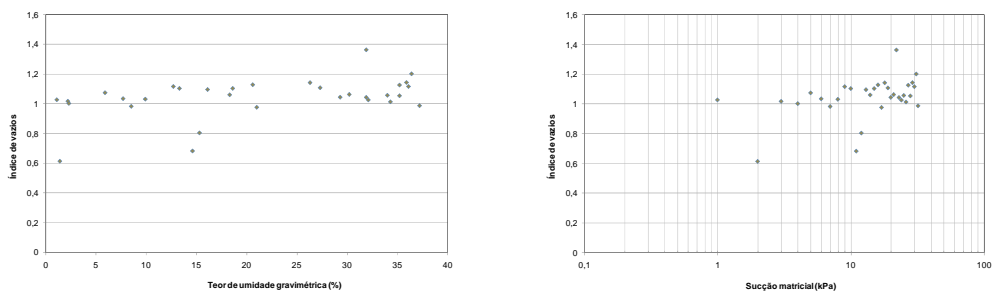


Figura 6.31 – Variação dos índices físicos para o solo Marrom.

Tabela 6.13 – Índices físicos obtidos dos corpos-de-prova do solo Branco utilizados na determinação da curva característica.

	W grav. (%)	W vol. (%)	Sucção Total (kPa)	Sucção Matricial (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	e	n	S (%)
1	0,50	0,88	-	26129	1,578	1,571	2,700	0,719	0,418	1,88
2	0,60	1,01	-	29896	1,508	1,499	2,700	0,802	0,445	2,02
3	0,70	1,07	-	18696	1,373	1,363	2,700	0,980	0,495	1,93
4	0,70	1,05	-	22344	1,342	1,333	2,700	1,026	0,506	1,84
4	0,80	1,50	-	21056	1,678	1,665	2,700	0,622	0,383	3,47
5	0,90	1,42	-	21549	1,415	1,403	2,700	0,925	0,480	2,63
6	1,70	3,39	9484	5108	1,803	1,772	2,700	0,523	0,344	8,77
6	4,50	7,62	2331	1392	1,574	1,507	2,700	0,792	0,442	15,34
7	7,00	13,89	1638	1449	1,890	1,766	2,700	0,529	0,346	35,74
8	7,90	12,75	-	502	1,550	1,437	2,700	0,879	0,468	24,25
8	8,70	13,03	-	570	1,448	1,333	2,700	1,026	0,506	22,89
9	12,90	23,14	987	313	1,803	1,597	2,700	0,691	0,409	50,41
10	12,90	23,98	987	-	1,868	1,654	2,700	0,632	0,387	55,09
10	13,40	25,46	455	417	1,917	1,691	2,700	0,597	0,374	60,63
11	16,40	31,80	315	100	2,009	1,726	2,700	0,565	0,361	78,42
12	19,60	29,97	-	30	1,627	1,361	2,700	0,984	0,496	53,76
12	20,10	32,87	150	41	1,748	1,455	2,700	0,855	0,461	63,47
13	23,10	40,51	77	-	1,921	1,561	2,700	0,730	0,422	85,44
14	23,30	37,78	-	20	1,779	1,443	2,700	0,871	0,465	72,24
14	23,40	37,46	174	16	1,758	1,425	2,700	0,895	0,472	70,59
15	23,80	43,11	-	18	1,996	1,612	2,700	0,675	0,403	95,24
16	24,10	38,92	127	-	1,783	1,437	2,700	0,879	0,468	74,05
16	24,20	40,63	69	-	1,856	1,494	2,700	0,807	0,447	80,99
17	24,60	41,15	-	12	1,855	1,489	2,700	0,814	0,449	81,62
18	25,00	41,75	67	8	1,858	1,486	2,700	0,817	0,450	82,65
18	25,00	41,14	-	21	1,831	1,465	2,700	0,843	0,458	80,03
19	25,10	40,82	-	20	1,811	1,447	2,700	0,865	0,464	78,31
20	25,30	44,39	94	11	1,957	1,562	2,700	0,729	0,422	93,70
20	26,00	42,93	-	12	1,851	1,469	2,700	0,838	0,456	83,82
21	26,10	42,10	56	-	1,810	1,436	2,700	0,881	0,468	80,02
22	26,80	42,75	-	9	1,800	1,420	2,700	0,902	0,474	80,23
22	29,80	47,07	55	-	1,825	1,406	2,700	0,921	0,479	87,38
23	29,90	42,92	-	2	1,660	1,278	2,700	1,113	0,527	72,52

Tabela 6.14 – Índices físicos obtidos dos corpos-de-prova do solo Amarelo utilizados na determinação da curva característica.

	$w_{\text{grav.}} (\%)$	$w_{\text{vol.}} (\%)$	Sucção Total (kPa)	Sucção Matricial (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	e	n	S (%)
1	0,90	1,27	-	847938	1,420	1,407	2,718	0,931	0,482	2,63
2	0,90	1,29	-	103870	1,447	1,434	2,718	0,896	0,473	2,73
3	1,10	1,38	350917	89188	1,265	1,251	2,718	1,172	0,540	2,55
4	1,50	1,60	-	16343	1,082	1,066	2,718	1,550	0,608	2,63
5	1,60	2,14	22440	18714	1,356	1,335	2,718	1,036	0,509	4,20
6	1,60	2,01	23418	24358	1,276	1,256	2,718	1,163	0,538	3,74
7	3,50	4,85	3060	-	1,435	1,387	2,718	0,960	0,490	9,91
8	5,10	6,87	3169	2490	1,416	1,347	2,718	1,017	0,504	13,63
9	8,10	11,77	4128	1850	1,571	1,453	2,718	0,871	0,465	25,28
10	8,30	10,72	3422	-	1,399	1,291	2,718	1,105	0,525	20,42
11	8,50	10,97	1680	1365	1,400	1,290	2,718	1,107	0,525	20,88
12	8,60	11,39	2471	-	1,439	1,325	2,718	1,051	0,513	22,23
13	8,70	11,77	2488	943	1,471	1,353	2,718	1,009	0,502	23,44
14	9,30	11,65	1312	1461	1,369	1,253	2,718	1,170	0,539	21,61
15	9,90	11,77	1937	1387	1,307	1,189	2,718	1,285	0,562	20,93
16	12,00	17,00	3564	1229	1,587	1,417	2,718	0,918	0,479	35,52
17	12,90	15,90	1244	911	1,392	1,233	2,718	1,205	0,546	29,11
18	13,40	18,98	991	538	1,606	1,417	2,718	0,919	0,479	39,64
19	13,50	16,90	1608	521	1,421	1,252	2,718	1,171	0,539	31,34
20	16,50	23,38	-	329	1,651	1,417	2,718	0,918	0,479	48,85
21	17,20	25,37	-	287	1,729	1,475	2,718	0,843	0,457	55,46
22	18,50	23,96	-	228	1,534	1,295	2,718	1,099	0,524	45,75
23	21,80	28,71	-	40	1,604	1,317	2,718	1,064	0,515	55,71
24	21,90	26,46	588	57	1,473	1,208	2,718	1,250	0,555	47,63
25	23,80	31,41	447	-	1,634	1,320	2,718	1,060	0,514	61,04
26	24,30	33,59	250	-	1,718	1,382	2,718	0,966	0,491	68,36
27	24,90	39,72	487	-	1,992	1,595	2,718	0,704	0,413	96,12
28	25,20	32,50	253	-	1,615	1,290	2,718	1,107	0,525	61,86
29	26,30	35,87	-	8	1,722	1,364	2,718	0,993	0,498	71,98
30	26,60	35,57	298	8	1,693	1,337	2,718	1,032	0,508	70,02
31	26,90	37,09	156	12	1,750	1,379	2,718	0,971	0,493	75,30
32	27,10	36,75	-	9	1,723	1,356	2,718	1,004	0,501	73,33
33	28,00	36,88	86	9	1,686	1,317	2,718	1,063	0,515	71,57
34	28,30	35,02	86	8	1,588	1,238	2,718	1,196	0,545	64,30
35	28,50	36,48	38	5	1,645	1,280	2,718	1,123	0,529	68,95
36	28,70	36,53	120	7	1,638	1,273	2,718	1,135	0,532	68,70
37	32,60	44,58	-	0	1,813	1,367	2,718	0,988	0,497	89,72

Tabela 6.15 – Índices físicos obtidos dos corpos-de-prova do solo Laranja utilizados na determinação da curva característica.

	$w_{\text{grav.}} (\%)$	$w_{\text{vol.}} (\%)$	Sucção Total (kPa)	Sucção Matricial (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	e	n	S (%)
1	1,00	1,19	45883	19935	1,201	1,189	2,764	1,325	0,570	2,09
2	1,00	1,31	51862	29346	1,327	1,314	2,764	1,103	0,525	2,51
4	4,90	5,98	8304	3968	1,280	1,220	2,764	1,265	0,559	10,71
5	6,60	8,03	-	4297	1,298	1,217	2,764	1,271	0,560	14,35
6	8,60	11,37	1745	-	1,436	1,323	2,764	1,090	0,521	21,81
7	9,30	11,69	6104	-	1,374	1,257	2,764	1,199	0,545	21,44
8	9,90	11,63	1928	-	1,291	1,174	2,764	1,353	0,575	20,22
10	14,00	17,77	3045	2363	1,447	1,269	2,764	1,177	0,541	32,86
11	16,60	20,03	2433	1309	1,407	1,207	2,764	1,291	0,563	35,55
13	17,20	20,93	3059	-	1,426	1,217	2,764	1,271	0,560	37,39
14	17,90	23,67	1714	535	1,559	1,323	2,764	1,090	0,521	45,40
15	18,40	19,81	2423	505	2,028	1,713	2,764	0,600	0,375	84,76
16	18,40	23,45	-	1219	1,509	1,275	2,764	1,168	0,539	43,52
17	23,80	32,31	448	272	1,681	1,358	2,764	1,036	0,509	63,50
18	25,20	32,29	670	-	1,604	1,281	2,764	1,157	0,536	60,20
23	31,90	36,42	352	17	1,506	1,142	2,764	1,421	0,587	62,04
24	33,20	40,37	377	10	1,620	1,216	2,764	1,273	0,560	72,08
25	33,50	46,82	524	7	1,866	1,398	2,764	0,977	0,494	94,73
26	33,60	41,46	590	-	1,648	1,234	2,764	1,240	0,554	74,88
27	34,30	41,31	688	9	1,618	1,204	2,764	1,295	0,564	73,21
28	34,50	46,10	-	4	1,797	1,336	2,764	1,069	0,517	89,23
29	34,60	41,94	358	7	1,631	1,212	2,764	1,280	0,561	74,69
30	35,20	45,82	749	-	1,760	1,302	2,764	1,123	0,529	86,61
31	35,80	41,73	662	-	1,583	1,166	2,764	1,371	0,578	72,15
33	37,60	43,36	71	7	1,587	1,153	2,764	1,397	0,583	74,41
34	37,60	44,56	167	-	1,631	1,185	2,764	1,332	0,571	78,00
35	39,10	42,54	78	-	1,513	1,088	2,764	1,540	0,606	70,15
36	43,90	51,64	-	-	1,693	1,176	2,764	1,350	0,574	89,90
37	44,00	52,54	-	-	1,719	1,194	2,764	1,315	0,568	92,50

Tabela 6.16 – Índices físicos obtidos dos corpos-de-prova do solo Vermelho utilizados na determinação da curva característica.

	$w_{\text{grav.}} (\%)$	$w_{\text{vol.}} (\%)$	Sucção Total (kPa)	Sucção Matricial (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	e	n	S (%)
1	1,6	1,79	21520	17220	1,372	1,351	2,731	1,022	0,505	4,27
2	1,8	2,1	25022	18272	1,436	1,411	2,731	0,936	0,483	5,25
3	2	2,31	22486	21807	1,425	1,397	2,731	0,954	0,488	5,72
4	2	2,33	19872	20107	1,439	1,410	2,731	0,936	0,484	5,83
5	2	2,37	15244	21790	1,460	1,432	2,731	0,907	0,476	6,02
6	2,3	3,44	-	19770	1,529	1,495	2,731	0,827	0,453	7,59
7	2,3	3,54	19047	15267	1,575	1,540	2,731	0,774	0,436	8,12
8	2,5	3,74	15744	16024	1,531	1,494	2,731	0,828	0,453	8,24
9	2,5	2,75	22294	19644	1,366	1,333	2,731	1,049	0,512	6,51
10	5,6	8,43	7757	6960	1,589	1,505	2,731	0,815	0,449	18,77
11	5,7	9,08	7684	7833	1,684	1,593	2,731	0,714	0,417	21,80
12	5,8	9,29	7262	6221	1,695	1,602	2,731	0,705	0,413	22,48
13	10,7	14,49	3810	2942	1,499	1,354	2,731	1,017	0,504	28,74
14	10,7	17,81	2745	2276	1,843	1,665	2,731	0,640	0,390	45,63
15	10,9	16,09	3094	1448	1,637	1,476	2,731	0,850	0,460	35,02
16	11,8	19,06	3011	1937	1,806	1,615	2,731	0,691	0,409	46,66
17	16,8	19,09	1928	1296	1,327	1,136	2,731	1,404	0,584	32,68
18	17,1	24,17	2425	1262	1,655	1,413	2,731	0,932	0,482	50,09
19	23,3	26,96	658	455	1,427	1,157	2,731	1,360	0,576	46,80
20	24,2	32,38	886	470	1,662	1,338	2,731	1,041	0,510	63,50
21	24,3	29,96	1200	308	1,532	1,233	2,731	1,216	0,549	54,58
22	26,7	35,12	1060	409	1,667	1,316	2,731	1,076	0,518	67,79
24	29,4	34,64	558	55	1,525	1,179	2,731	1,317	0,568	60,95
25	30,8	41,05	-	35	1,743	1,333	2,731	1,049	0,512	80,15
26	30,8	35,86	643	41	1,523	1,164	2,731	1,345	0,574	62,52
27	31,6	40,48	811	28	1,686	1,281	2,731	1,132	0,531	76,26
28	32,5	43,56	588	32	1,776	1,340	2,731	1,037	0,509	85,55
29	35	38,11	-	24	1,470	1,089	2,731	1,508	0,601	63,38
30	37,5	43,57	435	18	1,597	1,161	2,731	1,351	0,575	75,78
31	38	41	-	7	1,489	1,079	2,731	1,531	0,605	67,78
32	38,3	44,1	281	11	1,592	1,151	2,731	1,372	0,578	76,21
33	38,7	49,29	-	14	1,767	1,274	2,731	1,144	0,534	92,41
34	39,2	42,5	-	12	1,509	1,084	2,731	1,519	0,603	70,47
35	39,8	36,73	205	12	1,290	0,923	2,731	1,960	0,662	55,47
36	40,2	35,65	63	0	1,243	0,887	2,731	2,080	0,675	52,77
37	41,5	46,35	68	0	1,580	1,117	2,731	1,446	0,591	78,39
38	42,4	47,12	69	0	1,583	1,112	2,731	1,457	0,593	79,49
39	44,7	48,47	-	0	1,569	1,084	2,731	1,519	0,603	80,38

Tabela 6.17 – Índices físicos obtidos dos corpos-de-prova do solo Marrom utilizados na determinação da curva característica.

	$w_{\text{grav.}} (\%)$	$w_{\text{vol.}} (\%)$	Sucção Total (kPa)	Sucção Matricial (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	e	n	S (%)
1	1,10	1,47	-	298040998	1,347	1,332	2,700	1,027	0,507	2,89
2	1,40	2,35	23526	51201	1,699	1,675	2,700	0,612	0,380	6,18
3	2,20	2,94	25435	-	1,368	1,339	2,700	1,017	0,504	5,84
4	2,30	3,10	22569	-	1,380	1,349	2,700	1,002	0,501	6,20
5	5,90	7,68	31645	18555	1,379	1,302	2,700	1,074	0,518	14,84
6	7,70	10,22	16346	-	1,430	1,327	2,700	1,034	0,508	20,11
7	8,50	11,58	14644	19714	1,478	1,362	2,700	0,982	0,495	23,38
8	9,90	13,16	22152	17608	1,461	1,329	2,700	1,031	0,508	25,92
10	12,70	16,21	-	14868	1,438	1,276	2,700	1,116	0,527	30,73
11	13,30	17,07	-	11806	1,454	1,283	2,700	1,104	0,525	32,52
12	14,60	23,45	7201	14647	1,841	1,606	2,700	0,681	0,405	57,90
13	15,30	22,91	16031	12149	1,726	1,497	2,700	0,803	0,445	51,42
14	16,10	20,74	11604	-	1,496	1,288	2,700	1,096	0,523	39,68
15	18,30	23,99	5295	5644	1,551	1,311	2,700	1,060	0,515	46,61
16	18,60	23,88	11310	-	1,523	1,284	2,700	1,103	0,524	45,53
17	20,60	26,13	5477	2557	1,530	1,269	2,700	1,128	0,530	49,29
18	21,00	28,70	6111	6374	1,653	1,366	2,700	0,976	0,494	58,10
20	26,30	33,15	3926	875	1,592	1,261	2,700	1,142	0,533	62,18
21	27,30	34,96	3497	-	1,630	1,281	2,700	1,108	0,526	66,50
22	29,30	38,70	2489	988	1,708	1,321	2,700	1,044	0,511	75,75
23	30,20	39,52	1801	421	1,704	1,309	2,700	1,063	0,515	76,69
24	31,90	36,44	2726	483	1,507	1,142	2,700	1,364	0,577	63,15
25	31,90	42,16	-	187	1,743	1,322	2,700	1,043	0,511	82,58
26	32,10	42,77	776	78	1,760	1,332	2,700	1,026	0,507	84,44
27	34,00	44,63	915	66	1,759	1,313	2,700	1,057	0,514	86,86
28	34,30	46,00	-	11	1,801	1,341	2,700	1,013	0,503	91,38
29	35,20	44,71	235	22	1,717	1,270	2,700	1,126	0,530	84,41
30	35,20	46,26	428	26	1,777	1,314	2,700	1,054	0,513	90,15
31	35,90	45,21	486	44	1,712	1,259	2,700	1,144	0,534	84,74
33	36,10	46,06	316	20	1,737	1,276	2,700	1,116	0,527	87,34
34	36,40	44,64	324	7	1,673	1,226	2,700	1,202	0,546	81,77
35	37,20	50,55	-	0	1,864	1,359	2,700	0,987	0,497	100,00

6.1.1.2. Amostras Compactadas

As curvas características de sucção matricial para as amostras compactadas foram determinadas pelo método do papel filtro. O mesmo procedimento utilizado para as amostras indeformadas foi empregado nas

amostras compactadas. Para esses ensaios foram utilizados os corpos-de-prova preparados para os ensaios de ruptura a compressão simples. As amostras foram compactadas no teor de umidade ótimo em um cilindro de CBR. A compactação foi realizada em cinco camadas, com 12 golpes do soquete em cada camada. Após a extração do solo do cilindro, foram moldados corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A partir de cada cilindro compactado eram moldados 4 corpos-de-prova. No total foram moldados 12 corpos-de-prova para cada cor de solo (Branco, Amarelo, Laranja, Vermelho e Marrom). Para a obtenção de toda a faixa de sucção, os corpos-de-prova foram secos ou umedecidos a partir da umidade de compactação. Em cada corpo-de-prova foram colocados 3 papéis filtro em contato direto com o solo. Após 14 dias de estabilização, a sucção era determinada a partir das curvas de calibração do papel filtro *Whatman no. 42* sugeridas por Chandler *et al.* (1992).

Nas figuras 6.32 a 6.35 são apresentadas as curvas obtidas para os solos compactados e o ajuste fornecido pelas propostas de Fredlund e Xing (1994) e van Genuchten (1980). Os parâmetros de ajuste das equações das curvas de retenção das duas propostas citadas foram determinados pelo método dos mínimos quadrados de modo a obter a melhor correlação entre os dados experimentais e a curva teórica. O teor de umidade saturado foi obtido a partir de correlação teórica entre o grau de saturação, índice de vazios e peso específico real dos grãos. O peso específico real dos grãos foi determinado em laboratório (ver Capítulo 5) e o índice de vazios foi obtido dos corpos-de-prova compactados utilizados nos ensaios de compressão simples e de compressão diametral (ver Capítulo 7).

Tabela 6.18 – Teor de umidade gravimétrica médio para o grau de saturação igual a 100% para os solos estudados compactados.

Solo	Grau de Saturação (%)	Índice de Vazios	Peso Específico Real dos Grãos	Teor de Umidade para S=100% (%)
Branco 2.4056.07	100	0,71	2,699	26,31
Amarelo 2.4058.07	100	0,94	2,749	34,19
Laranja 2.4057.07	100	0,98	2,741	35,75
Vermelho 2.4059.07	100	1,14	2,807	40,61
Marrom 2.4060.07	100	0,89	2,739	32,49

As características dos corpos-de-prova compactados utilizados na determinação das curvas características são resumidas nas Tabelas 6.19 a 6.23.

Tabela 6.19 – Índices físicos obtidos dos corpos-de-prova compactados do solo Branco utilizados na determinação da curva característica.

	Amostra	W _{grav.} (%)	W _{vol.} (%)	Sucção matricial (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	e	S (%)
1	2.4056.07	4,33	7,88	3746	18,62	17,85	2,699	0,48	24,37
2		4,45	8,04	1844	18,52	17,73	2,699	0,49	24,50
3		6,47	11,62	972	18,75	17,61	2,699	0,50	34,93
4		6,67	11,66	1748	18,30	17,16	2,699	0,54	33,32
4		7,83	13,94	685	18,85	17,48	2,699	0,51	41,42
5		9,00	15,63	916	18,57	17,04	2,699	0,55	44,17
6		11,32	20,36	283	19,64	17,65	2,699	0,50	61,08
6		11,33	20,44	489	19,70	17,69	2,699	0,50	61,18
7		13,28	24,08	173	20,15	17,78	2,699	0,49	73,17
8		14,93	26,80	115	20,23	17,61	2,699	0,50	80,61
8		20,01	34,60	27	20,35	16,96	2,699	0,56	96,45
9		22,32	36,41	12	19,58	16,01	2,699	0,65	92,67
10	22,52	37,70	11	20,12	16,42	2,699	0,61	99,66	
10	23,18	37,87	8	19,74	16,03	2,699	0,65	96,27	
11	23,89	39,18	9	19,93	16,09	2,699	0,65	99,20	
12	24,08	38,92	6	19,67	15,86	2,699	0,67	97,00	

Tabela 6.20 – Índices físicos obtidos dos corpos-de-prova compactados do solo Amarelo utilizados na determinação da curva característica.

	Amostra	W _{grav.} (%)	W _{vol.} (%)	Sucção matricial (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	e	S (%)
1	2.4058.07	0,00	0,00	1000010	17,21	17,21	2,749	0,57	0,00
2		0,90	1,56	70952	17,17	17,01	2,749	0,59	4,19
3		0,90	1,57	72123	17,27	17,12	2,749	0,58	4,27
4		3,38	5,98	14225	17,92	17,33	2,749	0,56	16,61
5		5,10	8,90	7322	17,98	17,11	2,749	0,58	24,17
6		7,00	12,15	3918	18,22	17,03	2,749	0,58	33,18
7		8,44	14,21	2549	17,92	16,52	2,749	0,63	36,83
8		9,96	16,77	1658	18,15	16,51	2,749	0,63	43,48
9		10,40	17,45	1473	18,17	16,46	2,749	0,64	44,67
10		10,80	17,93	1335	18,05	16,29	2,749	0,66	44,99
11		14,70	24,89	462	19,06	16,61	2,749	0,62	65,18
12		15,19	25,60	404	19,04	16,53	2,749	0,63	66,27
13		17,20	29,13	229	19,47	16,61	2,749	0,62	76,27
14		18,47	31,06	160	19,55	16,50	2,749	0,63	80,58
15		19,70	32,56	112	19,41	16,21	2,749	0,66	82,06
16		21,82	35,53	56	19,46	15,97	2,749	0,69	86,94
17		23,23	37,97	33	19,76	16,03	2,749	0,68	93,92
18		26,04	41,13	10	19,53	15,50	2,749	0,74	96,73
19		29,21	44,19	1	19,18	14,84	2,749	0,82	97,94
20		29,68	44,84	1	19,22	14,82	2,749	0,82	99,52

Tabela 6.21 – Índices físicos obtidos dos corpos-de-prova compactados do solo Laranja utilizados na determinação da curva característica.

	Amostra	W _{grav.} (%)	W _{vol.} (%)	Sucção matricial (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	e	S (%)
1	2.4057.07	3,30	5,48	4659	16,84	16,30	2,739	0,65	14,02
2		4,40	7,22	3626	16,47	15,77	2,739	0,7	17,22
3		8,00	13,38	1894	17,72	16,41	2,739	0,64	34,16
4		9,10	14,99	1591	16,92	15,52	2,739	0,73	33,98
5		10,30	16,82	1323	17,67	16,03	2,739	0,68	41,35
6		11,13	18,11	1173	17,74	15,97	2,739	0,68	44,81
7		12,81	21,28	909	18,39	16,30	2,739	0,65	53,98
8		16,46	26,47	513	18,38	15,78	2,739	0,70	64,39
9		18,03	28,47	401	18,28	15,49	2,739	0,73	67,66
10		25,42	40,04	78	19,38	15,45	2,739	0,74	94,09
11		28,21	43,07	24	19,20	14,98	2,739	0,79	97,81
12		30,71	45,16	1	18,86	14,43	2,739	0,86	97,80
13		31,99	46,11	0	18,67	14,14	2,739	0,90	97,34
14		32,67	46,78	0	18,63	14,05	2,739	0,91	98,34

Tabela 6.22 – Índices físicos obtidos dos corpos-de-prova compactados do solo Vermelho utilizados na determinação da curva característica.

	Amostra	W _{grav.} (%)	W _{vol.} (%)	Sucção matricial (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	e	S (%)
1	2.4059.07	4,12	6,70	25424	16,62	15,96	2,807	0,73	15,82
2		7,07	11,43	10843	16,97	15,85	2,807	0,74	26,83
3		11,21	17,57	4182	17,11	15,38	2,807	0,79	39,81
4		15,15	24,10	1832	17,97	15,61	2,807	0,76	55,94
5		19,18	29,45	794	17,95	15,07	2,807	0,83	64,85
6		20,87	32,20	553	18,30	15,14	2,807	0,82	71,42
7		25,21	38,42	204	18,72	14,95	2,807	0,84	84,22
8		28,51	41,74	84	18,46	14,36	2,807	0,92	86,98
9		31,82	45,21	28	18,37	13,94	2,807	0,98	91,14
10		35,68	48,08	5	17,93	13,22	2,807	1,08	92,73
11		38,59	51,63	0	18,19	13,12	2,807	1,10	98,47
12		39,00	51,74	0	18,09	13,01	2,807	1,12	97,74

Tabela 6.23 – Índices físicos obtidos dos corpos-de-prova compactados do solo Marrom utilizados na determinação da curva característica.

	Amostra	W grav. (%)	W vol. (%)	Sucção matricial (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ρ_{real} (g/cm ³)	e	S (%)
1	2.4060.07	3,60	5,90	223782	16,66	16,08	2,740	0,67	14,72
2		5,40	8,91	129439	17,07	16,19	2,740	0,66	22,42
3		9,70	15,70	39144	17,42	15,88	2,740	0,69	38,52
4		9,90	15,91	37037	17,32	15,76	2,740	0,70	38,74
5		12,60	20,12	17242	17,64	15,67	2,740	0,72	47,92
6		14,81	23,44	8890	17,82	15,52	2,740	0,73	55,58
7		15,59	24,49	6991	17,81	15,41	2,740	0,74	57,71
8		19,01	29,80	2200	18,30	15,38	2,740	0,75	69,41
9		20,24	31,96	1388	18,63	15,49	2,740	0,73	75,94
10		23,62	37,17	330	19,08	15,44	2,740	0,74	87,41
11		26,73	41,63	55	19,36	15,28	2,740	0,76	96,33
12		27,54	41,99	30	19,07	14,95	2,740	0,80	94,30
13		28,42	42,82	14	18,98	14,78	2,740	0,82	94,93
14		28,64	43,50	11	19,17	14,90	2,740	0,80	98,06
15		28,90	43,52	9	19,04	14,77	2,740	0,82	96,54
16		31,60	45,89	0	18,75	14,25	2,740	0,89	97,23

Os dados de sucção do solo Branco são apresentados na Figura 6.32. Tanto a proposta de Fredlund e Xing quanto a de van Genutchen se ajustaram bem aos dados experimentais resultando em coeficiente de correlação igual a 0,96 (Tabela 6.24). A principal diferença entre as duas propostas está na faixa de sucção acima de 10.000 kPa, onde para o mesmo teor de umidade a proposta de van Genutchen apresenta maiores valores de sucção.

A mesma observação vale para os dados de sucção do solo Amarelo compactado apresentados na Figura 6.33. Nesse caso os coeficientes de correlação foram de 0,97 e 0,96 para as propostas de Fredlund e Xing e van Genutchen, respectivamente (Tabela 6.25).

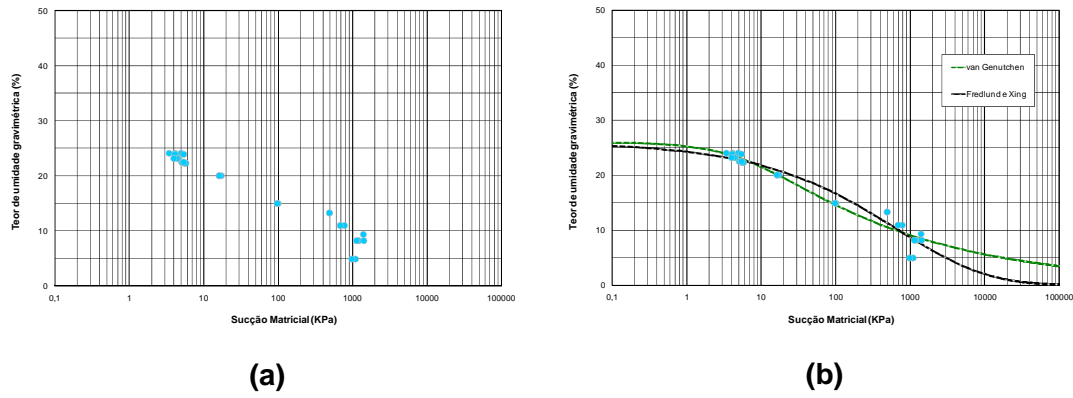


Figura 6.32 – Curva de retenção de sucção matricial do solo Branco compactado. (a) Método do papel filtro. (b) Ajuste por Fredlund e Xing (1994) e van Genutchen (1980).

Tabela 6.24 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Branco compactado.

Fredlund e Xing (1994)		van Genutchen (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}^m} \right]$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	26,31	θ_r	0,0
Cr	19977,88	θ_s	26,31
n	0,41	α	0,14
m	11,24	n	1,0
a	19977,88	m	0,21
R^2	0,96	R^2	0,96

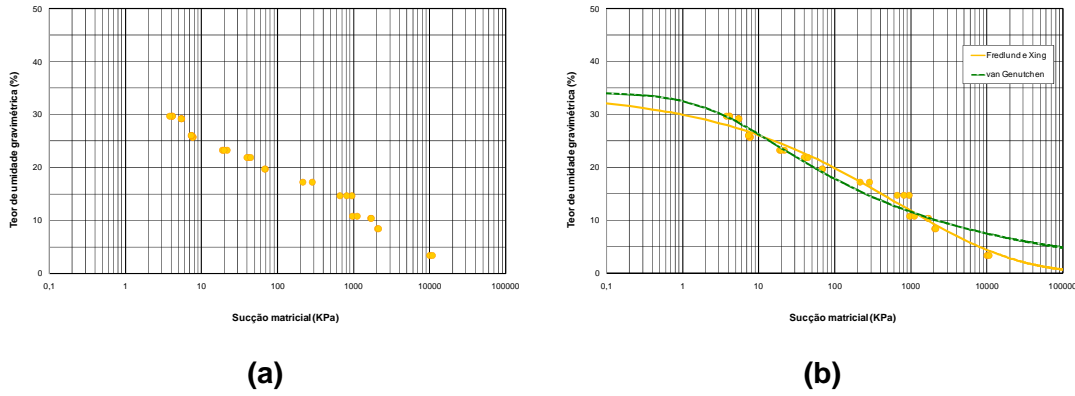


Figura 6.33 – Curva de retenção de sucção matricial do solo Amarelo compactado. (a) Método do papel filtro. (b) Ajuste por Fredlund e Xing (1994) e van Genutchen (1980).

Tabela 6.25 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Amarelo compactado.

Fredlund e Xing (1994)		van Genutchen (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}} \right]^m$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	34,19	θ_r	0,0
Cr	19977,86	θ_s	34,19
n	0,32	α	0,30
m	8,42	n	1,0
a	19977,86	m	0,19
R^2	0,97	R^2	0,96

OS dados da curva de retenção para o solo Laranja são apresentados na Figura 6.34. Esse solo foi o que apresentou o menor coeficiente de correlação entre os dados de laboratório e as equações de ajuste. Para a proposta de Fredlund e Xing o coeficiente de correlação foi de 0,95 e para a proposta de van Genutchen o fator de correlação foi de 0,93 (Tabela 6.26). O mesmo fato, de menor coeficiente de correlação nas equações de ajuste para os dados de sucção, aconteceu para a curva de sucção do solo Laranja indeformado.

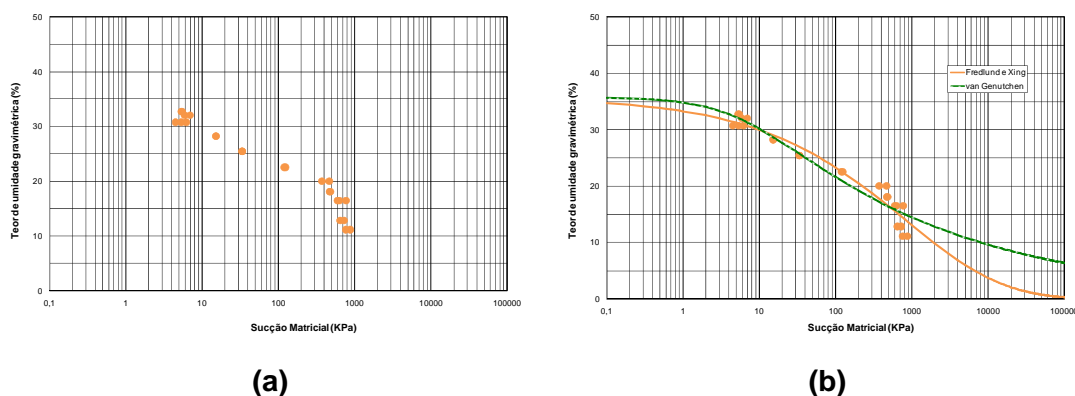


Figura 6.34 – Curva de retenção de sucção matricial do solo Laranja compactado. (a) Método do papel filtro. (b) Ajuste por Fredlund e Xing (1994) e van Genutchen (1980).

Tabela 6.26 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Laranja compactado.

Fredlund e Xing (1994)		van Genutchen (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}^m} \right]$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	35,75	θ_r	0,0
Cr	19977,88	θ_s	35,76
n	0,39	α	0,16
m	9,72	n	1,0
a	19977,88	m	0,18
R^2	0,95	R^2	0,93

A Figura 6.35 apresenta os dados de sucção matricial obtidos para o solo Vermelho. O ajuste por Fredlund e Xing resultou em um grau de correlação igual a 0,97 e o ajuste pela proposta de van Genuchten proporcionou um grau de correlação de 0,96. Ao contrário do solo Vermelho indeformado, a curva característica do solo compactado não apresenta comportamento bi-modal. O solo, sem secagem prévia, foi compactado no teor de umidade ótima através de compactação dinâmica. E, de acordo com Toll (2000), nesse estado a energia de compactação destrói possíveis agregações que possam existir no solo.

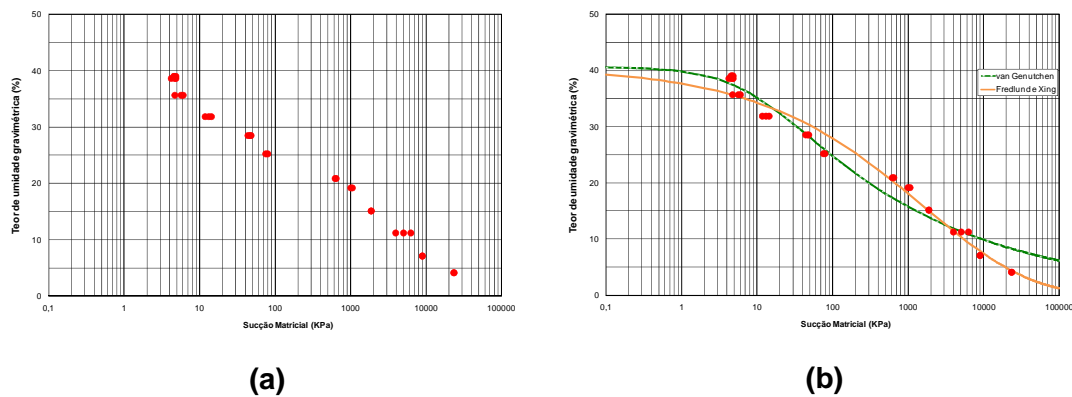


Figura 6.35 – Curva de retenção de sucção matricial do solo Vermelho compactado. (a) Método do papel filtro. (b) Ajuste por Fredlund e Xing (1994) e van Genuchten (1980).

Tabela 6.27 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Vermelho compactado.

Fredlund e Xing (1994)		van Genuchten (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}^m} \right]$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	40,61	θ_r	0,0
Cr	19977,86	θ_s	40,61
n	0,36	α	0,1
m	7,07	n	1,0
a	19977,86	m	0,2
R^2	0,97	R^2	0,96

Os pontos da curva de retenção para o solo Marrom e os ajustes realizados pelas propostas de Fredlund e Xing e van Genutchen estão apresentados na Figura 6.36, com fator de correlação de 0,96 e 0,91, respectivamente.

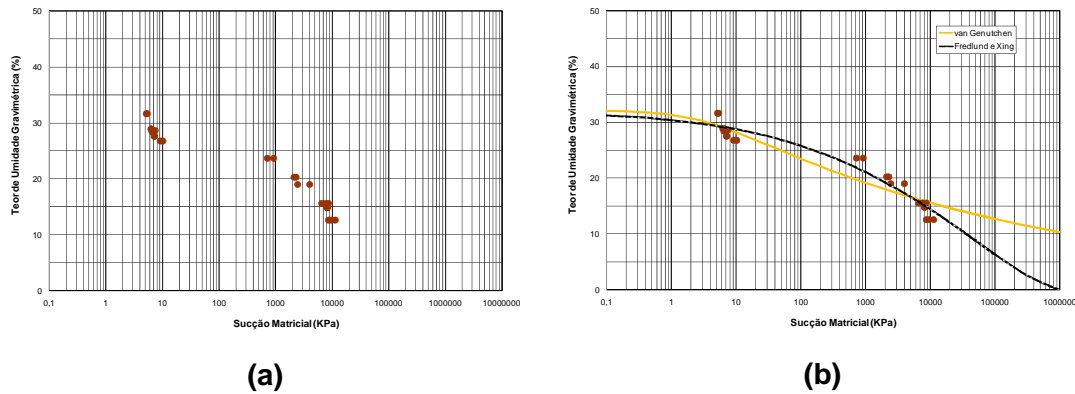


Figura 6.36 – Curva de retenção de sucção matricial do solo Marrom compactado. (a) Método do papel filtro. (b) Ajuste por Fredlund e Xing (1994) e van Genutchen (1980).

Tabela 6.28 – Parâmetros de ajuste para a curva de sucção matricial do solo Marrom compactado.

Fredlund e Xing (1994)		van Genutchen (1980)	
$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}^m} \right]$		$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right)^m}$	
θ_s	32,49	θ_r	0,0
Cr	99708,46	θ_s	32,49
n	0,29	α	0,39
m	3,61	n	1,0
a	30000	m	0,09
R^2	0,96	R^2	0,91

A Figura 6.37 resume os dados de sucção matricial obtidos pelo método do papel filtro. Com menos teor de argila em sua composição o solo Branco apresenta menor valor de sucção para o mesmo teor de umidade do que os outros solos. O solo Marrom exibe maior capacidade de retenção para valores de sucção superiores a 1.000 kPa. Para valores de umidade inferiores a 1.000 kPa o solo Vermelho apresenta os maiores valores de sucção.

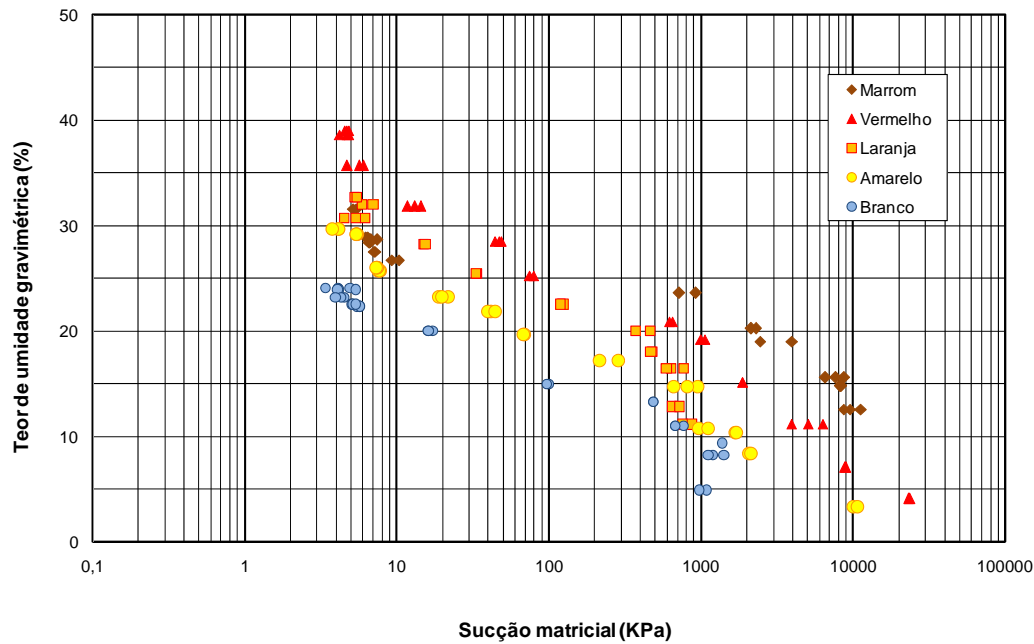


Figura 6.37 – Sucção matricial dos solos compactados.

Os valores característicos das curvas de retenção obtidos dos ajustes pela proposta de Fredlund e Xing (1994) são exibidos na Tabela 6.29.

Tabela 6.29 – Valores característicos das curvas de retenção dos solos compactados.

Solo	Teor de umidade residual (%)	Teor de umidade saturada (%)	Teor de umidade na entrada de ar (%)	Entrada de ar (kPa)	Capacidade de sucção (%)
Branco	1,5	26,31	23	20	8
Amarelo	3	34,19	29	6	7,5
Laranja	0,5	35,75	28	80	15
Vermelho	4	40,61	35	20	11
Marrom	1	33,49	28	200	8

6.1.1.3. Comparação entre Amostras Compactadas e Indeformadas

Alguns dos fatores que influenciam as características de retenção dos solos são: estrutura, índice de vazios, tipo de solo, textura, história de tensões e mineralogia. Destes, conforme já mencionado no Capítulo 2, a estrutura do solo e a história de tensões apresentam a maior influência no comportamento da curva característica (Vanapalli *et al.*, 2002). As estruturas dos solos compactados e indeformados são bastante distintas. A estrutura dos solos residuais pode compreender cimentação e diferentes tamanhos de poros existindo poros entre partículas e poros entre agregados de partículas. Já o solo compactado no teor de umidade ótima com a energia de compactação do Proctor normal não apresenta nenhum nível de agregação (Toll, 2000).

A Tabela 6.30 resume os dados das curvas de retenção dos solos indeformados e compactados.

Tabela 6.30 – Dados das curvas de retenção.

Solo	Teor de umidade para grau de saturação igual a 100%	Entrada de ar		Estado residual	
		Teor de umidade (%)	Sucção matricial (kpa)	Teor de umidade (%)	Sucção matricial (kpa)
Branco indeformado	30,10	26	17	1	4.000
Branco compactado	26,31	23	20	1,5	8.000
Amarelo indeformado	37,20	30	7	4	12.000
Amarelo compactado	34,19	29	6	3	10.000
Laranja indeformado	45,50	33	80	2,5	9.000
Laranja compactado	35,75	28	80	0,5	7.000
Vermelho indeformado	45,80	40,5	16	0,5	10.000
		27,5	400		
Vermelho compactado	40,61	35	20	4	30.000
Marrom indeformado	37,70	36	40	5	30.000
		31	500		
		25	5.000		
Marrom compactado	32,49	28	200	1	100.000

Embora as amostras compactadas não tenham sido confeccionadas com o intuito de reproduzir o índice de vazios de campo, mesmo porque a variação do índice de vazios de campo é tão grande que seria difícil determinar um valor característico por material, apresenta-se neste item uma breve comparação entre as curvas características. Conforme pode ser visto na Tabela 6.30, a amostra compactada diminui o valor do teor de umidade para o grau de saturação igual a 100% e apresenta um valor de entrada de ar menor quando comparada com o solo indeformado. Este fato está condizente com dados citados na bibliografia (e.g. Fredlund, 2002).

A comparação dos resultados de sucção matricial, obtidos a partir do método do papel filtro para os solos estudados, pode ser vista da Figura 6.38 a Figura 6.42. Para cada solo são apresentados os resultados para o ensaio indeformado e compactado. De modo geral, observa-se que para um mesmo teor de umidade o solo indeformado apresenta um valor de sucção matricial superior ao do solo compactado.

Para o solo Branco os pontos do ensaio com o solo compactado posicionam-se abaixo dos pontos dos solos indeformados até a sucção de 100 kPa, aproximadamente. Após esse valor de sucção os pontos do solo compactado apresentam maior teor de umidade do que os pontos do solo indeformado para igual sucção matricial. Para altos valores de sucção a tendência é convergência para os dois estados de estrutura (Figura 6.38).

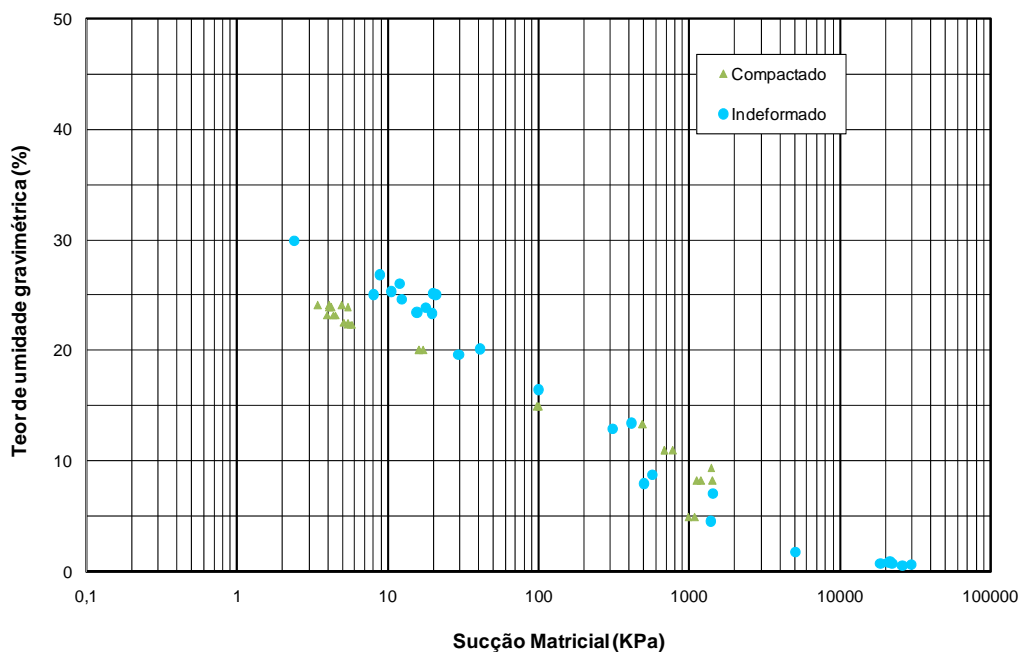


Figura 6.38 – Sucção do solo Branco para o estado indeformado e compactado.

Para o solo Amarelo, os pontos dos ensaios executados no solo compactado e indeformado apresentam praticamente o mesmo comportamento (Figura 6.39). O valor da entrada de ar é praticamente o mesmo (umidade de 30% para o solo indeformado e 29% para o solo compactado), assim como o teor de umidade residual (4% para o solo indeformado e 3% para o solo compactado). Apenas no teor de umidade saturado há uma redução do solo indeformado para o compactado, de 37,20% para 34,19%.

Os dados de retenção para o estado compactado e indeformado do solo Laranja são apresentados na Figura 6.40. Para a faixa de sucção de 4 kPa até 1.000 kPa, os dados do solo compactado estão abaixo dos dados do solo indeformado no gráfico de teor de umidade versus sucção matricial. Ou seja, para um mesmo valor de sucção o solo indeformado retém mais água que o solo compactado. Não se dispõe de dados para o solo compactado para teores de umidade inferiores a 10%.

Os resultados dos ensaios pelo método do papel filtro para o solo Vermelho estão reproduzidos na Figura 6.41. Para valores de sucção matricial inferiores a 100 kPa o solo indeformado retém mais umidade que o solo compactado. Entre 100 kPa e 1.000 kPa os resultados são muito próximos entre os dois estados de estrutura e, a partir de 1.000 kPa, o solo compactado passa a reter mais água.

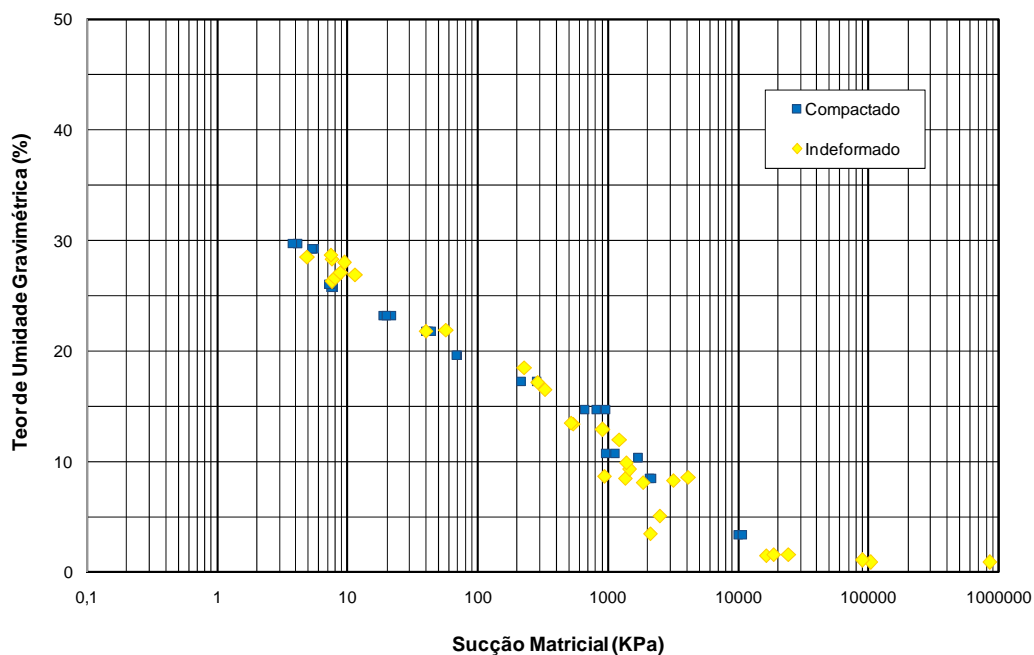


Figura 6.39 – Sucção do solo Amarelo para o estado indeformado e compactado.

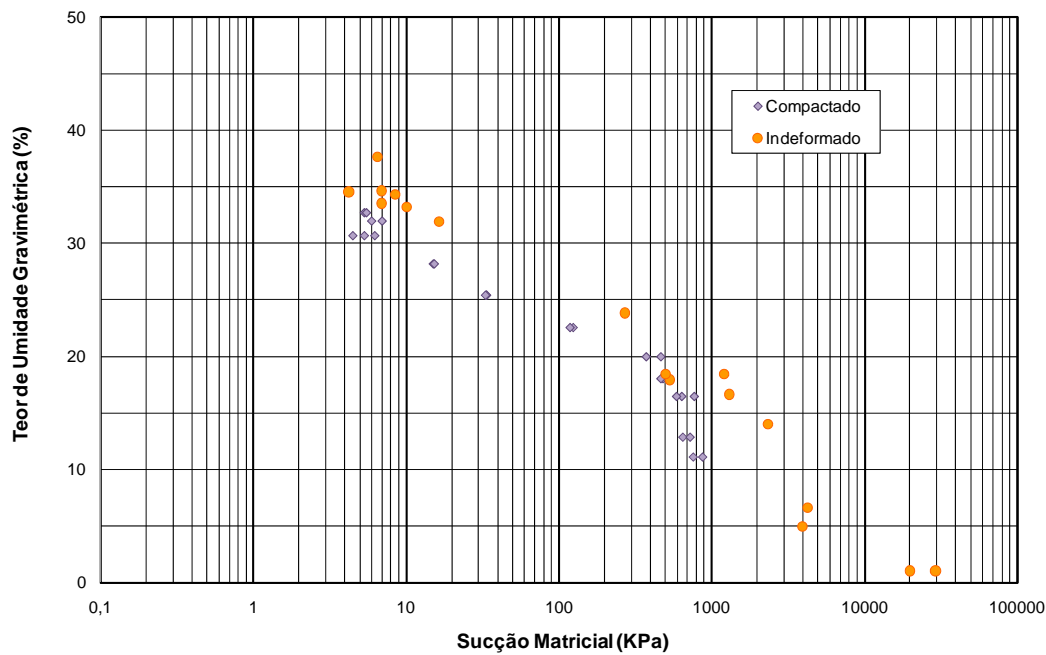


Figura 6.40 – Sucção do solo Laranja para o estado indeformado e compactado.

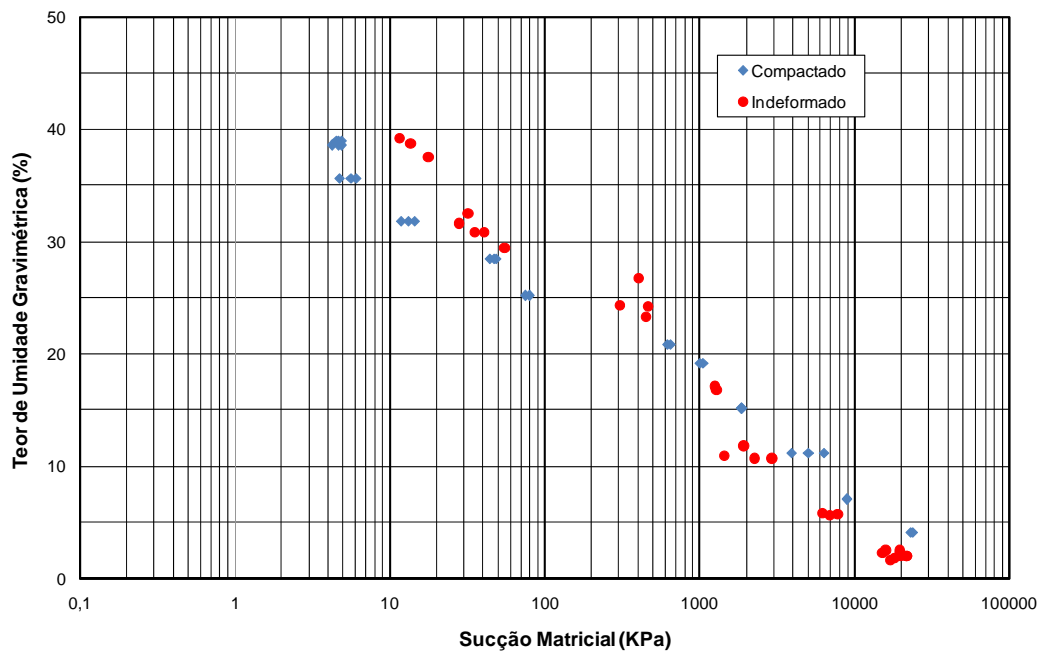


Figura 6.41 – Sucção do solo Vermelho para o estado indeformado e compactado.

Na Figura 6.42 são apresentados conjuntamente os dados de sucção do solo Marrom no estado indeformado e compactado. Até a pressão de 5.000 kPa o solo indeformado apresenta maior capacidade de retenção de água do que o solo compactado. A partir dessa pressão as curvas convergem para um mesmo resultado.

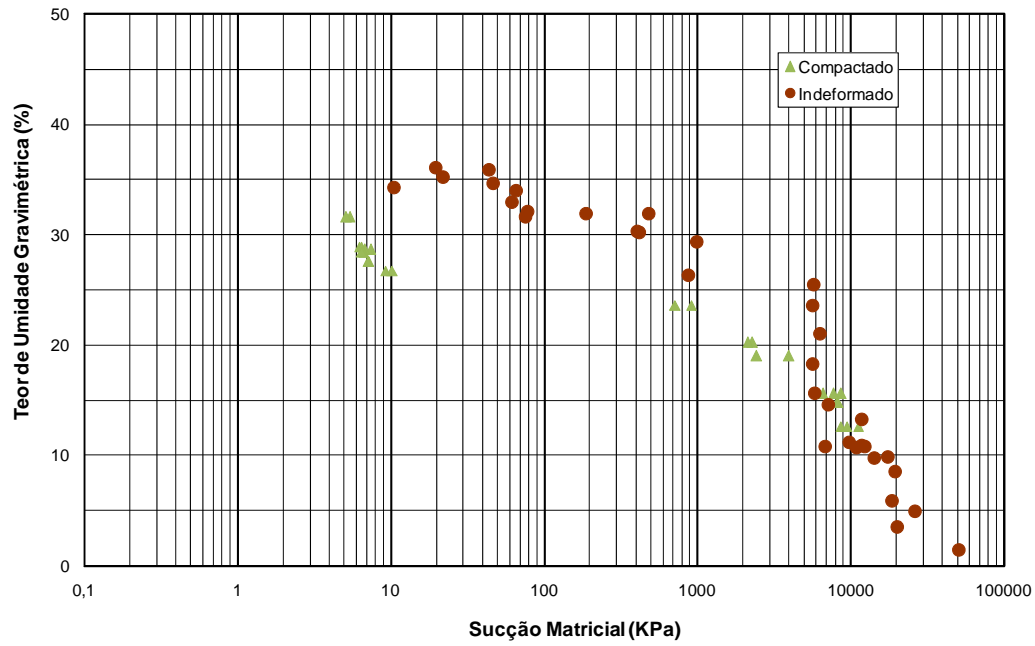


Figura 6.42 – Sucção do solo Marrom para o estado indeformado e compactado.

6.1.2. Porosimetria de Mercúrio: Resultados Experimentais

As curvas características solo-ar obtidas do ensaio de intrusão de mercúrio são apresentadas na Figura 6.43. O volume de mercúrio injetado a partir da curva porosimétrica foi convertido para Volume de Ar (V_a / V_0) considerando o volume inicial de solo como V_0 (Aung *et al.*, 2001).

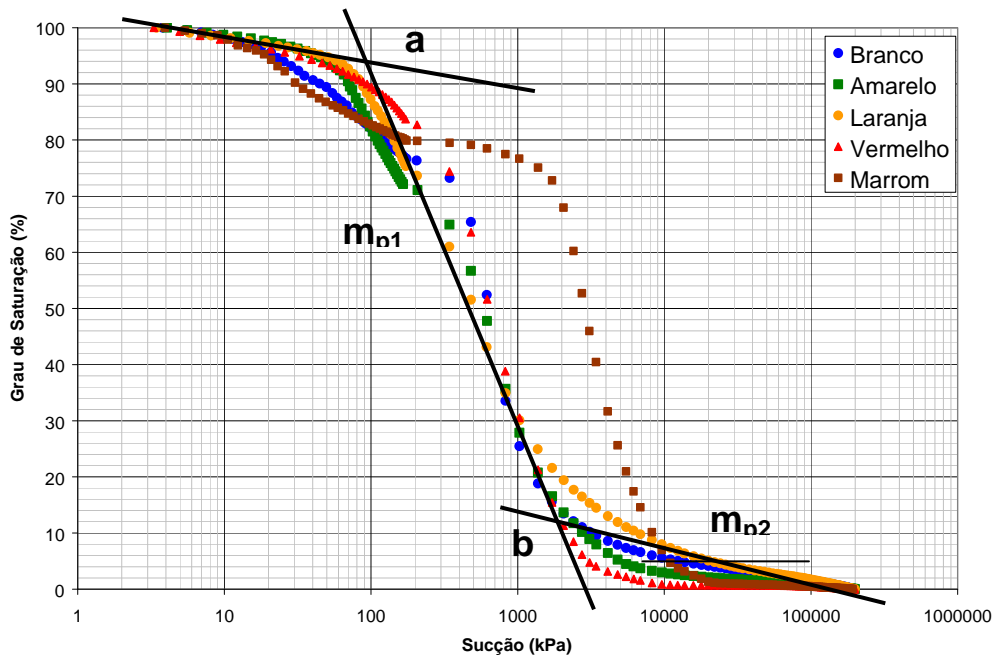


Figura 6.43 – Curvas características solo-ar para os solos residuais estudados.

Assim como na curva característica solo-água, dois pontos de inflexão (a e b) e duas inclinações (m_{p1} e m_{p2}) podem ser observadas na curva característica solo-ar, com exceção do solo Marrom, onde, devido ao formato de sela, são quatro pontos de inflexão e quatro inclinações. O ponto **a** corresponde ao valor de entrada de mercúrio. A inclinação m_{p1} mostra a variação da quantidade de ar em relação à pressão. O ponto **b** determina o início do teor de ar volumétrico residual, e a inclinação m_{p2} determina as variações no teor de ar na faixa de pequenos poros. A Tabela 6.31 resume os valores de **a** e **b** obtidos das curvas características solo-ar.

Tabela 6.31 – Parâmetros da curva característica solo-ar.

<i>Solo / Parâmetro</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
<i>Branco</i>	95%	13%
<i>Amarelo</i>	93%	8%
<i>Laranja</i>	92%	11%
<i>Vermelho</i>	86%	5%
<i>Marrom</i>	96/80%	2%

Nas figuras 6.30, 6.31, 6.32, 6.33 e 6.34 são apresentados gráficos comparativos entre a curva característica obtida através do ensaio de porosimetria e a curva característica obtida através do método do papel filtro.

Notam-se grandes diferenças entre as curvas características obtidas pelo método do papel filtro e porosimetria de mercúrio. A grande diferença desta curva em relação àquela obtida pelo método do papel filtro é que os valores de sucção obtidos a partir deste método são somente devidos à ação da capilaridade. Isto acontece porque a molécula de mercúrio é apolar e, portanto, não pode apresentar o fenômeno de adsorção. Também no ensaio de porosimetria de mercúrio só são atingidos os poros interconectados do solo e, conforme apresentado no item 5.3 são grandes as diferenças entre a porosidade total e os poros interconectados.

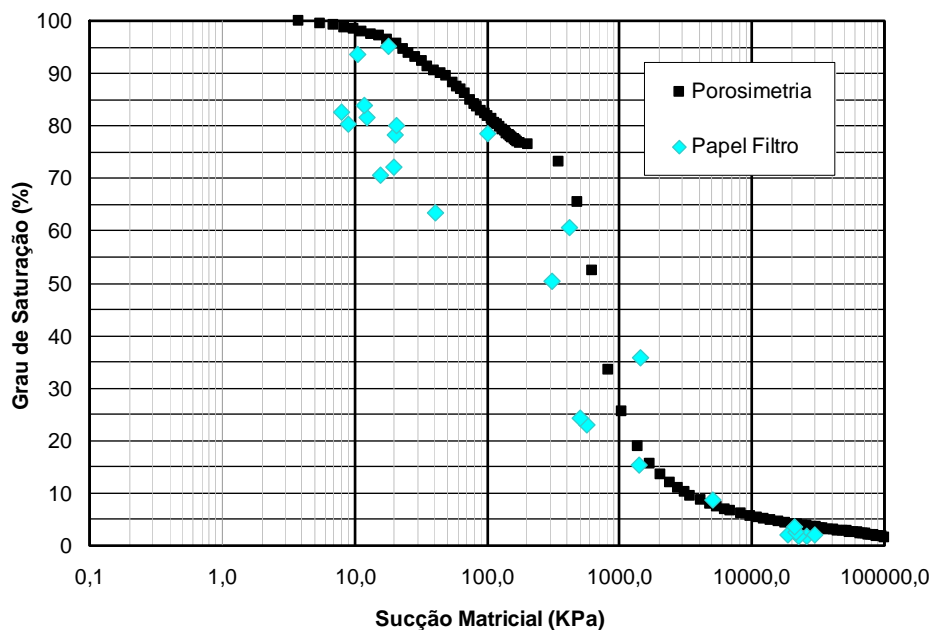


Figura 6.44 – Curva característica obtida através do ensaio de porosimetria e do ensaio com papel filtro para o solo Branco.

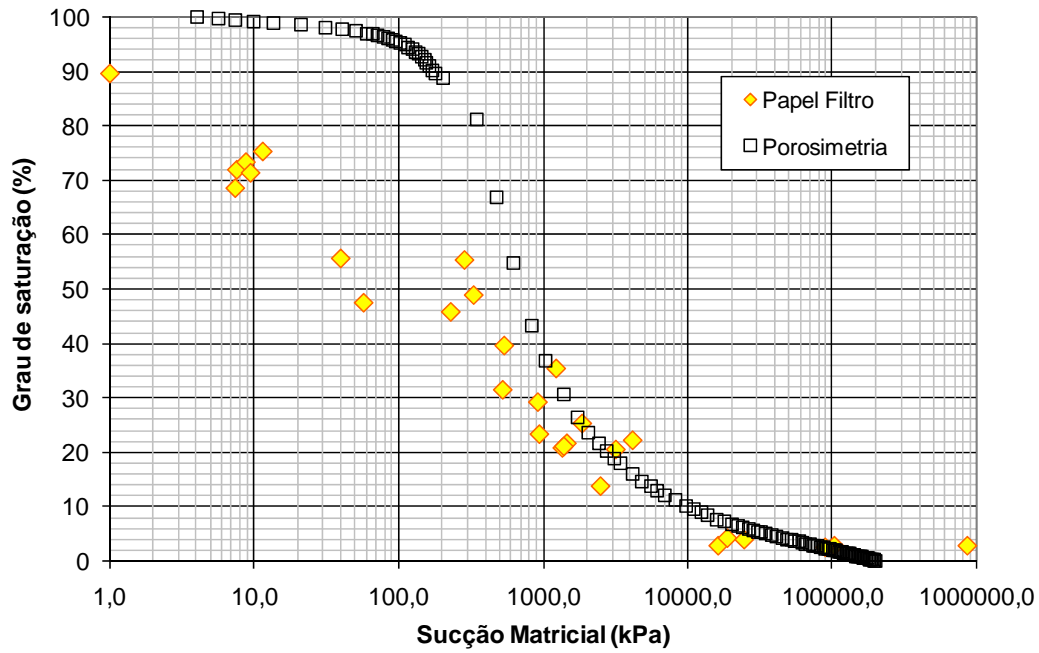


Figura 6.45 – Curva característica obtida através do ensaio de porosimetria e do ensaio com papel filtro para o solo Amarelo.

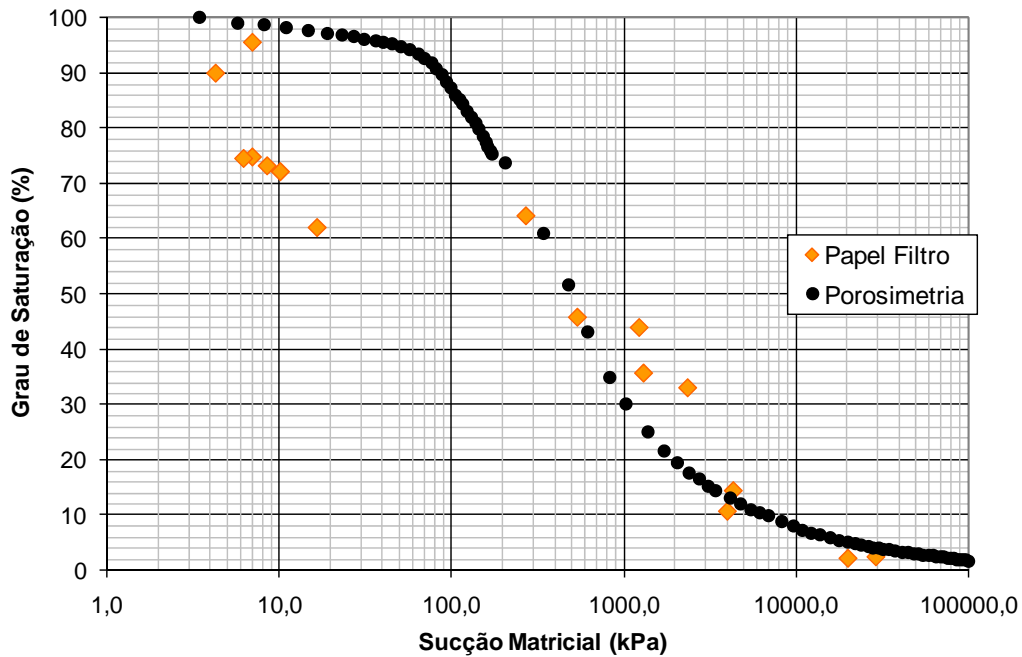


Figura 6.46 – Curva característica obtida através do ensaio de porosimetria e do ensaio com papel filtro para o solo Laranja.

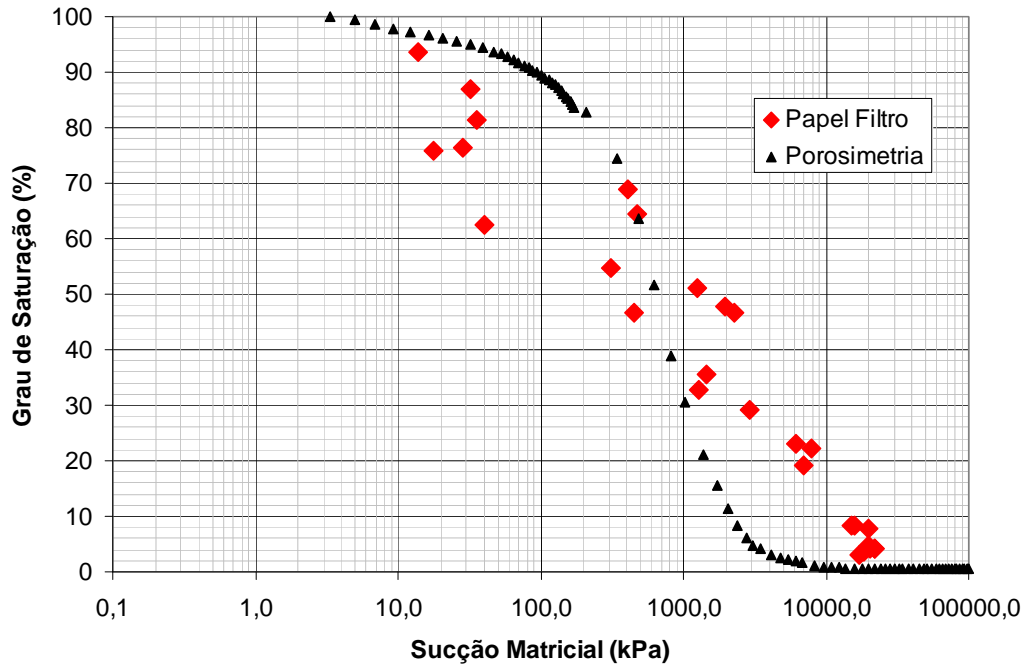


Figura 6.47 – Curva característica obtida através do ensaio de porosimetria e do ensaio com papel filtro para o solo Vermelho.

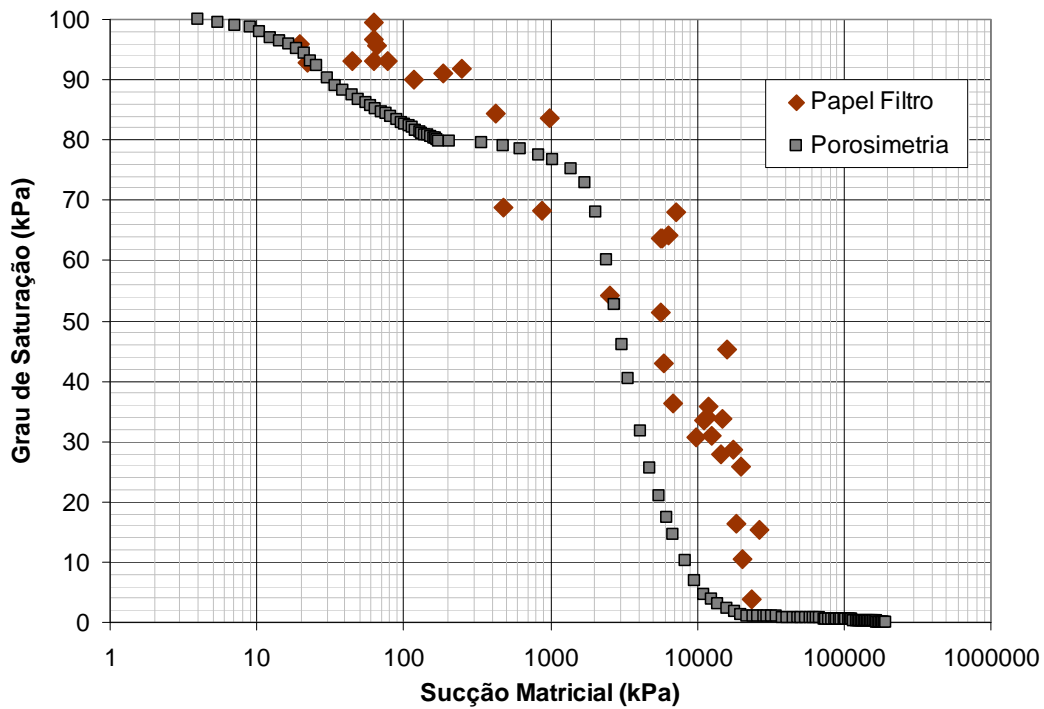


Figura 6.48 – Curva característica obtida através do ensaio de porosimetria e do ensaio com papel filtro para o solo Marrom.

6.2. Curvas de Resistividade Elétrica

Os obstáculos à passagem de corrente elétrica por um meio são representados por uma propriedade mensurável, denominada resistência, e definida pela relação:

$$R = \frac{V}{i} \quad \text{(Equação 6.5)}$$

Onde R é a Resistência; V é a Diferença de potencial e i é a Corrente.

Essa definição significa que quando se aplica uma diferença de potencial entre os extremos de um resistor, uma corrente circulará, de modo que a Equação 6.5 estará satisfeita. Qualquer objeto físico, de qualquer material, é um tipo de resistor. A maioria dos metais são materiais condutores, e opõe baixa resistência ao fluxo de corrente elétrica. Materiais que possuem resistência muito alta são chamados isolantes ou isoladores. A resistência de um corpo pode ser calculada a partir de suas características físicas. A resistência é proporcional ao comprimento do resistor e à resistividade do material (uma propriedade do material), e inversamente proporcional à área da secção transversal. A equação para determinar a resistência de uma seção do material é:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad \text{(Equação 6.6)}$$

Onde ρ é a resistividade do material, l é o comprimento, e A é a área da secção transversal. A Figura 6.49 apresenta um esquema da resistência elétrica de uma seção de um material de forma retangular.

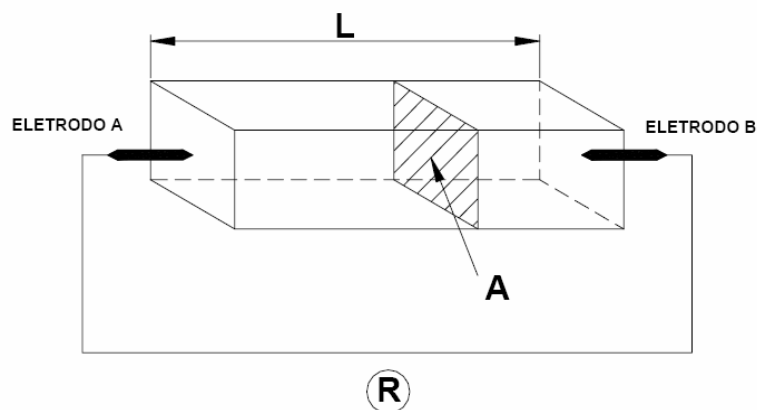


Figura 6.49 – Esquema da resistência elétrica de uma seção de um material retangular.

A resistividade de um solo está diretamente relacionada à quantidade de compostos iônicos solúveis nele presentes. Em geral, quanto maior for essa quantidade, menor será a resistividade do solo. A presença de água é outro fator importante na determinação da resistividade do solo. É a água que dissolve os compostos solúveis presentes no solo. Portanto, se não houver água, não há dissolução e não há passagem de corrente. A medida de resistividade do solo é função tanto da resistividade do fluido dos poros quanto das partículas e de seu arranjo. A condutividade elétrica em areias e pedregulhos ocorre quase que exclusivamente pelo líquido contido nos poros. A areia de quartzo é um material virtualmente não condutor e a resistividade da matriz sólida é considerada infinitamente grande. Em solos argilosos, no entanto, a condutividade elétrica ocorre também através da superfície carregada eletricamente dos argilo-minerais. Com o aumento da porcentagem de finos nos solos grossos, a resistividade elétrica é afetada de três maneiras. Primeiro, a porosidade irá diminuir, uma vez que os finos irão ocupar o espaço vazio entre grãos de areia, e o decréscimo da porosidade tem o efeito de aumentar a resistividade (Campanella e Weemees, 1990). Segundo, a presença de finos no solo geralmente indica a presença de argilo-minerais, o que deve resultar num decréscimo na resistividade. Terceiro, solos com alto teor de finos também geralmente apresentam uma superfície específica alta, o que aumenta a condutividade superficial (Abu-Hassanein *et al.* 1996).

O mecanismo dominante da condução elétrica é a transferência de carga através dos poros com água por condução eletrolítica. Em geral, quanto maior a presença de íons no fluido, menor é a resistividade, e maior é a condutividade (Abu-Hassanein *et al.*, 1996). Medidas elétricas no solo indicam não apenas mudanças nas propriedades elétricas do solo e do fluido dos poros devido à quantidade de sólidos dissolvidos, mas também devido a variações do tipo de solo (Woeller *et al.*, 1991).

A resistividade elétrica também está correlacionada com as propriedades índice. Solos com limite de liquidez ou índice de plasticidade alto apresentam baixa resistividade elétrica (Abu-Hassanein *et al.*, 1996).

A dependência do valor de resistividade dos solos com o teor de umidade já foi relatado por diversos pesquisadores (e.g. Higgs, 1930; McCollum e Logan, 1930 *apud* McCarter, 1984) ver Figura 6.50. Conforme pode ser visualizado na figura, para baixos teores de umidade o valor da resistividade apresenta um

rápido decréscimo com o aumento da umidade. A taxa de decréscimo, no entanto, reduz consideravelmente para teores de umidade superiores a 15%.

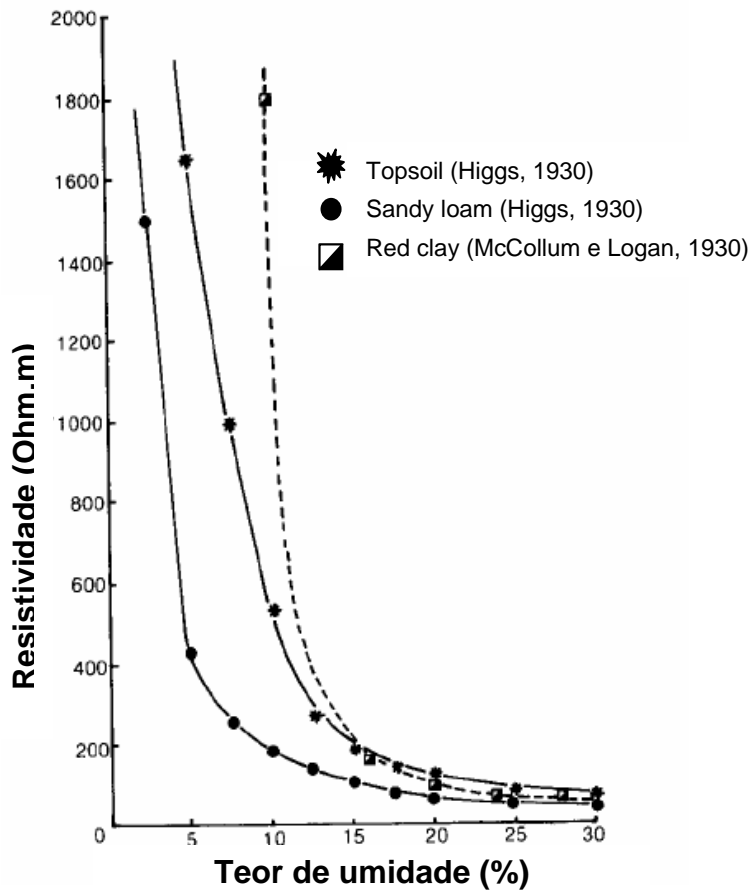


Figura 6.50 – Variação da resistividade elétrica com o teor de umidade (McCarter, 1984).

Richard *et al.* (2005) determinaram a resistividade elétrica de um solo siltoso compactado em distintas massas específicas (1,1 g/cm³; 1,3 g/cm³; 1,6 g/cm³ e 1,7 g/cm³) e teores de umidade (10%, 15%, 19%, 22% e 24%). Os resultados são apresentados na Figura 6.51.

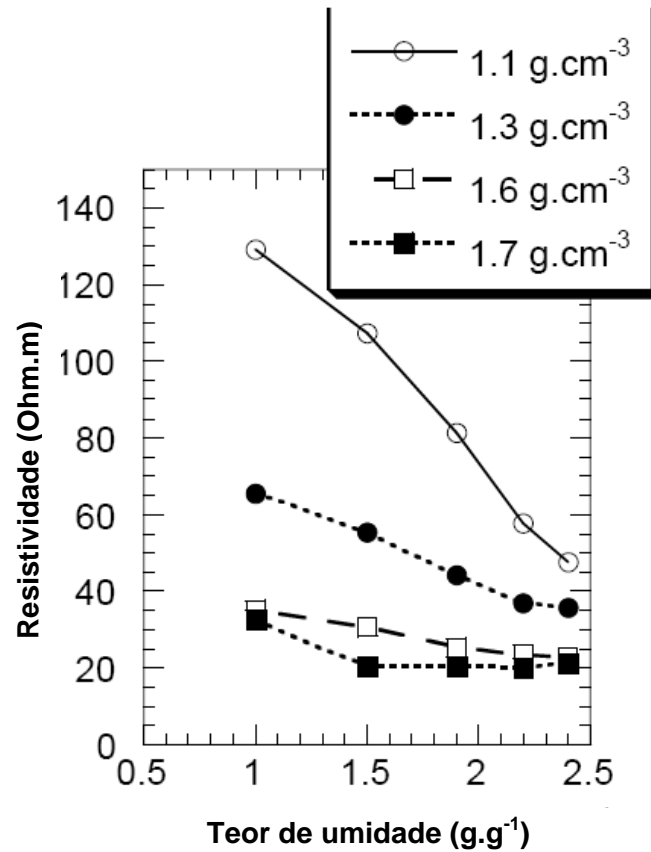


Figura 6.51 – Variação da resistividade elétrica em função do teor de umidade para diferentes massas específicas (Richard *et al.*, 2005).

Observa-se que para uma dada massa específica a resistividade diminui à medida que o teor de umidade aumenta. Esta diminuição é mais visível para baixos valores de massa específica. Nota-se também que o contraste entre as diferentes estruturas é mais acentuado para baixos teores de umidade. Delineando os mesmos resultados em função do grau de saturação dos corpos-de-prova, apresentados na Figura 6.52, observa-se que a partir de certo valor de umidade a resistividade não apresenta variação. Este ponto é atingido antes para as amostras com maior massa específica.

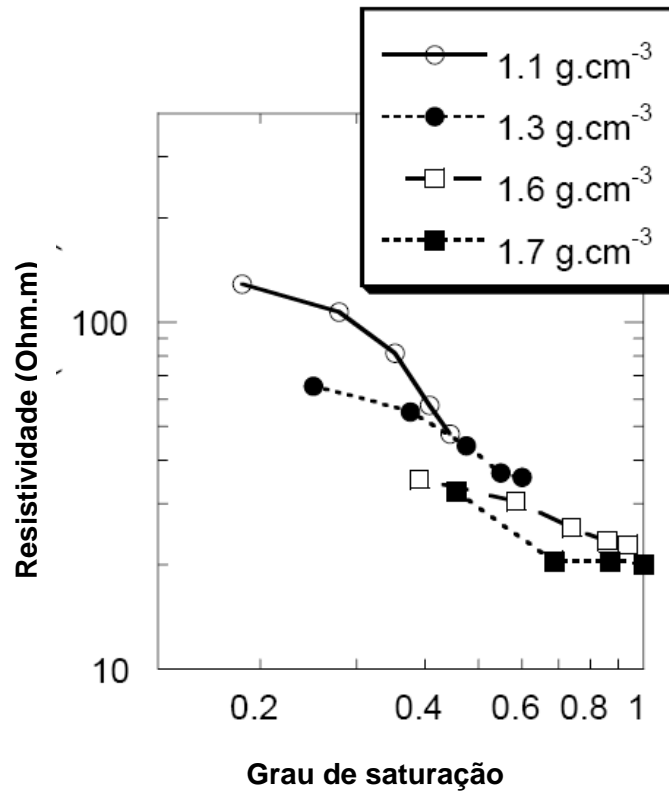


Figura 6.52 – Variação da resistividade elétrica em função do grau de saturação para diferentes massas específicas (Richard *et al.*, 2005).

Ensaio realizados em amostras de solo-cimento mostraram que a resistividade elétrica aumenta com o aumento do teor de cimento e tempo de cura (Liu *et al.*, 2007). Apresenta-se na Figura 6.53 a relação entre a resistividade elétrica e o teor de cimento para uma argila originária de um depósito marinho para diferentes relações água-cimento e tempo de cura. Além do aumento da resistividade com o aumento do teor de cimento, observa-se também o aumento da resistividade com o aumento do tempo de cura e da diminuição da relação água-cimento.

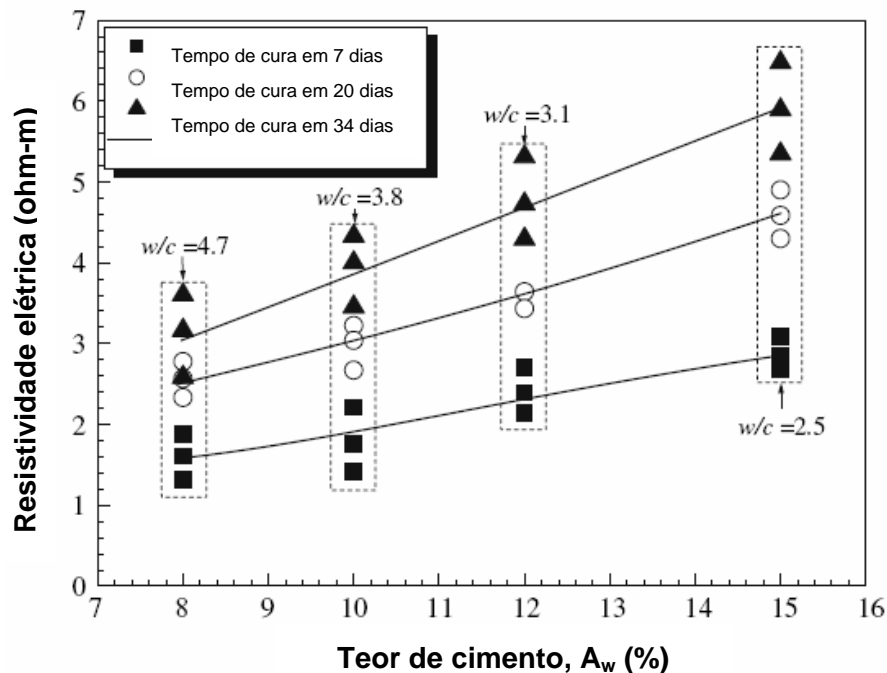


Figura 6.53 – Relação entre a resistividade elétrica e o teor de cimento em misturas solo-cimento (w/c relação água cimento) (Liu *et al.*, 2007).

McNeill (1999 *apud* Liu *et al.*, 2007) propôs uma equação empírica para descrever a relação entre a resistividade elétrica de solos saturados e não saturados, expressa por:

$$\rho = \rho_{sat} \left(\frac{S_w}{100} \right)^{-B} \quad \text{(Equação 6.7)}$$

onde ρ é a resistividade elétrica do solo não saturado, ρ_{sat} é a resistividade elétrica do solo saturado, S_w é o grau de saturação e B uma constante empírica função do tipo de solo.

Aplicando a Equação 6.6 aos valores de resistividade e grau de saturação dos corpos-de-prova de argila com teor de cimento de 8%, obtém-se a relação apresentada na Figura 6.54. O fator de correlação para esses dados foi de 0,97 (Liu *et al.*, 2007).

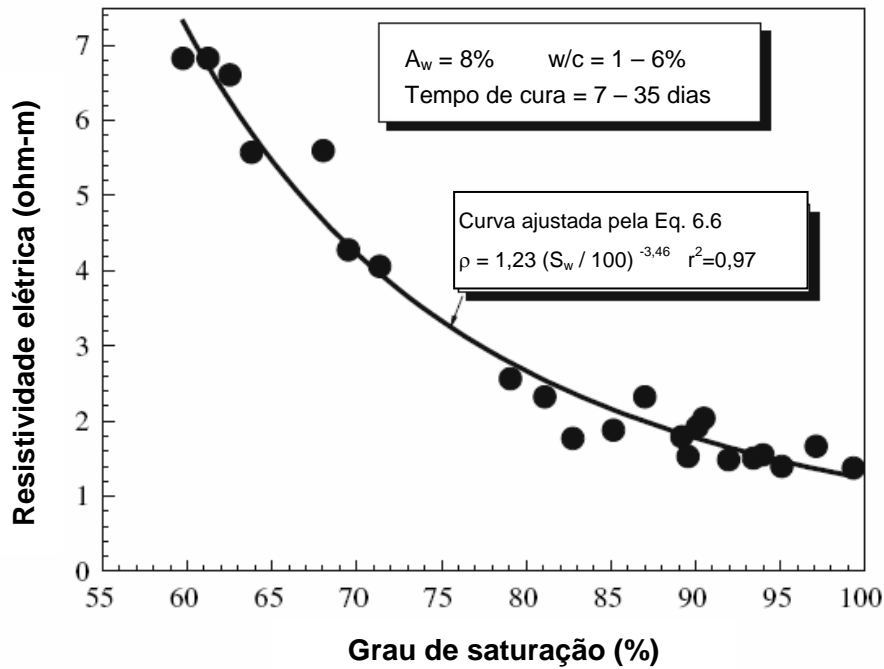


Figura 6.54 – Relação entre a resistividade elétrica e o teor grau de saturação em misturas solo-cimento, com teor de cimento igual a 8%, razão água-cimento entre 1 e 6% e tempo de cura entre 7 e 35 dias (Liu *et al.*, 2007).

Conhecendo-se a resistividade para uma dada energia de compactação e teor de umidade ótima, medidas de resistividade elétrica em campo podem ser utilizadas para determinar se um solo está compactado em distintos teores de umidade ótima (Abu-Hassanein *et al.* 1996).

Uma das formulações que relacionam a resistividade dos diferentes componentes à resistividade do meio condutor é a Lei de Archie. A fórmula de Archie (1942) relaciona a resistividade elétrica do solo saturado (ρ) à resistividade elétrica do fluido dos poros (ρ_w) e a geometria dos espaços porosos no solo pela relação:

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot n^{-m} \quad \text{(Equação 6.8)}$$

onde n é a porosidade do solo, e a e m são constantes (Abu-Hassanein *et al.* 1996).

Para solos normalmente adensados $a = 1$, e m é função da tortuosidade dos poros ou da trajetória que a água deve percorrer para se mover ao longo das partículas. Esta fórmula, apesar de simplificada, mostra que a resistividade

elétrica dos solos saturados é sensível à porosidade, resistividade do fluido e tipo e estrutura do solo.

A segunda lei de Archie (1942) descreve o índice de resistividade (IR), como sendo igual a:

$$IR = \frac{\rho(S_w)}{\rho(S_w = 1)} = S_w^{-x} \quad \text{(Equação 6.9)}$$

onde S_w é o grau de saturação do solo e x é o expoente da saturação (Richard *et al.*, 2005)

Para uma distribuição de poros unimodal o expoente x é uma constante. Ao contrário, para uma distribuição bimodal ou trimodal de poros o expoente x torna-se uma variável. A Figura 6.55 apresenta a variação do índice de resistividade com o grau de saturação em ensaios realizados por Worthington e Pallatt (1989 *apud* Richard *et al.*, 2005).

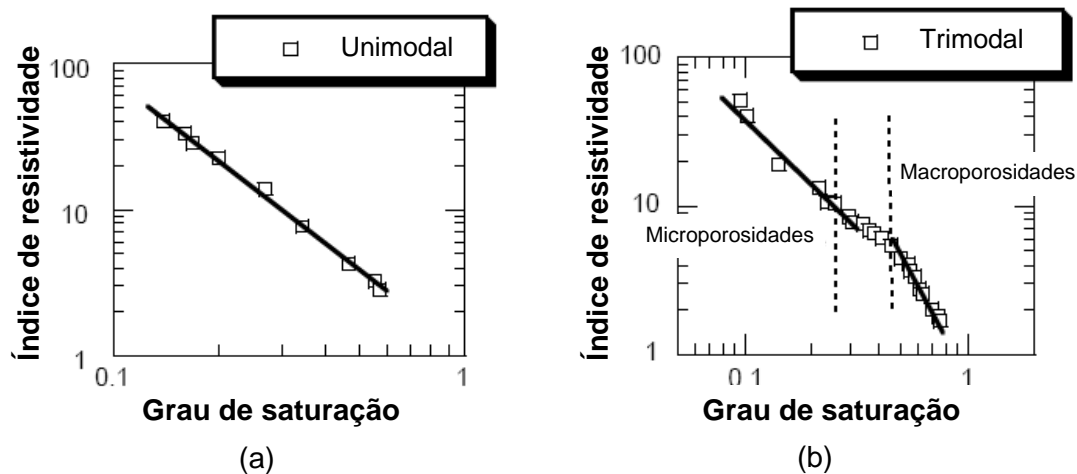


Figura 6.55 – Índice de resistividade em função do grau de saturação. (a) Distribuição unimodal de poros. (b) Distribuição trimodal de poros (Worthington e Pallatt, 1989 *apud* Richard *et al.*, 2005).

Pode-se resumir que a condutividade elétrica dos solos é controlada por dois fenômenos. Um estabelecido pela estrutura (condutividade por área de contato) quando o solo está com teor de umidade baixo, e outro estabelecido pela presença de água e condutividade elétrica sendo transmitida pelos íons dissolvidos.

A resistividade, pressão capilar e permeabilidade relativa apresentam feições similares. Por exemplo, todas são função da saturação do fluido em um meio poroso e são influenciadas pela estrutura de poros e heterogeneidade do

material (Li e Williams, 2006). No entanto, é mais fácil a obtenção em laboratório da resistividade de um meio do que a pressão capilar. Além disso, a medida da resistividade é feita em tempo real o que não acontece para a pressão capilar.

Szabo (1974 *apud* Li e Williams, 2006) propôs um modelo linear para correlacionar a sucção com a resistividade assumindo que o expoente da relação entre pressão capilar e grau de saturação é igual àquele entre a relação resistividade e grau de saturação. O modelo proposto por Szabo é definido por:

$$\frac{R_t}{R_0} = a + b.P_c \quad \text{(Equação 6.10)}$$

onde R_0 é a resistividade para a saturação de 100%, R_t é a resistividade para uma determinada saturação S_w , P_c é a pressão capilar, a e b são constantes.

No entanto, os resultados apresentados por Szabo demonstraram que a equação proposta não proporcionou boa relação entre a pressão capilar e a resistividade (Li e Williams, 2006).

A variação de resistividade obedece a uma “função do tipo potência” para baixos graus de saturação (Toledo *et al.*, 1994):

$$\frac{1}{R_t} \alpha (S_w)^{\frac{1}{\beta(3-D_f)}} \quad \text{(Equação 6.11)}$$

onde β é o expoente na relação entre “disjoining pressures” e a espessura do filme e D_f é a dimensão fractal da superfície do material.

A pressão capilar também segue uma “função do tipo potência” para baixos graus de saturação (Toledo *et al.*, 1994):

$$S_w \alpha (P_c)^{-(3-D_f)} \quad \text{(Equação 6.12)}$$

Combinando as equações 6.9 e 6.10, obtém-se:

$$P_c \alpha (R_t)^\beta \quad \text{(Equação 6.13)}$$

Quando a pressão capilar P_c é igual à pressão de entrada de ar P_e , R_t é igual R_0 , então (Li e Williams, 2006):

$$P_e \alpha (R_0)^\beta \quad \text{(Equação 6.14)}$$

Combinando as equações 6.10 e 6.11, obtém-se:

$$P_c = P_e \left(\frac{R_t}{R_0} \right)^\beta \quad \text{(Equação 6.15)}$$

Esta equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P_{cD} = I^\beta \quad \text{(Equação 6.16)}$$

onde P_{cD} é a pressão capilar adimensional (P_c / P_e) e I é o índice de resistividade (R_t / R_0).

Utilizando-se a Equação 6.14, a pressão capilar adimensional pode ser determinada a partir da resistividade desde que o parâmetro β seja conhecido.

Li e Williams (2006) determinaram valores de resistividade e de pressão capilar simultaneamente para dois grupos de amostras de arenitos de diferentes formações. O grupo 1 de amostras apresenta alta permeabilidade e o grupo 2 de amostras apresenta baixa permeabilidade. A relação em um gráfico bi-log entre a pressão capilar e o grau de saturação para os dois grupos de amostras é apresentada na Figura 6.56 e na Figura 6.57. A relação entre a pressão capilar e o grau de saturação é linear para uma pequena faixa de grau de saturação que varia de amostra para amostra. Observa-se, na Figura 6.56 que a faixa de grau de saturação na qual existe uma relação linear para a amostra 3 é bastante reduzida. Essa amostra é a que apresentou a maior dimensão fractal deste grupo, o que implica que esta amostra é a mais heterogênea. Para o grupo 2, de amostras de baixa permeabilidade, o arenito 153 é o que apresenta a menor faixa de linearidade e o maior valor fractal (Li e Williams, 2006).

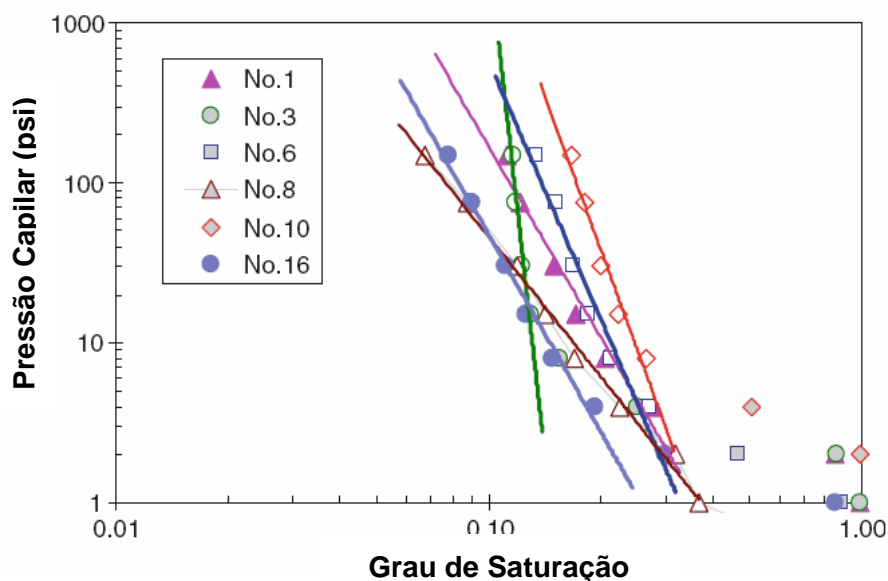


Figura 6.56 – Relação entre pressão capilar e grau de saturação para os arenitos do grupo 1 (alta permeabilidade) (Li e Williams, 2006).

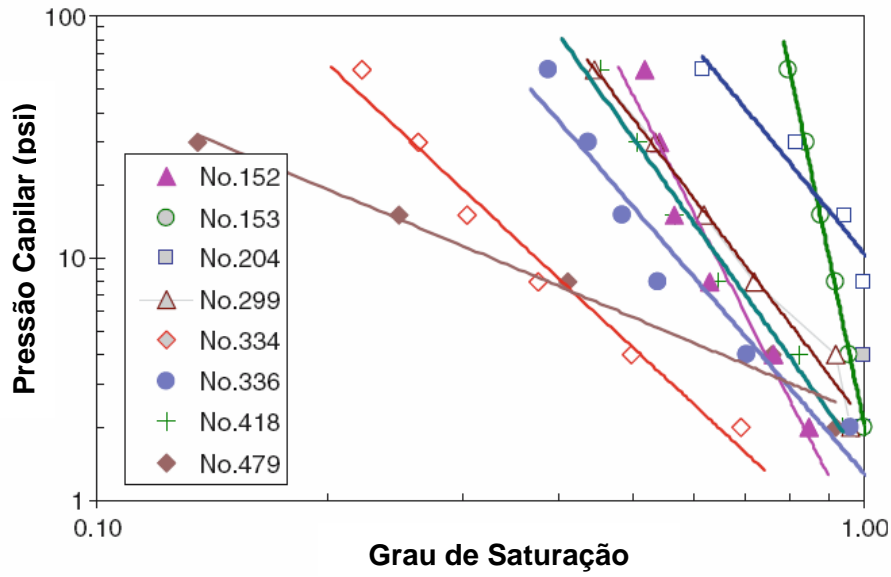


Figura 6.57 – Relação entre pressão capilar e grau de saturação para os arenitos do grupo 2 (baixa permeabilidade) (Li e Williams, 2006).

A relação entre pressão capilar e índice de resistividade dos grupos 1 e 2 é apresentada na Figura 6.58 e na Figura 6.59, respectivamente.

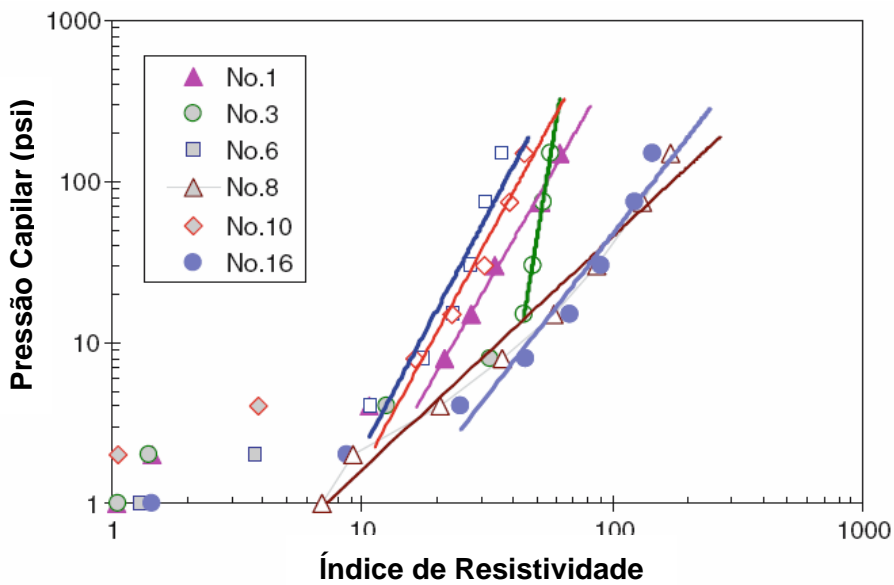


Figura 6.58 – Relação entre pressão capilar e índice de resistividade para os arenitos do grupo 1 (alta permeabilidade) (Li e Williams, 2006).

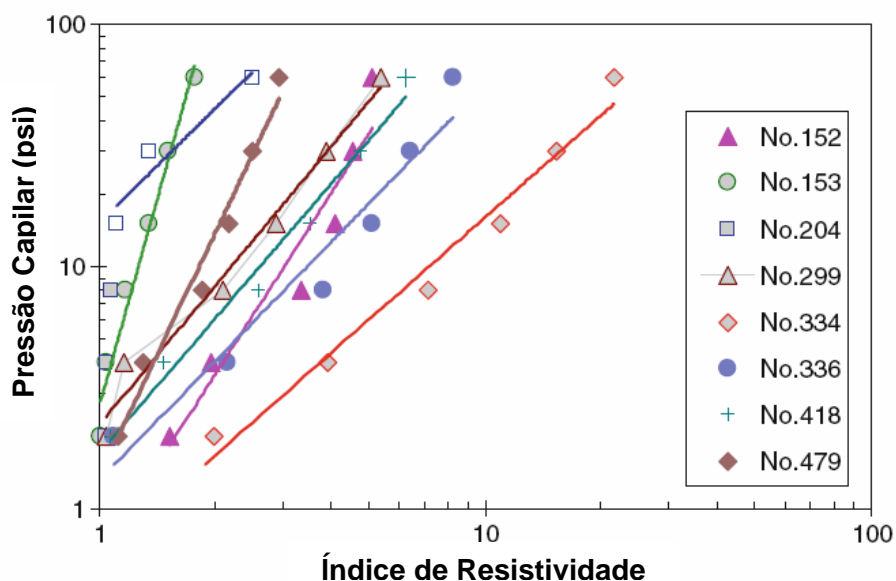


Figura 6.59 – Relação entre pressão capilar e índice de resistividade para os arenitos do grupo 2 (baixa permeabilidade) (Li e Williams, 2006).

Observa-se que para cada amostra, em ambos os grupos, existe uma faixa para a relação linear no gráfico bi-log entre o índice de resistividade e a pressão capilar. O ajuste linear ocorre na faixa de alta resistividade ou baixo grau de saturação. Existe um grau de saturação crítico, para cada amostra, a partir da qual a relação linear deixa de existir. Talvez a razão para essa perda de relação linear seja que a distribuição da saturação entre diferentes tamanhos de poros não possa ser representada por um fractal para altos graus de saturação (Li e Williams, 2006).

Existem poucos registros na literatura da relação entre pressão capilar e resistividade, e os parâmetros que influenciam essas grandezas precisam ser mais bem estudados.

Na presente tese foram realizados ensaios para a determinação da condutividade elétrica dos solos estudados com o objetivo principal de caracterizar os solos residuais e o intemperismo dos mesmos através da resistividade elétrica. Para melhor compreensão dos processos envolvidos na condutividade elétrica dos solos do perfil, esse estudo foi subdividido de forma a propiciar uma avaliação da: a) influência da estrutura na condutividade elétrica, b) influência da composição química dos solos na condutividade elétrica, e c) relação entre resistividade e sucção.

Para atingir esses objetivos foram realizados ensaios de resistividade em solos deformados e indeformados em diversos teores de umidade, descritos nos itens seguintes.

6.2.1. Ensaio de Resistência à Passagem de Corrente Elétrica

A curva de resistividade de um solo é obtida através da medição da resistência (em ohms) à passagem de uma corrente elétrica conhecida (em amperes), criada a partir da imposição de uma diferença de potencial (em volts) entre dois pontos no solo. Para um dado teor de umidade são feitas leituras de corrente para incrementos de 10 Volts. A Figura 6.60 apresenta um desenho esquemático do ensaio. Através de um circuito variador de potência aplica-se a diferença de potencial no corpo-de-prova a ser ensaiado. A corrente inicia-se no circuito, passa ao solo através de uma placa de bronze e percorre o corpo-de-prova. A resistência à passagem da corrente é medida através de um multímetro conectado ao solo também pela placa de bronze. É um circuito fechado, com a corrente passando pelo solo constantemente.

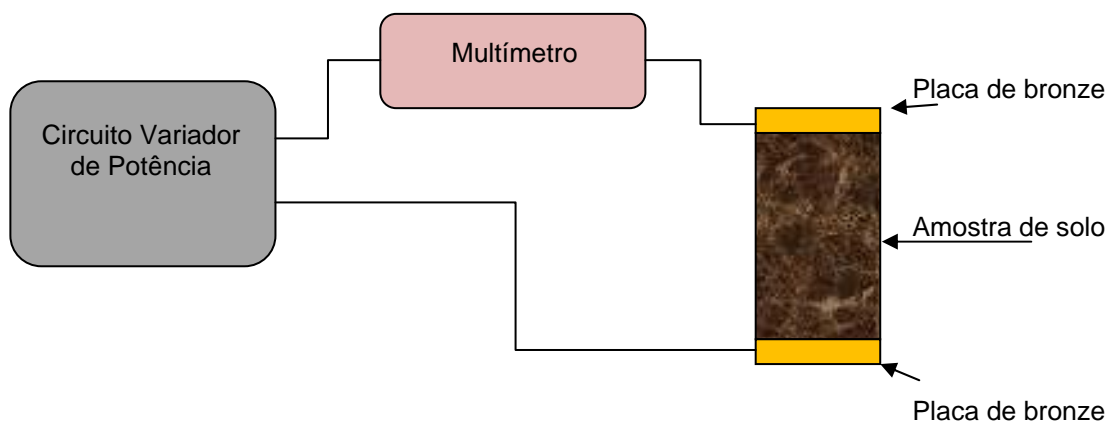


Figura 6.60 – Desenho esquemático do ensaio de resistividade elétrica.

Para a determinação da resistência, traça-se um gráfico de corrente elétrica *versus* diferença de potencial, ajustando-se uma reta passando pela origem. O coeficiente angular dessa reta é igual à resistência elétrica do solo para aquela umidade. Repetindo-se o ensaio para diversos teores de umidade obtém-se a variação da resistência do solo com a umidade. Os dois gráficos obtidos do ensaio de resistividade estão exemplificados na Figura 6.61

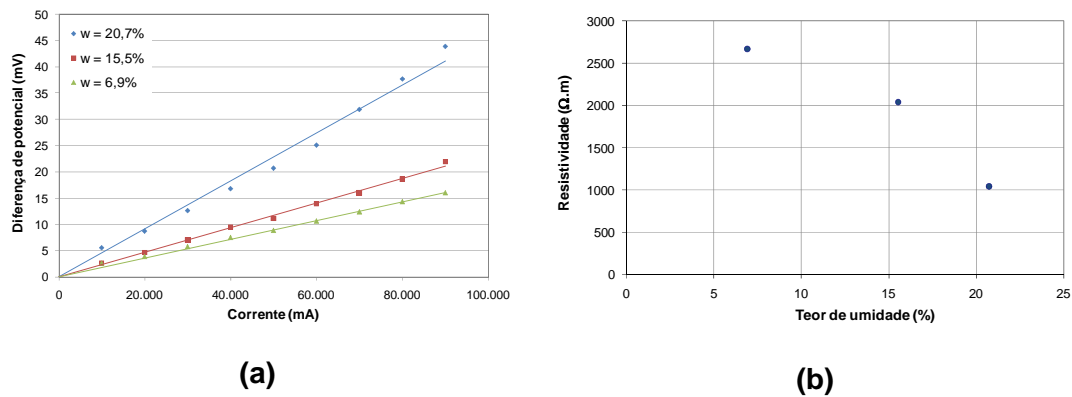


Figura 6.61 – Gráficos gerados no ensaio de resistividade. (a) Diferença de potencial versus corrente. (b) Resistividade versus teor de umidade.

6.2.1.1. Amostras Deformadas

Para avaliação da resistividade em amostras desestruturadas, a curva de resistividade elétrica foi determinada em amostras deformadas. O solo destorroado foi colocado em uma caixa padrão, denominada "soil box" (GCOI/SCM, 1995), de dimensões 120 mm de comprimento, 50 mm de altura e 50 mm de largura, sendo as laterais menores e o fundo feitos de acrílico e as laterais maiores feitas de cobre (Figura 6.62). Em cada placa de cobre há um parafuso para auxiliar a fixação dos cabos para passagem da corrente elétrica. A resistência foi determinada para a diferença de potencial de 10 Volts a 90 Volts, em incrementos de 10 Volts. A partir da resistência obteve-se a resistividade através da Equação 6.5.

Para verificar a influência da densidade e do teor de umidade nos valores de resistividade, as determinações deste parâmetro foram realizadas em solos com igual índice de vazios e com variação do teor de umidade, e com teor de umidade constante e com variação do índice de vazios. Os ensaios foram realizados nos cinco solos estudados.

Para avaliar a influência do índice de vazios na resistividade elétrica, este parâmetro foi determinado para os cinco solos estudados em três estados de densidade cada um. Nesses ensaios foram utilizadas as amostras compostas que também foram utilizadas para o estudo no estado compactado (item 5.2.2). Os solos foram compactados estaticamente sem variação do teor de umidade. A Tabela 6.32 apresenta os dados dos corpos-de-prova referentes a este teste e a Figura 6.63 apresenta graficamente os dados. O objetivo não é a comparação

entre as amostras, mas sim avaliar como o índice de vazios influencia o valor da resistividade em diferentes solos. Os teores de umidade são distintos para cada amostra e estão apresentados nos rótulos dos dados.



Figura 6.62 – Ensaio para a determinação da resistência elétrica em amostras deformadas. “Soil Box”.

Tabela 6.32 – Dados dos ensaios de resistividade com teor de umidade constante.

Solo	Umidade (%)	Resistividade (Ohm.m)	Peso específico (kN/m³)	Peso esp. seco (kN/m³)	Massa espec. real (g/cm³)	e	S (%)
Branco 2.4056.07	13,39	4760	1,056	0,931	2,699	1,899	6,57
	13,39	1989	1,281	1,129	2,699	1,390	10,88
	13,39	997	1,577	1,391	2,699	0,941	19,80
Amarelo 2.4058.07	2,76	26558	1,230	1,197	2,749	1,297	2,55
	2,76	13219	1,398	1,361	2,749	1,020	3,69
	2,76	9666	1,506	1,466	2,749	0,876	4,63
Laranja 2.4057.07	17,06	25172	1,044	0,892	2,741	2,073	7,336
	17,06	5918	1,265	1,080	2,741	1,537	11,991
	17,06	3830	1,414	1,208	2,741	1,270	16,224
Vermelho 2.4059.07	11,89	96339	1,096	0,980	2,807	1,865	6,248
	11,89	20739	1,190	1,064	2,807	1,639	7,717
	11,89	9773	1,309	1,170	2,807	1,399	9,947
Marrom 2.4060.07	7,41	231346	1,110	1,033	2,735	1,646	4,655
	7,41	68667	1,200	1,117	2,735	1,448	5,721
	7,41	49735	1,278	1,190	2,735	1,299	6,789

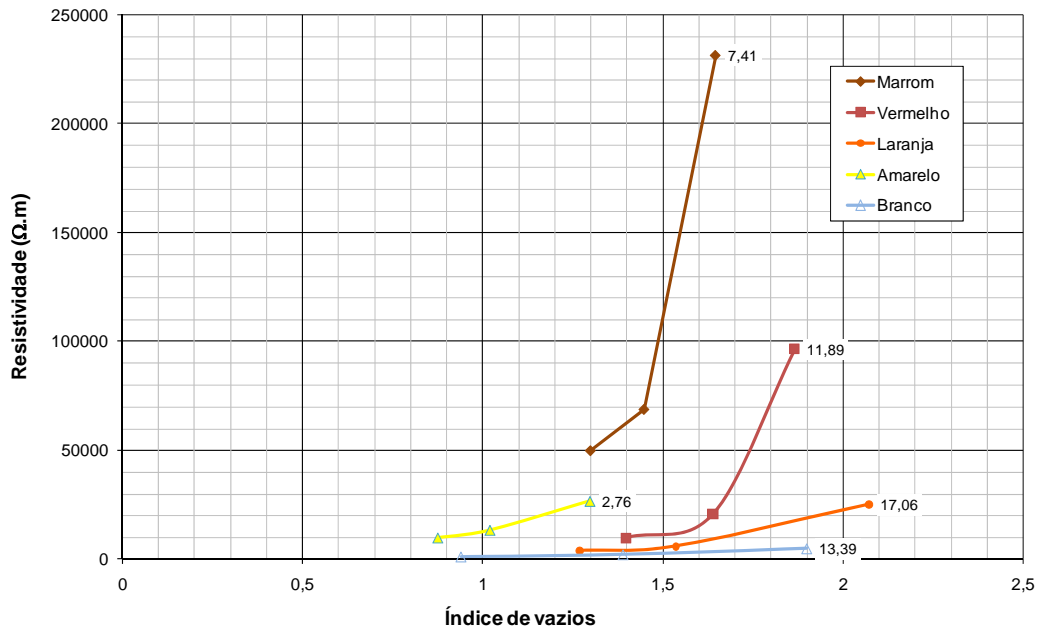


Figura 6.63 – Variação da resistividade com o índice de vazios para as amostras deformadas.

Observa-se na Figura 6.63 que os solos Marrom e Vermelho apresentam grande variação nos valores de resistividade, enquanto que os solos Branco, Amarelo e Laranja têm pequena variação. Ou seja, os solos mais intemperizados sofrem maior influência do índice de vazios que os solos menos intemperizados ou com menor teor de argila. Também se pode notar que o aumento dos vazios nos solos aumenta a resistividade elétrica, ou seja, dificulta a passagem de corrente elétrica.

Para avaliação da influência do teor de umidade na resistividade dos solos, a curva de resistividade foi determinada para solos com valor de índice de vazios constante e diversos teores de umidade. Em cerca de 300 g de solo destorroado e sem secagem prévia foram efetuadas adições sucessivas de água destilada, sendo que para cada teor de umidade foram determinados os valores de resistência à passagem de corrente elétrica. Para cada solo o ensaio foi realizado em dois valores de densidade seca. A Tabela 6.33 resume os dados deste ensaio.

Tabela 6.33 – Dados dos ensaios de resistividade com índice de vazios constante.

Solo	e	Umidade (%)	Resistividade (Ohm.m)	Peso específico (kN/m³)	Peso esp. seco (kN/m³)	S (%)
Branco 2.4056.07	1,443	9,94	10324	12,15	11,05	7,61
		15,81	3707	12,79	11,05	12,11
		21,94	1535	13,47	11,05	16,80
		27,74	1047	14,11	11,05	21,24
		33,66	823	14,77	11,05	25,77
	0,709	10,35	1369	1,742	1,579	23,04
		15,32	733	1,821	1,579	34,11
		20,22	561	1,898	1,579	45,03
		25,22	404	1,977	1,579	56,14
		30,28	390	2,057	1,579	67,40
Amarelo 2.4058.07	1,460	3,41	54069	11,55	11,17	2,61
		9,24	17754	12,20	11,17	7,07
		15,43	2983	12,90	11,17	11,18
		21,22	2254	13,54	11,17	16,23
		27,18	2155	14,21	11,17	20,80
	0,885	11,34	2237	1,624	1,458	18,67
		16,36	1299	1,697	1,458	26,95
		21,45	953	1,771	1,458	35,33
		26,45	688	1,844	1,458	43,58
		31,49	429	1,917	1,458	51,88
		36,54	415	1,991	1,458	60,20
		38,70	406	2,023	1,458	63,750
Laranja 2.4057.07	2,589	18,23	57915	9,03	7,64	5,38
		26,58	17584	9,67	7,64	7,84
		42,60	4747	10,89	7,64	12,56
		52,26	2731	11,63	7,64	15,41
		60,76	2458	12,28	7,64	17,92
	0,993	16,14	3968	1,597	1,375	22,357
		21,66	2497	1,673	1,375	30,009
		26,98	1621	1,747	1,375	37,382
		32,39	1070	1,821	1,375	44,871
		37,79	819	1,895	1,375	52,349
Vermelho 2.4059.07	2,193	11,55	91818	9,81	8,79	4,63
		19,06	13255	10,47	8,79	7,64
		26,31	4866	11,10	8,79	10,55
		33,03	3747	11,70	8,79	13,25
		40,91	2465	12,39	8,79	16,40
	1,273	15,22	12042	1,423	1,235	14,77
		20,68	5073	1,491	1,235	20,08
		25,83	2806	1,554	1,235	25,07
		31,10	1749	1,619	1,235	30,19
		36,17	1290	1,682	1,235	35,11

continuação

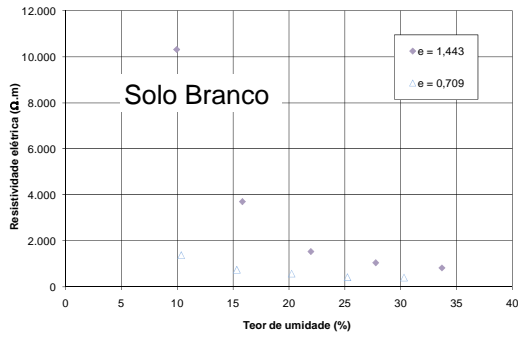
Marrom 2.4060.07	1,675	14,13	204642	11,67	10,23	8,63
		20,52	2807	12,32	10,23	12,53
		27,07	1244	12,99	10,23	16,53
		33,48	812	13,65	10,23	20,44
		39,81	592	14,30	10,23	24,31
		46,76	419	15,01	10,23	28,55
		53,03	353	15,65	10,23	32,38
		59,05	332	16,26	10,23	36,06
	1,256	14,03	6619	1,382	1,212	13,54
		20,02	1920	1,455	1,212	19,32
		25,90	1172	1,526	1,212	24,99
		31,80	824	1,598	1,212	30,68
		37,68	642	1,669	1,212	36,35

Na Figura 6.64 os resultados são apresentados graficamente. Estão mostrados os gráficos para os cinco solos, em estado deformado, dos valores de resistividade em função do teor de umidade e em função do grau de saturação.

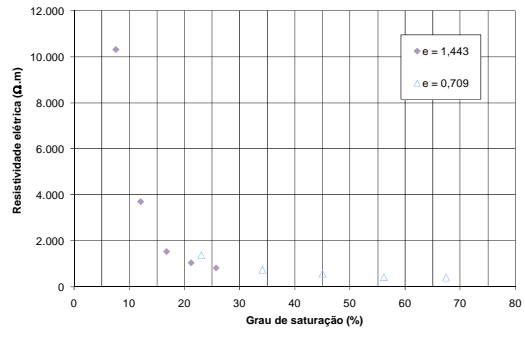
Verifica-se que quando o solo está seco a resistividade é muito alta, decrescendo rapidamente com o aumento do teor de água até alcançar uma umidade a partir da qual a resistividade torna-se praticamente constante. O decréscimo da resistividade está relacionado com a condutividade do material, que é função do teor de umidade, fator diretamente relacionado com a solubilidade dos sais existentes.

No gráfico de resistividade *versus* teor de umidade, índices de vazios superiores produzem curvas de maior resistividade. Conforme já observado no teste anterior, a maior porosidade dificulta a passagem de corrente elétrica no solo. Ao se analisar o gráfico de resistividade *versus* grau de saturação, observa-se que para os solos Branco, Amarelo e Laranja as duas curvas de resistividade com diferentes índices de vazios se aproximam bastante, mas as curvas dos solos Vermelho e Marrom, ao contrário, se afastam. Isto porque o índice de vazios tem pouca influência na resistividade dos solos arenosos e a resistividade é função apenas do grau de saturação.

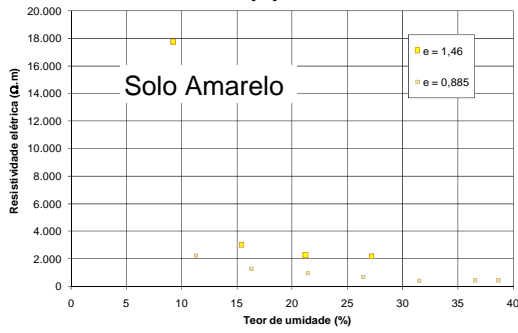
Os solos mais argilosos tendem a apresentar valores superiores de resistividade. O solo Marrom é bastante resistivo para teores de umidade pequenos e tem uma queda de resistividade acentuada quando se aumenta o teor de umidade. A resistividade do solo Branco é bem menos sensível à variação do teor de umidade.



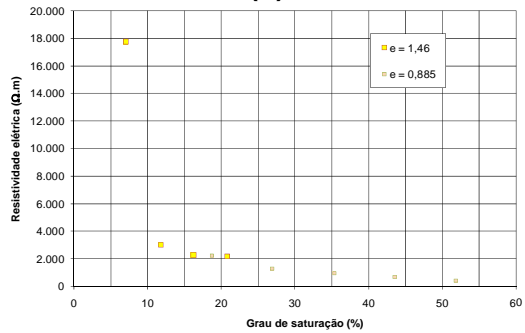
(a)



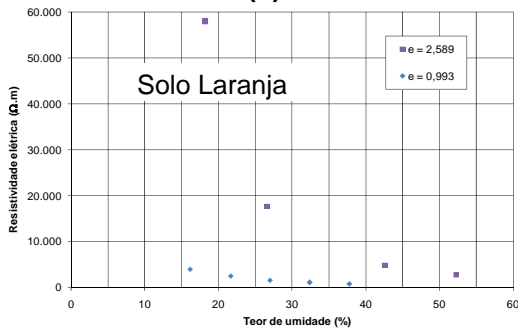
(b)



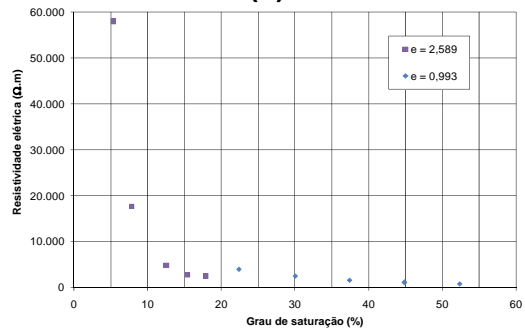
(c)



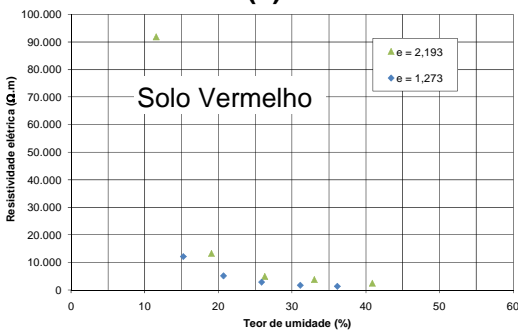
(d)



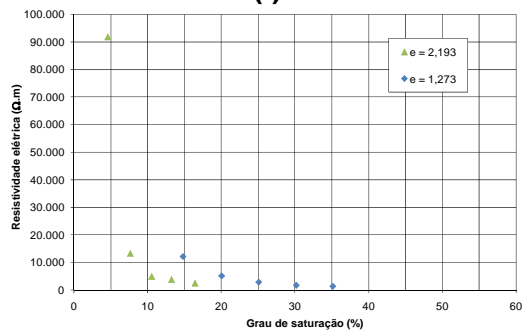
(e)



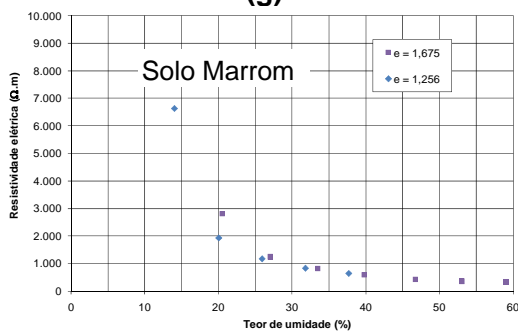
(f)



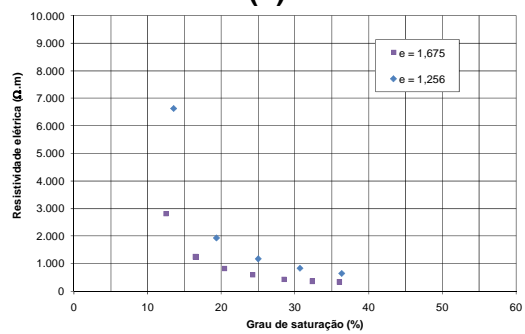
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 6.64 – Variação da resistividade com o teor de umidade e grau de saturação para amostras deformadas.

Foram ajustadas funções do tipo potência aos dados de laboratório, correlacionando a resistividade ao grau de saturação. O valor da resistividade é igual a uma constante que multiplica o grau de saturação elevado ao valor negativo do índice de vazios do solo. As funções são apresentadas na Tabela 6.34, juntamente com o coeficiente de correlação encontrado. Foram obtidas boas correlações para todos os solos, com exceção para o ajuste do solo Marrom que apresentou um R^2 de 0,72 e 0,62 para os dois índices de vazios avaliados. Para esse ajuste foram considerados todos os pontos do ensaio. Observa-se na Tabela 6.33 que o solo Marrom com índice de vazios igual a 1,675 apresenta um valor muito alto de resistividade. Desconsiderando esse ponto no ajuste da função o coeficiente de correlação aumenta para 0,91.

Nas funções ajustadas, quanto maior é a resistividade apresentada pelo solo, maior é a constante que multiplica o valor do grau de saturação. Essa constante pode ser função da estrutura do solo e da sua composição e deve ser mais bem pesquisada.

Tabela 6.34 – Funções do tipo potência propostas para o ajuste dos dados de resistividade (y) em função do grau de saturação (x) e do índice de vazios das amostras deformadas.

Solo	Índice de vazios	Função potência	Coeficiente de correlação (R^2)
Branco 2.4056.07	0,709	$y = 10.038 x^{-0,709}$	0,78
	1,443	$y = 169.365 x^{-1,443}$	0,91
Amarelo 2.4058.07	0,885	$y = 24.287 x^{-0,885}$	0,85
	1,43	$y = 222.427 x^{-1,43}$	0,98
Laranja 2.4057.07	0,993	$y = 71.487 x^{-0,993}$	0,81
	2,589	$y = 4.384.564 x^{-2,589}$	0,99
Vermelho 2.4059.07	1,273	$y = 278.818 x^{-1,273}$	0,74
	2,193	$y = 2.438.598 x^{-2,193}$	0,93
Marrom 2.4060.07	1,256	$y = 127.620 x^{-1,256}$	0,72
	1,675	$y = 5.012.251 x^{-1,675}$ $y = 164.790 x^{-1,675}$	0,62 0,91

A partir dos dois testes realizados com as amostras no estado deformado, pode-se concluir que o grau de saturação influencia de forma consistente a resistividade. A alteração no grau de saturação de um solo pode ocorrer de duas formas: alteração do teor de umidade com índice de vazios constante, ou

alteração do índice de vazios com umidade constante. No entanto, é necessária uma variação muito mais consistente do índice de vazios para produzir uma variação no grau de saturação do que a variação no teor de umidade. Portanto a efetividade da variação no teor de umidade para alterações na resistividade é muito maior.

6.2.1.2. Amostras Indeformadas

Para a execução do ensaio com as amostras indeformadas, corpos-de-prova representativos das amostras foram moldados em tubos de PVC de 50 a 75 mm de diâmetro e de 100 mm a 150 mm de altura. Para a passagem da corrente pelo solo foram colocadas duas placas de bronze, uma em cada lado do tubo de PVC. A diferença de potencial foi aplicada entre as duas placas. Os corpos-de-prova foram secos ao ar, para a primeira determinação de resistência. Para as demais determinações, os corpos-de-prova foram umedecidos e deixados em repouso por 2 dias previamente à medição. Após ficarem praticamente saturados, os corpos-de-prova foram secos em estufa para determinação do seu teor de umidade. Todas as medidas foram realizadas com um único corpo-de-prova e, portanto, as umidades de cada estágio só foram determinadas ao final de todo o processo, considerando que não houve perda de material, ou seja, não ocorreu variação no peso seco do corpo-de-prova. Após a determinação da resistência para cada teor de umidade, foi determinada a resistividade, multiplicando-se o valor da resistência pela área de transmissão da corrente (área de solo perpendicular ao fluxo de corrente) e dividindo-se pela distância entre as placas de bronze (altura do PVC).

Foram ensaiadas 12 amostras do solo Branco, 9 amostras do solo Amarelo, 6 amostras do solo Laranja e 5 amostras dos solos Vermelho e Marrom. As características iniciais dos solos estão resumidas na Tabela 6.35.

A variação da resistividade com o teor de umidade e com o grau de saturação das amostras é apresentada da Figura 6.65 à Figura 6.70.

Tabela 6.35 – Características dos solos indeformados utilizados para os ensaios de resistividade elétrica.

Solo	Amostra	Peso específico inicial (kN/m³)	Índice de vazios
Branco	2.4309.05	1,69	0,62
	2.4332.05	1,68	0,62
	2.4244.05	1,89	0,63
	2.4328.05	1,66	0,66
	2.4252.05	1,73	0,67
	2.4333.05	1,61	0,68
	2.4248.05	1,76	0,70
	2.4314.05	1,74	0,72
	2.4324.05	1,84	0,72
	2.4323.05	1,65	0,73
	2.4308.05	1,64	0,75
Amarelo	2.4254.05	1,62	0,80
	2.4375.05	1,66	0,86
	2.4376.05	1,66	0,91
	2.4372.05	1,70	0,94
	2.4374.05	1,53	0,95
	2.4373.05	1,53	1,09
	2.4217.05	1,57	1,15
	2.4379.05	1,46	1,29
Laranja	2.4392.05	1,47	1,36
	2.4393.05	1,47	1,40
	2.4228.05	1,38	1,35
	2.4398.05	1,18	1,71
	2.4351.05	1,30	1,41
	2.4225.05	1,34	1,27
Vermelho	2.4228.05	1,30	1,38
	2.4285.05	1,29	1,40
	2.4441.05	1,79	0,86
	2.4047.07	1,40	1,02
	2.4431.05	1,34	1,05
Marrom	2.4433.05	1,25	1,34
	2.4047.07	1,34	1,23
	2.4014.07	1,56	0,97
	2.4014.07	1,61	0,91
	2.4014.07	1,47	1,07
	2.4014.07	1,23	1,50
	2.4014.07	1,56	0,96

Na Figura 6.65 está apresentada a variação da resistividade elétrica em função da variação do teor de umidade e do grau de saturação do solo para as amostras com índice de vazios inferior a 0,7 e na Figura 6.66 são apresentados os mesmos gráficos para as amostras com índice de vazios superior a 0,7. Optou-se por dividir os resultados do solo Branco devido ao maior número de ensaios realizados. A passagem de corrente elétrica por um meio é função das características desse meio, como composição e estrutura. Na Figura 6.65 observam-se claramente 3 grupos distintos de curvas relacionando a resistividade com o teor de umidade e na Figura 6.66 dois grupos de curvas. Em cada figura, como o índice de vazios entre as amostras é próximo, as diferenças de resistividade podem ser decorrentes de uma distribuição distinta de poros ou de composição entre os corpos-de-prova.

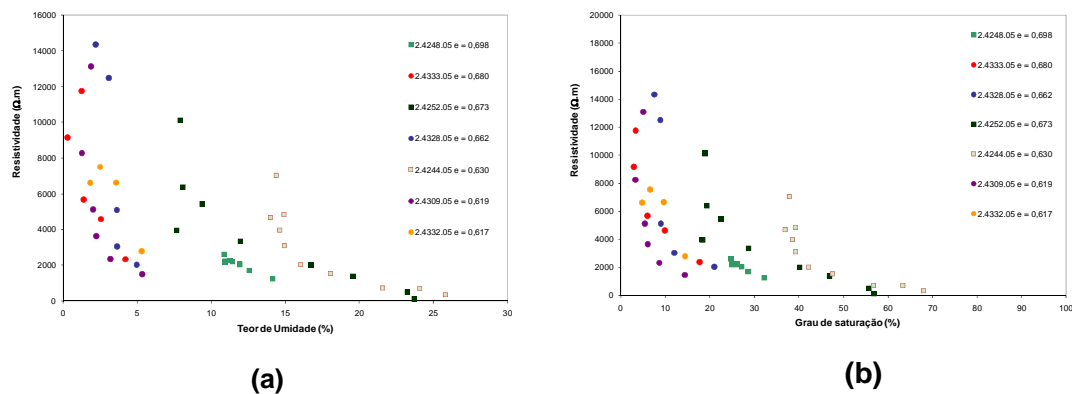


Figura 6.65 – Solo Branco, amostras brancas de índice de vazios inferior a 0,7. (a) Resistividade *versus* teor de umidade. (b) Resistividade *versus* grau de saturação.

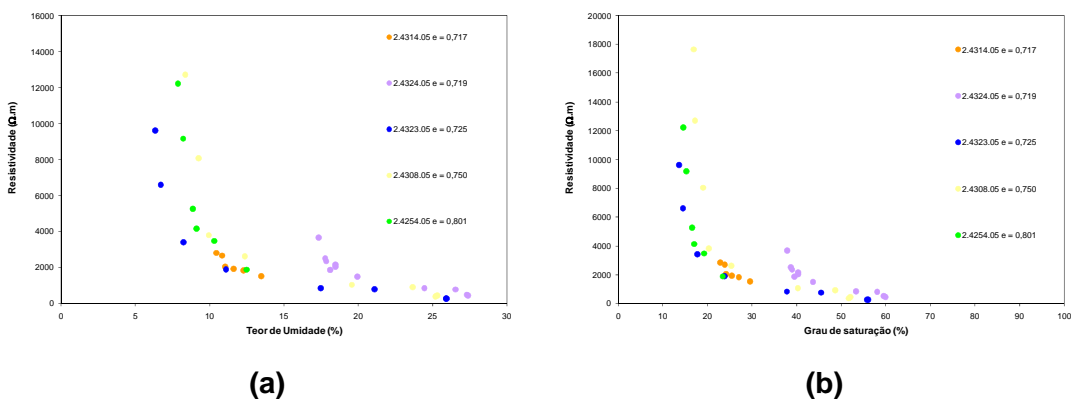


Figura 6.66 – Solo Branco, amostras brancas de índice de vazios superior a 0,7. (a) Resistividade *versus* teor de umidade. (b) Resistividade *versus* grau de saturação.

Na Figura 6.67 os resultados dos ensaios de resistividade são apresentados para as amostras do solo Amarelo. O índice de vazios desses corpos-de-prova variam entre 0,86 e 1,403. Também nestas figuras observam-se 3 comportamentos diferentes para a passagem de corrente elétrica nos solos. O primeiro comportamento, caracterizado por amostras mais resistivas e com índice de vazios superior a 1,1 (representadas nos gráficos por triângulos), um segundo comportamento representado pela amostra 2.4375.05, com índice de vazios de 0,86 e comportamento resistivo intermediário e um terceiro pelos demais corpos-de-prova, que apresentam pequena resistividade e índice de vazios em torno de 0,9.

Os corpos-de-prova com maior índice de vazios são mais resistivos (localizam-se acima das demais para um mesmo teor de umidade na Figura 6.67(a)). Apenas a amostra 2.4375.05 é que apresenta comportamento fora desta tendência, pois com índice de vazios de 0,86 tem resistividade maior que outras amostras com índice de vazios superior. Esse comportamento é mais evidente no gráfico de resistividade em função do grau de saturação. Provavelmente essa amostra tem composição mineral distinta das demais, fato que se reflete na condutividade elétrica.

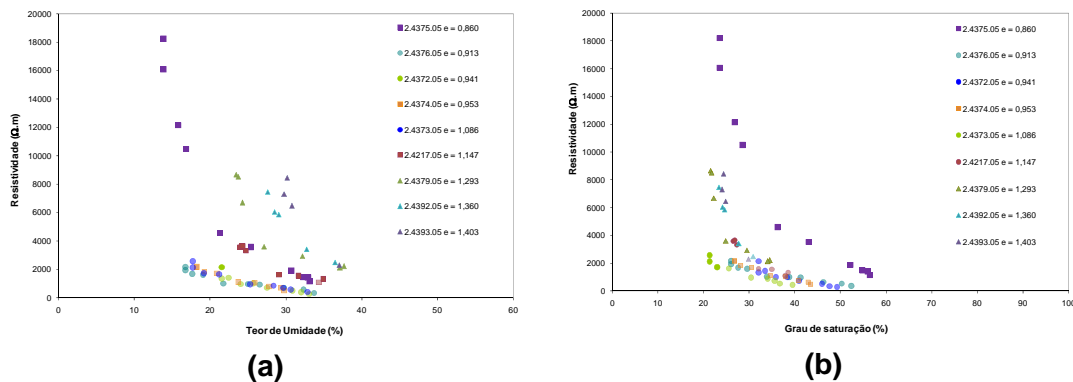


Figura 6.67 – Solo Amarelo. (a) Resistividade *versus* teor de umidade. (b) Resistividade *versus* grau de saturação.

Nas figuras 6.69, 6.70 e 6.71 são apresentadas as curvas de resistividade dos solos Laranja, Vermelho e Marrom. Esses solos têm comportamento resistivo menos variável que os solos menos intemperizados. Praticamente não há corpos-de-prova que apresentam comportamento distinto da média do grupo, com exceção para a amostra 2.4441.05 do solo Vermelho e um corpo-de-prova com índice de vazios 1,495 do solo Marrom.

Como pode ser visualizado, para as amostras menos intemperizadas (e.g. Branco e Amarelo) as diferentes curvas de resistividade tendem a um

comportamento mais uniforme quando a análise é feita em função do grau de saturação. Por outro lado, para as amostras mais intemperizadas (e.g. Vermelho e Marrom) o comportamento mais uniforme das curvas acontece na avaliação dos valores de resistividade com o teor de umidade. Isto é consequência da maior variação do índice de vazios nas amostras mais intemperizadas e a menor variação deste parâmetro nos solos menos intemperizados. A análise em termos de grau de saturação leva em consideração os vazios do solo, enquanto que a análise gravimétrica considera apenas a quantidade de água no elemento.

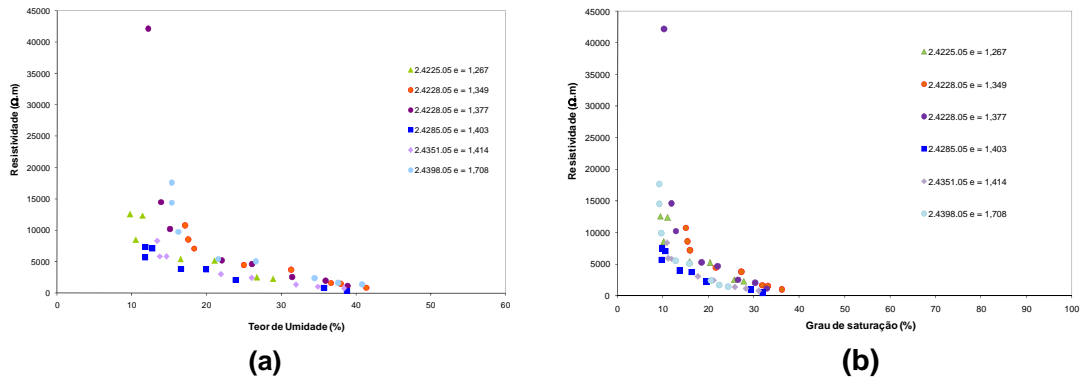


Figura 6.68 – Solo Laranja. (a) Resistividade versus teor de umidade. (b) Resistividade versus grau de saturação.

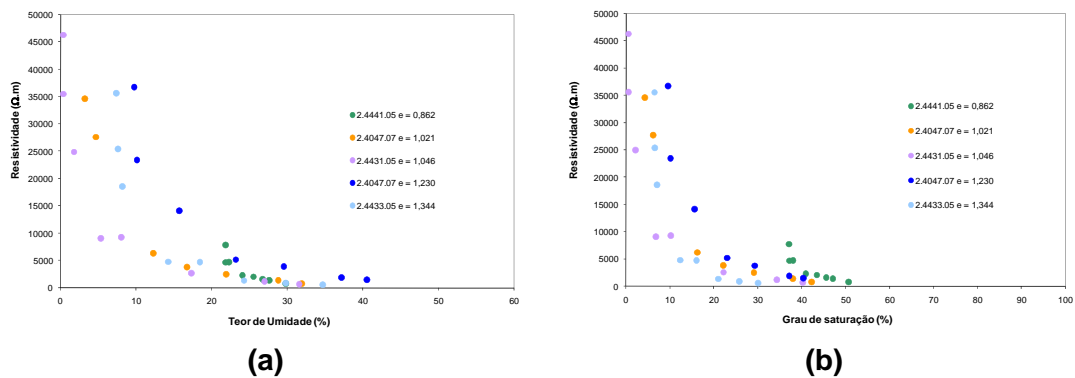


Figura 6.69 – Solo Vermelho. (a) Resistividade versus teor de umidade. (b) Resistividade versus grau de saturação.

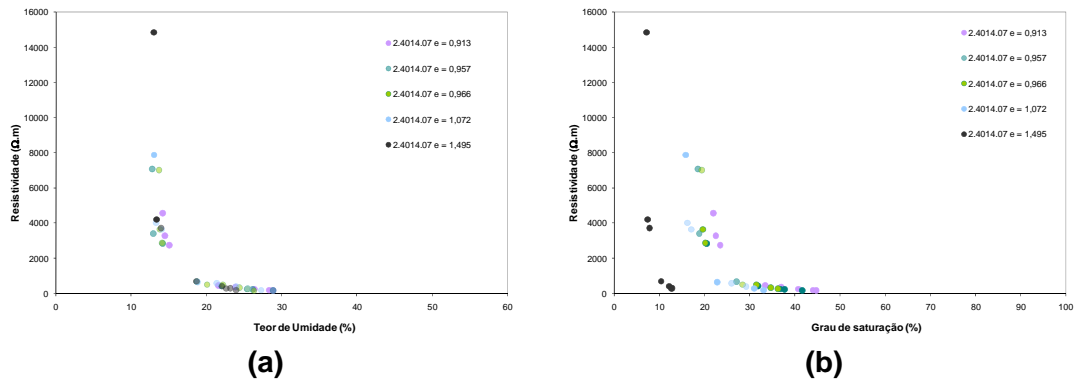


Figura 6.70 – Solo Marrom. (a) Resistividade versus teor de umidade. (b) Resistividade versus grau de saturação.

6.2.2. Avaliação da Influência da Estrutura na Resistividade Elétrica

Conforme descrito no item 6.2.1.1 o índice de vazios tem influência na passagem de corrente elétrica pelo solo. No entanto, a estrutura do solo não é representada apenas por esse parâmetro, principalmente nos solos residuais, mas também por outras características como cimentação e distribuição e tamanho de poros. Na Figura 6.71 apresenta-se a comparação da resistividade elétrica entre uma amostra deformada e outra indeformada do solo Branco. Procurou-se nos ensaios com as amostras deformadas e indeformadas dois corpos-de-prova que apresentassem índice de vazios próximos. Observa-se que o corpo-de-prova indeformado é mais resistivo que o corpo-de-prova deformado, ou seja, apresenta maior resistência à passagem de corrente elétrica. Se o índice de vazios das duas amostras é bastante próximo, essa diferença de condutividade pode ser decorrente de diferente composição mineralógica das amostras (uma vez que os solos do perfil estudados são bastante heterogêneos) e/ou de características de contato entre grãos que está presente nos solos residuais. Conforme relatado por Liu *et al.*, 2007, em amostras cimentadas artificialmente, o teor de cimento e o tempo de cura aumentam a resistividade dos materiais.

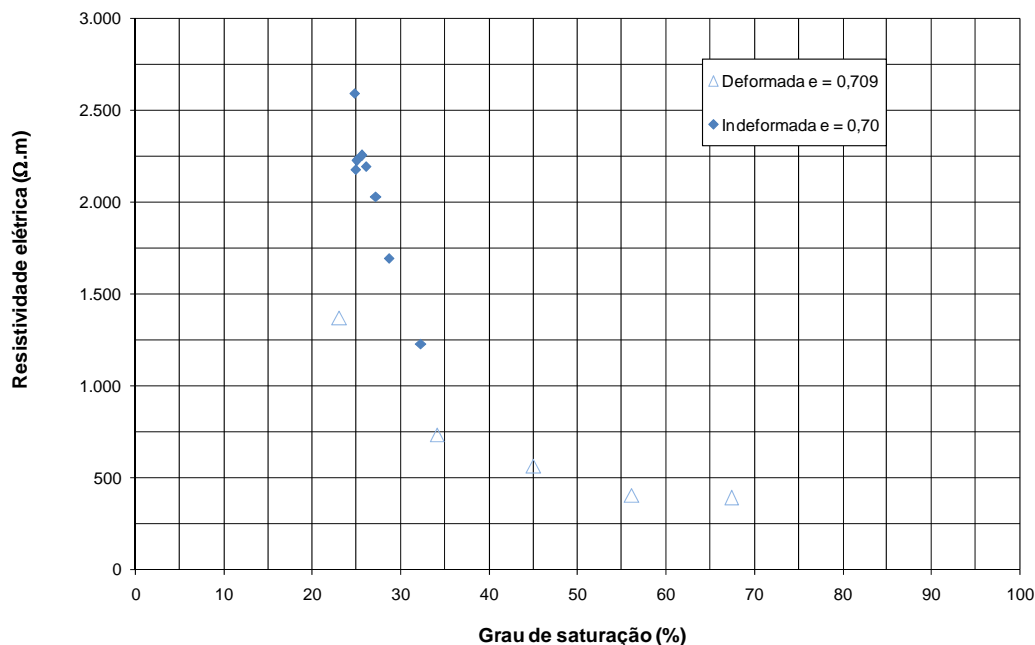


Figura 6.71 – Comparação entre corpos-de-prova deformados e indeformados do solo Branco.

A mesma comparação foi realizada para as demais categorias de solos estudados. Os resultados são apresentados da Figura 6.72 à Figura 6.75. Para o solo Amarelo a diferença entre os estados é bem pronunciada. Para o solo Laranja, existem dois ensaios com amostras deformadas com índices de vazios de 2,589 e 0,993. Como não havia amostras indeformadas ensaiadas com índices de vazios próximos àqueles, a Figura 6.73 apresenta a variação de resistividade de um corpo-de-prova com índice de vazios igual a 1,35. A curva de resistividade de uma amostra alaranjada com índice de vazios de 1,35 estaria entre as curvas de 2,589 e 0,993 e, portanto, com valores de resistividade inferiores à da amostra indeformada. Para o solo Vermelho a diferença de comportamento é um pouco menor (Figura 6.74), e para o solo Marrom é menor ainda (Figura 6.75).

Ou seja, assim como observado para o solo Branco, no estado indeformado (considerando os demais solos) a resistividade é sempre superior à resistividade no estado deformado no mesmo grau de saturação. Essa generalização praticamente descarta que essa diferença de comportamento possa ser decorrente apenas de diferença de mineralogia entre as amostras.

Pode-se dizer também que para os solos mais granulares, ou menos intemperizados, a diferença entre o estado deformado e indeformado é superior à diferença entre o estado dos solos mais argilosos. Ou seja, a estrutura dos solos, não caracterizada apenas pelo índice de vazios, causa grande influência na resistividade dos solos.

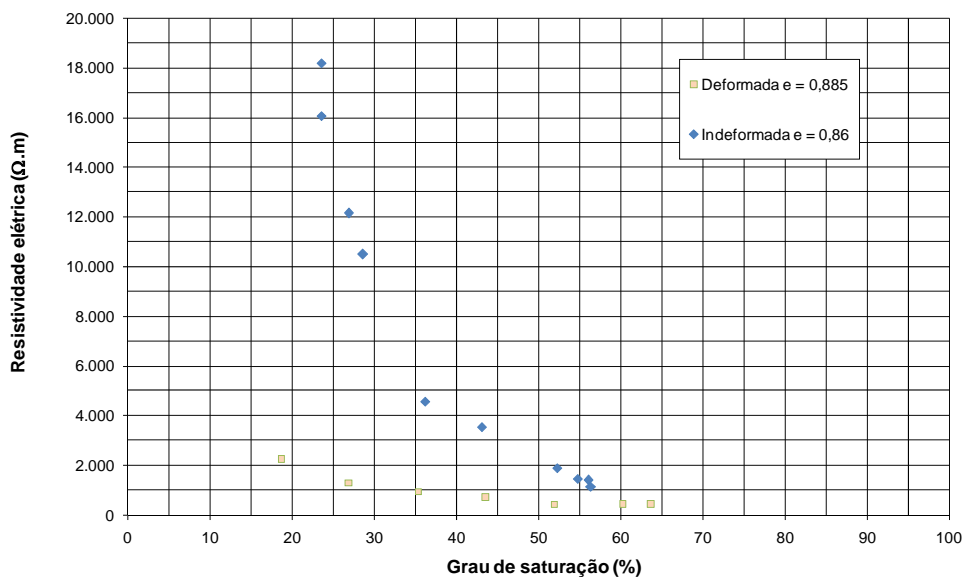


Figura 6.72 – Comparação entre corpos-de-prova deformados e indeformados do solo Amarelo.

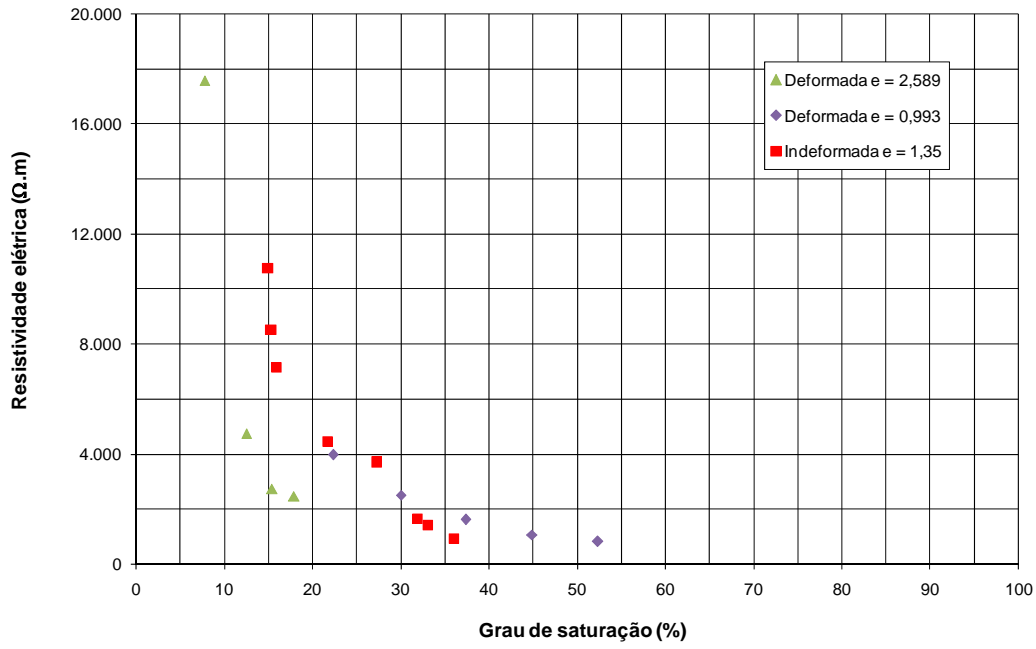


Figura 6.73 – Comparação entre corpos-de-prova deformados e indeformados do solo Laranja.

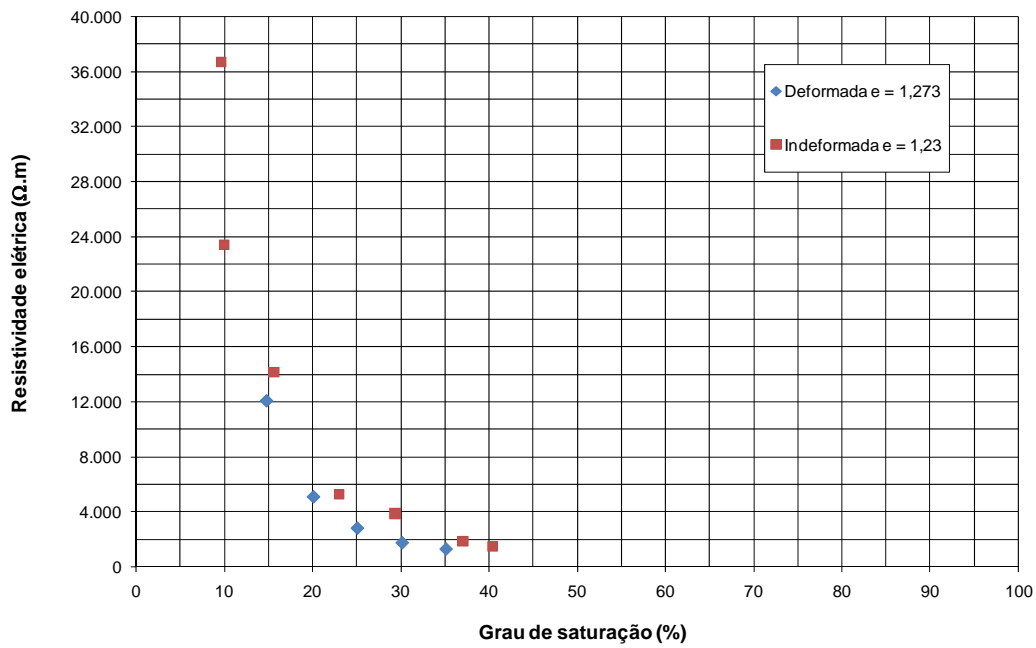


Figura 6.74 – Comparação entre corpos-de-prova deformados e indeformados do solo Vermelho.

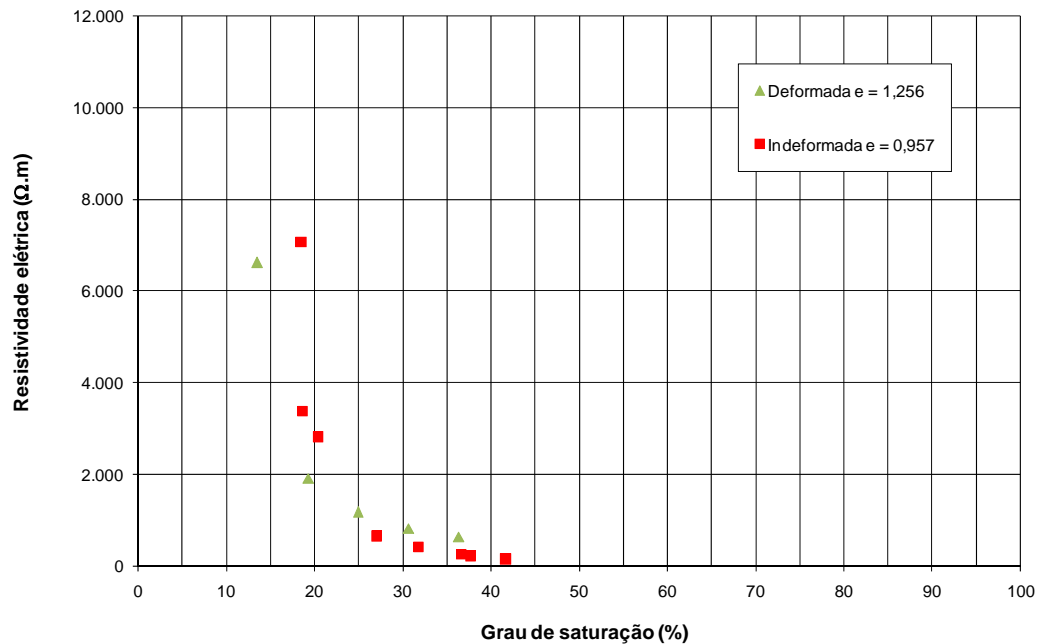


Figura 6.75 – Comparação entre corpos-de-prova deformados e indeformados do solo Marrom.

A variação do índice de resistividade (IR), determinado pela Equação 6.9, com o grau de saturação pode identificar também a distribuição de poros dos solos (Worthington e Pallatt, 1989 *apud* Richard *et al.*, 2005). A existência de micro, meso e macro-porosidades na estrutura provoca uma alteração na variação da resistividade que pode ser identificada num gráfico bi-log de IR x S(%) (ver Figura 6.55). Esta dependência é fácil de ser compreendida uma vez que a saturação de poros de diferentes tamanhos não ocorre por igual – nos poros maiores a troca de umidade com o exterior é realizada com mais facilidade do que nos micro poros – e, por sua vez o grau de saturação tem grande influência na condutividade elétrica.

A variação do índice de resistividade com o grau de saturação dos corpos-de-prova indeformados é apresentada da Figura 6.76 à Figura 6.80. A relação entre essas grandezas não é linear em toda a faixa de grau de saturação, mas pequenos trechos lineares podem ser observados ao longo da variação da saturação com o índice de resistividade. Este fato era esperado devido à ocorrência de distintos tamanhos de poros observados nos solos (ver ensaio de porosimetria de mercúrio no item 5.2.2) e a heterogeneidade apresentada pelos materiais. Cada mudança entre trechos lineares indica a preponderância da saturação de um tamanho de poro do solo.

Os solos menos intemperizados apresentam maior heterogeneidade, provavelmente função da mineralogia e da estrutura recebida da rocha. O comportamento resistivo do solo Branco é muito mais variável que os demais, conforme pode ser observado na Figura 6.76, principalmente para valores de grau de saturação inferiores a 30%. Ressalta-se que, quanto menor o grau de saturação do material maior é a influência da estrutura na passagem de corrente elétrica, pois quanto maior a saturação do elemento maior é a facilidade de corrente pelos fluidos em detrimento da estrutura.

O corpo-de-prova Marrom com índice de vazios igual a 1,495 apresenta comportamento bastante distinto dos demais corpos-de-prova, provavelmente devido ao também dessemelhante valor do índice de vazios (Figura 6.80).

De modo geral, todos os corpos-de-prova apresentam tendência de comportamento semelhante e dentro dos grupos de solos (Branco, Amarelo, Laranja, Vermelho e Marrom) pode-se delinear uma faixa média de variação. O comportamento geral é o de ter-se, para altos valores de índice de resistividade, um valor praticamente constante de grau de saturação (com exceção do solo Branco que apresenta muita heterogeneidade nessa faixa). Para valores decrescentes de índice de resistividade, valores crescentes de grau de saturação são observados, em uma variação praticamente linear desses parâmetros. E, por fim, para valores muito pequenos de IR, novamente um valor constante de grau de saturação.

Esse comportamento de IR com o grau de saturação é bastante similar à variação da pressão de sucção, com a ressalva que, no caso de IR, está-se avaliando um gráfico bi-log e, no caso da curva característica, a variação é observada em um gráfico mono-log.

Esses resultados demonstram que o ensaio de resistividade pode ser uma ferramenta importante para a caracterização da estrutura de solos residuais.

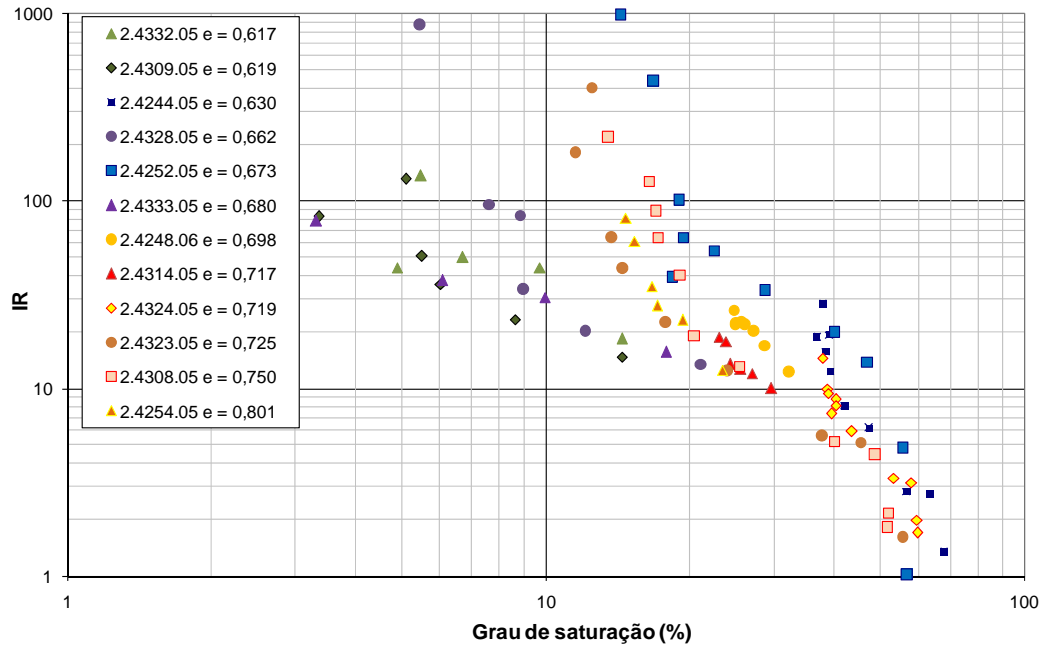


Figura 6.76 – Variação do índice de resistividade com o grau de saturação para o solo Branco.

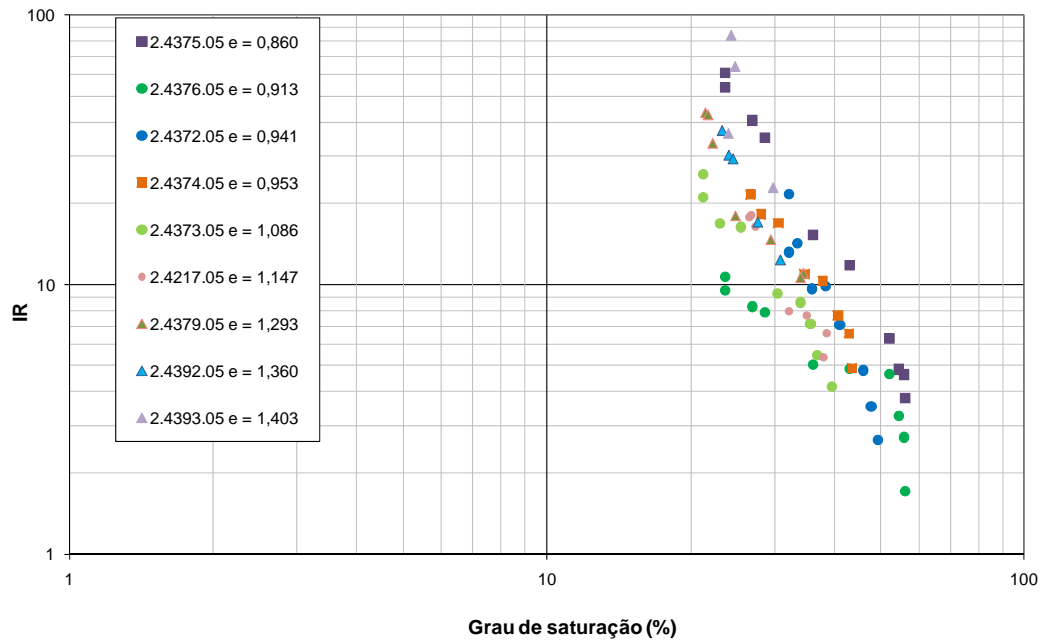


Figura 6.77 – Variação do índice de resistividade com o grau de saturação para o solo Amarelo.

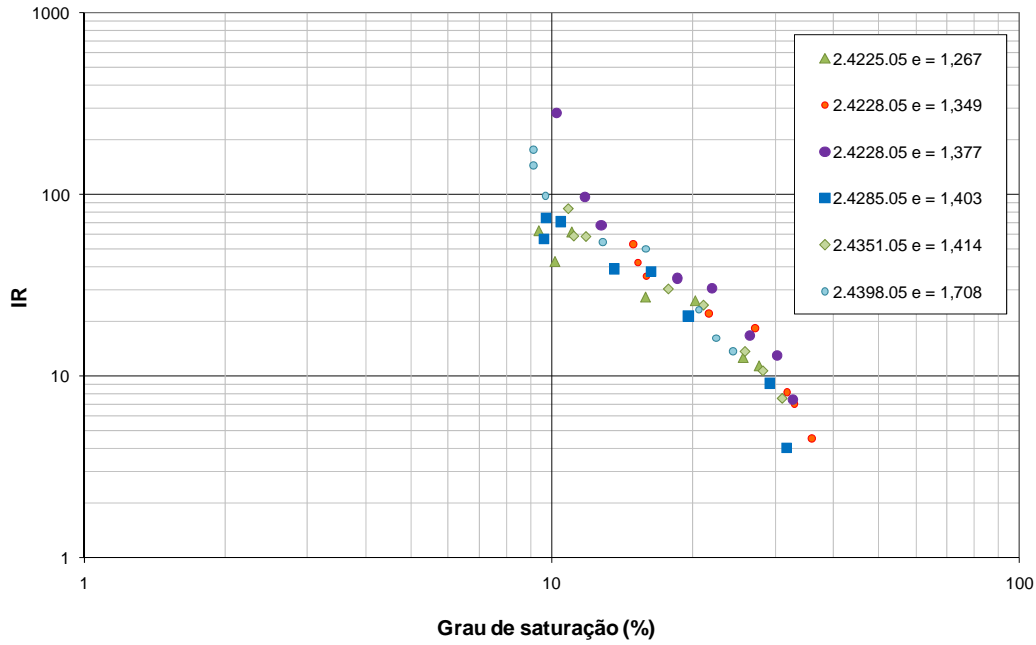


Figura 6.78 – Variação do índice de resistividade com o grau de saturação para o solo Laranja.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310927/CA

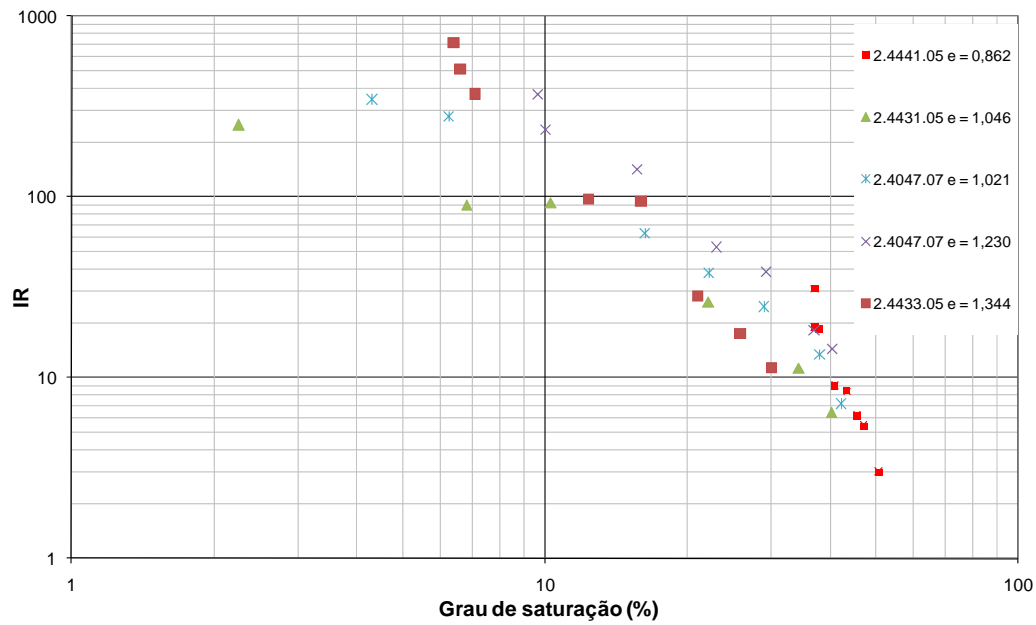


Figura 6.79 – Variação do índice de resistividade com o grau de saturação para o solo Vermelho.

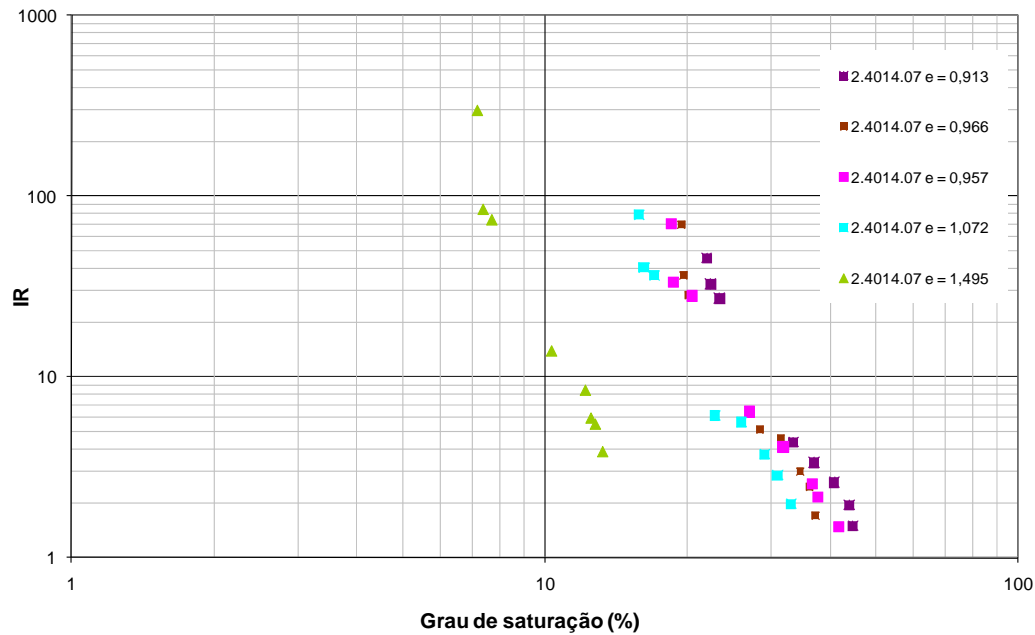


Figura 6.80 – Variação do índice de resistividade com o grau de saturação para o solo Marrom.

6.2.3. Avaliação da Influência dos Íons na Resistividade Elétrica

Para as curvas de resistividade determinadas para as amostras deformadas foi ajustada uma equação hiperbólica relacionando a resistividade e o grau de saturação. Para o índice de vazios próximo ao das amostras indeformadas e utilizando essa equação, foi determinado o valor de resistividade equivalente ao grau de saturação de 85%. Apesar de ser um valor extrapolado, foi determinado esse grau de saturação para a análise, pois é a partir desse valor que os solos podem ser considerados saturados, ou seja, com fluido contínuo dentro da estrutura do solo. Neste caso a corrente elétrica que percorre o material passa tanto pela estrutura sólida do solo quanto pelos seus vazios preenchidos por água. Esses valores foram comparadas ao índice ba_1 , ao índice ba , e ao teor de SiO_2 e Al_2O_3 dos solos. As correlações são apresentadas na Figura 6.81.

Os índices de intemperismo químico, entre eles o ba e o ba_1 , foram propostos para quantificar o grau de intemperismo dos solos. Esses índices são relações moleculares entre os diversos elementos presentes nos solos e rochas, e foram estabelecidos com base no princípio de que os elementos químicos provenientes da decomposição dos minerais são removidos de forma diferencial.

O índice ba considera os teores de potássio, sódio e cálcio em relação ao óxido de alumínio, como descrito pela Equação 6.1. E o índice ba_1 considera apenas os teores de potássio e sódio em relação ao óxido de alumínio, conforme a Equação 6.2.

$$ba = \frac{(K_2O + Na_2O + CaO)}{Al_2O_3} \quad \text{(Equação 6.1)}$$

$$ba_1 = \frac{(K_2O + Na_2O)}{Al_2O_3} \quad \text{(Equação 6.2)}$$

Existem diversos índices de intemperismo propostos para a quantificação do intemperismo de solos residuais (e.g. Vieira, 1975; Moníz, 1972; Falcão, 1984). A escolha de um determinado índice deve ser feita em função do tipo de rocha e clima da região e devem ser utilizados para avaliar, dentro de uma mesma formação o grau de alterabilidade do solo, não devendo ser aplicados como referências comparativas entre duas formações distintas (Oliveira, 2006). Os índices ba e ba_1 foram escolhidos pois o perfil estudado é resultado da intemperização de rochas ácidas e as quantidades de potássio e sódio são mais relevantes.

Foram ajustadas funções lineares aos dados com coeficientes de correlação de 0,905 para o índice ba , 0,78 para o índice ba_1 , 0,742 para o teor de sílica e 0,889 para o teor de óxido de alumínio. Essas correlações indicam a íntima relação da resistividade elétrica com a composição dos solos. Os parâmetros ba e ba_1 e o teor de sílica são diretamente proporcionais à resistividade dos solos. Enquanto que a quantidade de óxido de alumínio é inversamente proporcional, ou seja, os solos mais intemperizados oferecem menor resistência à passagem de corrente elétrica que os solos menos intemperizados. Como as amostras foram ensaiadas no estado deformado, praticamente não há a influencia da estrutura nos resultados.

A mesma análise foi efetuada para as amostras indeformadas. Corpos-de-prova representativos de cada grupo de solo foram selecionados e o valor da resistividade para o grau de saturação de 85% foi determinado a partir do ajuste de uma função hiperbólica aos dados de laboratório. Os resultados estão apresentados na Figura 6.82.

Enquanto que para as amostras deformadas o melhor ajuste entre os dados foi obtido com uma equação linear, a relação entre a resistividade das amostras indeformadas e os parâmetros ba , ba_1 , SiO_2 e Al_2O_3 não é linear.

Foram ajustadas funções do tipo potência aos dados com coeficientes de correlação de 0,801 para o índice ba , 0,827 para o índice ba_1 , 0,779 para o teor de sílica e 0,766 para o teor de óxido de alumínio.

Os coeficientes de correlação para os solos deformados e indeformados são bastante próximos, mas há diferenças marcantes entre as correlações entre os dois estados do solo. Observa-se que no estado deformado os solos menos intemperizados são mais resistivos, portanto quanto maior o índice de intemperismo (ba ou ba_1), quanto maior o teor de SiO_2 e quanto menor o teor de Al_2O_3 maior é a resistividade apresentada pelo material. O comportamento do material deformado é função preponderante da composição desse material, além do grau de saturação que, nesse caso é constante e igual a 85%. Os solos menos intemperizados contém maior quantidade de sílica que é um material resistivo. O material argiloso, por sua vez, é mais condutivo, principalmente porque geralmente apresenta uma superfície específica alta, o que aumenta a condutividade superficial (Abu-Hassanein *et al.*, 1996). Portanto o comportamento observado na Figura 6.81 era esperado.

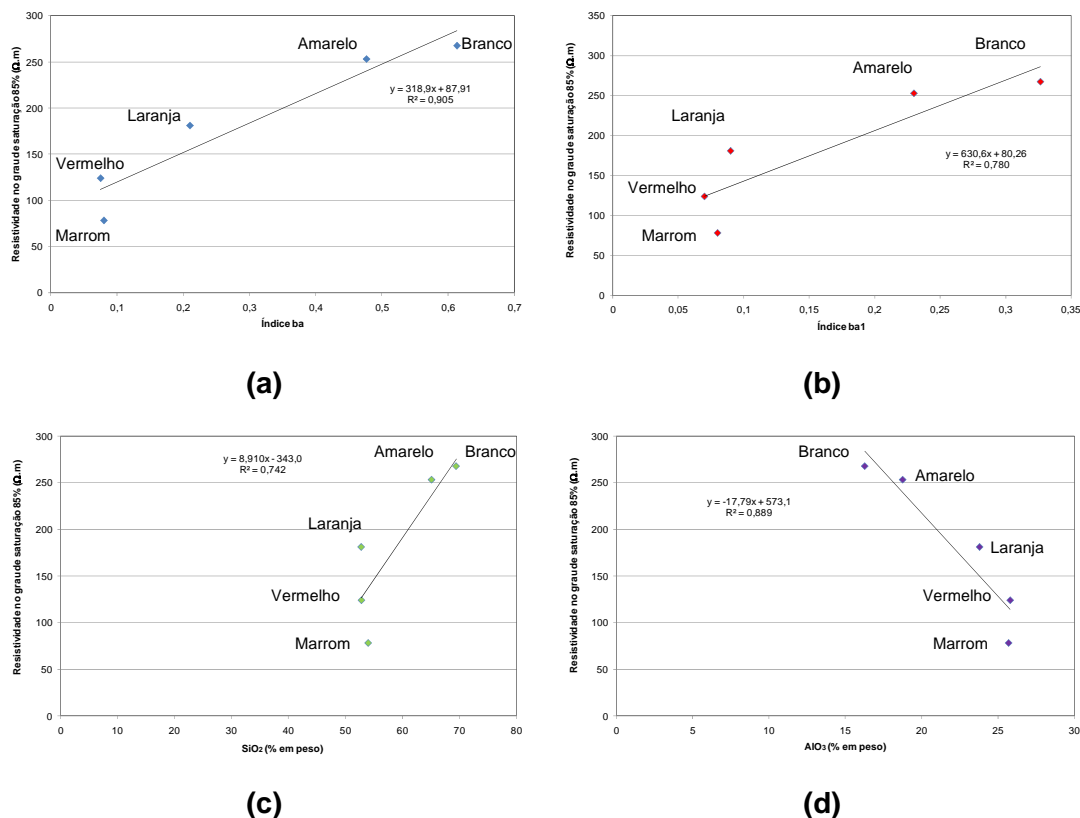


Figura 6.81 – Amostras deformadas. (a) Resistividade no grau de saturação de 85% versus índice ba . (b) Resistividade no grau de saturação de 85% versus índice ba_1 . (c) Resistividade no grau de saturação de 85% versus teor de SiO_2 . (d) Resistividade no grau de saturação de 85% versus teor de Al_2O_3 .

Por outro lado, o comportamento dos solos indeformados não segue a mesma tendência observada para os solos deformados. No estado indeformado os solos menos intemperizados são menos resistivos, portanto quanto maior o índice de intemperismo (ba ou ba_1), quanto maior o teor de SiO_2 e quanto menor o teor de Al_2O_3 menor é a resistividade apresentada pelo material. Nos ensaios com os solos no estado indeformado, além da composição do material a estrutura também exerce influência na resistividade. De acordo com os dados obtidos, quanto mais intemperizado o solo, mais a sua estrutura torna-se uma “barreira” para a passagem de corrente elétrica, enquanto que os solos de granulometria mais grossa permitem a passagem de corrente elétrica.

O índice de vazios também comanda a resistividade, pois a variação dessas duas características do solo apresenta o mesmo padrão. No perfil estudado, o solo Branco é o que apresenta o menor valor do índice de vazios e a menor resistividade. Os dois parâmetros crescem com o decréscimo da profundidade, atingindo seu maior valor no solo Vermelho. Para o solo Marrom o valor do índice de vazios e da resistividade volta a decrescer (Figura 5.9, Tabela 5.24 e Figura 6.82).

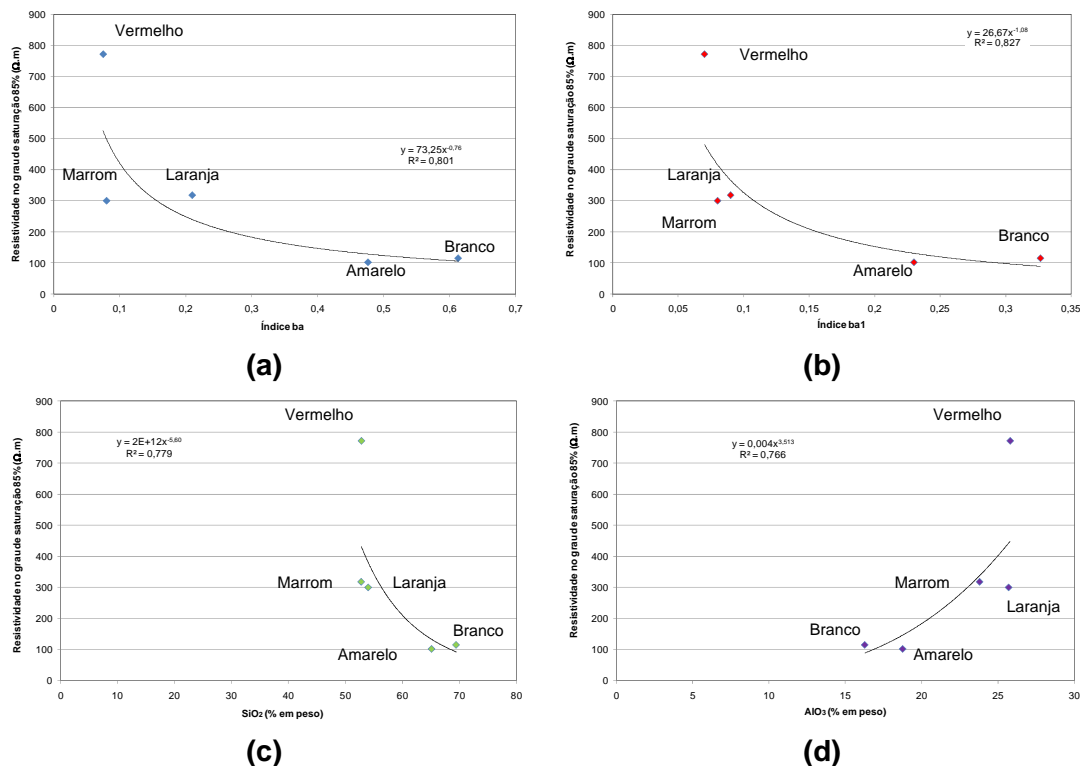


Figura 6.82 – Amostras indeformadas. (a) Resistividade no grau de saturação de 85% versus índice ba . (b) Resistividade no grau de saturação de 85% versus índice ba_1 . (c) Resistividade no grau de saturação de 85% versus teor de SiO_2 . (d) Resistividade no grau de saturação de 85% versus teor de Al_2O_3 .

Devido aos bons resultados de correlação entre os valores de resistividade e os índices de intemperismo, foi planejado um programa de ensaios com o objetivo de avaliar a capacidade de resistividade elétrica dos solos em função da quantidade de íons presentes. Foi realizada uma série de ensaios envolvendo a determinação da resistividade dos solos intercalada com a percolação de água destilada nesses corpos-de-prova. A água percolada foi coletada e foram determinadas suas características químicas e resistividade.

Para este ensaio, foram moldados corpos-de-prova de aproximadamente 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Foram percolados, no total, 6,5 litros de água destilada em cada solo, sendo que a resistividade do solo foi determinada após a percolação de 500 ml, 1.500 ml, 2.500 ml, 3.500 ml, 4.500 ml, 5.500 ml e 6.500 ml. O sistema de percolação de água é apresentado na Figura 6.83.



Figura 6.83 – Percolação de água em corpos-de-prova do ensaio de resistividade elétrica.

Os dados dos corpos-de-prova ensaiados são apresentados na Tabela 6.36.

Tabela 6.36 – Dados dos corpos-de-prova dos ensaios de resistividade elétrica com percolação de água.

	Umidade (%)	Percolação (ml)	Resistividade (Ohm.m)	Peso Esp. (kN/m ³)	Peso Esp. Seco (kN/m ³)	ρ real (g/cm ³)	Índice de Vazios	Grau de Saturação (%)
Solo Branco 4.4084.05	11,65	0	ND	1,744	1,562	2,700	0,729	43
	22,11	500,0	53	1,907	1,562	2,700	0,729	82
	24,18	1500,0	483	1,939	1,562	2,700	0,729	90
	25,01	2500,0	410	1,952	1,562	2,700	0,729	93
	25,83	3500,0	1445	1,965	1,562	2,700	0,729	96
	26,38	4500,0	1429	1,974	1,562	2,700	0,729	98
	26,65	5500,0	1851	1,978	1,562	2,700	0,729	99
	27,33	6500,0	1032	1,982	1,557	2,700	0,734	100
Solo Amarelo 4.4488.05	2,94	0	ND	1,532	1,488	2,719	0,827	10
	29,37	500,0	3361	1,926	1,488	2,719	0,827	97
	29,73	1500,0	330	1,931	1,488	2,719	0,827	98
	30,02	2500,0	558	1,935	1,488	2,719	0,827	99
	30,32	3500,0	1134	1,940	1,488	2,719	0,827	100
	30,32	4500,0	1149	1,940	1,488	2,719	0,827	100
	30,32	5500,0	926	1,940	1,488	2,719	0,827	100
	30,50	6500,0	937	1,940	1,486	2,719	0,829	100
Solo Laranja 4.4398.05	16,56	0	ND	1,323	1,135	2,764	1,435	32
	37,95	500,0	5208	1,566	1,135	2,764	1,435	73
	39,88	1500,0	1275	1,587	1,135	2,764	1,435	77
	39,95	2500,0	681	1,588	1,135	2,764	1,435	77
	40,07	3500,0	1279	1,590	1,135	2,764	1,435	77
	40,18	4500,0	2073	1,591	1,135	2,764	1,435	77
	40,37	5500,0	2134	1,593	1,135	2,764	1,435	78
	40,63	6500,0	1355	1,596	1,135	2,764	1,435	78
Solo Vermelho 4.4441.05	17,34	0	ND	1,501	1,279	2,732	1,135	42
	38,68	500,0	1989	1,774	1,279	2,732	1,135	93
	39,79	1500,0	591	1,788	1,279	2,732	1,135	96
	40,46	2500,0	856	1,797	1,279	2,732	1,135	97
	40,79	3500,0	1289	1,801	1,279	2,732	1,135	98
	40,96	4500,0	1648	1,803	1,279	2,732	1,135	99
	41,13	5500,0	1459	1,806	1,279	2,732	1,135	99
	41,58	6500,0	1278	1,811	1,279	2,732	1,135	100
Solo Marrom 4.4503.05	2,64	0	ND	1,347	1,312	2,700	1,057	7
	34,09	500,0	13952	1,760	1,312	2,700	1,057	87
	36,88	1500,0	707	1,797	1,312	2,700	1,057	94
	37,05	2500,0	922	1,799	1,312	2,700	1,057	95
	37,22	3500,0	1930	1,801	1,312	2,700	1,057	95
	37,38	4500,0	1034	1,803	1,312	2,700	1,057	95
	37,45	5500,0	879	1,804	1,312	2,700	1,057	96
	37,46	6500,0	1255	1,804	1,312	2,700	1,057	96

Os resultados de resistividade elétrica para os solos ensaiados são apresentados em forma de gráfico nas figuras 6.84 a 6.89. Na Figura 6.84 a variação da resistividade com a percolação de água para o solo branco é mostrada. Nos rótulos dos pontos estão apresentados os teores de umidade do corpo-de-prova. Observa-se que para este solo o valor da resistividade foi aumentando à medida que a água ia sendo percolada até o teor de umidade de 26,93%. Na última determinação o valor da resistividade apresentou uma queda.

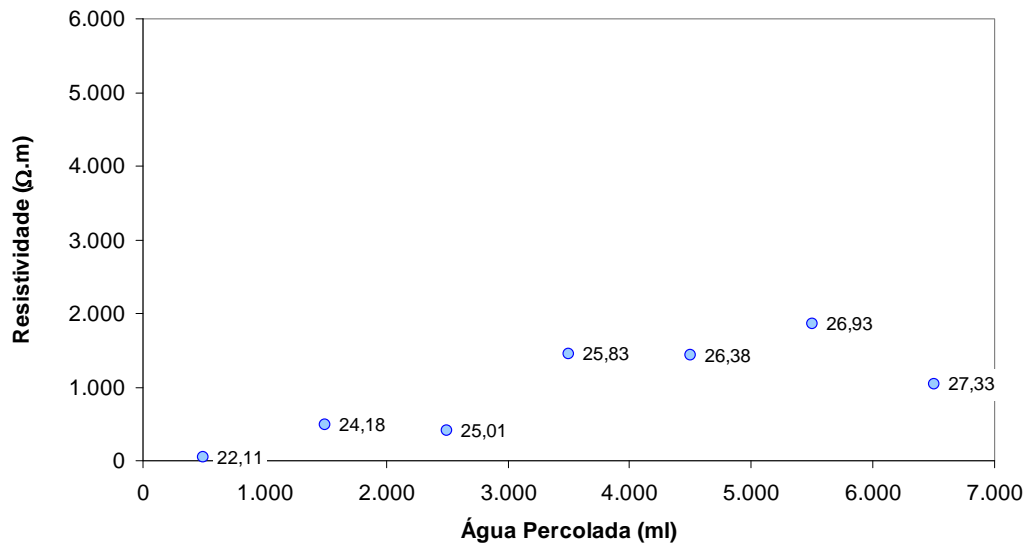


Figura 6.84 – Variação da resistividade elétrica com a percolação de água para o Solo Branco, com o valor do teor de umidade em porcentagem nos rótulos.

Para os outros quatro solos (amarelo, laranja, vermelho e marrom) o comportamento da resistividade com a percolação de água é bastante similar, como pode ser observado nas Figuras 6.85 a 6.89. A primeira determinação da resistividade apresenta um valor bastante alto. A partir da segunda determinação o valor da resistividade decresce, subindo gradualmente com o aumento do teor de umidade. Em seguida há uma nova queda no valor da resistividade.

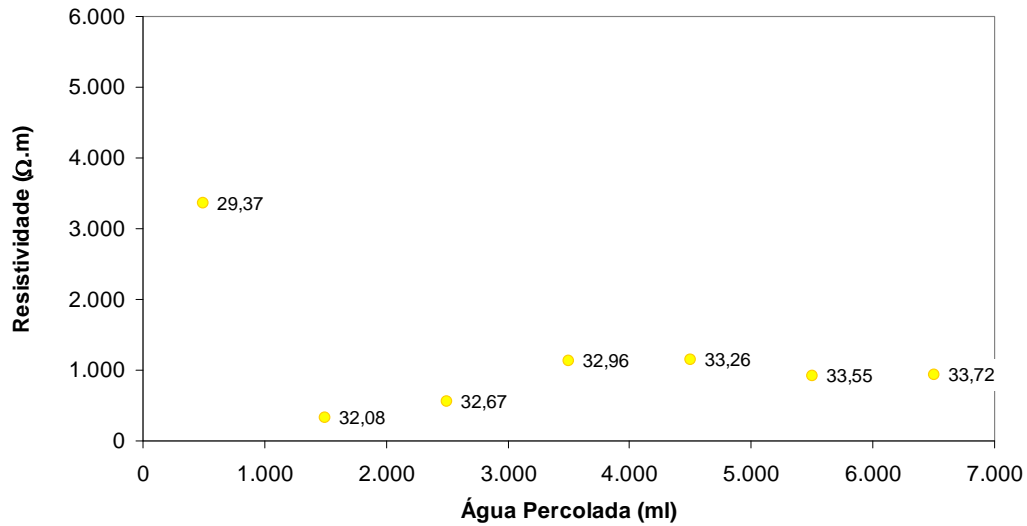


Figura 6.85 – Variação da resistividade elétrica com a percolação de água para o Solo Amarelo, com o valor do teor de umidade em percentagem nos rótulos.

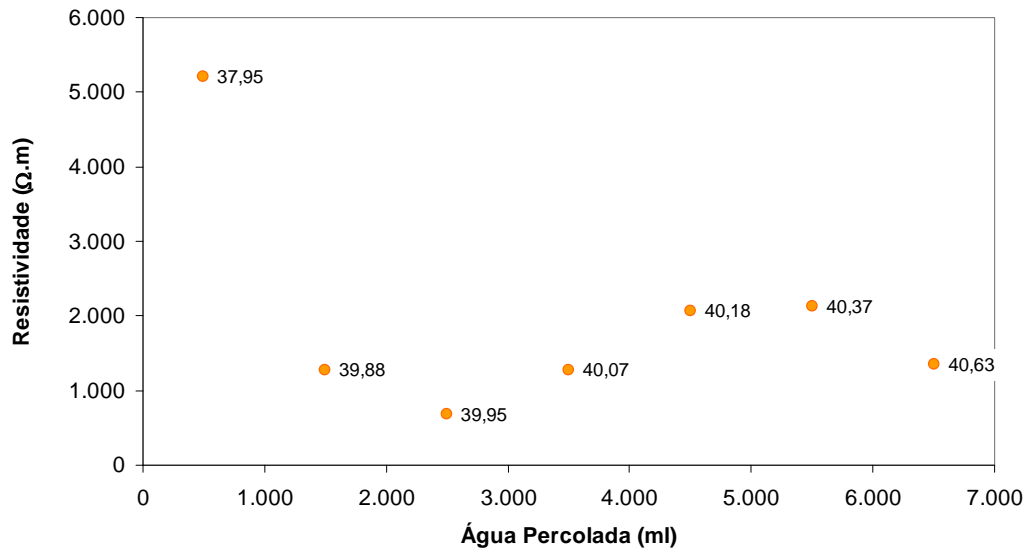


Figura 6.86 – Variação da resistividade elétrica com a percolação de água para o Solo Laranja, com o valor do teor de umidade em percentagem nos rótulos.

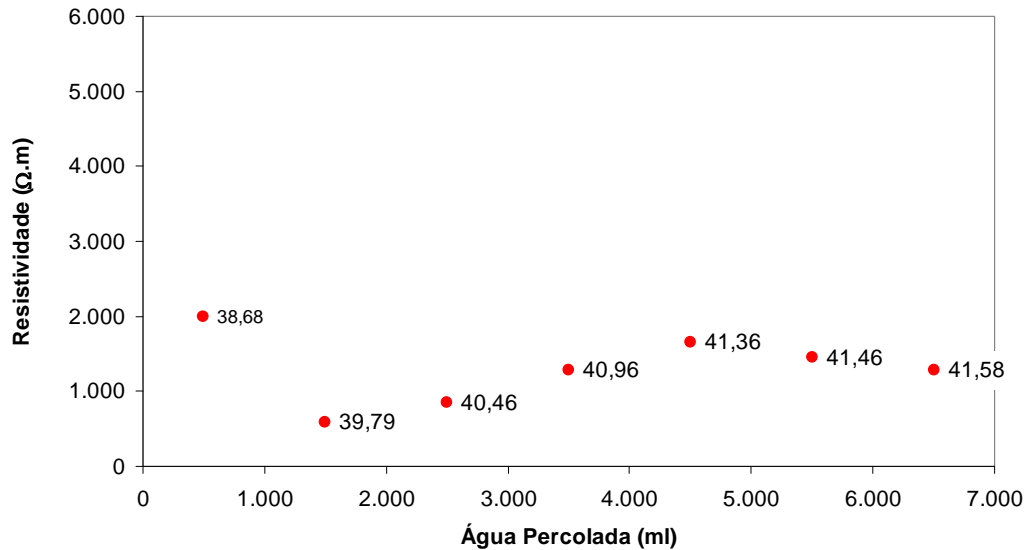


Figura 6.87 – Variação da resistividade elétrica com a percolação de água para o Solo Vermelho, com o valor do teor de umidade em percentagem nos rótulos.

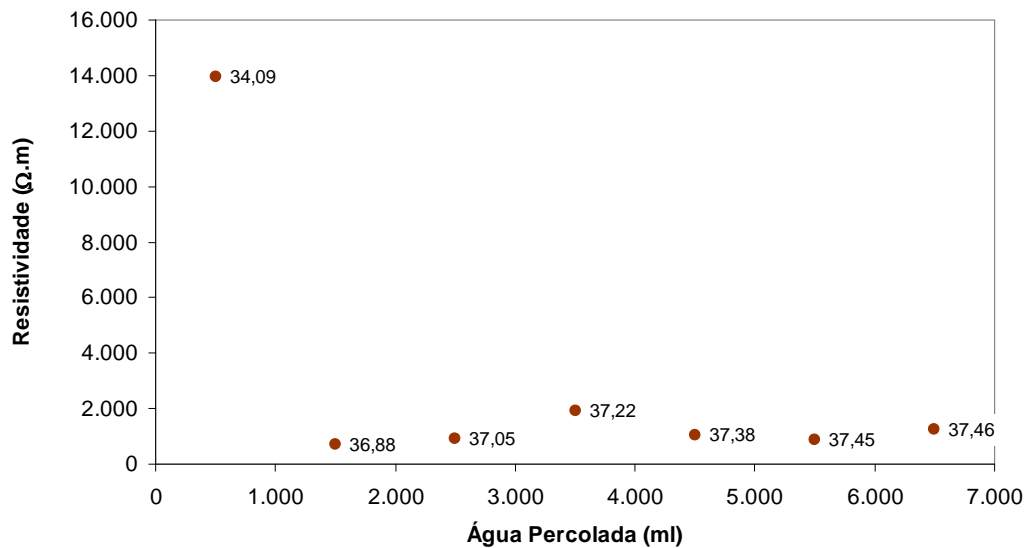


Figura 6.88 – Variação da resistividade elétrica com a percolação de água para o Solo Marrom, com o valor do teor de umidade em percentagem nos rótulos.

Com a passagem de água destilada pelos corpos-de-prova, o grau de saturação dos mesmos foi aumentando ao mesmo tempo em que o solo ia sendo “lavado” pela água. Ou seja, dois parâmetros foram alterados durante a percolação de água pelos solos: a saturação dos corpos-de-prova e a quantidade de íons presentes no solo. Portanto, além do grau de saturação dos corpos-de-prova, a análise química da água percolada é um fator importante para explicar o comportamento observado nas curvas de resistividade versus água percolada. A água percolada foi coletada e analisada através de ensaios

químicos e de resistividade elétrica. As análises realizadas na água percolada estão resumidas na Tabela 6.37.

Tabela 6.37 – Ensaio realizados na água percolada nos solos.

Solo / Água percolada	500 ml	1500 ml	2500 ml	3500 ml	4500 ml	5500 ml	6500 ml
Solo Branco	Análise química 1		Análise química 2		Análise química 3 Resistividade		Resistividade
Solo Amarelo		Análise química 1	Análise química 2		Análise química 3 Resistividade		Resistividade
Solo Laranja	Análise química 1		Análise química 2		Análise química 3 Resistividade		Resistividade
Solo Vermelho		Análise química 1	Análise química 2		Análise química 3 Resistividade		Resistividade
Solo Marrom	Análise química 1		Análise química 2		Análise química 3 Resistividade		Resistividade

As análises químicas compreenderam a determinação dos íons cloretos, sulfatos, nitratos, sódio, potássio, cálcio, magnésio, ferro total, ferro solúvel, alumínio solúvel e sulfetos. Esses ensaios foram realizados pelo LPH – Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas da Universidade Federal do Paraná. A determinação da resistividade elétrica da água foi realizada, assim como nos solos, através da caixa padrão "soil box" (GCOI/SCM, 1995), com dimensões de 120 mm de comprimento, 50 mm de altura e 50 mm de largura, colocando o efluente na caixa. A partir da resistência elétrica obteve-se a resistividade.

Os resultados obtidos dos ensaios químicos são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Observa-se que o elemento químico mais presente na água percolada é o cloreto, seguido do cálcio. E o ânion mais presente é o sulfato, com exceção do solo Marrom, onde este elemento não está presente.

Nas Figuras 6.89 a 6.94 os resultados dos ensaios químicos da água percolada nos solos são apresentados para os elementos químicos mais relevantes. Pode-se notar que, de modo geral, a partir de 2500 ml de água destilada percolada, praticamente já não ocorrem remoções dos elementos químicos dos solos. Exceção deve ser feita ao magnésio, que só apresentou queda significativa a partir de 4500 ml percolados (Figura 6.94).

A quantidade de cloretos e de cálcio é maior nos solos menos intemperizados, como pode ser observado na Figura 6.89 e na Figura 6.93. Já os sulfatos, com exceção do solo Marrom, estão mais presente nos solos mais intemperizados (Figura 6.90). Para as quantidades de magnésio, sódio e potássio não há uma tendência clara em relação ao intemperismo (Figura 6.94, Figura 6.91 e Figura 6.92).

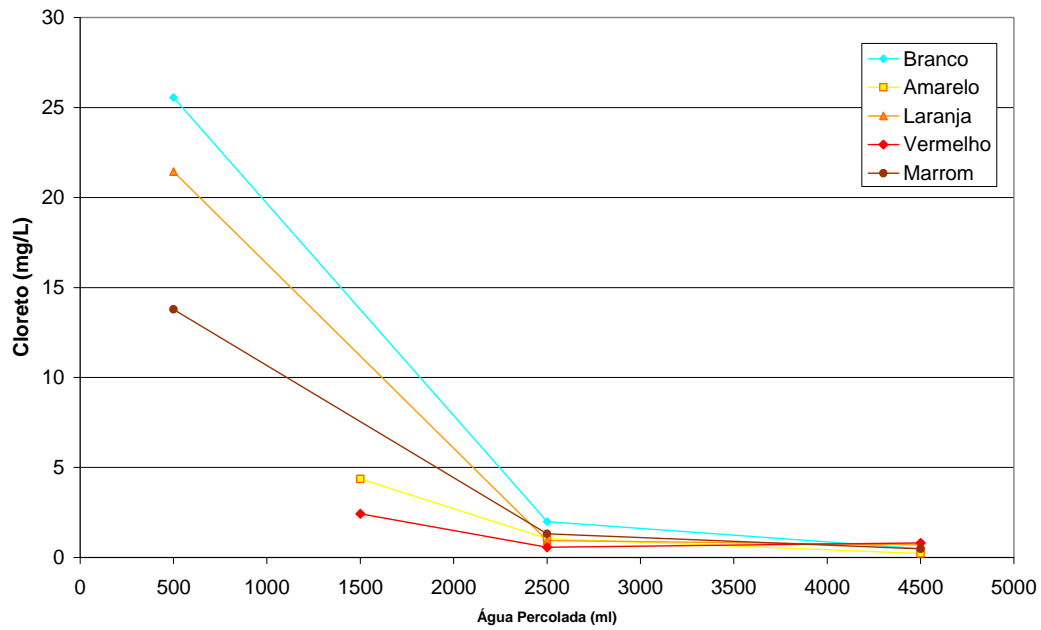


Figura 6.89 – Variação do teor de cloretos na água percolada nos corpos-de-prova dos ensaios de resistividade.

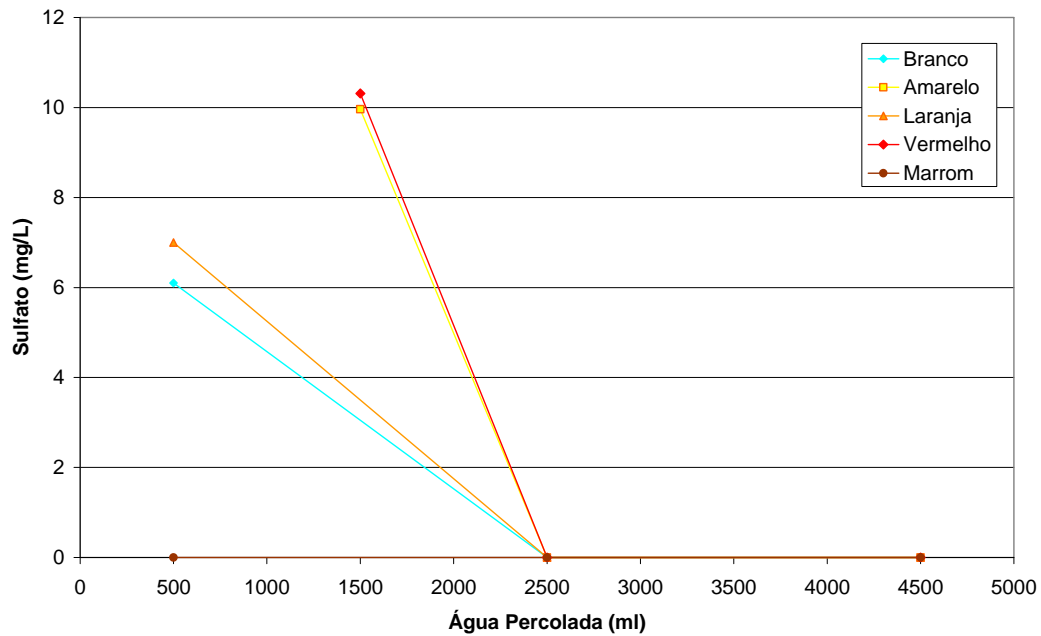


Figura 6.90 – Variação do teor de sulfatos na água percolada nos corpos-de-prova dos ensaios de resistividade.

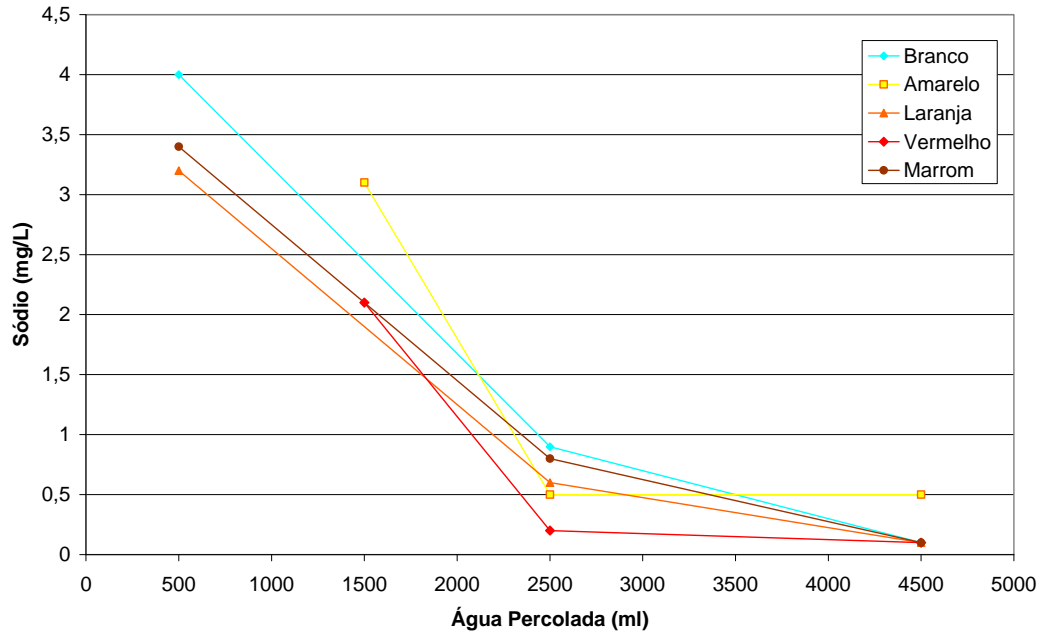


Figura 6.91 – Variação do teor de sódio na água percolada nos corpos-de-prova dos ensaios de resistividade.

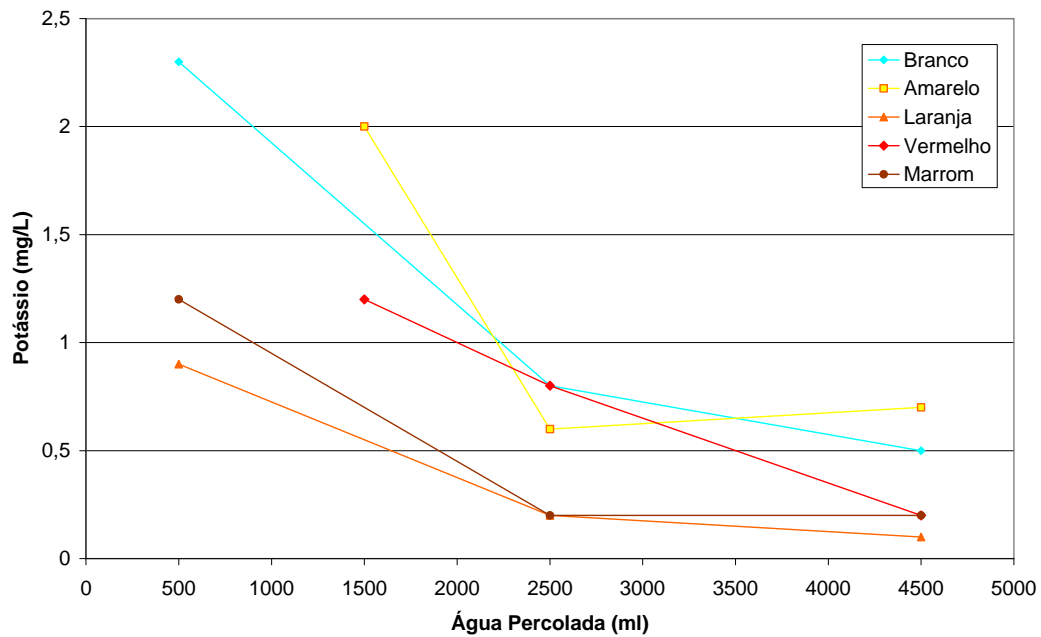


Figura 6.92 – Variação do teor de potássio na água percolada nos corpos-de-prova dos ensaios de resistividade.

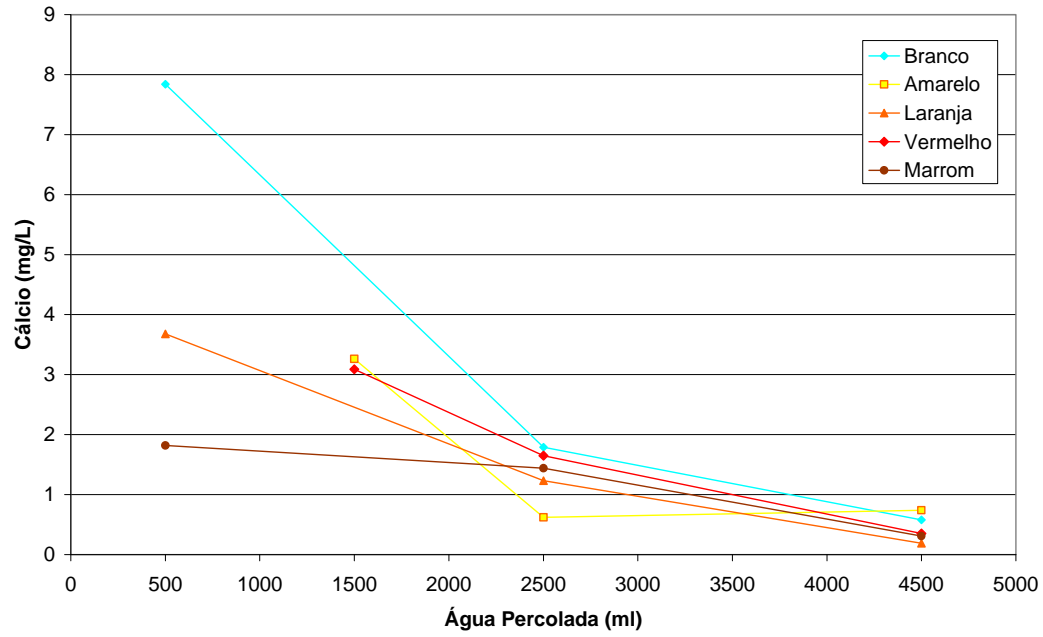


Figura 6.93 – Variação do teor de cálcio na água percolada nos corpos-de-prova dos ensaios de resistividade.

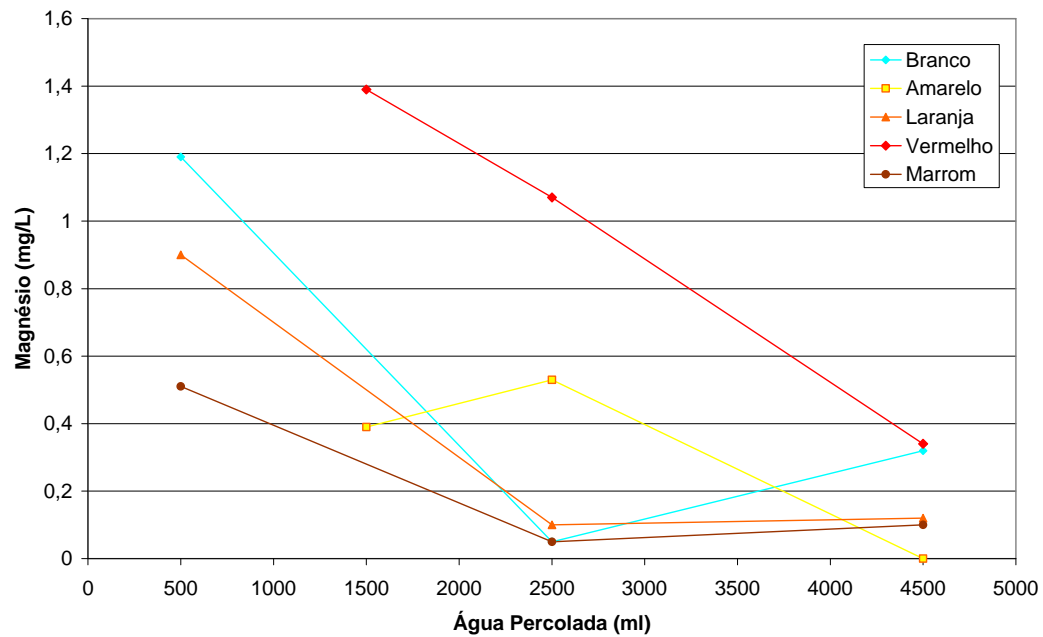


Figura 6.94 – Variação do teor de magnésio na água percolada nos corpos-de-prova dos ensaios de resistividade.

A resistividade do solo está diretamente relacionada com a quantidade de compostos iônicos solúveis nele presentes, além de ser função também de sua estrutura, composição e grau de saturação. A condutividade em solos com baixo teor de umidade ocorre através da área de contato entre partículas, pois não há quantidade suficiente de água em poros interconectados e, neste caso a estrutura do solo é um fator relevante. Por outro lado, em solos com teor de umidade alto, próximo à saturação do material, a condutividade elétrica ocorre mais facilmente pelos sais dissolvidos na fase líquida do solo. Estes dois fenômenos agem paralelamente, de modo que, nas condições iniciais a área de contato é que determina a resistividade, mas para a região de saturação é a dissolução de sais que determina o valor da resistividade.

Nas Figuras 6.95 a 6.99 as curvas de resistividade elétrica versus percolação de água são apresentadas em conjunto com a variação de cloretos e ânions determinados para a água percolada. Nos rótulos da curva de resistividade é apresentado o grau de saturação do corpo-de-prova. Para melhor compreensão, a faixa de dados onde ocorre uma diminuição da condutividade elétrica do solo está demarcada com a cor lilás. O comportamento de cada solo é analisado de acordo com os dados apresentados.

Observando a Figura 6.95 pode-se concluir que até a percolação de 5.500 ml de água destilada ocorreu um pequeno aumento da resistividade elétrica ou uma diminuição da condutividade elétrica do solo. A combinação de dois fatores resultou nesse comportamento: a saturação do corpo-de-prova (fator que aumenta a condutividade elétrica) e a perda de íons do solo (fator que diminui a condutividade elétrica). Neste caso a perda de íons foi preponderante para a diminuição da condutividade elétrica. Após a percolação de 5.500 ml, provavelmente a quantidade de íons que permaneceram já era pequena o suficiente para não mais influenciar a condutividade elétrica do corpo-de-prova, neste ponto, então, o valor da resistividade elétrica do solo apresentou pequeno decréscimo devido ao aumento da saturação do solo (de 99% para 100%).

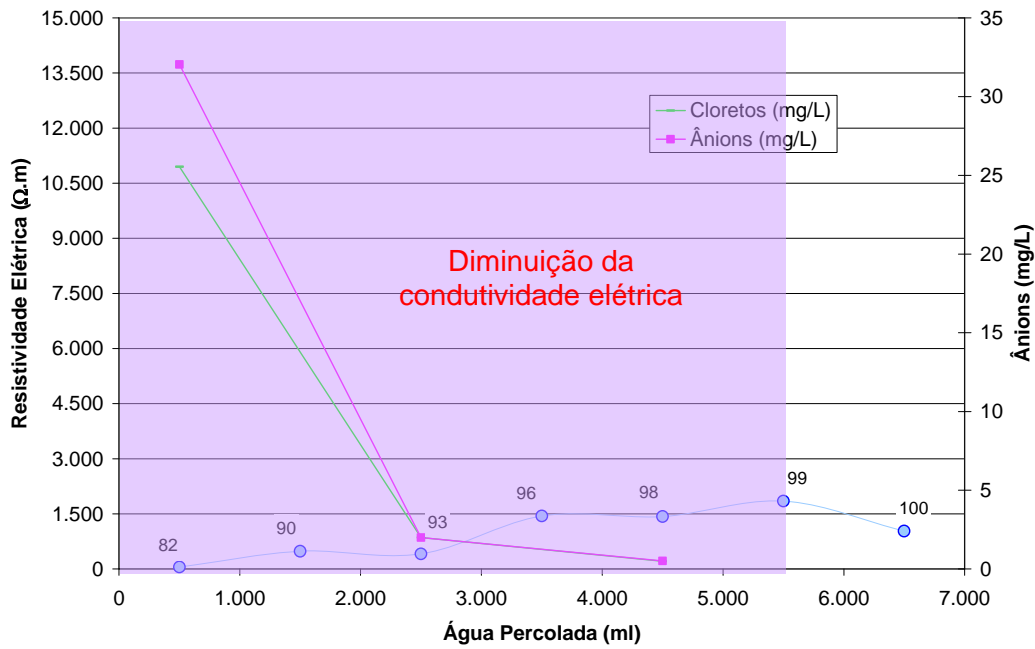


Figura 6.95 – Variação da resistividade elétrica com a água percolada e quantidade de cloretos e ânions na água percolada para o Solo Branco. Representação do grau de saturação nos rótulos dos pontos.

Na Figura 6.96 o ensaio de resistividade elétrica com percolação de água é apresentado para o solo amarelo. Esse solo comporta-se de maneira um pouco diferente quando comparado ao solo Branco. Inicialmente, ocorre uma diminuição da resistividade elétrica no solo, provavelmente relacionada à preponderância da saturação do corpo-de-prova em detrimento à perda de íons. A partir de 1500 ml de percolação, a condutividade elétrica começa a diminuir, relacionada à perda dos íons por lixiviação. A partir de 4.500 ml percolados, praticamente já não ocorrem mais perdas de íons e o solo encontra-se completamente saturado, portanto o valor da resistividade apresenta-se constante, em torno de 1.000 ohms.m.

O comportamento para o solo Laranja é similar ao encontrado para o solo Amarelo, sendo que, até a percolação de 6.500 ml de água, este solo não atingiu a completa saturação (Figura 6.97).

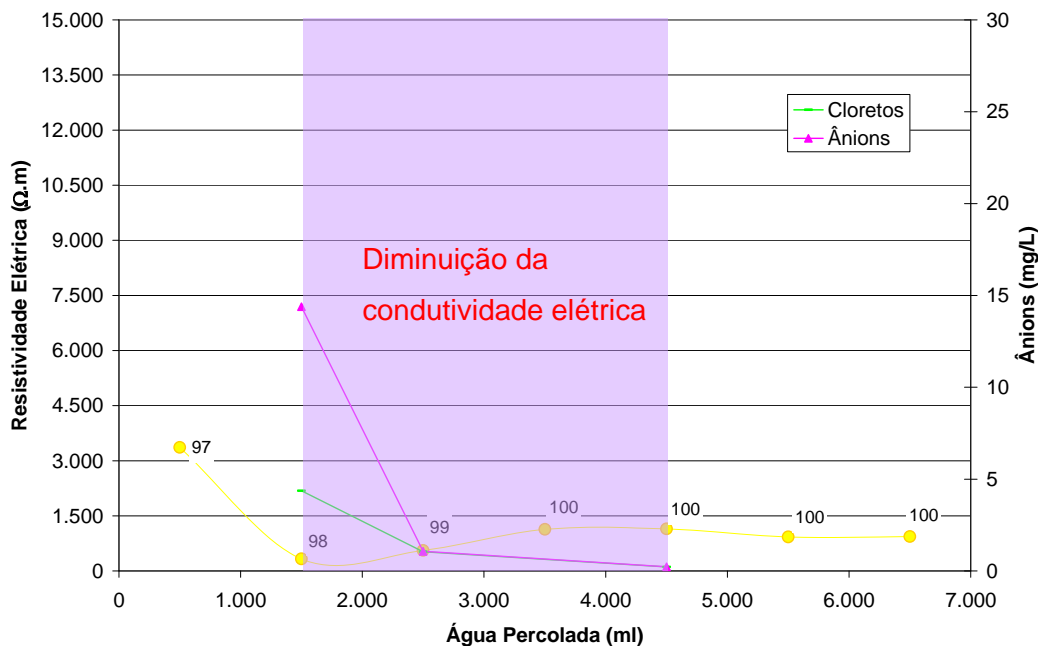


Figura 6.96 – Variação da resistividade elétrica com a água percolada e quantidade de cloretos e ânions na água percolada para o Solo Amarelo. Representação do grau de saturação nos rótulos dos pontos.

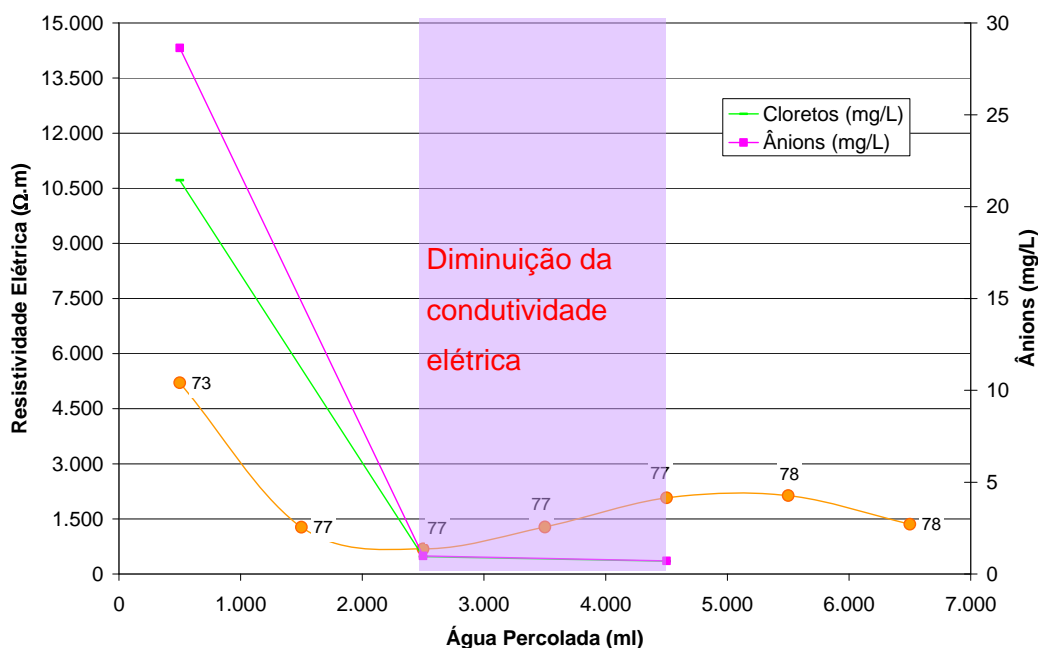


Figura 6.97 – Variação da resistividade elétrica com a água percolada e quantidade de cloretos e ânions na água percolada para o Solo Laranja. Representação do grau de saturação nos rótulos dos pontos.

Os resultados obtidos para os solos Vermelho e Marrom são apresentados na Figura 6.98 e na Figura 6.99. O comportamento é idêntico ao dos solos Amarelo e Laranja já descritos.

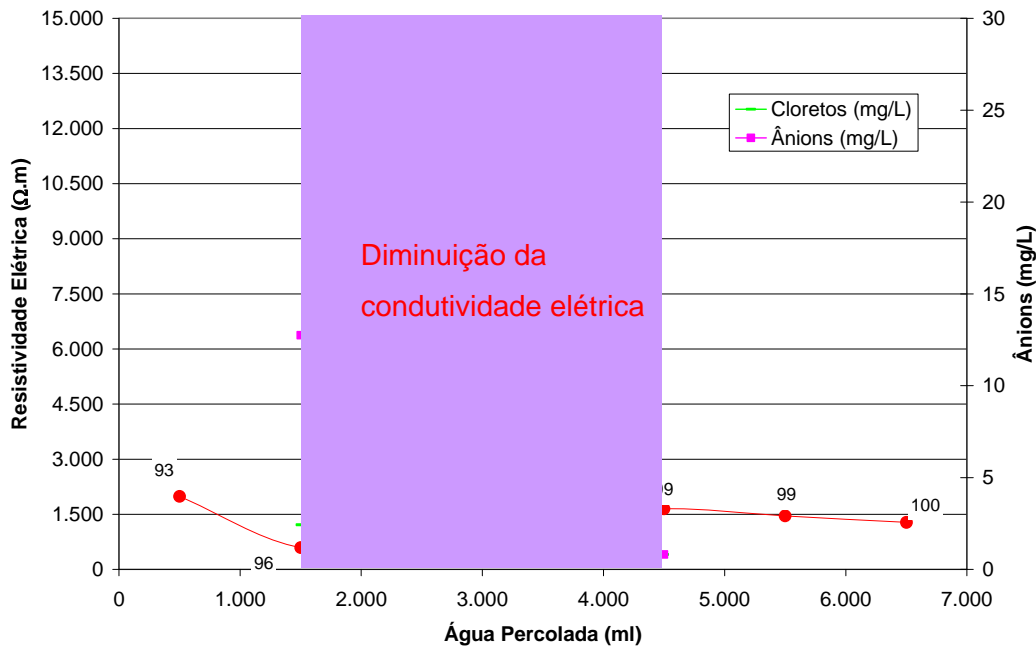


Figura 6.98 – Variação da resistividade elétrica com a água percolada e quantidade de cloretos e ânions na água percolada para o Solo Vermelho. Representação do grau de saturação nos rótulos dos pontos.

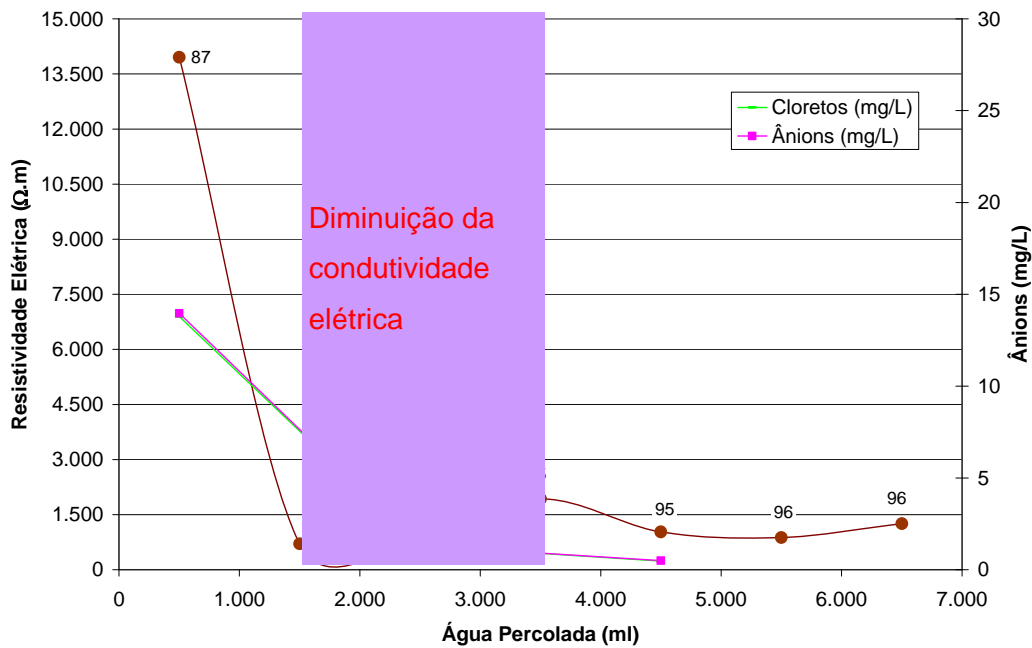


Figura 6.99 – Variação da resistividade elétrica com a água percolada e quantidade de cloretos e ânions na água percolada para o Solo Marrom. Representação do grau de saturação nos rótulos dos pontos.

Ao se determinar a resistividade elétrica de um solo saturado, onde todos os vazios estão interconectados, grande parte da condução elétrica se dá pelos íons diluídos na água intersticial. Com o objetivo de avaliar a capacidade de resistividade elétrica dos solos saturados em função da quantidade de íons presentes, determinou-se essa capacidade em água com diversos teores de cloreto de sódio e sulfato de sódio em sua composição. Esses compostos foram escolhidos, pois os solos estudados apresentam grande quantidade de cloreto e sulfato em sua composição.

A resistência elétrica das águas foi determinada através da caixa padrão "soil box" (GCOI/SCM, 1995), de dimensões 120 mm de comprimento, 50 mm de altura e 50 mm de largura. A partir da resistência elétrica obteve-se a resistividade. Na Tabela 6.39 e nas figuras 6.100 e 6.101 são apresentados os valores de resistividade em função da concentração de NaCl e NaSO₄ em água destilada.

Observa-se que para a concentração de 0,001 mg/L de NaCl a resistividade é de 14 ohm.m enquanto que para a mesma concentração o NaSO₄ apresenta resistividade de 21 ohm.m. Para a concentração de 0,0000078 mg/L de NaCl a resistividade é de 932 ohm.m e para o NaSO₄ a resistividade é de 1.253 ohm.m. Portanto, o cloreto de sódio é menos resistivo e mais condutor que o NaSO₄.

Tabela 6.39 – Resistividade da água com diluição de NaCl e NaSO₄.

Concentração (mg/L)	NaCl		NaSO₄	
	Resistividade (Ohm.m)	Resistência (Ohm)	Resistividade (Ohm.m)	Resistência (Ohm)
0,0010000	14	58	21	87
0,0005000	27	114	31	133
0,0002500	45	192	63	267
0,0001250	71	303	121	516
0,0000625	137	583	210	890
0,0000313	264	1.123	376	1.598
0,0000156	483	2.052	680	2.890
0,0000078	932	3.962	1.253	5.324
0,0000039	1.722	7.320	2.028	8.621
0,0000020	2.956	12.565	3.245	13.793
0,0000010	4.466	18.979	4.584	19.484
0,0000005	8.615	36.616	5.777	24.552

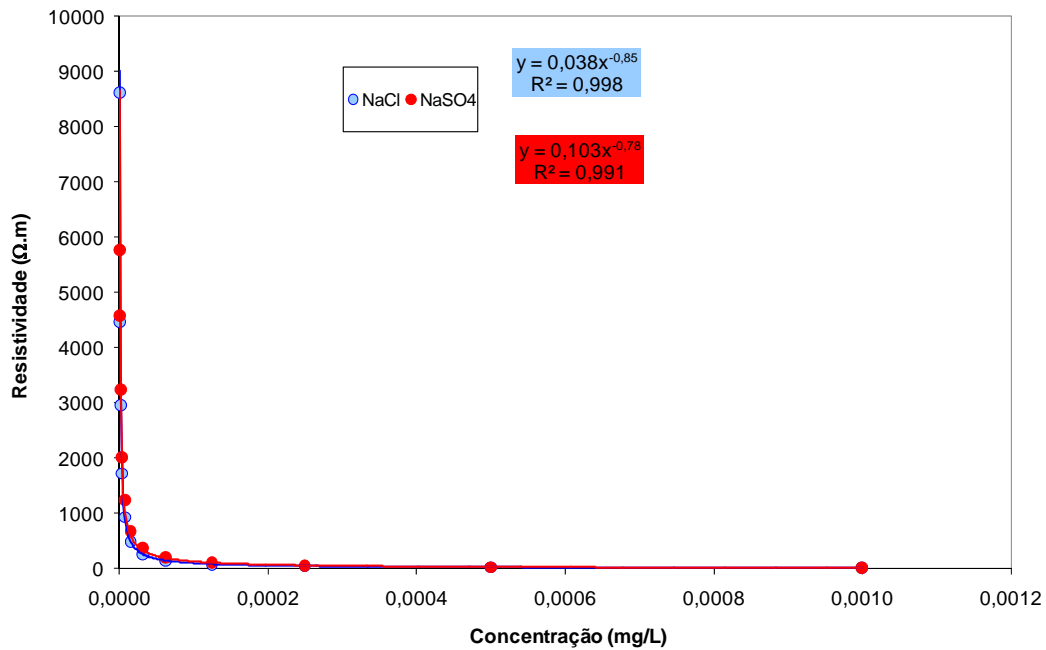


Figura 6.100 – Resistividade da água com diluição de NaCl e NaSO₄.

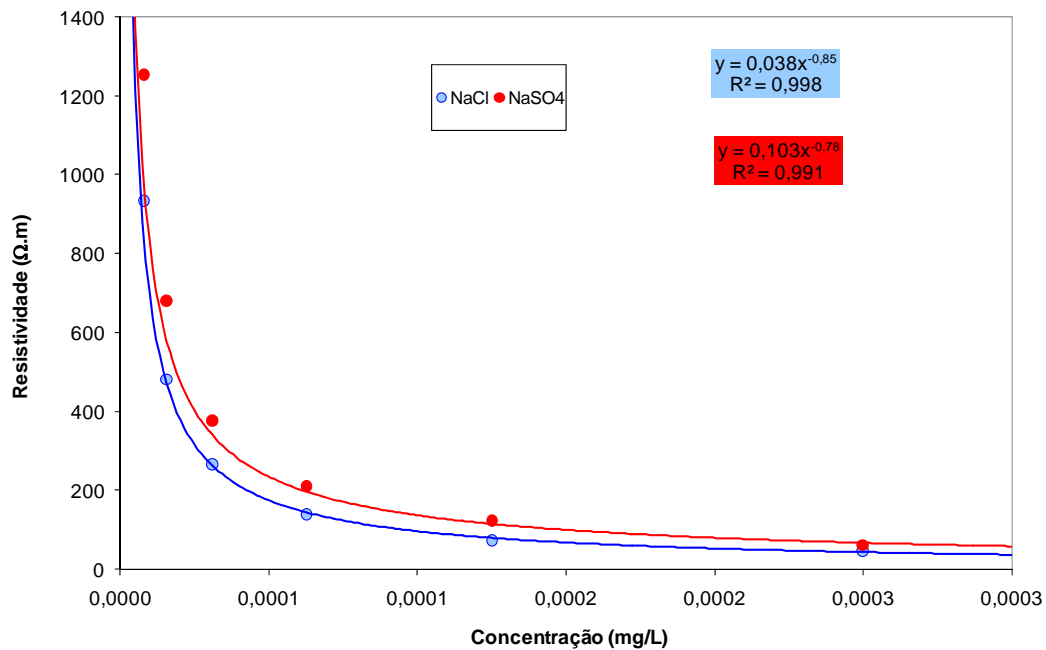


Figura 6.101 – Resistividade da água com diluição de NaCl e NaSO₄.

Detalhe da figura anterior.

Após a percolação de 4500 ml e de 6.500 ml, foi determinada a resistividade da água coletada dos solos que está apresentada na Figura 6.102. Praticamente não há alteração da resistividade da água entre as duas coletas, fato que confirma que não ocorreu alteração de concentração química nos solos após a percolação de 4.500 ml.

De acordo com a resistividade apresentada pela água pode-se inferir a concentração de sais existentes considerando uma das relações obtidas na Figura 6.101 válida para todos os sais dissolvidos. De acordo com a equação definida pela solução de NaSO_4 , os solos Branco, Amarelo e Laranja teriam, após a percolação de 4.500 ml, $1,89 \cdot 10^{-6}$ mg/L de sais dissolvidos, enquanto que o solo Vermelho apresentaria $3,18 \cdot 10^{-6}$ mg/L e o solo Marrom $1,12 \cdot 10^{-6}$ mg/L.

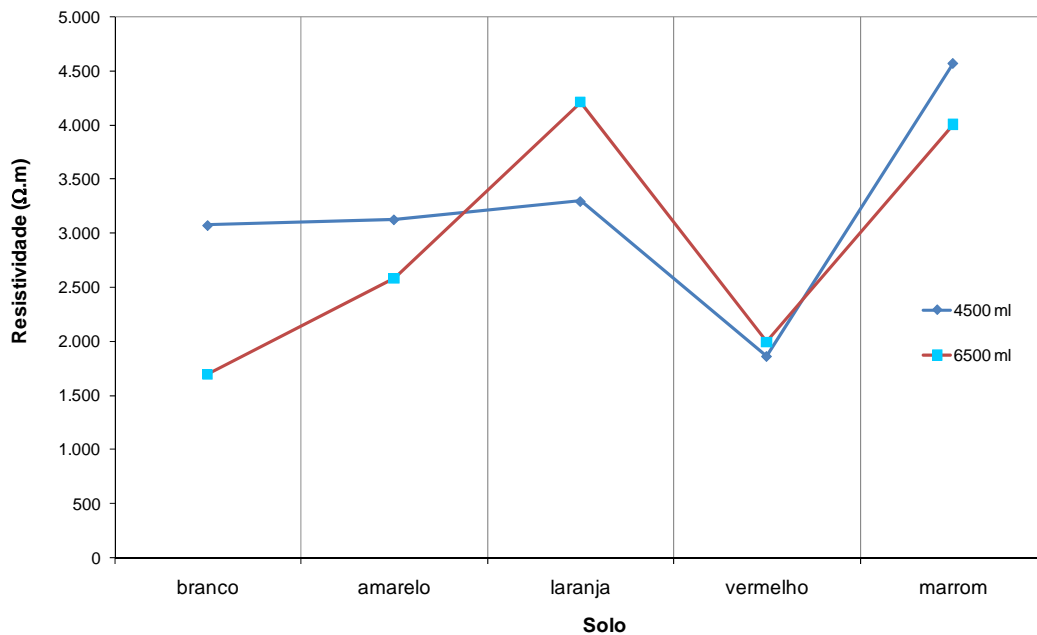


Figura 6.102 – Resistividade elétrica da água percolada nos solos. Percolação de 4.500 ml e 6.500 ml.

6.2.4. Relação entre Resistividade e Sucção

Todos os parâmetros que influenciam a resistividade elétrica dos solos como estrutura, mineralogia e composição, influenciam também a sucção dos solos. Diferentes pesquisadores já tentaram correlacionar essas características (Szabo, 1974; Li e Williams, 2006), mas nenhuma formulação definitiva foi ainda determinada.

As figuras 6.102 a 6.111 apresentam a relação entre o índice de resistividade e a sucção matricial e a sucção total para os solos Branco, Amarelo, Laranja, Vermelho e Marrom. A sucção matricial e a total foram normalizadas pela pressão de entrada de ar dos respectivos solos.

Observa-se que para todos os solos, a relação entre a sucção total e o índice de resistividade apresenta menor dispersão do que a relação entre a sucção matricial e o índice de resistividade. Isto porque para esses solos a sucção osmótica tem valor considerável e os íons dissolvidos na água intersticial da estrutura têm grande influência na condutividade elétrica. Para os gráficos de sucção total foi traçada uma linha de tendência média, para todos os pontos observados. De modo geral, parecem existir 3 trechos lineares para a variação da sucção normalizada e o índice de resistividade. Para valores altos de IR, o valor da sucção é praticamente constante. Após esse trecho de sucção constante, segue um intervalo com decréscimo de IR e decréscimo de sucção e depois, novamente um trecho de valores pequenos de IR e valor de sucção constante.

Li e Williams (2006) relatam a existência de uma relação linear em pelo menos um trecho da curva entre a sucção normalizada pela pressão de entrada de ar e o índice de resistividade de arenitos (Equação 6.15). A relação linear não foi observada para valores altos de saturação e, de acordo com os pesquisadores pode ser justificada pela ocorrência de diferentes tamanhos de poros onde a distribuição de saturação não é bem representada por um fractal.

É evidente a relação entre a resistividade e a sucção nos solos. Tal se ressalta porque parte da dispersão encontrada nos ensaios pode ser decorrente da heterogeneidade do material e as grandezas que estão sendo comparadas (sucção e resistividade) foram determinadas em amostras distintas. Esses resultados corroboram a idéia de que o ensaio de resistividade elétrica pode ser uma ferramenta importante para a caracterização de solos, especialmente solos residuais que apresentam grande heterogeneidade. Além de ser um ensaio não destrutivo, a sua execução é bastante simples.

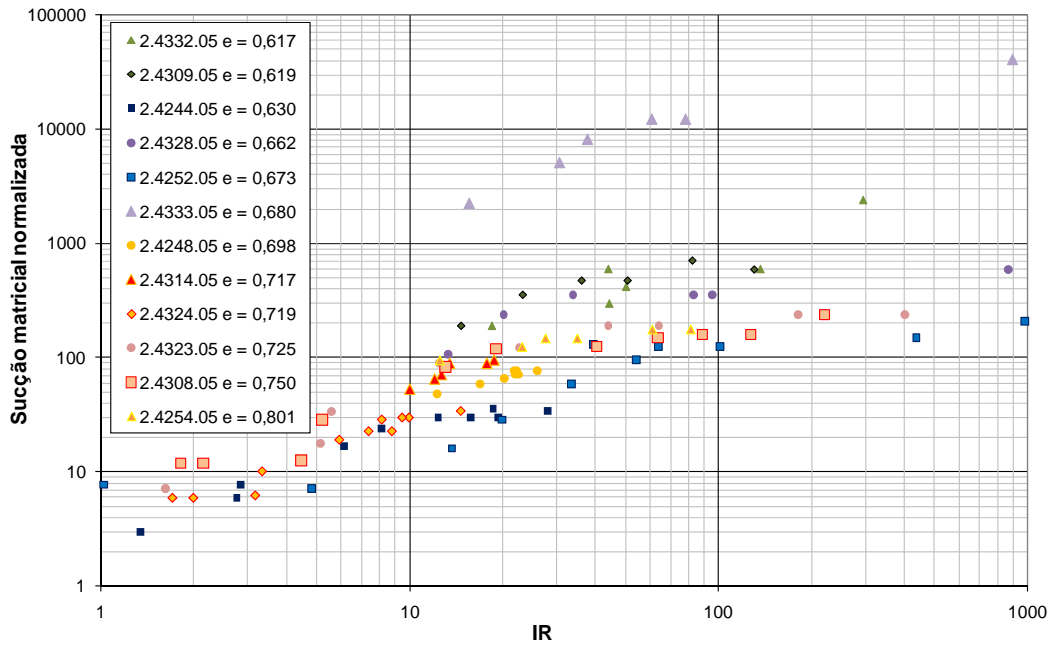


Figura 6.103 – Variação do índice de resistividade com a sucção matricial normalizada para o solo Branco.

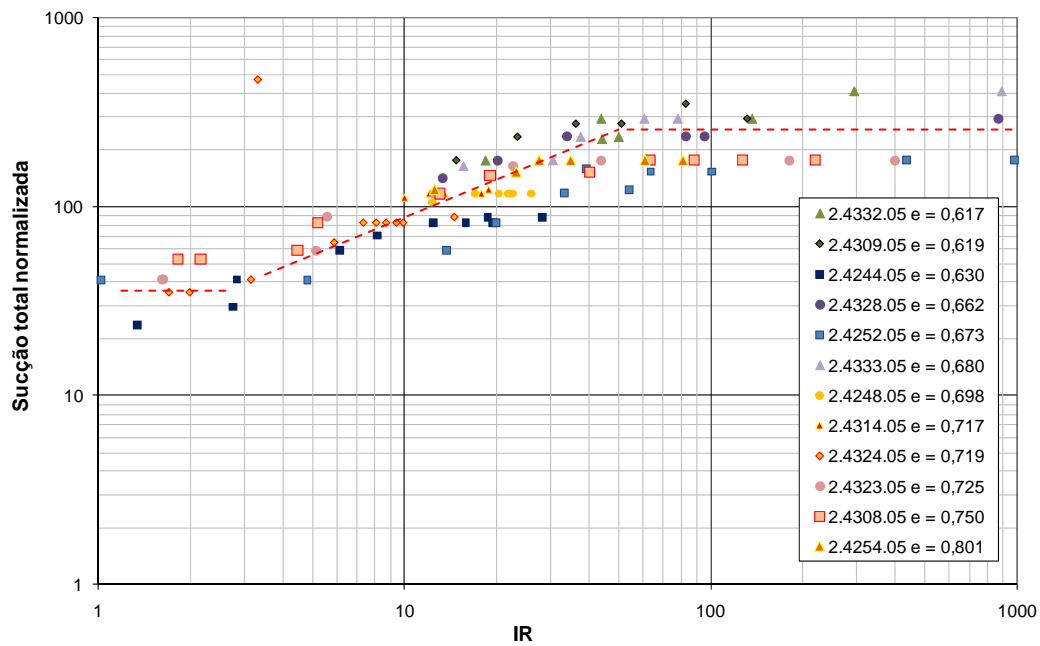


Figura 6.104 – Variação do índice de resistividade com a sucção total normalizada para o solo Branco.

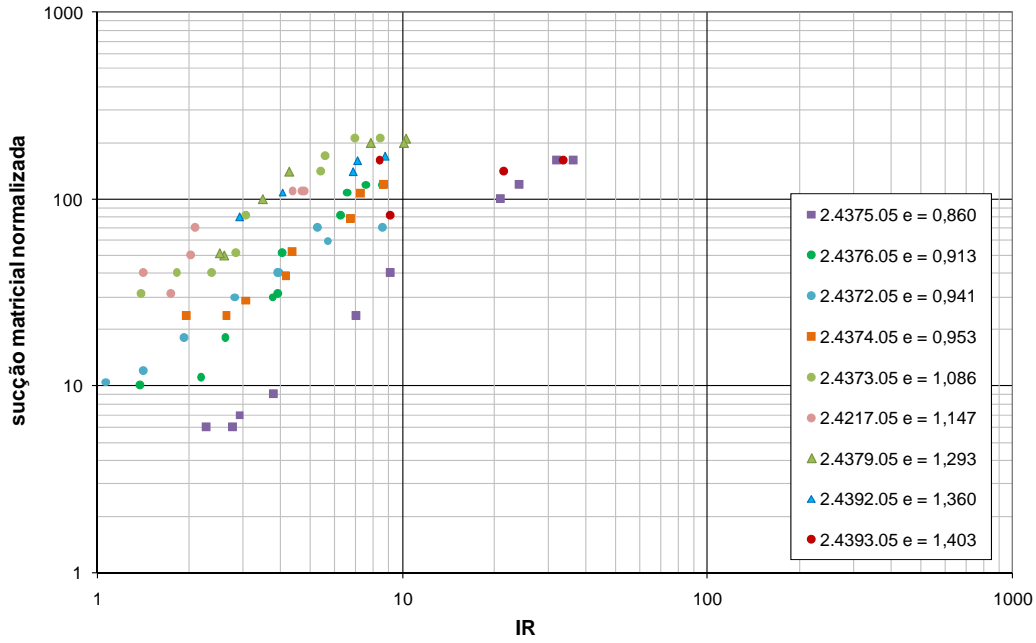


Figura 6.105 – Variação do índice de resistividade com a sucção matricial normalizada para o solo Amarelo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310927/CA

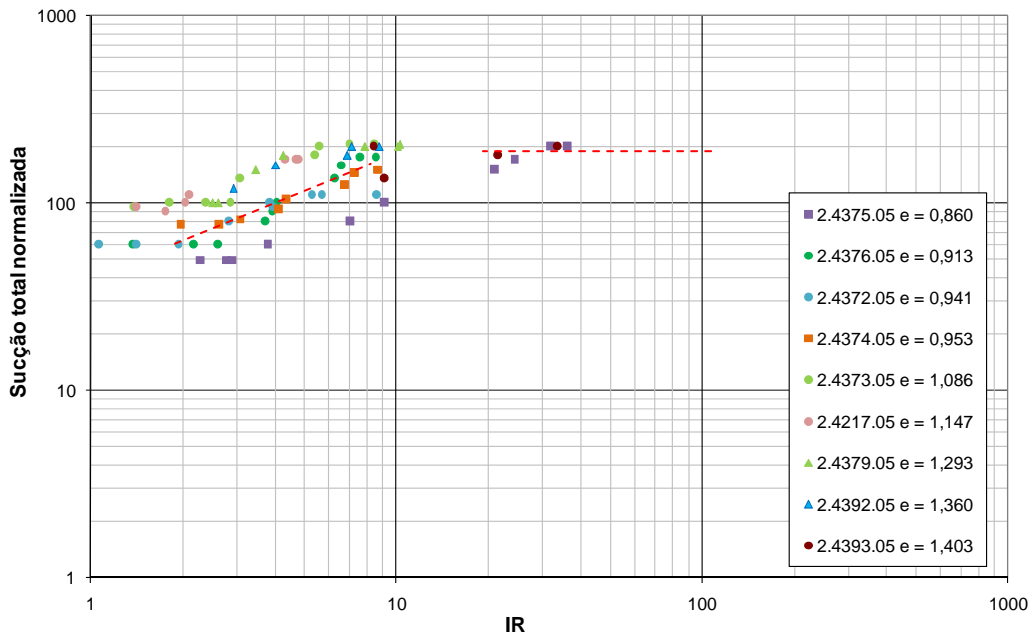


Figura 6.106 – Variação do índice de resistividade com a sucção total normalizada para o solo Amarelo.

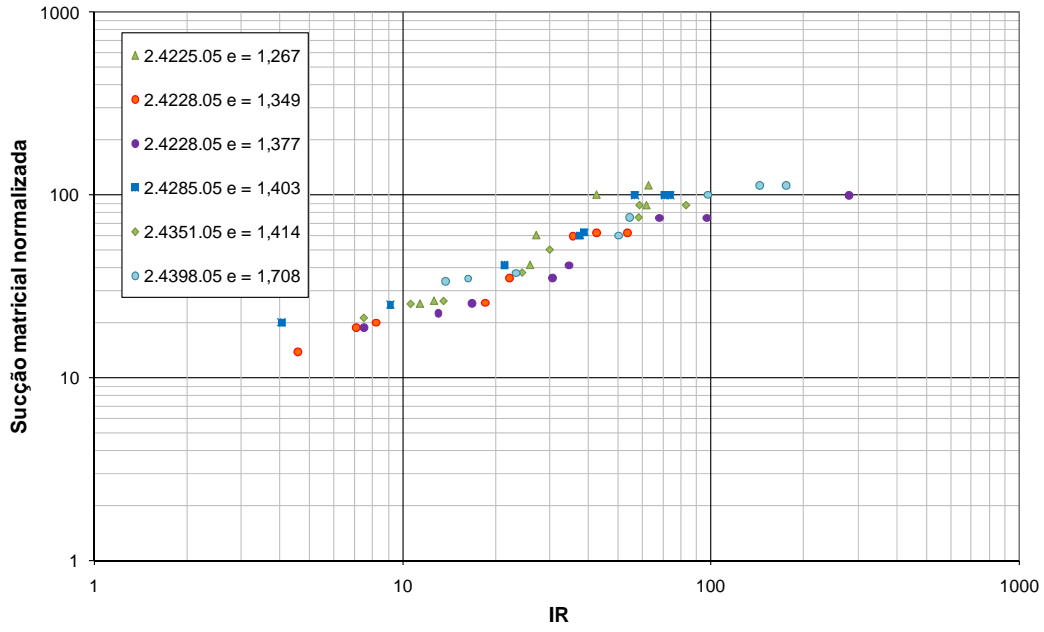


Figura 6.107 – Variação do índice de resistividade com a sucção matricial normalizada para o solo Laranja.

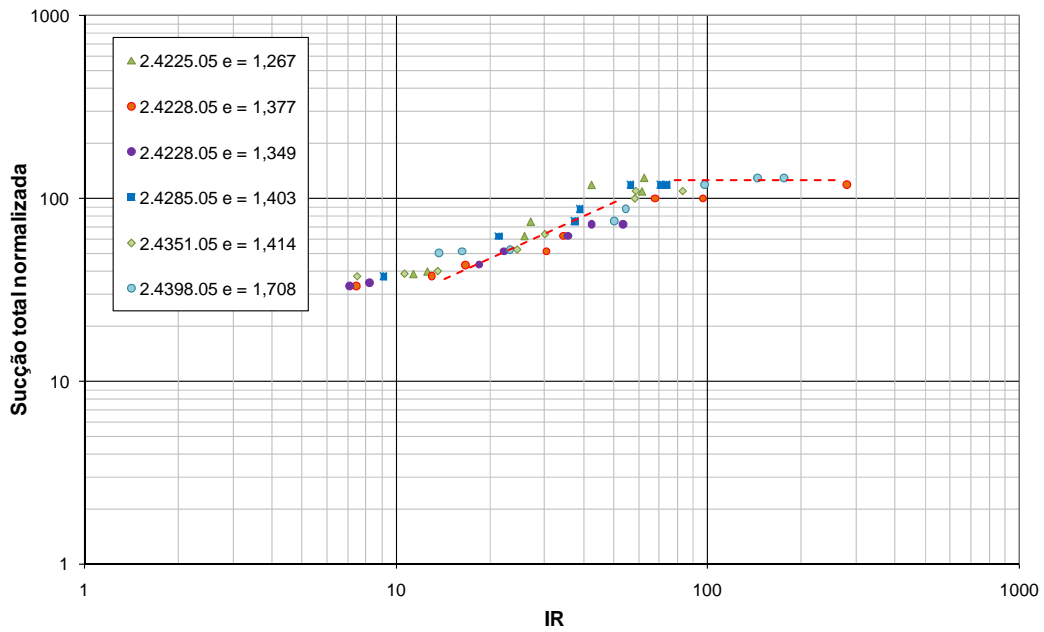


Figura 6.108 – Variação do índice de resistividade com a sucção total normalizada para o solo Laranja.

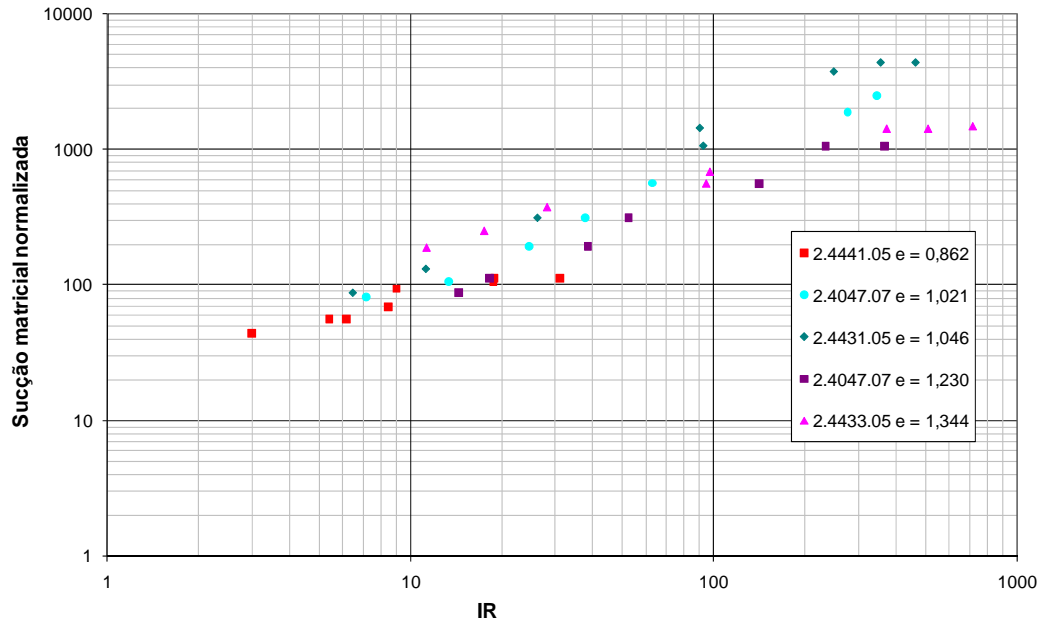


Figura 6.109 – Variação do índice de resistividade com a sucção matricial normalizada para o solo Vermelho.

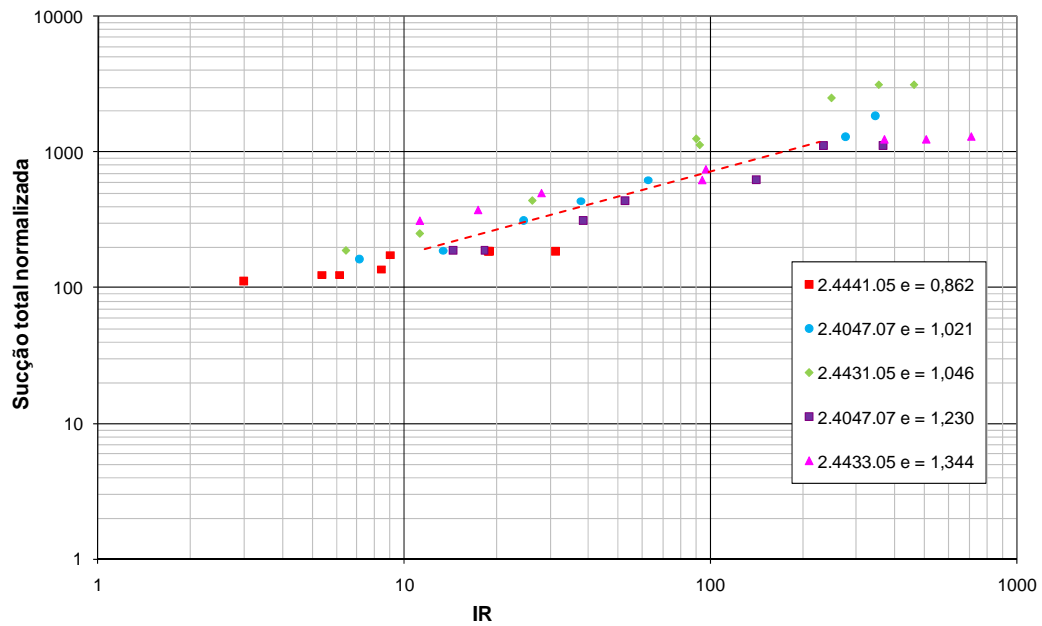


Figura 6.110 – Variação do índice de resistividade com a sucção total normalizada para o solo Vermelho.

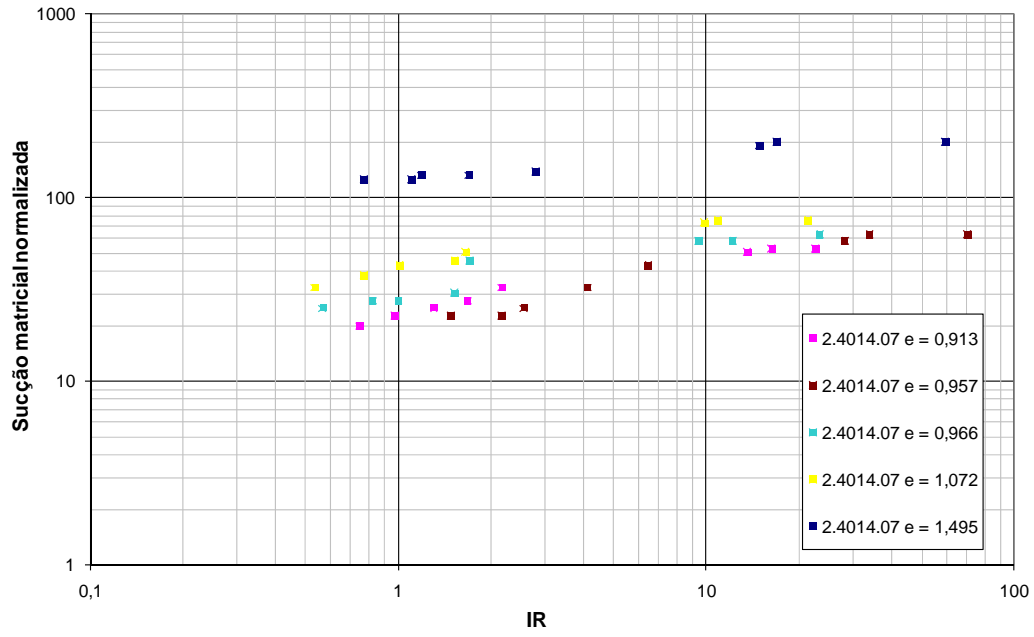


Figura 6.111 – Variação do índice de resistividade com a sucção matricial normalizada para o solo Marrom.

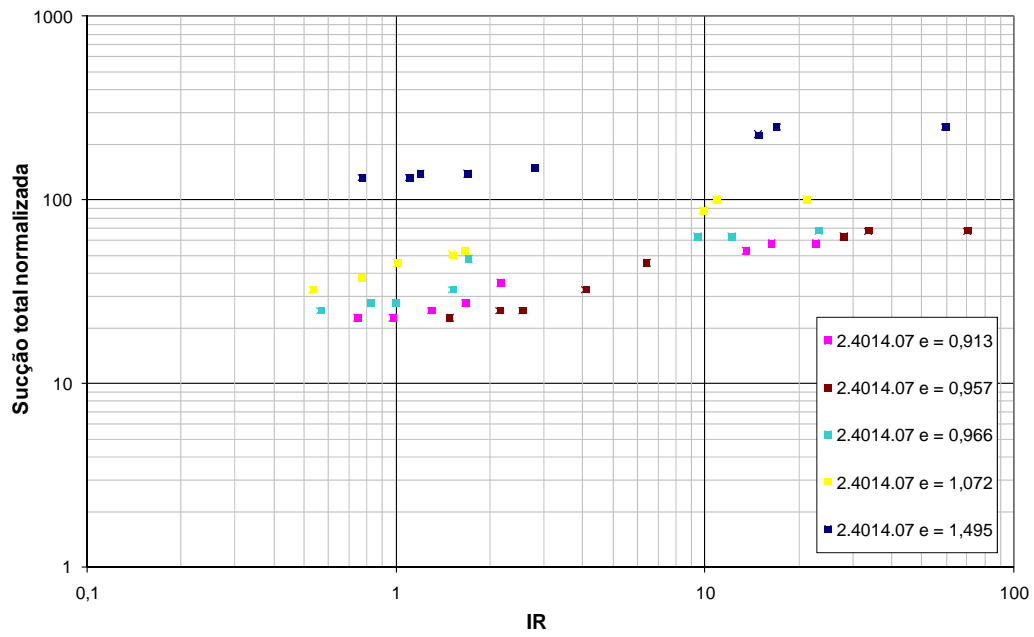


Figura 6.112 – Variação do índice de resistividade com a sucção total normalizada para o solo Marrom.

6.3. Condutividade Hidráulica

Diversos são os métodos propostos para se estimar a curva de condutividade hidráulica de solos não saturados, variando desde testes de campo com medidas de umidade e sucção, até métodos empíricos, que estimam a curva de condutividade a partir da curva característica.

Nos ensaios de laboratório é assumida a validade da lei de Darcy, ou seja, admite-se a proporcionalidade entre a velocidade de fluxo e o gradiente da energia total da água. Os ensaios de laboratório são classificados em métodos de fluxo estacionário (por exemplo, Klute, 1965) e métodos de fluxo transiente (por exemplo, Gardner, 1956; Hamilton *et al.*, 1981; Olson e Daniel, 1981), em função do gradiente hidráulico ser mantido constante ou variar durante a realização do ensaio.

O esquema de um ensaio com aplicação de regime de fluxo estacionário é apresentado na Figura 6.113. O fluxo de água ocorre devido à diferença de energia entre a entrada de água h_{w1} e a saída de água h_{w2} . Com tensiômetros ou (T_1 e T_2 , na figura) colocados a uma distância d_t , o gradiente de energia é dado por:

$$i = \frac{d_t}{(h_{w3} - h_{w4})} \quad \text{(Equação 6.17)}$$

O valor da condutividade hidráulica, para cada valor de sucção, será obtido a partir dos valores de vazão de água e do gradiente hidráulico. O valor da sucção é controlado através do valor da pressão de ar aplicada à amostra.

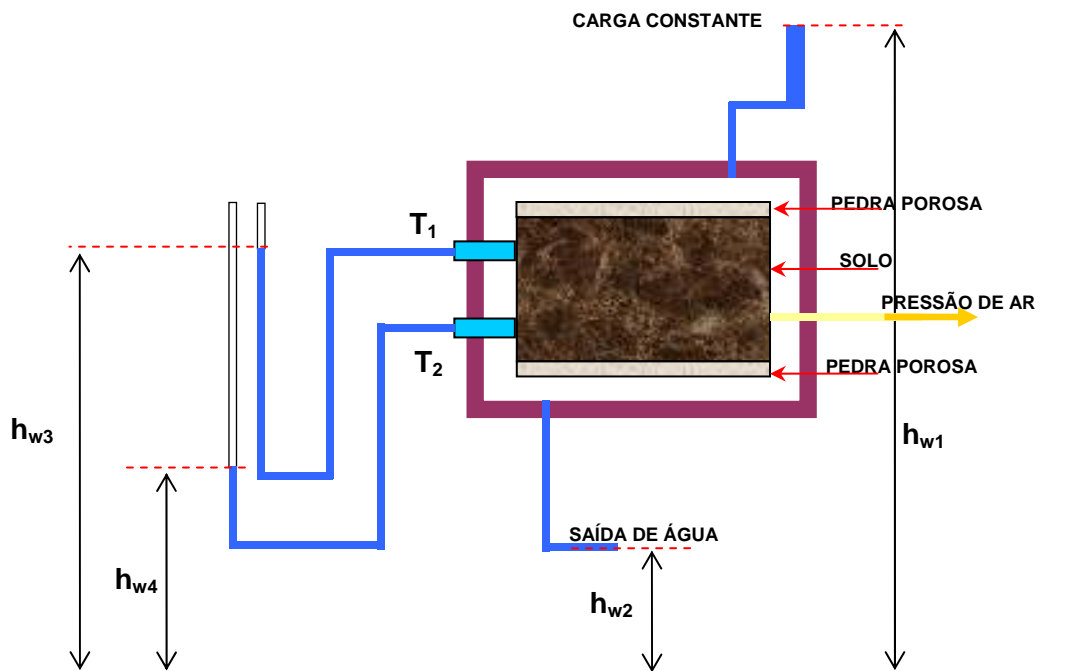


Figura 6.113 – Esquema de laboratório utilizado para a realização de ensaios em regime de fluxo estacionário.

Conforme discutido no Capítulo 2, a permeabilidade não saturada pode também ser estimada a partir da curva característica dos solos e o valor da permeabilidade saturada (e.g. Brooks e Corey, 1964; Mualem, 1976; Gardner, 1958 *apud* Brisson *et al.*, 2002; Vanapalli *et al.*, 2002; van Genuchten, 1980).

No presente trabalho apenas a permeabilidade saturada dos solos foi determinada através do ensaio de carga variável (NBR 14545), cujos resultados são apresentados no item seguinte.

6.3.1. Permeabilidade à Carga Variável

A permeabilidade saturada dos solos estudados foi determinada através de ensaios de carga variável. Foram moldados corpos-de-prova de diâmetro aproximado de 5 e 7 cm e altura aproximada de 10 ou 14 cm. Os corpos-de-prova foram saturados com fluxo ascendente. Na Tabela 6.40 são apresentados os dados dos corpos-de-prova e o valor do coeficiente de permeabilidade obtido.

Tabela 6.40 – Dados do ensaio de permeabilidade à carga variável.

Amostra	Cor	w_i (%)	w_f (%)	h (cm)	d (cm)	ρ (g/cm³)	Coef. de Permeabilidade (cm/s)
2.4019.07	Marrom	21,9	30,77	10,26	4,98	1,74	$3,15 \cdot 10^{-6}$
2.4434.05	Vermelho	24,3	32,17	13,49	7,25	1,69	$3,38 \cdot 10^{-5}$
2.4031.07	Laranja	19,8	40,49	10,19	4,98	1,51	$1,04 \cdot 10^{-5}$
2.4046.07	Amarelo	22,1	35,86	10,22	4,99	1,65	$2,82 \cdot 10^{-5}$
2.4420.05	Branco	16,3	22,58	14,45	7,31	1,73	$3,18 \cdot 10^{-5}$

A permeabilidade dos solos depende de vários fatores tais como (e.g. Das, 1983):

- Formato e tamanho das partículas do solo;
- Estrutura do solo;
- Índice de vazios;
- Grau de saturação;
- Composição das partículas de solo;
- Propriedades do fluido percolante.

A permeabilidade é diretamente proporcional ao índice de vazios do solo. Uma relação entre índice de vazios, estrutura e coeficiente de permeabilidade pode ser exemplificada por solos residuais e solos evoluídos pedologicamente que apresentam estruturas com macroporos, pelos quais a água percola com maior facilidade. Nesses solos, ainda que as partículas sejam pequenas, os vazios entre os aglomerados de partículas são grandes e é por eles que a água flui (Pinto, 2000). Um solo em condições estruturais diferentes como natural, compactada e remoldada apresenta comportamento distinto frente à permeabilidade. Vargas (1978 *apud* Futai, 2002) obteve permeabilidades maiores em solos na condição compactada que no estado natural.

A permeabilidade de solos residuais não é função apenas do índice de vazios, mas também da cimentação, ligação e distribuição e tamanho de poros. Futai (2002) analisou dados de coeficiente de permeabilidade de 12 solos tropicais e identificou quatro faixas distintas de comportamento:

I – Solos porosos argilosos, típicos do horizonte B, têm menor permeabilidade que solos do horizonte C com mesmo índice de vazios. O IP é, em geral, maior que 25% e apresentam percentual de argila maior que 50%;

II – Solos saprolíticos, de horizonte C, micáceos, com predominância da fração silte e IP menor que 20%;

III – Solos saprolíticos arenosos, de horizonte C, não plásticos e com baixos teores de argila (inferior a 20%);

IV – Comportamento particular apresentado por solos residuais de granito da Estrada do Soberbo, de horizonte C saprolítico e solo coluvionar, ambos arenosos.

Na Figura 6.114 são apresentados os grupos identificados por Futai (2002) e também estão inseridos os resultados de permeabilidade dos solos estudados (pontos coloridos no gráfico). Na legenda do gráfico, LP são solos residuais de leptinito, GN são solos residuais de gnaisse e GR são solos residuais de granito.

Os solos Marrom e Laranja situam-se próximos à faixa IV indenticada por Futai (2002), o solo Amarelo situa-se no grupo III e os solos Branco e Vermelho apresentam permeabilidade superior aos dos solos citados por aquele pesquisador. Ou seja, apesar de pertencerem ao mesmo perfil e terem a mesma origem, os solos estudados ficam inseridos em grupos distintos identificados por Futai (2002). Por isso esse gráfico de comportamento de permeabilidade não é razoável para solos de origem granito-gnaisse.

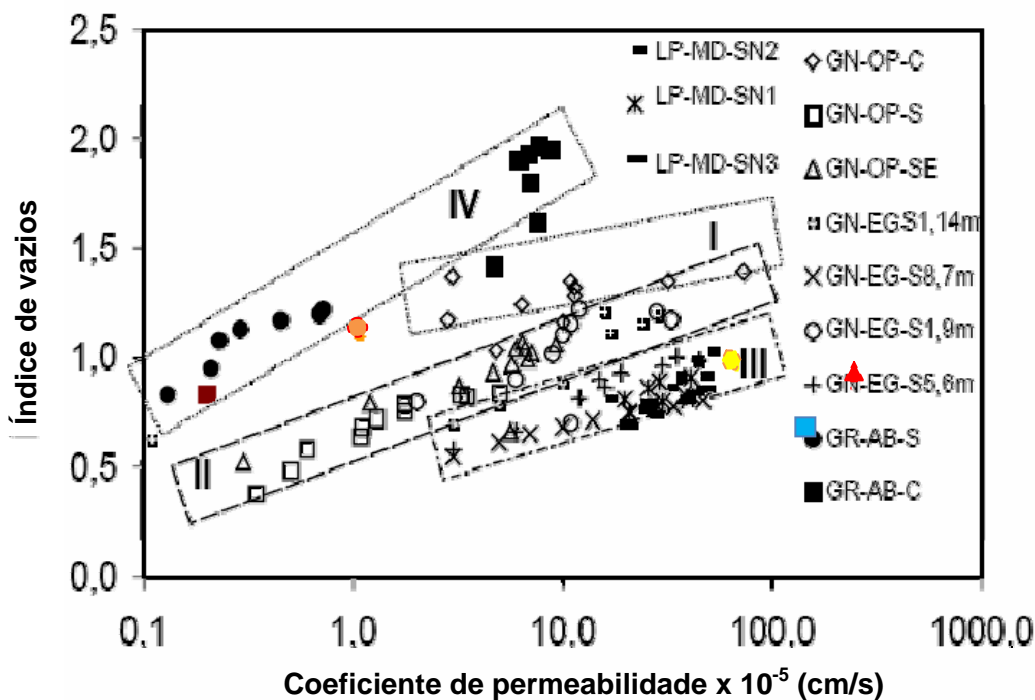


Figura 6.114 – Variação da permeabilidade com o índice de vazios (Futai, 2002).

6.4. Conclusões

As curvas de retenção determinadas através do papel filtro mostram que o solo Marrom apresenta os maiores valores de sucção para um dado grau de saturação, seguido pelo solo Vermelho, Laranja, Amarelo e Branco. Este comportamento é esperado devido ao seu maior grau de intemperismo. O solo Vermelho e o solo Marrom apresentam a curva de retenção em forma de “sela”. Esse formato é peculiar de solos residuais intemperizados que apresentam poros entre partículas e poros entre agregados de partículas, fazendo com que o valor de entrada de ar nestas estruturas seja duplo ou triplo.

Conforme pode ser visto no Capítulo 5, (Figura 5.8) resultado do ensaio de porosimetria, a distribuição do diâmetro dos poros para o solo Marrom se dá na forma bi-modal, ou seja, existe uma concentração de poros em dois diâmetros muito distintos, isto também pode explicar o formato de “sela” da curva característica.

Foram comparadas as curvas de sucção matricial obtidas através dos ensaios de porosimetria e papel filtro (Figuras 6.45 a 6.49). Observa-se uma diferença entre as curvas obtidas a partir dos dois ensaios, explicada principalmente pela diferença entre os líquidos molhantes e o princípio de cada ensaio. O comportamento bi-modal, apresentado pelo solo Marrom na sua curva de retenção obtida pela técnica do papel filtro, também foi observado na curva obtida através do ensaio de porosimetria.

Quanto mais intemperizado é o solo, maior é a sucção osmótica apresentada. No entanto, mesmo para o solo Branco os valores de sucção encontrados são bastante altos (Figura 6.26).

As propriedades de resistividade elétrica dos solos apresentam boas correlações com outras características dos solos, tais como índice de vazios e estrutura, mineralogia e tamanho de grãos, índice de intemperismo e sucção.

A resistividade dos solos diminui com o aumento do grau de saturação do material e aumenta com o aumento do índice de vazios. Ou seja, a presença de água favorece a condutividade elétrica e a presença de vazios prejudica a condutividade elétrica. Materiais estruturados também dificultam a passagem de corrente elétrica, enquanto que o estado desestruturado a favorece. Ensaio realizados em amostras cimentadas artificialmente mostram que o aumento do teor de cimento e tempo de cura aumentam a resistividade dos corpos-de-prova

(Liu *et al.*, 2007), ou seja, o ensaio de resistividade realizado em amostras indeformadas e amolgadas pode indicar a existência de cimentação na estrutura dos solos.

Os valores de resistividade, de amostras deformadas e indeformadas, determinados para o grau de saturação de 85% apresentaram boa concordância com os índices de intemperismo ba e ba_1 , apresentando-se como uma alternativa para a classificação de solos residuais de rochas ácidas. Esses valores de resistividade também apresentaram boa correlação com a quantidade de sílica e de óxido de alumínio, fato que corrobora a influência da intemperização na resistividade elétrica.

Embora tanto as amostras deformadas como as amostras indeformadas tenham apresentado boa correlação com os parâmetros de intemperização, a relação entre elas é inversa. Enquanto para as amostras deformadas a composição dos solos é a influência principal na resistividade (por exemplo, quanto maior o teor de sílica, mais resistivo é o solo, e a sílica é um conhecido material não condutor), nas amostras indeformadas a estrutura exerce um controle considerável na passagem ou não da corrente elétrica. Por exemplo, o solo Branco, menos intemperizado e com maior teor de sílica, é mais condutor no grau de saturação 85% do que os demais solos. Ou seja, o comportamento do solo estruturado é totalmente diferente do comportamento do solo desestruturado.

A pressão de sucção e a resistividade elétrica são função dos mesmos parâmetros: grau de saturação, estrutura, mineralogia e composição. Diante dessa similaridade é esperada uma boa relação entre essas grandezas. Observou-se a mesma tendência geral de comportamento para a variação da sucção normalizada com o índice de resistividade para os cinco grupos de solos estudados. Para valores altos de IR, o valor da sucção normalizada é praticamente constante. Após esse intervalo de sucção constante, segue um trecho linear com decréscimo de IR e decréscimo de sucção e depois, novamente um segmento de valores pequenos de IR e valor de sucção constante. Os trechos com sucção constante não são observados em todos os solos, provavelmente pela ausência de dados, mas a razão linear com decréscimo de IR e de sucção é sempre observada. A existência de distintos trechos lineares pode estar relacionada à ocorrência de diferentes tamanhos de poros no material. Devido aos altos teores de sucção osmótica presente nos

solos, obteve-se uma melhor correlação dos valores de resistividade com os valores de sucção total do que com os valores de sucção matricial dos solos.

A determinação da curva característica de resistividade dos solos pode se tornar uma ferramenta útil na classificação de solos residuais. O ensaio pode ser executado em todos os corpos-de-prova que serão ou foram utilizados em outros ensaios de resistência, permeabilidade ou compressibilidade, pois se trata de um ensaio não destrutivo e de simples execução.