



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciência
Faculdade de Engenharia

Anderson Moura Ferreira

**Avaliação de Proposições Matemáticas para Interpretação do
Comportamento de Solos Residuais Não Saturados**

Rio de Janeiro
2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Anderson Moura Ferreira

**Avaliação de Proposições Matemáticas para Interpretação do
Comportamento de Solos Residuais Não Saturados**

Dissertação apresentada ao
PGECIV - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade do
Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como
parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil. Ênfase: Geotecnia.

Orientador:

Prof. Dr. Denise Maria Soares Gerscovich

Co-orientador:

Prof. Dr. Francisco José da Cunha Pires Soeiro

Rio de Janeiro

2010

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/CTCB

F383 Ferreira, Anderson Moura
Avaliação de Proposições Matemáticas para Interpretação do
Comportamento de Solos Residuais Não Saturados / Anderson
Moura Ferreira. – 2010.
243f

Orientador: Denise Maria Soares Gerscovich
Co-orientador: Francisco José da Cunha Pires Soeiro
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.
Anexos e Apêndices: 207-243

1. Solos Residuais. 2. Cisalhamento dos Solos – Resistência.
3. Problemas Inversos (Equações Diferenciais) – Teses. I.
Gerscovich, Denise Maria Soares. II. Soeiro, Francisco José da
Cunha Pires. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Engenharia. IV. Título

CDU 624.131

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese.

Anderson Moura Ferreira

Data

Anderson Moura Ferreira

**Avaliação de Proposições Matemáticas para Interpretação do
Comportamento de Solos Residuais Não Saturados**

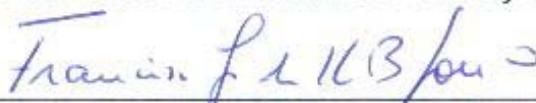
Dissertação apresentada ao
PGE CIV - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade do
Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como
parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil. Ênfase: Geotecnia.

Aprovado em: 04 de Fevereiro de 2010

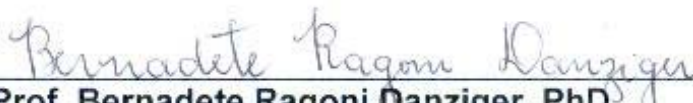
Banca Examinadora:



Prof.^a Denise Maria Soares Gerscovich, DSc
Presidente/Orientadora
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ



Prof. Francisco José da Cunha Pires Soeiro, PhD
Co-Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica – UERJ



Prof. Bernadete Ragoni Danziger, PhD
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ



Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior^{PhD}
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Rio de Janeiro

2010

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Marco Antonio e Eliana, à minha amada irmã, Kamila e à minha noiva, Maria Aline, pelo amor, estímulo e por compreenderem minhas ausências no decorrer deste trabalho. Aos Adolescentes de Santo Agostinho (ASA), turma 2009, pelas orações e carinho e à Deus, por me permitir o grandioso dom da vida.

AGRADECIMENTOS

Aos funcionários Rodolfo Santos e Shirlei Barros pelo auxílio e atenção dispensada durante todo o curso.

A professora Ana Cristina Sieira que, acima de mestre, sempre se mostrou amiga e uma grande incentivadora nessa trajetória.

À Professora Bernadete R. Danziger pela transmissão dos conhecimentos, por todo o carinho e por ter aceitado, junto ao Professor Eurípedes A. Vargas Junior, a participarem da banca examinadora deste trabalho. A esses agradeço de forma especial dado o valor de suas considerações e contribuições dadas, não só a esse trabalho, mas principalmente para os que ainda virão.

Aos Freis Agostinianos André Ricardo Zago, Arthur Vianna e Alex Moura pelas orações e direcionamento espiritual; à Selma Venturini e Cleide Lino pelo carinho e incansável intercessão; e ao grupo Adolescentes de Santo Agostinho (ASA) pelo carinho e pelos momentos de descontração.

Aos amigos que a vida de engenheiro me deu: Adriana Pessoa, Andrea Gasiglia, Bernardo Ortega, Fernanda Paola Paredes, José Bernardino, Julia Cheroto, Márcia Medeiros, Patrícia Cunha, Renata Carneiro, Rogério Cyrillo e Vinicius Aguiar pelos trabalhos desenvolvidos, por tantos outros que ainda surgirão e pelos momentos “anti-estresses”, que por tanta vezes proporcionaram.

Aos amigos que Deus me deu como irmãos: Fabiana Barbosa, Fábio Cirino, Janaína da Silva, Julio Pimentel, Lilliane Cabral, Lucio Barbosa e Viviane Ferreira pela torcida, o companherismo, compreensão, apoio e (muita) paciência que tiveram ao longo dessa jornada.

A amiga Ludma Ferreira pelo incentivo, carinho e por sempre acreditar na realização deste trabalho, até mesmo quando eu o achava impossível. A amiga Alessandra Conde pelos divertidos momentos passados dentro do LABBAS no desenvolvimento de nossas dissertações.

Ao Professor Francisco José Soeiro por aceitar o desafio de co-orientar este trabalho, acoplado conceitos de otimização aos estudos de geotecnia.

À minha orientadora Denise Gerscovich pelo conhecimento transmitido, pela dedicação, paciência com minhas “negligências”, pela confiança, mesmo em momentos de desânimos e pela maestria na realização deste trabalho. Por tudo isso, agradeço a amizade nascida e criada no decorrer do trabalho.

Aos meus pais, Marco Antonio Ferreira e Eliana Moura, à minha amada irmã, Kamila Moura e ao meu cunhado Ronaldo Barreto, por sempre se fazerem presentes em minha vida e por serem os grandes responsáveis por cada uma das minhas conquistas.

A minha noiva, Maria Aline, por entender minhas ausências, pela sua paciência, pelo seu companheirismo, enfim, por seu amor verdadeiro.

A DEUS por me conceder a graça de ter cada um desses, dentre tantos outros, em momentos tão especiais de minha vida e, por meio deles permitindo que eu pudesse compreender o Seu Amor por mim.

Eu, porém, já tinha sido ensinado por ti, meu Deus, de modo extraordinário e misterioso. Creio no que me ensinaste, porque é verdade, e fora de ti ninguém é mestre da verdade, qualquer que seja a maneira ou lugar em que esta apareça. Eu já havia apreendido de ti que uma coisa não deve ser aceita como verdade apenas pelo fato de ser afirmada em belo estilo, e não deve ser tida por falsa porque as palavras saem dos lábios de modo confuso; por outro lado, não deve ser julgada verdadeira porque expressa sem cuidado, ou falsa porque apresentada com elegância. A sabedoria e a ignorância são mais ou menos como os alimentos úteis ou nocivos: podem ser apresentadas através de palavras polidas ou rudes, como os bons e maus alimentos podem ser servidos em pratos finos ou grossos.

Santo Agostinho, in Confissões V, 6.10.

RESUMO

FERREIRA, Anderson Moura. *Avaliação de Proposições Matemáticas para Interpretação do Comportamento de Solos Residuais Não Saturados*. Rio de Janeiro, 2010. 243p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Nas últimas décadas, teorias têm sido formuladas para interpretar o comportamento de solos não saturados e estas têm se mostrado coerentes com resultados experimentais. Paralelamente, várias técnicas de campo e de laboratório têm sido desenvolvidas. No entanto, a determinação experimental dos parâmetros dos solos não saturados é cara, morosa, exige equipamentos especiais e técnicos experientes. Como resultado, essas teorias têm aplicação limitada a pesquisas acadêmicas e são pouco utilizados na prática da engenharia. Para superar este problema, vários pesquisadores propuseram equações para representar matematicamente o comportamento de solos não saturados. Estas proposições são baseadas em índices físicos, caracterização do solo, em ensaios convencionais ou simplesmente em ajustes de curvas. A relação entre a umidade e a sucção matricial, convencionalmente denominada curva característica de sucção do solo (SWCC) é também uma ferramenta útil na previsão do comportamento de engenharia de solos não saturados. Existem muitas equações para representar matematicamente a SWCC. Algumas são baseadas no pressuposto de que sua forma está diretamente relacionada com a distribuição dos poros e, portanto, com a granulometria. Nestas proposições, os parâmetros são calibrados pelo ajuste da curva de dados experimentais. Outros métodos supõem que a curva pode ser estimada diretamente a partir de propriedades físicas dos solos. Estas propostas são simples e conveniente para a utilização prática, mas são substancialmente incorretas, uma vez que ignoram a influência do teor de umidade, nível de tensões, estrutura do solo e mineralogia. Como resultado, a maioria tem sucesso limitado, dependendo do tipo de solo. Algumas tentativas têm sido feitas para prever a variação da resistência ao cisalhamento com relação a sucção matricial. Estes procedimentos usam, como uma ferramenta, direta ou indiretamente, a SWCC em conjunto com os parâmetros efetivos de resistência c' e ϕ' . Este trabalho discute a aplicabilidade de três equações para previsão da SWCC (Gardner, 1958; van Genuchten, 1980; e Fredlund e Xing, 1994) para vinte e quatro amostras de solos residuais brasileiros. A adequação do uso da curva característica normalizada, proposta por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004), também foi investigada. Os parâmetros dos modelos foram determinados por ajuste de curva, utilizando técnicas de problema inverso; dois métodos foram usados: algoritmo genético (AG) e Levenberg-Marquardt. Vários parâmetros que influenciam o comportamento da SWCC são discutidos. A relação entre a sucção matricial e resistência ao cisalhamento foi avaliada através de ajuste de curva utilizando as equações propostas por Öberg e Sällfors (1995, 1997), Vanapalli et al (1996), Vilar (2007) e Futai (2002); oito resultados experimentais foram analisados. Os vários parâmetros que influenciam a forma da SWCC e a parcela não saturada da resistência ao cisalhamento são discutidos.

Palavras-chave: Solos residuais brasileiros não saturados, Curva característica de sucção do solo, Resistência ao cisalhamento não saturada, Problemas Inversos, Métodos de otimização.

ABSTRACT

In the last decades, theories have been formulated to interpret the behavior of unsaturated soils and found to be consistent with the experimental response. Besides, several techniques for field and laboratory testing have been developed, as well. However, the experimental determination of unsaturated soil parameters is costly, time-consuming, requires particular test equipments and experienced technicians. As a result, these theories application are limited to academic researches and are barely used in engineering practice. To overcome this issue, several researchers proposed equations to mathematically represent the experimental behavior unsaturated soils. These propositions are based on physical indexes, soil characterization, and current laboratory tests or simply curve fitting. The relationship of soil-water content and matric suction, conventionally referred to as the soil-water characteristic curve (SWCC) is also useful tool in the prediction of the engineering behavior of unsaturated soils. There are many equations to mathematically represent SWCC. Some are based on the assumption that its shape is directly related to the pore distribution, and, therefore, the grain size distribution. In these propositions the parameters are calibrated by curve adjustment of the experimental data. Others assume that the curve can be directly estimated from physical properties of soils. These proposals are simple and convenient for practical use, but are substantially incorrect since they disregard the influence of moisture content, stress level, soil structure and mineralogy. As a result, most of them have limited success depending on soil types. Some attempts have also been made to predict the variation of the shear strength with respect to matric suction. These procedures use SWCC as a tool either directly or indirectly along with the saturated strength parameters c' and ϕ' . This work discusses the applicability of three SWCC equations (Gardner, 1958; van Genuchten, 1980; and Fredlund and Xing, 1994) for twenty four residual soils from Brazil. The suitability of the normalized soil-water characteristic curve, proposed by Camapum de Carvalho and Leroueil (2004), was also investigated. Model's parameters were determined by curve fitting, using inverse problem techniques; two optimization methods were used: Genetic Algorithm (GA) and Levenberg-Marquardt method. Several parameters that influence the SWCC behavior are discussed, as well. The relationship between matric suction and shear strength was evaluated by curve fitting using the equations proposed by Öberg and Sällfors (1995, 1997), Vanapalli et al (1996), Vilar (2007) and Futai (2002); eight experimental results were analyzed. Several parameters that influence the SWCC behavior and the unsaturated shear strength are discussed, as well.

Key-words: Residual Soil Brazilian Unsaturated, Soil-Water Characteristic Curve, Shear Strength, Inverse Problem, Optimization Methods

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Elemento de Solo Não Saturado (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993)....	29
Figura 1.2 – Água Capilar e de Adsorção (Hillel, 1971 apud Gerscovich, 1994)	34
Figura 1.3 – Ascensão Capilar	35
Figura 1.4 – Curvas Características Típicas (Gerscovich, 2001).	40
Figura 1.5 – Curva Característica ($S \times \psi$) e Estágios (Vanapalli et al, 1996)	41
Figura 1.6 – Variação da Área de Água (Vanapalli et al, 1996)	42
Figura 1.7 – Forma Geral da Curva Característica de Sucção de acordo com a Distribuição de Poros (Marinho, 2005 apud Feuerharmel, 2007).....	43
Figura 1.8 – Curva Característica Bimodal de dois Solos Coluvionares (Feuerharmel et al, 2006).....	45
Figura 1.9 – Distribuição de Poros (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004)	46
Figura 1.10 – Trechos da Curva Característica Bimodal (Feuerharmel et al, 2005)	46
Figura 1.11 – Formas Típicas Geral da Curva Característica de Solos Tropicais (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004)	47
Figura 1.12 – Curvas Características de Amostras Compactadas em Diferentes Umidades Iniciais (Vanapalli, 1999).....	47
Figura 1.13 – Influência da Tensão de Pré-adensamento na Curva Característica (Barbour, 1998).....	48
Figura 1.14 – Previsão da Curva Característica para Diferentes Valores de pelo Volume Específico de Vazios (v) (Gallipoli, 2003).....	49
Figura 1.15 – Curva Característica Típica – Secagem e Umedecimento (Fredlund e Xing, 1994).....	49
Figura 1.16 – Efeito “Ink Bottle” (a) secagem (b) umedecimento	50
Figura 1.17 – Histerese da Curva Característica (Melgarejo et al, 2002).....	50
Figura 1.18 – Resultados de Ensaio Triaxiais com Teor de Umidade Constante em Solo Compactado (Bishop et al 1960)	52
Figura 1.19 – Envoltória de Tridimensional de Ruptura (Fredlund e Rahardjo, 1993)	53
Figura 1.20 – Representação Gráfica da Resistência ao Cisalhamento (Fredlund e Rahardjo, 1993; Ho e Fredlund, 1982).	54
Figura 1.21 – Relação entre a Curva Característica do Solo (a) e a Resistência ao Cisalhamento (b) para uma Areia e um Silte Argiloso (Fredlund e Rahardjo, 1993).....	56
Figura 1.22 – Relação ϕ^b/ϕ com a sucção (de Campos, 1997).	57
Figura 1.23 – Comparação entre ϕ^b e χ	58
Figura 1.24 – Problema Direto e Problema Inverso (Velloso, 2000)	59

Figura 1.25 – Fluxograma de um Problema de Estimativa de Parâmetros (Velloso, 2000)..	61
Figura 1.26 – Representação da População e seus Indivíduos (Cheung, 2007)	73
Figura 1.27 – Definição de Resíduo (Velloso, 2000).....	78
Figura 2.1 – Procedimento Gráfico para Estimar os Parâmetros α , m e η	87
Figura 2.2 – Curva Característica para Diferentes Índices de Vazios (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2000).....	90
Figura 2.3 – Curva Transformada (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004).	92
Figura 2.4 – Previsão da Resistência pela Equação da Elipse (Escario, 1988 apud Carrillo, 1995).....	99
Figura 2.5 – Previsão da Resistência pela Equação da Elipse (Escario, 1988 apud Carrillo, 1995).....	100
Figura 2.6 – Aplicação do Modelo de Fredlund et al para Previsão da Parcela de Resistência em 2 solos.....	103
Figura 2.7 – Previsão da Variação da Resistência com a Sucção (Vanapalli et al, 1996) ..	104
Figura 2.8 – Influência do Parâmetro κ na Previsão da Variação da Resistência com a Sucção (Vanapalli et al, 1996).....	105
Figura 2.9 – Relação entre o Parâmetro κ e o Índice de Plasticidade (Vanapalli e Fredlund, 2000).....	106
Figura 2.10 – Estudos de Vilar e Colaboradores: (a) Curva de Característica; (b) Função Hiperbólica (Vilar, 2007).	108
Figura 2.11 – Ajuste da Curva de Resistência ao Cisalhamento (Vilar,2007).....	110
Figura 2.12 – Ajuste da Curva de Resistência ao Cisalhamento (Vilar,2007).....	111
Figura 2.13 – Picos na Curva de Resistência em Função da Sucção (Vilar,2007).	112
Figura 2.14 – Variação de χ em Função da Sucção (Khallili e Khabbaz,1998)	114
Figura 2.15 – Variação dos Parâmetros de Resistência com a Sucção (Futai, 2004)	116
Figura 2.16 –Curva Característica dos Solos (Vanapalli e Fredlund, 2000).....	117
Figura 2.17 –Comparação entre Curva Medida e as Prevista para Argila de Madrid (Vanapalli e Fredlund, 2000).....	117
Figura 3.1 – Curva Característica – Salvador - AvG (Machado e Lima Jr, 2001).	121
Figura 3.2 – Curva Característica – Salvador - AvPI (Machado e Dourado, 2001).....	122
Figura 3.3 – Curva Característica – Salvador - AvPS (Machado e Dourado, 2001)	122
Figura 3.4 – Alto do Bom Viver – Curva Característica (Jesus, 2008)	123
Figura 3.5 – Alto do Bom Viver – $c \times \psi$ (Jesus, 2008).....	124
Figura 3.6 – Curva Característica: Solo Saprolítico de Gnaisse Kinzigítico Chapéu D’Uvas (de Campos et al, 1992).	125
Figura 3.7 – Viçosa – Curva Característica (Reis, 2004)	126

Figura 3.8 – Curvas $c \times \psi$ - Viçosa (adaptado de Reis, 2004).....	127
Figura 3.9 – Curva Característica – Trajetórias de Umedecimento (umd) e Secagem(sec) (Bastos, 1999)	129
Figura 3.10 – Envoltórias de Resistência (Bastos, 1999).....	130
Figura 3.11 – Ajuste de acordo com o Modelo Proposto por Vilar e Colaboradores (Bastos, 1999).....	130
Figura 3.12 – $\tau_{us} \times \psi$ - Ajuste de bi-linear (Bastos, 1999).....	131
Figura 3.13 – Curva Característica – Escudo Sul-Riograndense (Oliveira et al, 2001).....	133
Figura 3.14 – Curva Característica: Solo Saprolítico de Gnaiss Kinzigítico Lagoa (de Campos et al, 1992).....	134
Figura 3.15 – Curva Característica: Solo Residual de Gnaiss Facoidal (de Campos et al, 1992).....	135
Figura 3.16 – Curvas Características – Vista Chinesa (Delgado, 1993)	138
Figura 3.17 – Envoltória de Resistência com Relação à Sucção Vista Chinesa (Delgado, 1993).....	140
Figura 3.18 – Curva Característica – São Carlos-USP (Machado e Vilar, 1998)	141
Figura 3.19 – Envoltória de Resistência com Relação à Sucção São Carlos-USP (Machado e Vilar, 1998)	141
Figura 3.20 – Curva Característica – USP (Vieira e Marinho, 2001).....	142
Figura 3.21 – Perfil de Sondagem - SP-01 (Calle, 2000).	145
Figura 3.22 – Perfil de Sondagem - SP-02 (Calle, 2000).	146
Figura 3.23 – Limites de Consistência e Umidade - SP-01 (Calle, 2000)	147
Figura 3.24 – Envoltória de Resistência – AI1 (adaptado de Calle, 2000).	149
Figura 4.1 – Exemplo do programa Matlab®	152
Figura 4.2 – Exemplo do programa Evolver – Indicação das Células a serem Ajustadas ..	154
Figura 4.3 – Análise Preliminar – F(p) x Iterações – AI1	158
Figura 4.4 – Análise Preliminar – F(p) x Iterações – AI3	159
Figura 4.5 – Parâmetros de Ajuste do Modelo de van Genuchten obtidos pelo Evolver – Amostra AI1	160
Figura 4.6 – Análise Preliminar – F(p) X Iterações – Avaliação da População.	161
Figura 4.7 – Análise Preliminar – Tempo X Iterações – Avaliação da População.....	161
Figura 5.1 – Modelagem da Curva Característica – Salvador	165
Figura 5.2 – Modelagem da Curva Característica – Alto do Bom Viver.	166
Figura 5.3 – Modelagem da Curva Característica – Alvorada (ALGB).....	167
Figura 5.4 – Modelagem da Curva Característica – Alvorada (ALGC).....	168
Figura 5.5 – Modelagem da Curva Característica – USP – Prof. 1,6m (Vieira e Marinho, 2001).....	169

Figura 5.6 – Ajuste Unimodal – USP (1,6 m).....	169
Figura 5.7 – Modelo de van Genuchten (1980) considerando m ajustável e dependente de η	170
Figura 5.8 – Curva Característica– Salvador (AvPI).....	175
Figura 5.9 –Curva Característica– Chapéu D’ Uvas.....	176
Figura 5.10 – Proposta de Öberg e Sällfors (1995,1997) – Viçosa	178
Figura 5.11 – Proposta de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996) – Viçosa	179
Figura 5.12 – $\kappa \times IP$ – Comparação com estudos de Vanapalli e Fredlund (2000a, 2000b)	181
Figura 5.13 – Proposta de Vilar e Colaboradores – Viçosa.....	183
Figura 5.14 – Proposta de Futai e Colaboradores – Viçosa.....	184
Figura 5.15 – $c \times \psi$ - Comparação entre os Modelos– ALGC	186
Figura 5.16 – Relação ϕ^b/ϕ'	187
Figura D. 1 – Modelagem da Curva Característica – Viçosa.....	213
Figura D. 2 – Modelagem da Curva Característica – Joatinga.....	214
Figura D. 3 – Modelagem da Curva Característica – Chapéu D’Uvas	215
Figura D. 4 – Modelagem da Curva Característica – Vista Chinesa.	215
Figura D. 5 – Modelagem da Curva Característica – Rod. Engº Thales L. Peixoto	216
Figura D. 6 – Modelagem da Curva Característica – USP (Vieira e Marinho, 2001)	217
Figura D. 7 – Modelagem da Curva Característica – Lagoa	218
Figura D. 8 – Modelagem da Curva Característica – USP (Machado e Vilar, 1998).....	218
Figura D. 9 – Modelagem da Curva Característica – Escudo Sul-Riograndense.....	218
Figura E.1– Transformação da Curva Característica – Viçosa	221
Figura E.2 – Transformação da Curva Característica – Salvador	222
Figura E.3 – Transformação da Curva Característica – Alto do Bom Viver.	223
Figura E.4 – Transformação da Curva Característica – Alvorada	223
Figura E.5 – Transformação da Curva Característica – Joatinga.....	224
Figura E.6 – Transformação da Curva Característica – Escudo Sul-Riograndense.	225
Figura E.7 – Transformação da Curva Característica – Vista Chinesa.	225
Figura E.8 – Transformação da Curva Característica– Rod. Engº Thales L. Peixoto	226
Figura E.9 – Transformação da Curva Característica – USP (Machado e Vilar, 1998)	227
Figura E.10 – Transformação da Curva Característica – Lagoa	227
Figura F.1 – Proposta de Öberg e Sällfors (1995,1997) – Alvorada	228
Figura F.2 – Proposta de Öberg e Sällfors (1995,1997) – USP (Machado e Vilar, 1998)...	229

Figura F.3 – Proposta de Öberg e Sällfors (1995,1997) – Vista Chinesa	229
Figura F.4 – Proposta de Öberg e Sällfors (1995,1997) – AI1	230
Figura F.5 – Proposta de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996) – USP	230
Figura F.6 – Proposta de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996) – Alvorada	231
Figura F.7 – Proposta de Vanapalli et al (1996) – Vista Chinesa	232
Figura F.8 – Proposta de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996)– AI1	233
Figura F.9 – Proposta de Futai e Colaboradores – USP	233
Figura F.10 – Proposta de Futai e Colaboradores – Alvorada	234
Figura F.11 – Proposta de Futai e Colaboradores – AI1	234
Figura F.12 – Proposta de Futai e Colaboradores – Vista Chinesa	235
Figura F.13 – Proposta de Vilar e Colaboradores – Alvorada	236
Figura F.14 – Proposta de Vilar e Colaboradores – USP	237
Figura F.15 – Proposta de Vilar e Colaboradores – AI1	237
Figura F.16 – Proposta de Vilar e Colaboradores – Vista Chinesa	238
Figura G.1 – Relação ϕ^b/ϕ' – Viçosa	239
Figura G.2 – Relação ϕ^b/ϕ' – Alvorada.....	240
Figura G.3 – Relação ϕ^b/ϕ' – USP (Machado e Vilar, 1998).....	240
Figura G.4 – Relação ϕ^b/ϕ' – Vista Chinesa.....	241
Figura G.5 – Relação ϕ^b/ϕ' – AI1	241

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Faixa de Variação da Sucção de Entrada de Ar (ψ_b)	44
Tabela 2.1 – Propostas para Modelagem da Curva Característica (adaptado de Gerscovich, 2001 e Vivian, 2008).....	93
Tabela 2.2 – Propostas para Modelagem da Resistência ao Cisalhamento	118
Tabela 3.1 – Caracterização do Solo AvG (Machado e Lima Jr, 2001).	120
Tabela 3.2 – Caracterização do Solo (Machado e Lima Jr, 2001)	122
Tabela 3.3 – Alto do Bom Viver – Caracterização do Solo (Jesus, 2008).....	123
Tabela 3.4 – Distribuição Granulométrica Chapéu D’Uvas (adaptado de de Campos et al, 1992).....	124
Tabela 3.5 – Viçosa – Caracterização do Solo (Reis, 2004).....	125
Tabela 3.6 – Caracterização Geotécnica (Bastos, 1999 e Bastos et al, 2001)	128
Tabela 3.7 – Parâmetros de Resistência (Bastos, 1999)	131
Tabela 3.8 – Ajuste da Curva Característica (Bastos, 1999).....	132
Tabela 3.9 – Parâmetros para Previsão da Resistência ao Cisalhamento	132
Tabela 3.10 – Distribuição Granulométrica (Oliveira et al, 2001).....	132
Tabela 3.11 – Índices Físicos do Solo (Oliveira et al, 2001)	133
Tabela 3.12 – Distribuição Granulométrica Lagoa (adaptado de de Campos et al, 1992)..	134
Tabela 3.13 – Caracterização Geotécnica (adaptado de de Campos et al, 2001).....	135
Tabela 3.14 – Caracterização Geotécnica (Delgado, 1993).....	137
Tabela 3.15 – Índices Físicos das Amostras (Delgado, 1993)	139
Tabela 3.16 – Índices Físicos Adotados (médios) (Delgado, 1993).....	139
Tabela 3.17 – Caracterização do Solo (Machado e Vilar, 1998).....	140
Tabela 3.18 - Caracterização Geotécnica (adaptado de Calle, 2000).....	143
Tabela 3.19 - Dados Experimentais – Amostra AI1 (adaptado de Calle, 2000).....	147
Tabela 3.20 – Dados Experimentais – Amostra AI2 (adaptado de Calle, 2000)	148
Tabela 3.21 - Dados Experimentais – Amostra AI3 (adaptado de Calle, 2000).....	148
Tabela 3.22 – Condição de Ensaio (Calle, 2000).....	149
Tabela 4.1 – Valores de Referência para as Análises.....	162
Tabela 5.1 – Parâmetros dos Modelos.....	163
Tabela 5.2 – Parâmetros de Ajuste – Salvador	164
Tabela 5.3 – Parâmetros para o Modelo de Fredlund e Xing (1994), com ψ_r Ajustado Numericamente e $\psi_r = 5 \times 10^6$ kPa – Alto do Bom Viver	167
Tabela 5.4 – Parâmetros de Ajuste - Alvorada.....	168
Tabela 5.5 – Parâmetros de Ajuste	170

Tabela 5.6 – Análise Global - Resumo dos Resultados das Análises de Curvas Características.....	172
Tabela 5.7 –Parâmetros de Ajuste – Normalização das Curvas Características.....	177
Tabela 5.8 – Parâmetros de Ajuste – Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996).....	180
Tabela 5.9 – Resultados Obtidos para o Modelo de Vilar e Colaboradores.....	182
Tabela 5.10 – Parâmetros de Ajuste – Futai e Colaboradores.....	184
Tabela 5.11 – Análise Global - Análises de Previsão da Resistência.	188

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
AG _{mod}	Análise Global do modelo
AI (n)	Amostra de Solo extraída Rodovia Engenheiro Thales de L. Peixoto – SP; (n) corresponde ao número da amostra.
ALGB	Amostra de Solo extraída do Município de Alvorada (RS), horizonte B
ALBC	Amostra de Solo extraída do Município de Alvorada (RS), horizonte C
AvG	Amostra de Solo extraída da Avenida Garibaldi (BA)
AvPI	Amostra de Solo extraída da Avenida Paralela - berma inferior (BA)
AvPS	Amostra de Solo extraída da Avenida Paralela - berma superior (BA)
BFGS	Broyden-Fletcher-Goldforb-Shama
CQ	Critério de qualidade
DFP	Davidon-Fletcher-Powell
RT	Residual Típico
RV	Residual Vermelho
SRJ	Solo Residual Jovem
SRM	Solo Residual Maduro
SI	Sistema Internacional
SP	Sondagem a Percussão
SWCC	Curva Característica de Sucção do Solo (Soil-Water Characteristic Curve)
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas Minúsculas

b_{10}	Número decimal referente à cadeia de bits
c	Intercepto coesivo
c'	Coesão efetiva
d^k	Direção de busca
e	Índice de vazios
e_i	Índice de vazios inicial
f_k	Avaliação do cromossomo
f_m	Número de filhos esperados do cromossomo
g	Gradiente da função objetivo
j	Restrição
k	Iteração
k	Cromossomo
k_i	Permeabilidade na direção i ($i = x, y$ ou z)
m	Tamanho da cadeia de bits
m	Parâmetro de ajuste da equação de Fredlund e Xing (1994)
n	Porosidade
n_p	Número de parâmetros de ajuste
p^k	Vetor de parâmetros
r_i	Diferença entre o valor observado e o calculado (resíduo)
u_a	Porosidade no ar
u_w	Porosidade no água

Letras Romanas Maiúsculas

A_a	Área de ar correspondendo a qualquer valor de grau de saturação
A_{tot}	Área de água correspondendo a $S=100\%$
A_w	Área de água correspondendo a qualquer valor de grau de saturação
C_{p0}	Matriz de covariância das estimativas iniciais dos parâmetros
C_y	Matriz de covariância das medidas,
$C(\psi)$	Capacidade de retenção específica

D	Matriz Diagonal de ordem n_p
$F(p)$	Função objetivo
G	Densidade dos grãos
H	Matriz hessiana
$H_j(x)$,	Função de penalização
J	Matriz Jacobiana
$K(\psi)$,	Tangente do gráfico sucção x condutividade hidráulica
N	Número de dados
Q	Qualidade do ajuste
P_k	Probabilidade de seleção
R	Constante universal do gás
S	Grau de saturação
S_f	Grau de saturação final
S_r	Grau de saturação residual
T	Temperatura absoluta
V_v	Volume de vazios
V_w	Volume de água
V	Volume total
W	Matriz de pesos diagonal com elementos não negativos

Letras Gregas Minúsculas

α	Parâmetro de ajuste das equações de Gardner (1958), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994)
β	Tamanho do passo
ε	Erro do ajuste
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
ϕ_a	Potencial pneumático
ϕ^b	Ângulo de atrito em relação a variação da sucção
ϕ_g	Potencial gravitacional
ϕ_m	Potencial mátrico
ϕ_o	Potencial osmótico
ϕ_p	Potencial de consolidação
η	Parâmetro de ajuste das equações de Gardner (1958), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994)
κ	Parâmetro de ajuste da equação de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996)
λ	Parâmetro de Levenberg.
v	Volume específico
θ	Teor de umidade volumétrico
θ_{med}	Teor de umidade volumétrico medido experimentalmente
θ_{prev}	Teor de umidade previsto pelo ajuste realizado
θ_r	Teor de umidade volumétrico residual
θ_s	Teor de umidade volumétrico saturado
ρ_s	Peso específico seco
ρ_w	Densidade da água
σ'	Tensão efetiva
σ	Tensão total
σ_y^2	Variância
σ_{yi}	Desvio padrão
τ	Tensão de cisalhamento
τ_{usmed}	Parcela de coesão devida a sucção medido experimentalmente

τ_{usprev}	Parcela de coesão devida a sucção previsto pelo ajuste realizado
ω	Teor de umidade em peso
ω_v	Massa molecular do vapor d'água
ψ_b	Sucção de entrada de ar
ψ_m	Sucção mátrica
ψ_o	Sucção osmótica
ψ_r	Sucção residual
ψ_t	Sucção total

Letras Gregas Maiúsculas

χ	Fator de correção que representa a condição de saturação do solo (Bishop et al,1960)
Δp^k	Varição do vetor de parâmetros

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	27
Generalidades	27
Objetivos e Metodologia.....	27
Estrutura da Dissertação.....	28
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
1.1 Origem dos Solos Não Saturados	30
1.2 Problemas Associados a Solos Não Saturados	31
1.3 Conceito de Energia na Água.....	32
1.3.1 Sucção Osmótica	33
1.3.2 Sucção Mátrica.....	34
1.4 Fluxo em Meios Não Saturados	36
1.4.1 Curva Característica de Sucção do Solo.....	39
1.5 Resistência ao Cisalhamento.....	51
1.5.1 Proposta de Bishop et al (1960).....	51
1.5.2 Proposta de Fredlund e Morgenstern (1977)	53
1.6 Estimativa de Parâmetros – Problemas Inversos	58
1.6.1 Métodos de Estimativa de Parâmetros.....	61
1.6.2 Algoritmos de Otimização.....	64
1.6.3 Métodos de Otimização.....	65
1.6.4 Análise de Resíduos e Interpretação da Estimativa	77
2 MODELOS APLICADOS A DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLOS NÃO SATURADOS	82
2.1 Curva Característica.....	82
2.1.1 Proposta de Gardner (1958).....	84
2.1.2 Proposta de van Genuchten (1980)	85

2.1.3	Proposta de Fredlund e Xing (1994),	86
2.1.4	Proposta de Camapum de Carvalho e Leroueil (2000,2004).....	88
2.2	Envoltória de Resistência ao Cisalhamento	98
2.2.1	Escario (1988)	99
2.2.2	de Campos e Carrillo (1995)	100
2.2.3	Öberg e Sällfors (1995, 1997)	101
2.2.4	Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996)	102
2.2.5	Vilar e colaboradores.....	107
2.2.6	Khallili e Khabbaz (1998).....	112
2.2.7	Bao et al (1998).....	114
2.2.8	Futai e colaboradores.....	115
2.2.9	Comparação entre Alguns Métodos	116
3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS SOBRE O COMPORTAMENTO DE SOLOS RESIDUAIS NÃO SATURADOS BRASILEIROS	120
3.1	Bahia – Salvador – Região Metropolitana (Machado e Lima Jr, 2001; Machado e Dourado, 2001)	120
3.2	Bahia - Salvador – Encosta do Alto do Bom Viver (Jesus, 2008)	122
3.3	Minas Gerais – Juiz de Fora - Chapéu D’Uvas (de Campos et al, 1992)	124
3.4	Minas Gerais - Viçosa (Reis, 2004)	125
3.5	Rio Grande do Sul - Alvorada (Bastos, 1999 e Bastos et al, 2001)	127
3.6	Rio Grande do Sul - Porto Alegre - Escudo Sul-Riograndense (Oliveira et al, 2001)	132
3.7	Rio de Janeiro - Lagoa e Joatinga (de Campos et al, 1992)	133
3.7.1	Lagoa.....	134
3.7.2	Joatinga.....	134
3.8	Rio de Janeiro - Vista Chinesa (Delgado, 1993)	135
3.9	São Paulo - São Carlos - Campo Experimental da USP (Machado e Vilar, 1998; Vieira e Marinho, 2001.....	139
3.10	São Paulo - São Carlos - Rodovia Engenheiro Thales de L. Peixoto - SP (Calle, 2000).....	143

4	MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DE SOLOS NÃO SATURADOS	150
4.1	Introdução	150
4.2	Ferramentas Numéricas.....	150
4.2.1	Matlab 7.0.....	150
4.2.2	Evolver 5.5.....	153
4.3	Critério de Erro e Qualidade do Ajuste	155
4.4	Análise Preliminar – Curva Característica	157
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MODELAGEM	163
5.1	Modelagem Numérica aplicada à Curva Característica	163
5.1.1	Comparação entre os Modelos de Gardner, van Genuchten e Fredlund e Xing	163
5.1.2	Transformação da Curva Característica.....	174
5.2	Modelagem Numérica aplicada à Resistência	174
5.2.1	Modelo de Öberg e Sällfors (1995, 1997)	176
5.2.2	Modelo de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996)	178
5.2.3	Vilar e Colaboradores.....	181
5.2.4	Futai e Colaboradores	182
5.2.1	Comparação entre os Modelos Analisados.....	185
5.2.2	Relação ϕ^b/ϕ'	185
5.2.3	Análise Global – Previsão da Resistência.....	187
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	190
6.1	Introdução	190
6.2	Conclusões	191
6.2.1	Quanto ao Estudo da Convergência dos Métodos e Ferramentas	191
6.2.2	Quanto aos Modelos Aplicados.....	191
6.2.3	Quanto ao Número de Amostras.....	192
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	193
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	194
	APÊNDICE A – ESTRUTURA DO ARQUIVO TEXTO – GARDNER	207
	APÊNDICE B – ESTRUTURA DO ARQUIVO TEXTO – VAN GENUCHTEN.....	209

APÊNDICE C – ESTRUTURA DO ARQUIVO TEXTO – FREDLUND E XING	211
APÊNDICE D – RESULTADOS DA MODELAGEM DA CURVA CARACTÉRISTICA	213
APÊNDICE E – RESULTADOS DA TRANSFORMAÇÃO DA CURVA CARACTÉRISTICA.	221
APÊNDICE F – RESULTADOS DA MODELAGEM DA CONTRIBUIÇÃO DA SUÇÃO NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	228
APÊNDICE G – RESULTADOS DA RELAÇÃO ϕ^B/ϕ'	239
ANEXO A – FUNÇÃO LSQNONLIN.....	242

INTRODUÇÃO

Generalidades

Alguns problemas de engenharia geotécnica e ambiental estão associados a problemas de fluxo saturado e não saturado. O conhecimento do padrão de fluxo em solos é uma informação fundamental, que muitas vezes determina a escolha da solução de um projeto geotécnico.

Fatores externos, por exemplo, como a chuva, podem ocasionar variações no teor de umidade volumétrico (θ) do solo, afetando diretamente a permeabilidade não saturada e a carga de pressão. Assim sendo o conhecimento da relação entre o teor de umidade e sucção (curva característica ou de retenção) é fundamental em projetos que tratem do comportamento de solos não saturados.

A curva característica é uma propriedade essencial para o estudo de fluxo em solos não saturados, a partir da qual se pode obter valores da condutividade hidráulica não saturada e a resistência ao cisalhamento não saturada. O conhecimento destas relações é fundamental para que o engenheiro geotécnico possa prever e analisar diversos problemas envolvendo solos em condição não saturada.

A determinação experimental dos parâmetros dos solos não saturados é cara, morosa, exige equipamentos especiais, técnicos experientes e por esses motivos são poucos utilizados na prática da engenharia. Algumas equações matemáticas foram propostas para reproduzir as relações entre parâmetros hidráulicos, e, ainda, para estimativa da parcela da resistência devido a sucção. Estes modelos são definidos de forma empírica e/ou semi-empírica, baseado em curvas de regressão de resultados experimentais.

Objetivos e Metodologia

Gerscovich (2001) e Gerscovich e Sayão (2002) analisaram a aplicabilidade de algumas proposições matemáticas a solos brasileiros. Gerscovich e Guedes (2004) e Gerscovich et al (2004) avaliaram a utilização de ferramentas numéricas de otimização para o ajustes de tais proposições de acordo com os autores, a utilização

de uma ferramenta numérica facilita a determinação dos parâmetros, não requer um grande esforço computacional e apresenta resultados adequados.

Este trabalho tem por objetivo discutir a aplicabilidade de três equações para previsão da curva característica (Gardner, 1958; van Genuchten, 1980; e Fredlund e Xing, 1994) de solos residuais brasileiros. Os parâmetros dos modelos foram determinados por ajuste de curva, utilizando duas ferramentas numéricas que adotam o algoritmo de Levenberg-Marquardt e algoritmo genético (AG) em suas soluções. A relação entre a sucção matricial e resistência ao cisalhamento foi avaliada através de ajuste de curva utilizando as equações propostas por Öberg e Sällfors (1995,1997), Vanapalli et al (1996), Vilar (2007) e Futai (2002).

Estrutura da Dissertação

Nos capítulos 1 e 2 serão apresentados conceitos importantes para o desenvolvimento e entendimento dessa dissertação. No capítulo 1, serão apresentados conceitos da mecânica dos solos não saturados contemplando, principalmente, os estudos de fluxo de água e de resistência ao cisalhamento. Este capítulo apresenta, ainda, os conceitos de estimativa de parâmetros, métodos de otimização para modelagem de problemas inversos e análise de resíduos.

No capítulo 2, apresentam-se os modelos aplicados para a determinação de parâmetros de solos não saturados, com ênfase aos modelos aplicados à curva característica e a resistência ao cisalhamento.

O Capítulo 3 apresenta o banco de dados relativo a ensaios realizados em solos residuais brasileiros, não saturados, reportados na literatura. A partir deste banco de dados foi realizado o estudo dos parâmetros.

O Capítulo 4 descreve a modelagem aplicada ao estudo, as ferramentas numéricas adotadas e o critério de erro tomado como parâmetro de qualificação dos modelos estudados.

No Capítulo 5, os resultados previstos pela modelagem são apresentados e discutidos, considerando as particularidades de cada modelo e dos dados utilizados. Pretende-se por meio dos resultados obtidos relacioná-los os parâmetros dos solos.

Finalizando, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões globais obtidas a partir das análises realizadas, avaliando os resultados alcançados em função dos objetivos programados e propondo sugestões para pesquisas futuras.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos solos não saturados, parte dos espaços vazios é ocupado por água e parte por ar. De acordo com Fredlund (2002), o solo não saturado pode ser definido como o solo onde a pressão de água é negativa em relação à pressão do ar.

O solo não saturado é constituído por quatro fases (Fredlund e Morgenstern, 1977): duas fases fluidas compostas por água (fase líquida) e ar (fase gasosa), uma fase sólida formada pelos grãos do solo e uma fase constituída por uma membrana contrátil de comportamento sólido. O ar ocupa parte dos vazios do solo deixados pela água podendo, também, nela estar dissolvido. A Figura 1.1 apresenta uma idealização de um elemento de solo não saturado.

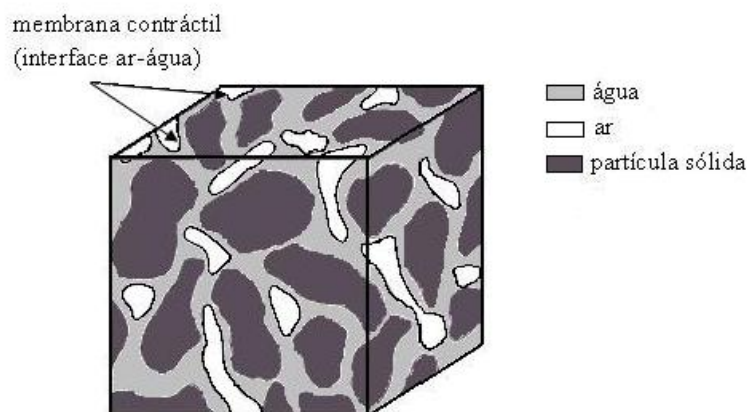


Figura 1.1 – Elemento de Solo Não Saturado (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993).

A membrana contrátil possui uma propriedade chamada tensão superficial, que tem a capacidade de exercer uma tensão de tração, causada por forças intermoleculares que atuam dentro dessa membrana contrátil. Essa tensão superficial faz com que a membrana contrátil se comporte como uma membrana elástica. Quando a fase de ar é contínua, a membrana contrátil interage com as partículas de solo, influenciando no comportamento mecânico do solo.

Pode-se então, considerar o solo não saturado como uma mistura de duas fases que fluem (ar e água) e duas que entram em equilíbrio sob aplicação de gradientes de tensão (partículas sólidas e membrana contrátil).

1.1 Origem dos Solos Não Saturados

Dentre os materiais que são abrangidos pela teoria da mecânica dos solos não saturados, incluem-se os solos residuais, alguns solos sedimentares, solos compactados, solos colapsíveis e solos expansivos (Vivian, 2008).

A formação dos solos não saturados é influenciada principalmente pelo clima. A água presente no solo é extraída por evaporação ou pela evapotranspiração da cobertura vegetal. Qualquer solo próximo à superfície está sujeito a um ambiente seco, sujeito à dessaturação, e, conseqüentemente, ao desenvolvimento de pressão negativa de água (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Os solos residuais têm sua transformação em solo não saturado associada às características mineralógicas da rocha matriz e ao tipo de intemperismo sofrido. Já nos solos sedimentares, a evaporação da água de um lago e a posterior secagem do solo ali depositado, faz com que o nível de água fique abaixo da superfície. Desta forma, a poro-pressão de água tem seu valor reduzido, tornando-se negativa em relação à pressão atmosférica sobre o nível de água. Porém, a tensão total nos sedimentos de solos permanece constante. Isto aumenta a consolidação dos sedimentos e eventualmente a sua dessaturação.

Os solos compactados são solos naturais em que suas condições iniciais são modificadas para melhorar o comportamento mecânico. Os processos de escavação, de remoldagem e de recompactação desses solos podem resultar em um material não saturado.

De acordo com Fredlund (1979), a poropressão atua em todas as direções e pode gerar um valor de pressão negativa maior que a pressão de confinamento na massa de solo. Com o tempo, o solo é sujeito à variações e mudanças ambientais, que produzem alterações nos valores de poro-pressão resultando em processos de colapso ou de expansão no solo. As formas de distribuição de poro-pressão acabam sendo resultados destas variações ambientais.

Os solos colapsíveis e expansivos podem ocorrer tanto em solos naturais como em solos compactados. E tem sua origem a partir de fenômenos complexos ligados a variação de energia atuante internamente ou aplicada externamente ao solo (Camapum de Carvalho, 2007).

A natureza expansiva do solo é mais bem observada nas camadas superficiais, que estão mais sujeitas às variações sazonais. Tais variações provocam, de forma reversível, a mudança de volume do mesmo (expansão e

contração) Já os solos colapsíveis têm comportamento oposto aos solos expansivos, havendo decréscimo de volume predominantemente de forma irreversível quando submetidos a um gradiente de tensão ou a trajetória de umedecimento (Santos, 2005).

1.2 Problemas Associados a Solos Não Saturados

Além dos problemas envolvendo a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade, que são comuns nos solos saturados, os solos não saturados sofrem variações no seu comportamento em virtude de alterações nos valores negativos de poro-pressão. A infiltração de águas de chuva pode causar rupturas de taludes, redução da capacidade de carga e empolamento, devido à expansão de argilas secas, e recalques, devidos ao colapso com umedecimento em solos sob cargas.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), uma condição comum a todos os problemas envolvendo solos não saturados é a existência da poropressão negativa. Muitas situações na engenharia civil envolvem essa condição; a saber:

- Construção e operação de barragens,
- Taludes naturais sujeitos à variações do meio ambiente,
- Estabilidade de escavações,
- Empuxos laterais de solos,
- Capacidade de carga de fundações superficiais,
- Solos próximos de lagos de retenção de efluentes de indústrias e mineração,
- Movimentos de solo envolvendo solos expansivos e solos colapsíveis.

Grande parte dos problemas de mecânica dos solos não saturados pode ser resolvida a partir do conhecimento e estudo de três propriedades: o coeficiente de condutividade hidráulica, os parâmetros de resistência ao cisalhamento e a variação volumétrica (Fredlund e Rahardjo, 1993).

1.3 Conceito de Energia na Água

A água apresenta uma quantidade de energia, que pode ser subdividida em duas parcelas: cinética e potencial. Em solos, energia cinética é considerada desprezível, uma vez que, o movimento da água no solo é muito lento e seu valor é proporcional ao quadrado da velocidade de percolação. Já a energia potencial é definida como a quantidade de trabalho que deve ser realizado para transportar, reversa e isotropicamente, uma quantidade infinitesimal de água de um reservatório de água pura, a uma elevação específica, até a água do solo, estando o reservatório submetido a uma pressão atmosférica.

A energia potencial ou carga total (energia/massa) tem, portanto, importância primordial na determinação da movimentação da água dentro do solo. Uma vez que há perda de energia face às iterações entre as moléculas de água e as partículas de solo, o fluxo se dá sempre na direção da região de maior para a de menor energia potencial. Este conceito é aplicável tanto para o solo em condições saturadas como em condições não saturadas. Nos solos não saturados, a carga de pressão é altamente dependente do grau de saturação e do tipo de solo.

Aitchison et al (1965) apresenta o potencial total como uma composição de parcelas de potenciais menores, conforme a equação:

$$\phi_t = \phi_a + \phi_p + \phi_g + \phi_m + \phi_o \quad (1.1)$$

onde:

ϕ_a = potencial pneumático, que corresponde a pressão na fase gasosa;

ϕ_p = potencial de consolidação, que corresponde à parcela de sobrecarga aplicada ao ponto que é transmitida a pressão da água;

ϕ_g = potencial gravitacional, determinado pela elevação do ponto considerado em relação ao nível de referência;

ϕ_m = potencial mátrico, resultante de forças capilares e de adsorção;

ϕ_o = potencial osmótico ou de soluto, correspondente à pressão osmótica da água do solo.

Considerando que o ar existente nos poros do solo esteja interligado com a atmosfera e que não ocorra nenhum processo de adensamento, as parcelas

correspondentes ao potencial pneumático e potencial de consolidação podem ser consideradas nulas. Desprezando também o potencial gravitacional, a equação (1.1) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\phi_t = \phi_m + \phi_o \quad (1.2)$$

O termo potencial é uma definição de energia que pode ser convertido ao conceito equivalente de pressão de água negativa ou sucção (de Campos et al,1992). Portanto, os potenciais osmótico e mátrico podem ser tratados pelas suas pressões correspondentes que são, a sucção osmótica e a sucção mátrica. Desta forma, a sucção total é então a soma das parcelas osmótica e mátrica.

$$\psi_t = \psi_m + \psi_o \quad (1.3)$$

onde:

ψ_t = sucção total;

ψ_m = sucção mátrica;

ψ_o = sucção osmótica.

1.3.1 Sucção Osmótica

Os poros de água contém substâncias dissolvidas que causam uma redução na energia quando comparado com o correspondente energia de água pura. Esta diferença é designada sucção osmótica.

A sucção osmótica é relacionada à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre e é associada à ocorrência de diferenças de concentração de solutos no solo. A sucção osmótica se faz presente tanto nos solos saturados como nos não saturados

Ensaio de laboratório realizados por Krahn e Fredlund (1972) demonstraram que sucção osmótica não é sensível às mudanças na umidade do solo, conseqüentemente, qualquer variação no teor de umidade afeta apenas sucção mátrica. Como a maioria dos problemas de engenharia civil provoca variação do teor de água, as alterações em relação ao total de sucção são principalmente causadas por alterações de sucção matricial.

Vários autores (Fredlund, 1979; Edil et al, 1981; Alonso et al, 1987 Marinho,1997) confirmam o fato de que as variações na sucção osmótica são geralmente menos significativas do que as da sucção mátrica. Assim sendo, a parcela osmótica não contribui, significativamente, para o comportamento dos solos não saturados. No caso de solos tropicais brasileiros, de Campos (1984) acrescenta que por apresentarem pouca ou nenhuma salinidade, a parcela da sucção osmótica é desprezível.

1.3.2 Sucção Mátrica

A sucção mátrica corresponde à pressão negativa da água em meios não saturados e tem grande importância na compreensão do comportamento mecânico destes materiais.

O perfil de sucção mátrica é variável com o tempo. A variação das condições do subsolo é afetada por mudanças ambientais (estações chuvosas e secas). Em períodos chuvosos, ocorre uma redução no valor da sucção mátrica, já em períodos de seca, ocorre um aumento nesse valor. A vegetação, também, tem influência no perfil de sucção mátrica do solo através de processos de evapotranspiração. Assim sendo, a habilidade do solo de variar seu valor de sucção mátrica, devido a mudanças ambientais, pode ser indicada pela condutividade hidráulica do perfil do solo.

A sucção ocorre, basicamente, devido às forças capilares e as forças de adsorção que atraem as partículas, resultando numa pressão abaixo da atmosférica (Figura 1.2).

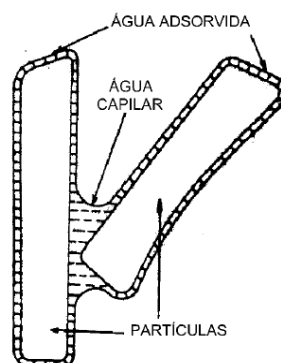


Figura 1.2 – Água Capilar e de Adsorção (Hillel, 1971 apud Gerscovich, 1994)

As forças capilares aparecem como resultado de um desbalanceamento de forças de atração das moléculas de água presentes na interface líquido-gás. Na superfície do líquido (Figura 1.3 (a)), as forças em direção à fase gasosa são menores do que as ocorrem em direção à fase líquida, contudo, no interior do líquido as forças de atração são isotrópicas, causando uma contração da superfície do líquido.

Quando existe uma diferença de pressão entre as 2 fases, a interface líquido-gás se torna curva, com concavidade voltada para a fase de menor pressão. Se, por exemplo, um tubo capilar for inserido numa superfície líquida forma-se um menisco (Figura 1.3 (b)), cujo raio de curvatura é inversamente proporcional ao diâmetro do tubo. A concavidade do menisco em direção ao fluido indica que pressão no interior do tubo é inferior à pressão atmosférica. No caso de tubos cilíndricos o menisco assume uma forma esférica, segundo as relações geométricas apresentadas na Figura 1.3. Como a pressão atmosférica é considerada referência (nula), na região de ascensão capilar a pressão na água (ou sucção) é negativa.

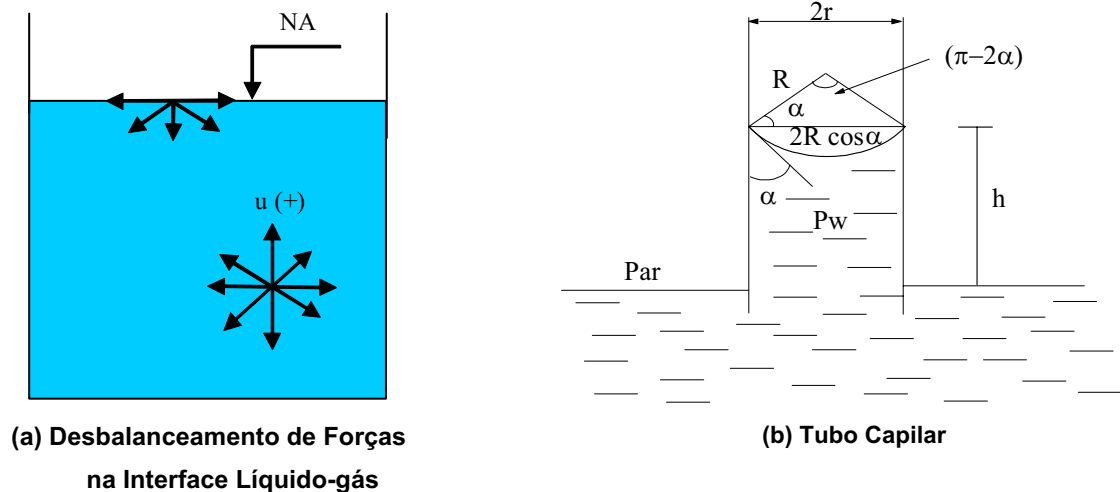


Figura 1.3 – Ascensão Capilar

A adsorção é um fenômeno resultante da ação de forças elétricas de atração e repulsão entre partículas do solo. Nos solos argilosos, a adsorção acarreta a formação de uma dupla camada, com propriedades de resistência e viscosidade diferentes da água pura, nas mesmas condições de temperatura e pressão. A água presente na camada dupla é responsável pelos elevados teor de umidade em solos argilosos, mesmo para altos valores de sucção (Gerscovich, 1994).

1.4 Fluxo em Meios Não Saturados

A equação de fluxo em meios não saturados origina-se da lei de Continuidade, em que:

$$\left\{ \frac{\delta}{\delta x}(\rho v_x) + \frac{\delta}{\delta y}(\rho v_y) + \frac{\delta}{\delta z}(\rho v_z) \right\} = \frac{\delta(nS\rho)}{\delta t} \quad (1.4)$$

onde,

v_x , v_y e v_z são as velocidades na direção de x, y e z respectivamente,

ρ é a massa específica,

n é a porosidade,

S grau de saturação

t o tempo.

Considerando-se os parâmetros ρ e n constantes, a equação da Continuidade pode ser escrita como:

$$\left\{ \frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} + \frac{\delta v_z}{\delta z} \right\} = \frac{\delta(nS)}{\delta t} \quad (1.5)$$

A hipótese de porosidade constante é questionável, não sendo realístico dizer que o esqueleto sólido não se deforma e permanece rígido quando submetido a um processo de fluxo, já que ocorrem variações na magnitude das tensões transmitidas aos sólidos. Esta hipótese é particularmente inadequada em solos colapsíveis e expansivos ou mesmos em situações de fluxo transiente.

Definindo o produto da porosidade com o grau de saturação como teor de umidade volumétrico (θ); isto é:

$$nS = \frac{V_v}{V} \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V} = \theta \quad (1.6)$$

A equação da continuidade pode então ser escrita da seguinte forma:

$$\left\{ \frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} + \frac{\delta v_z}{\delta z} \right\} = \frac{\delta(\theta)}{\delta t} \quad (1.7)$$

Dado que a variação de umidade interfere diretamente na sucção, a variação de umidade volumétrica em relação ao tempo pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1.8)$$

onde:

ψ é a carga de pressão

$C(\psi)$ é a tangente a curva umidade volumétrica (θ) vs carga de pressão (ψ), usualmente denominada de Curva Característica de Sucção do Solo ou Curva de Retenção do Solo.

Considerando-se que a lei de Darcy é válida para solos não saturados, e que, neste caso, a permeabilidade não é mais constante, mas função da sucção, tem-se os vetores de velocidade definidos como:

$$\begin{aligned} v_x &= -k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} \\ v_y &= -k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \\ v_z &= -k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.9)$$

As derivadas parciais da velocidade, nas direções $i = x$ e $i = z$, podem ser explicitadas pela equação (1.10), uma vez que a carga de elevação só varia na direção vertical (y); isto é, a parcela relativa à carga de elevação é nula. Com isso:

$$\frac{\partial v_i}{\partial i} = -\frac{\partial}{\partial i} \left[k_i(\psi) \frac{\partial h}{\partial i} \right] = -\frac{\partial}{\partial i} \left[k_i(\psi) \frac{\partial h_e + \psi}{\partial i} \right] = -\frac{\partial}{\partial i} \left[k_i(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial i} \right] \quad (1.10)$$

No caso da direção y , a derivada da velocidade é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_y}{\partial y} &= -\frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] = -\frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \frac{\partial h_e + \psi}{\partial y} \right] = -\frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \left(1 + \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] = \\ &= -\left\{ \frac{\partial k(\psi)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right] \right\} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Combinando-se as equações (1.8), (1.10) e (1.11) com a equação (1.7), obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial k(\psi)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1.12)$$

Considerando-se ainda que o solo seja isotrópico em relação à permeabilidade ($k_x = k_y = k_z = K$), ou seja, que esta seja a mesma em todas as direções, a equação (1.12) toma a forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} + 1 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \quad (1.13)$$

A equação (1.13) é conhecida como a equação de Richards e define a equação de fluxo em meios não saturados, sua solução fornece a variação da carga de pressão ao longo do tempo. Para resolvê-la, precisam-se conhecer as funções não lineares $C(\psi)$ e $K(\psi)$, que são definidas a partir das relações sucção x umidade volumétrica do solo (Curva Característica de Sucção) e condutividade hidráulica x sucção, respectivamente.

De acordo com Vargas et al (1992), a solução da equação requer o uso de métodos numéricos como os de elementos finitos (Neuman, 1973; Huyokorn et al, 1984) ou das diferenças finitas (Remson et al, 1971; Anderson, 1984). Soluções aproximadas para os problemas em condição unidimensionais são apresentadas por Vargas et al (1992).

1.4.1 Curva Característica de Sucção do Solo

Define-se como curva característica de sucção do solo ou, simplesmente, curva característica a relação entre a água presente nos poros e a sucção de um solo. Este volume de água pode ser quantificado em termos de teor de umidade em peso (ω) ou volumétrico (θ) ou em termos do grau de saturação (S). Já a sucção é estabelecida pela diferença entre as pressões na água e no ar contido nos vazios ($\psi = u_a - u_w$). Segundo Gerscovich (2001), a forma mais adotada para se representar a curva característica é aquela que relaciona o teor de umidade volumétrico e a sucção mátrica. No entanto, há autores (de Campos et al, 1992) que recomendam a adoção do teor de umidade em peso, para estudos de estabilidade, e o emprego da umidade volumétrica para estudos envolvendo deformação. As relações entre o teor de umidade volumétrico e os demais índices físicos podem ser escritas como:

$$\theta = \frac{Se}{1+e} = Sn \quad (1.14)$$

$$\theta = \omega \rho_s \quad (1.15)$$

onde:

e = índice de vazios;

n = porosidade;

ρ_s = peso específico seco

Alguns solos sofrem significativas variações volumétricas, como resultado de mudanças na sucção. Fredlund e Rahardjo (1933) recomendaram, nestes casos, que as relações massa-volume fossem definidas como:

$$\Delta e = \frac{G\Delta w - e_i \Delta S}{S_f} \quad (1.16)$$

onde:

G = densidade dos grãos;

e_i = índice de vazios inicial;

S_f = grau de saturação final.

Em geral a curva característica apresenta uma forma de S e sua caracterização pode ser feita a partir de quatro parâmetros: teor de umidade volumétrico residual (θ_r), teor de umidade volumétrico saturado (θ_s); sucção de entrada de ar (ψ_b) e capacidade de retenção específica ($\Delta\psi / \Delta\theta$). A forma da curva característica depende da mineralogia do solo, granulometria e arranjo estrutural, os quais são intrinsecamente relacionados com a distribuição de tamanho dos poros. Solos arenosos mostram uma acentuada perda de umidade para valores relativamente baixos de sucção do solo. Solos argilosos geralmente demonstram um comportamento mais suave. Solos siltosos apresentam um comportamento intermediário. Curvas típicas para um solo arenoso e para um solo argiloso estão mostradas na Figura 1.4.

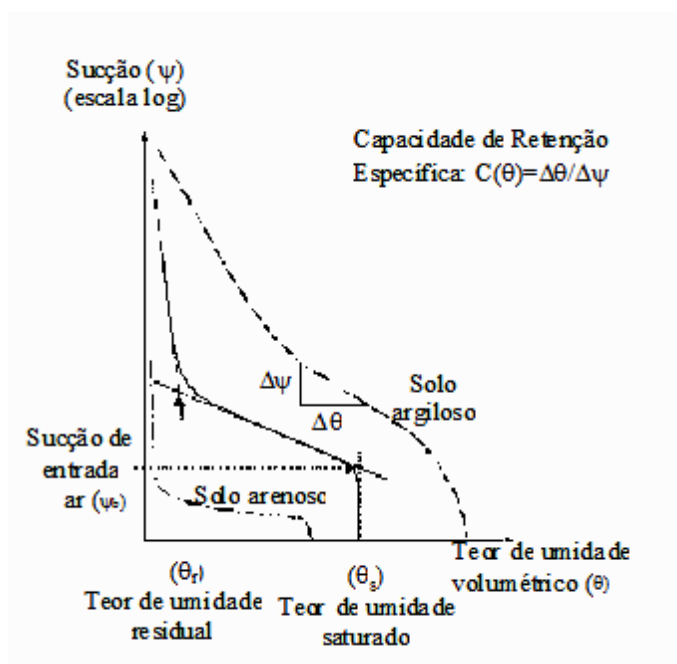


Figura 1.4 – Curvas Características Típicas (Gerscovich, 2001).

A pressão nos poros de um solo saturado, em equilíbrio, é sempre maior ou igual à atmosférica. Se uma pequena sucção é aplicada, a pressão no interior dos poros passará a ser um pouco abaixo da atmosférica. O fluxo de água começará a ocorrer quando o valor da sucção aplicada exceder um valor de sucção crítica (valor no qual o mecanismo de água na superfície do solo rompe, permitindo a entrada de ar). Esta sucção crítica é denominada de sucção de entrada de ar (ψ_b). Apesar de ser numericamente pequena, a sucção de entrada de ar é facilmente detectável em solos grossos e em solos bem graduados. Com um aumento gradual da sucção,

vazios de diâmetro menores vão se esvaziando, até que para altos valores de sucção, somente os vazios muito pequenos ainda retêm água (Gerscovich, 1994).

A Figura 1.5 mostra a curva característica definida em termos do grau de saturação. De acordo com Vanapalli et al (1996), é possível subdividi-la em 3 diferentes estágios: região limite, zonas de transição primária e secundária e zona residual, considerando um processo de dessaturação. Na região inicial os poros estão saturados e interconectados. Na zona de transição o solo inicia o processo de dessaturação e o grau de saturação reduz significativamente até atingir uma condição em que não mais ocorre a ligação entre os canais preenchidos por água. Após este estágio, aumentos no valor da sucção não mais promovem redução significativa na quantidade de água presente no solo. A Figura 1.6 ilustra a variação na presença de água nos diferentes estágios de dessaturação do solo não saturado.

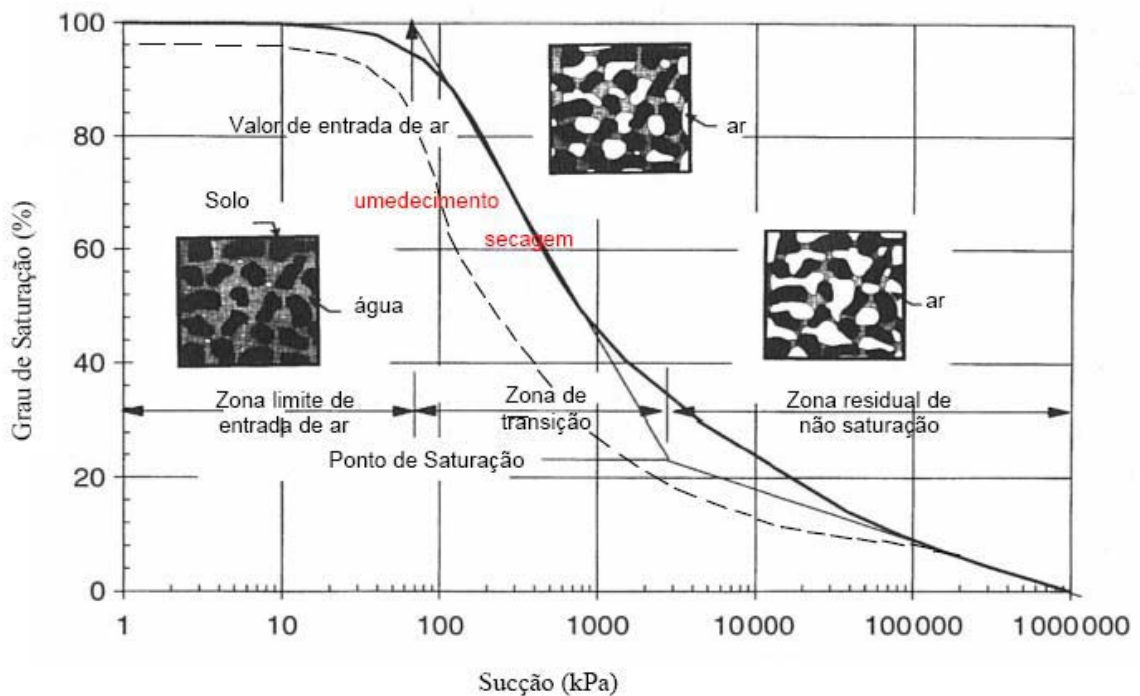


Figura 1.5 – Curva Característica ($S \times \psi$) e Estágios (Vanapalli et al, 1996)

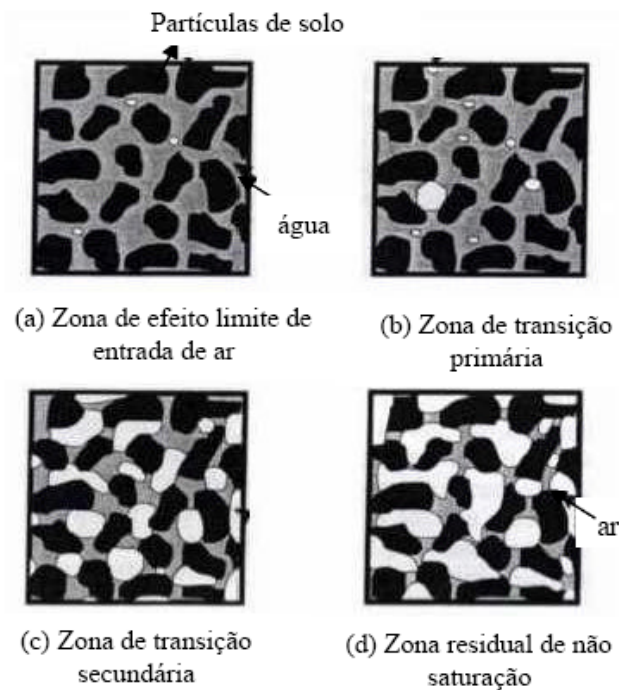


Figura 1.6 – Variação da Área de Água (Vanapalli et al, 1996)

Em areias e siltes a sucção residual é facilmente identificável e pode ser atingida para valores inferiores a 200 kPa. Já em argilas, este ponto já não é tão bem observado. Argilas com baixa plasticidade, podem apresentar uma sucção residual (ψ_r) entre 500 a 1500 kPa. No caso de argilas muito plásticas ψ_r pode ser superior a 1500 kPa

Marinho (2005) apud Moncada (2008) apresenta diferentes formas para as curvas características, considerando a distribuição de poros do material, como mostra a Figura 1.7. Solos com distribuição uniforme de poros são representados pelas curvas (a) e (b). A curva (b) coincide com a (a) no trecho inicial de baixos valores de sucção ($\psi < 10$ kPa) e umidade (ω) superior a 5%. A partir deste ponto há uma redução abrupta do teor de umidade para um ligeiro aumento de sucção: a curva (a) indica $\omega = 0$ para valores de $\psi > 10$ kPa; já a curva (b) mostra declínio de ω com o aumento de ψ . De acordo com o autor, a curva (b) representa uma situação mais real, uma vez que, mesmo com uma distribuição uniforme de poros, uma certa quantidade de água permanece presente devido a fenômenos de superfície. A curva (c) representa um material com dois tamanhos de poros preferenciais e a curva (d) um material com distribuição de poros bem graduada. Em muitos casos, os solos

residuais jovens apresentam uma curva com degraus, como a curva (c). Já os solos argilosos apresentam uma forma de curva similar à curva (d).

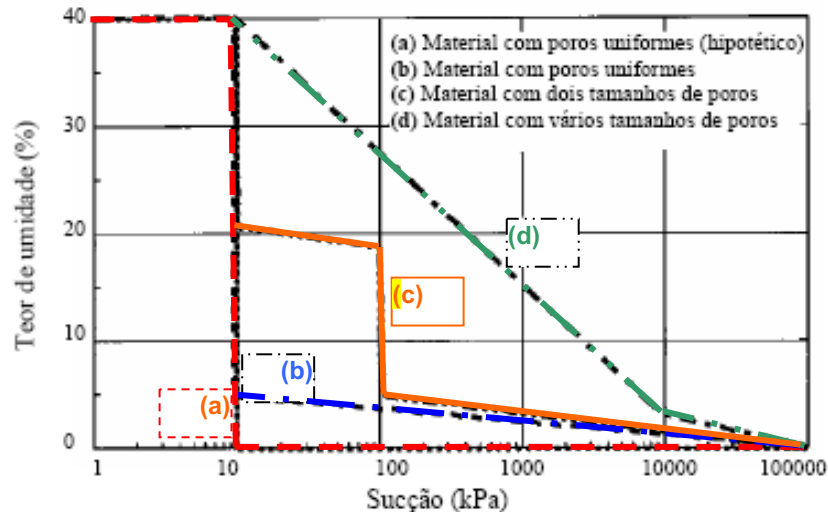


Figura 1.7 – Forma Geral da Curva Característica de Sucção de acordo com a Distribuição de Poros (Marinho, 2005 apud Feuerharmel, 2007)

Para obtenção da curva característica completa de um solo é necessário utilizar mais de uma técnica, já que nenhuma consegue cobrir toda a faixa de variação de sucção satisfatoriamente. Marinho (1997) e Oliveira e Marinho (2004) recomendam a seguinte metodologia para a escolha dos métodos: para baixos valores de sucção (até 30 kPa), os autores recomendam o uso da placa de sucção; de 30 até 300 kPa sugerem a placa de pressão (ou um transdutor de alta capacidade de sucção). Adicionalmente, ainda segundo os autores, para altos valores de sucção, o método de papel filtro ou o uso de transdutores de alta capacidade têm-se mostrados adequados.

1.4.1.1 Fatores que Afetam a Forma da Curva Característica

Dois fatores são importantes na forma da curva característica: a distribuição de poros e a compressibilidade do solo em relação à sucção. Estas características do solo são afetadas pela estrutura, mineralogia, história de tensões, índice de vazios, história de umedecimento e secagem e teor de umidade inicial (Tinjum et al, 1997; Vanapalli et al, 1999; Gerscovich, 2001).

- Tipo de Solo

Pedregulhos e areias perdem grande parte da sua água com um pequeno acréscimo de sucção, enquanto que a argila tende a perder muito menos água com o acréscimo de sucção. Isto ocorre porque areias e pedregulhos apresentam poros maiores, sendo assim quase que não existe força capilar. As argilas têm poros menores e uma área superficial maior para que a água se prenda ao solo e resista a drenagem gravitacional. As ligações eletrostáticas que podem se desenvolver entre as moléculas de água e a superfície dos argilos-minerais são também responsáveis pela alta retenção de umidade nas argilas e solos finos. De acordo com Vanapalli et al (1999), o teor de umidade inicial e a história de tensões são os fatores que mais influenciam a curva característica de um solo de granulometria fina. Devido às diferenças na distribuição dos tamanhos dos poros e da mineralogia, existe uma curva característica para cada solo (Figura 1.4).

Aubertin et al (1998) apud Feuerharmel (2003) apresentaram faixas de variação do valor de entrada de ar (ψ_b) de acordo com o tipo de solo. Esses valores são apresentados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Faixa de Variação da Sucção de Entrada de Ar (ψ_b)

Tipo de Solo	Sucção de Entrada de Ar (kPa)
Areia Grossa	0,2 – 1,0
Areia Média	1,0 – 3,5
Areia Fina	3,5 – 7,5
Silte	7,5 – 25
Argila	> 25

De acordo com Côté et al (2002) apud Feuerharmel (2003), o teor de finos e a porosidade influenciam o valor de entrada de ar. Segundo os autores, se a quantidade de finos for pequena, o valor de entrada de ar será baixo. Por outro lado, o valor de entrada de ar aumenta quando o teor de finos ultrapassa um valor crítico requerido para preencher os vazios entre as partículas maiores. O estudo também indicou que a inclinação da curva característica decresce com o aumento da superfície específica da fração fina.

- Arranjo Estrutural

Dependendo do tipo e disposição da estrutura do solo, a curva característica pode apresentar diferentes formas:

a) Curva unimodal ou curva em formato “S”, a qual constitui o formato mais comum, amplamente estudado pela Mecânica dos Solos Não-Saturados;

b) Curvas bimodais ou curvas em formato de “sela”, observadas em alguns tipos de solos, em especial os provenientes de regiões tropicais e subtropicais. Este comportamento foi observado em alguns solos coluvionares, de acordo com o estudo de Feuerharmel et al (2006), apresentado na Figura 1.8.

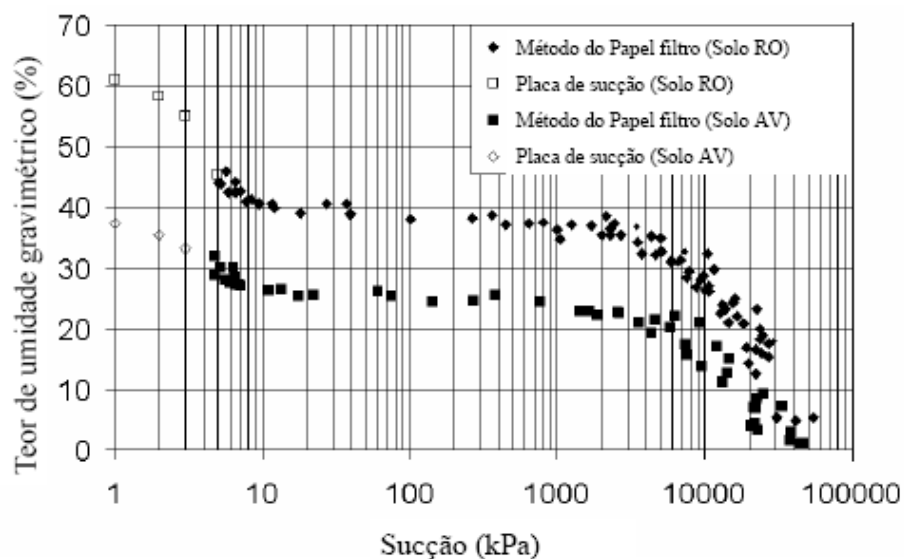


Figura 1.8 – Curva Característica Bimodal de dois Solos Coluvionares (Feuerharmel et al, 2006)

Em solos tropicais, o intemperismo e a acidez são responsáveis pela formação de agregações de partículas cimentadas ou não, por óxidos e/ou hidróxidos de alumínio e/ou ferro. Com isso surgem dois níveis de estrutura: macro e micro (Figura 1.9). A microestrutura é descrita como uma associação elementar de partículas dentro do solo, caracterizando a estrutura interior dos agregados. Já o arranjo dos agregados é referido como macroestrutura (Mitchell, 1976). Os microporos podem se encontrar interconectados e se ligando aos macroporos ou totalmente isolados (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004).

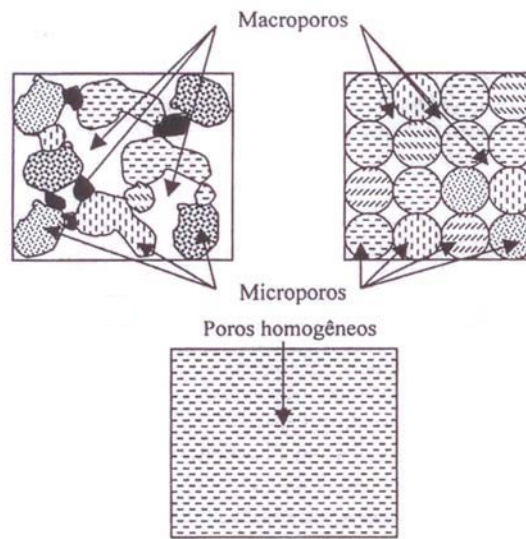


Figura 1.9 – Distribuição de Poros (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004)

A curva bimodal é constituída basicamente pela dessaturação dos macroporos, de uma fase intermediária, onde o aumento da sucção não provoca uma variação significativa no teor de umidade e pela dessaturação dos microporos (Figura 1.10).

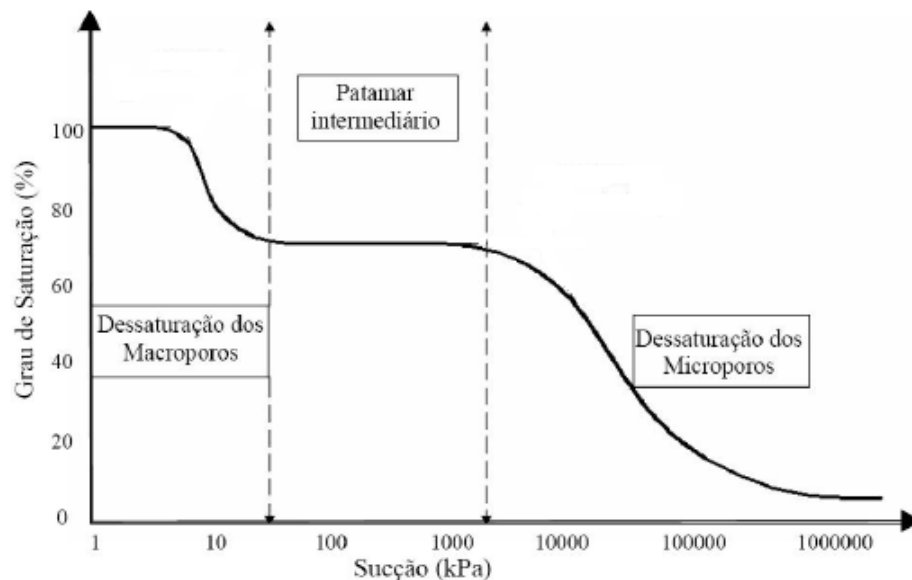


Figura 1.10 – Trechos da Curva Característica Bimodal (Feuerharmel et al, 2005)

Solos com distribuição de poros bem graduada apresentam uma curva característica similar à curva I da Figura 1.11. A curva II caracteriza solos com distribuição de poros mal graduada, com forma bimodal, influenciada pela diferença existente entre o tamanho dos microporos e macroporos. A curva III representa

materiais que apresentam fluência com o aumento da sucção, como é o caso de solos estabilizados com betume (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004)

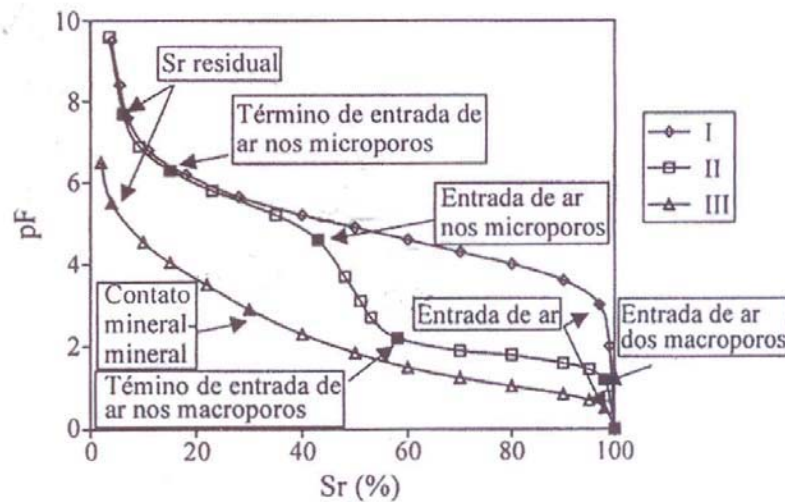


Figura 1.11 – Formas Típicas Geral da Curva Característica de Solos Tropicais (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004)

- Teor de Umidade Inicial

O teor de umidade inicial influencia a forma da curva característica, pois afeta a estrutura dos poros do solo. Alguns estudos (Vanapalli et al, 1999 e Tinjum et al, 1997) com amostras de solos compactadas em umidades iniciais variadas mostraram que as amostras do ramo úmido são mais homogêneas, isentas do macroporos e apresentam maior capacidade de armazenar água, logo o valor de entrada de ar é maior (Feuerhamel, 2003).

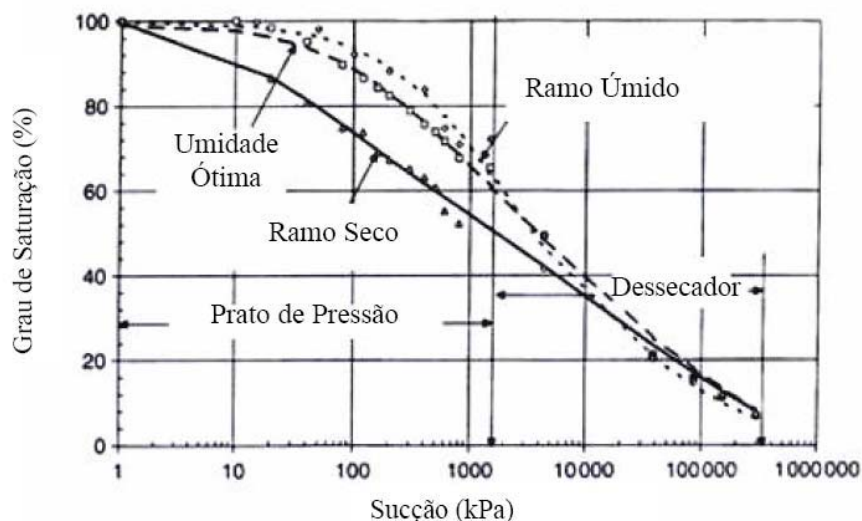


Figura 1.12 – Curvas Características de Amostras Compactadas em Diferentes Umidades Iniciais (Vanapalli, 1999)

- História de Tensões

O adensamento não afeta a estrutura dos poros para altas sucções, porém, para baixos valores de sucção, a curva característica é diretamente influenciada pela tensão de pré-adensamento, conforme Figura 1.13. De acordo com Barbour (1998) apud Feuerhamel (2003), quanto maior a tensão de pré-adensamento, mais elevado é o valor de entrada de ar.

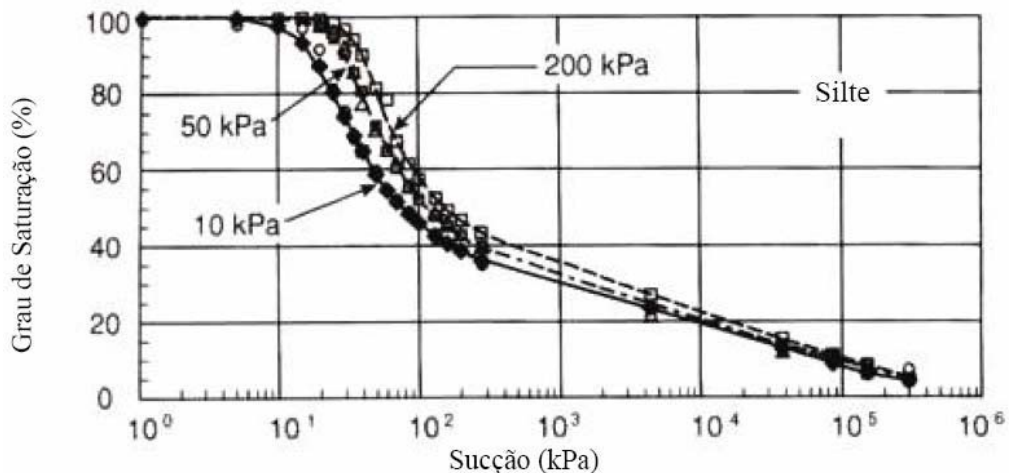


Figura 1.13 – Influência da Tensão de Pré-adensamento na Curva Característica (Barbour, 1998)

- Índice de Vazios

Gallipoli et al (2003) adotaram a hipótese de que, não ocorrendo os efeitos de histerese, existe uma única relação entre a sucção, o grau de saturação (S%) e a variação do índice de vazios, expressa pelo volume específico de vazios (v), definido pela equação:

$$v = 1 + e \quad (1.17)$$

Assim sendo, concluíram que, para um valor fixo de grau de saturação a sucção obtida é maior quanto menor for o volume específico de vazios, conforme apresenta a Figura 1.14.

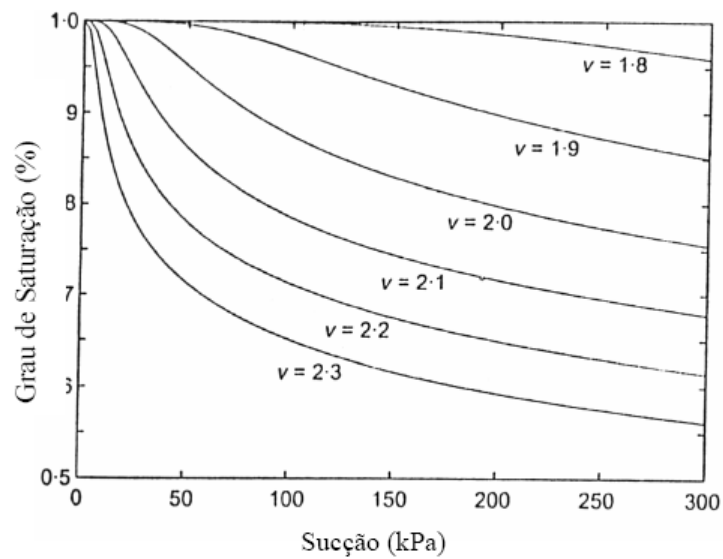


Figura 1.14 – Previsão da Curva Característica para Diferentes Valores de pelo Volume Específico de Vazios (v) (Gallipoli, 2003)

- História de Umedecimento e Secagem

No processo de umedecimento, a curva característica tende a apresentar, para certo valor de umidade, sucção menor do que a observada em um processo de secagem. De maneira geral, a quantidade de água retida no processo de secagem é maior que no processo de umedecimento (de Campos et al, 1992). Este processo está ilustrado na Figura 1.15.

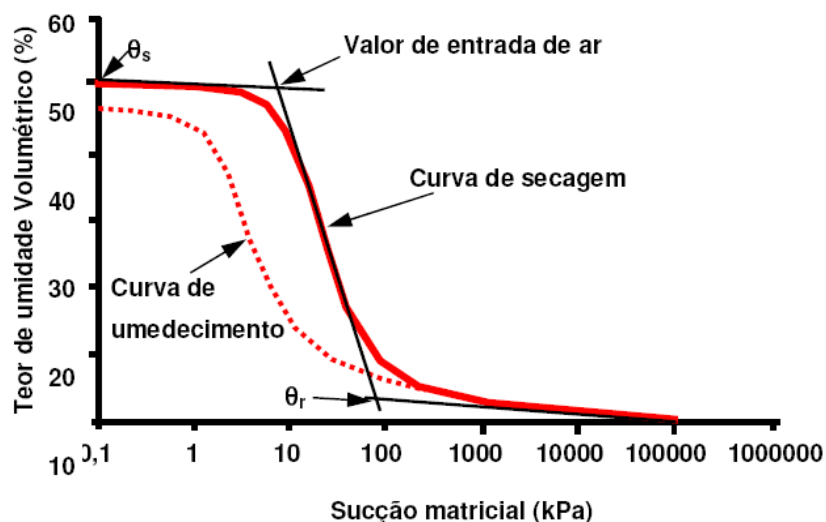


Figura 1.15 – Curva Característica Típica – Secagem e Umedecimento (Fredlund e Xing, 1994)

A histerese é atribuída à não uniformidade geométrica dos vazios, presença de ar ou mesmo a mudanças estruturais decorrentes de processos de fluxo que

podem propiciar fenômenos de inchamento, ressecamento ou envelhecimento (Hillel, 1971 apud Gerscovich, 2001). A não uniformidade dos vazios produz o efeito denominado ink bottle (Figura 1.16), que está relacionado com o fato do ângulo de contato ser maior no umedecimento do que na secagem, e o possível aprisionamento do ar no umedecimento.

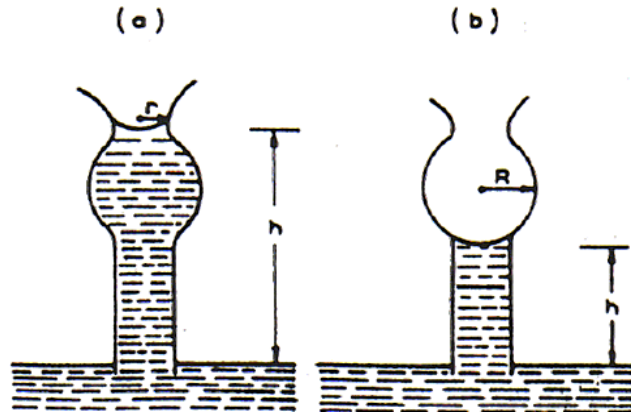


Figura 1.16 – Efeito “Ink Bottle” (a) secagem (b) umedecimento

De acordo com Melgarejo et al (2002) apud Feuerhamel (2003), a curva característica de uma amostra de solo é delimitada por duas curvas limite de umedecimento e de secagem. Os autores afirmam ainda que as primeiras trajetórias de umedecimento e secagem (denominadas de trajetórias principais) bem como processos subsequentes irão fornecer trajetórias internas às curvas limites, conforme mostrado na Figura 1.17.

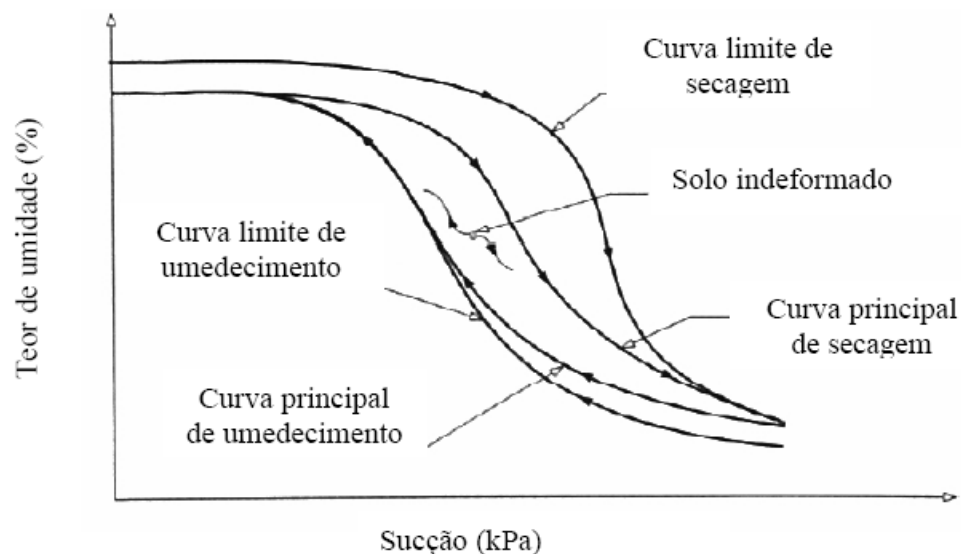


Figura 1.17 – Histerese da Curva Característica (Melgarejo et al, 2002)

1.5 Resistência ao Cisalhamento

Terzaghi (1936) observou que as mudanças no volume e na resistência ao cisalhamento são devidas à variação da tensão transmitida aos grãos sólidos e propôs o conceito de tensão efetiva (σ'). Nos solos saturados, a tensão efetiva é definida como a diferença entre a tensão total (σ) aplicada e a poro pressão (u_w).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1.18)$$

e a resistência ao cisalhamento é expressa por:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi \quad (1.19)$$

No caso de solos não saturados este princípio deixa de ser válido já que os poros são preenchidos não só por água, mas também por ar. Assim sendo, a resistência passa a ser função da quantidade de água presente nos vazios. Conseqüentemente está sujeita a variações ambientais em função dos vários processos presentes no ciclo hidrológico (infiltração e/ou evaporação)

Bishop e Donald (1961) observaram que ao comparar os resultados de resistência e variação volumétrica de um dado material saturado e não saturado, em termos de tensão total menos poro pressão, seria necessária uma correção na expressão de tensão efetiva, para que fosse possível considerar as pressões de ar e água existentes nos vazios do solo não saturado.

1.5.1 Proposta de Bishop et al (1960)

Bishop et al (1960) conduziram um extenso programa de pesquisa envolvendo solos não saturados. Foram realizados ensaios usando equipamento triaxial modificado, sem qualquer instrumento de medição de poropressão (ar e água). A Figura 1.18 mostra os resultados na forma do diagrama $p' \times q$.

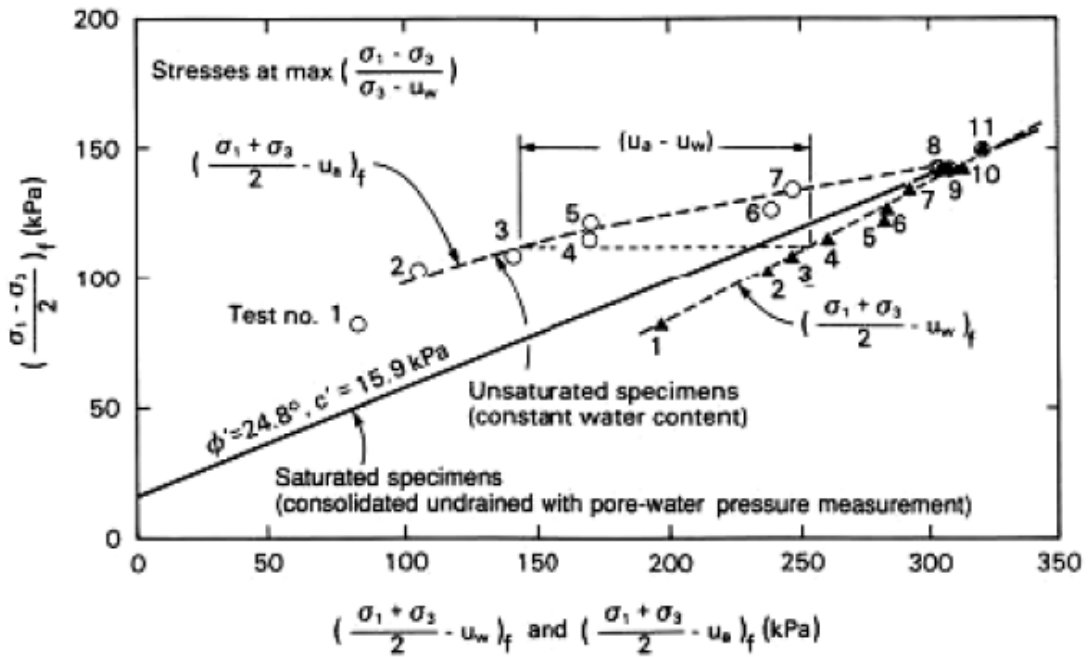


Figura 1.18 – Resultados de Ensaio Triaxiais com Teor de Umidade Constante em Solo Compactado (Bishop et al 1960)

Como resultado, Bishop et al (1960) introduziram o fator χ que incorpora o fato da água não estar presente em toda seção transversal e propuseram a equação:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1.20)$$

onde:

σ' = tensão efetiva do solo;

σ = tensão total do solo;

χ = parâmetro que representa a condição de saturação do solo (1,0 para solo saturado e 0,0 para solo completamente seco);

u_w = poro pressão de água;

u_a = poro pressão de ar.

A partir deste conceito Bishop et al (1960) definiram a seguinte equação de resistência ao cisalhamento para solos não saturados:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (1.21)$$

Quando o parâmetro χ é igual a 1, a envoltória passa a ser equivalente a de solos saturados.

1.5.2 Proposta de Fredlund e Morgenstern (1977)

Fredlund e Morgenstern (1977) propuseram uma nova abordagem para solos não saturados, baseada nos conceitos da mecânica de um material multifásico. Com isso, foram estabelecidas as variáveis de estado, relacionando as tensões totais com as pressões nos poros no ar (u_a) e na água (u_w), as quais podem ser definidas como:

- $(\sigma - u_w)$ e $(u_a - u_w)$;
- $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$;
- $(\sigma - u_a)$ e $(\sigma - u_w)$.

Observa-se, com base neste conceito, que a tensão efetiva, definida por Terzaghi, é uma variável de estado (Eq. (1.18))

A partir desta definição, Fredlund e Rahardjo (1993) propuseram um critério para a determinação da resistência de solos não saturados em que a envoltória de ruptura do solo é então representada em um espaço tridimensional, conforme indicado na Figura 1.19. O gráfico tridimensional tem como ordenada a tensão cisalhante (τ) e, como abscissas, as variáveis de estado de tensão $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$. A representação gráfica da superfície de ruptura nos planos $\tau_f \times (\sigma - u_a)$ e $\tau_f \times (u_a - u_w)$ estão mostradas na Figura 1.20.

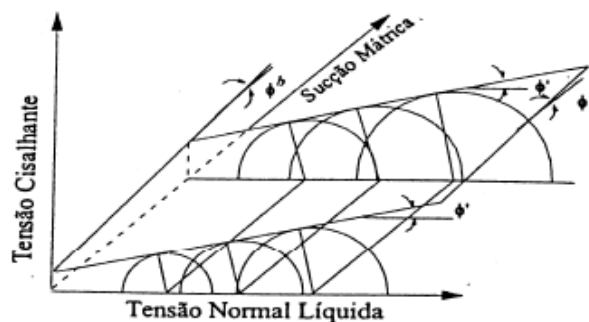


Figura 1.19 – Envoltória de Tridimensional de Ruptura (Fredlund e Rahardjo, 1993)

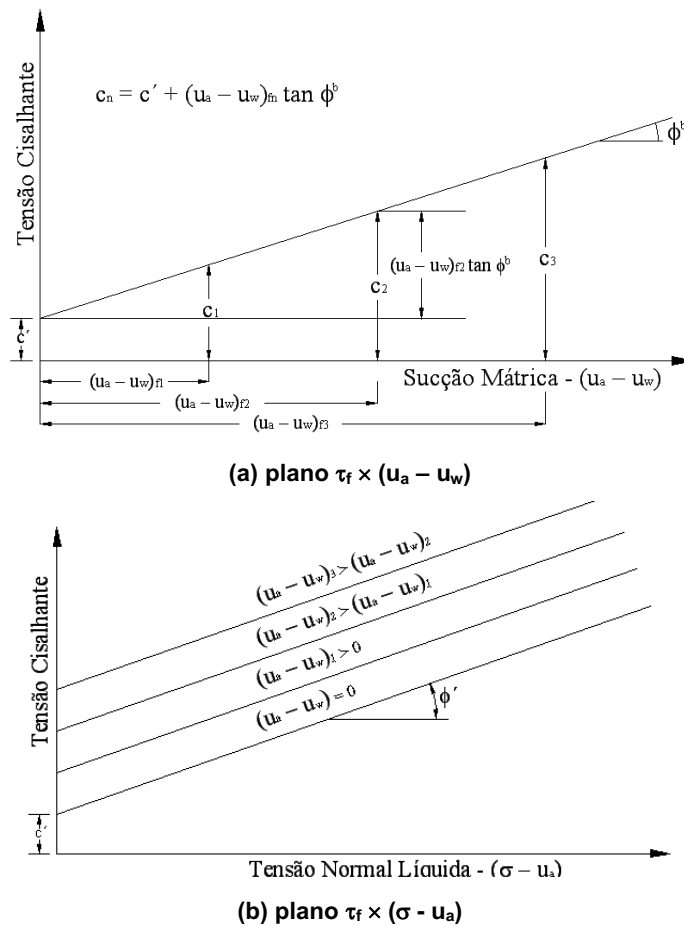


Figura 1.20 – Representação Gráfica da Resistência ao Cisalhamento (Fredlund e Rahardjo, 1993; Ho e Fredlund, 1982).

Assim sendo, a equação de resistência ao cisalhamento de solos não saturados pode ser representada pelas equações:

$$\tau = c' + (u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi^b + (\sigma - u_a) \cdot \operatorname{tg} \phi' \quad (1.22)$$

ou

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \cdot \operatorname{tg} \phi' \quad (1.23)$$

onde:

c' = intercepto coesivo do solo quando as duas variáveis de estado são nulas;

ϕ' = ângulo de atrito interno do solo

ϕ^b = ângulo de atrito interno do solo com respeito a mudanças em $(u_a - u_w)$;

c = intercepto coesivo (Figura 1.20), dado por:

$$c = c' + (u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi^b \quad (1.24)$$

Existe um consenso no meio geotécnico de que esta abordagem é a que melhor representa o comportamento de solos não saturados na prática de engenharia.

1.5.2.1 Parâmetros ϕ' e ϕ^b

De acordo com Fredlund et al (1978), o ângulo de atrito do solo (ϕ') independe do nível de sucção e ϕ^b é constante e, em geral, inferior a ϕ' . Resultados experimentais (Futai et al, 2004) têm mostrado que a envoltória de ruptura de solos não saturados é não linear, ou seja os parâmetros ϕ' e ϕ^b não são constantes. Os resultados apresentados por Franch e Futai (2009) indicam valores de ϕ^b maiores que o valor de ϕ' , onde era esperado que ϕ^b fosse menor que ϕ' para sucções superiores ao valor de entrada de ar e valor ϕ^b igual a ϕ' para valores inferiores ao valor de entrada de ar.

A Figura 1.21 ilustra a variação da parcela da resistência dos solos não saturados, gerada pela sucção, associando-a a curva característica do solo. Observa-se que o ângulo ϕ^b começa a desviar do ângulo de atrito efetivo interno ϕ' quando a dessaturação atinge altos valores de sucção. Quando a sucção atinge o valor correspondente ao teor de umidade residual, o ângulo ϕ^b aproxima-se de zero.

Reis (2004) e Reis e Vilar (2004) analisando dois solos residuais de gnaiss da região de Viçosa (MG) verificaram que o intercepto coesivo (c) relaciona-se com a sucção matricial seguindo um modelo não linear, possivelmente hiperbólico, afastando a possibilidade de se admitir ϕ^b constante.

A variação de ϕ^b com o nível de sucção (ψ) foi também observada por outros autores (Escario, 1980; Escario e Sãez, 1986 e 1987; Delage et al, 1987; Fredlund et al, 1987; Escario e Jucá, 1989; Delgado, 1993; Röhm e Vilar, 2007; Vilar, 1995; Vilar e Rodrigues, 2007).

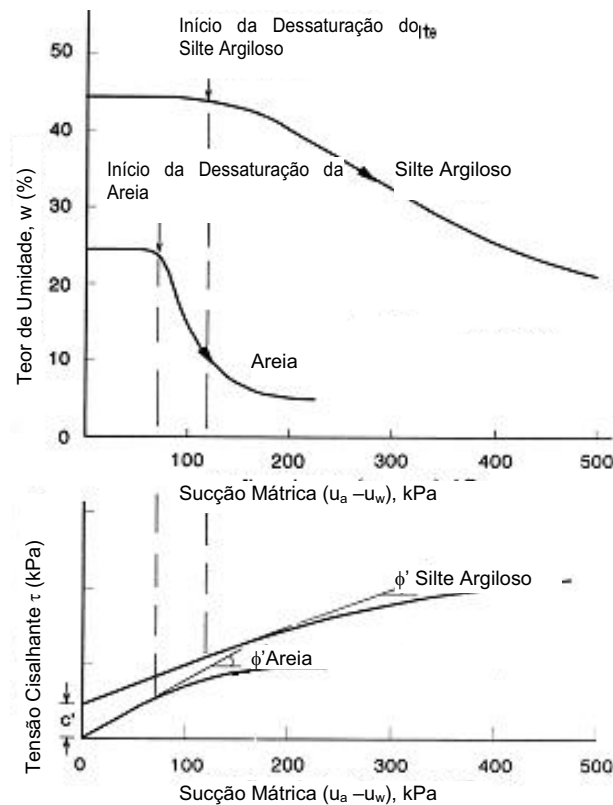
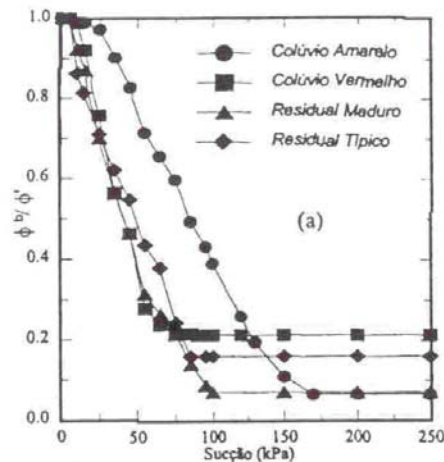


Figura 1.21 – Relação entre a Curva Característica do Solo (a) e a Resistência ao Cisalhamento (b) para uma Areia e um Silte Argiloso (Fredlund e Rahardjo, 1993).

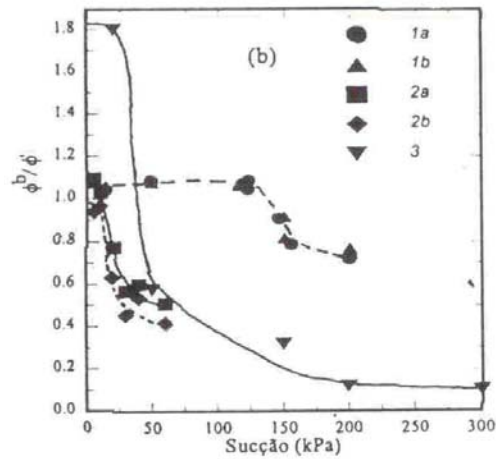
Segundo Vanapalli et al (1996), apesar da não linearidade do termo associado à sucção, a equação de Fredlund et al (1978) continua válida com respeito a intervalos específicos de sucção matricial.

de Campos e Carrillo (1995) observaram resultados de ensaios em solos tropicais brasileiros e mostraram que a relação ϕ^b/ϕ' é igual a 1 para sucções inferiores à sucção de entrada de ar (25kPa), a partir da qual passa a apresentar valores menores que 1, tornando-se constante para sucções mais elevadas; no solo residual esta constante foi aproximadamente 0,15 (Figura 1.22(a)). Por outro lado, resultados em outros materiais (de Campos, 1997) não se ajustavam ao comportamento previsto no modelo de Fredlund e apresentavam ϕ^b/ϕ' superiores a 1 no trecho de baixa sucção (Figura 1.22(b)).

Futai (2004) atribuiu este resultado ao fato de que não só ϕ^b varia com o nível de sucção, mas também o ângulo de atrito interno do solo (ϕ').



(a) Solo de biotita-gnaiss (de Campos e Carrillo, 1995)



(a) 1a - Colúvio; 1b - Solo residual (Abramento e Carvalho, 1989); 2a e 2b - Solo saprolítico de gnaiss (Fonseca, 1991); 3 - Solo sedimentar laterítico (Rohm e Vilar, 1995)

Figura 1.22 – Relação ϕ^b/ϕ com a sucção (de Campos, 1997).

1.5.2.2 Comparação entre as propostas de Bishop e colaboradores e a de Fredlund e colaboradores

Comparando as equações (1.20) e (1.22) verifica-se que as propostas de Bishop e Fredlund podem ser relacionadas de acordo com:

$$(u_a - u_w)_f \tan \phi^b = \chi (u_a - u_w)_f \tan \phi' \quad (1.25)$$

ou

$$\chi = \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \quad (1.26)$$

Uma comparação gráfica entre as propostas de Bishop e Fredlund está apresentada na Figura 1.23. De acordo com Fredlund, um aumento na sucção causa uma translação na envoltória de resistência. Esta translação é calculada como sendo $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ (ponto A). Por outro lado, a proposta de Bishop et al (1960) usa a mesma envoltória do solo saturado e a sucção resulta num incremento de tensão normal; isto é, há uma translação na horizontal, cuja magnitude é igual a $\chi (u_a - u_w)$ (ponto A').

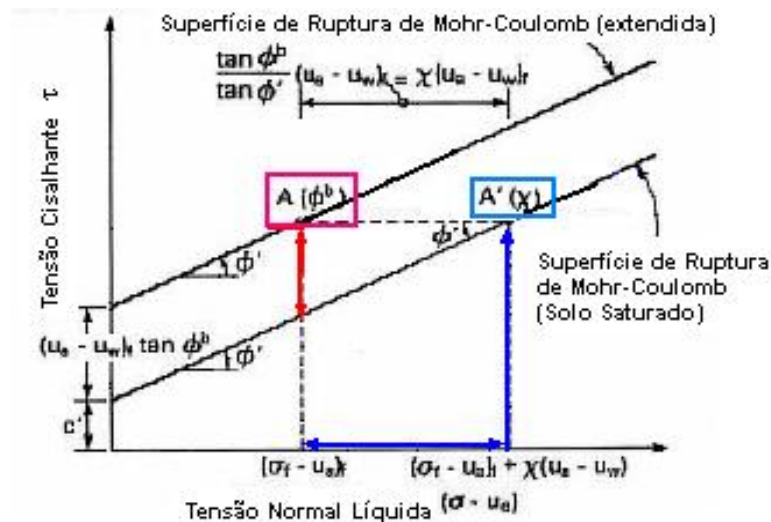


Figura 1.23 – Comparação entre ϕ^b e χ

Observa-se que ambas as propostas fornecem o mesmo valor de resistência na ruptura. Entretanto, no caso de envoltórias altamente curvas com relação à sucção mátrica, seriam necessários diferentes valores de χ para reproduzir a não linearidade da curva. Em resumo, χ não poderia ser constante.

1.6 Estimativa de Parâmetros – Problemas Inversos

De acordo com Beck e Arnold (1977) apud Velloso (2000), a estimativa de parâmetros se constitui hoje uma disciplina que vem a fornecer ferramentas para o uso eficiente de dados nas estimativas dos parâmetros existentes nos modelos matemáticos e para o auxílio na modelagem de um fenômeno.

A estimativa de parâmetros nada mais é que um estudo de problemas inversos. Quando se busca a solução de um problema em um determinado domínio, conhecendo-se as condições iniciais e de contorno e também os parâmetros do modelo em estudo, temos o que conhecemos como problema direto. Já no problema inverso, nem todos estes parâmetros são conhecidos, mas medidas discretas das variáveis dependentes dentro do domínio podem ser usadas para estimar valores dos parâmetros. A Figura 1.24 apresenta um fluxograma ilustrativo da definição de problema direto e problema inverso.

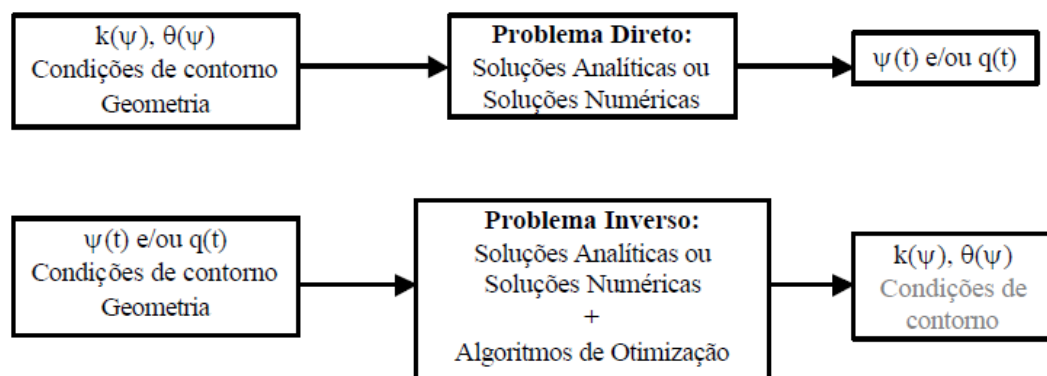


Figura 1.24 – Problema Direto e Problema Inverso (Velloso, 2000)

Existem duas abordagens para o problema de estimativa de parâmetros. Neuman (1973) apud Velloso (2000) classificou as formulações como direta e indireta. A abordagem direta trata os parâmetros do modelo como variáveis dependentes num problema de contorno inverso. Aplicações da formulação direta podem ser encontradas em Ramos (1997), Cividini e Gioda (1997) e Castro (1997). A formulação indireta é baseada na minimização da discrepância entre os dados medidos e os valores correspondentes calculados pelo modelo matemático.

A principal vantagem da formulação indireta está na simplicidade da implementação, pois o programa de análise indireta é incluído como uma sub-rotina do programa principal de retroanálise, enquanto que na formulação direta é necessária a modificação do código da análise direta.

Na formulação indireta, utiliza-se um modelo matemático, que expressa o fenômeno em estudo, onde são calculadas as grandezas correspondentes às observadas (carga de pressão, deslocamento, etc.) em função dos parâmetros a

estimar p . Determina-se então, uma função F representativa do ajuste entre os valores observados, y^* , e a resposta calculada pelo modelo, $y(p)$:

$$F(p) = f(y(p), y^*) \quad (1.27)$$

O problema de estimativa de parâmetros pode, então, ser formulado como um problema de otimização, onde se deseja encontrar o vetor de parâmetros p que torne mínima a diferença entre os valores calculados pelo modelo matemático e os medidos no ensaio.

$F(p)$ é denominada função objetivo. Os diferentes métodos de estimativa de parâmetros são caracterizados pelas diversas formas da função objetivo, que depende do grau de informação prévia disponível sobre o problema.

A solução do problema pode ser obtida por meio do uso de algoritmos de otimização que, por processos iterativos, obtém o vetor de parâmetros estimados p^* correspondente ao mínimo da função objetivo a partir de uma estimativa inicial do vetor de parâmetros p_0 .

Após as estimativas terem sido calculadas deve-se questionar quais conclusões podem ser tiradas no que diz respeito à qualidade do modelo que está sendo ajustado e dos valores estimados (Bard, 1974). A adequação do modelo ao fenômeno estudado pode ser qualificada por meio da análise dos resíduos finais obtidos. A condição necessária, mas não suficiente, para uma estimativa significativa pode ser obtida quando se tem um bom ajuste entre os valores medidos no experimento e os calculados pelo modelo matemático. Pode-se ter uma alta incerteza nos parâmetros estimados devido à má qualidade dos dados observados ou por características do próprio modelo. De acordo com Finsterle (1999), uma das principais vantagens da abordagem formalizada da estimativa de parâmetros é a possibilidade de realizar uma interpretação das estimativas que é importante para avaliar sua qualidade.

A Figura 1.25 resume os principais componentes de uma estimativa de parâmetros.

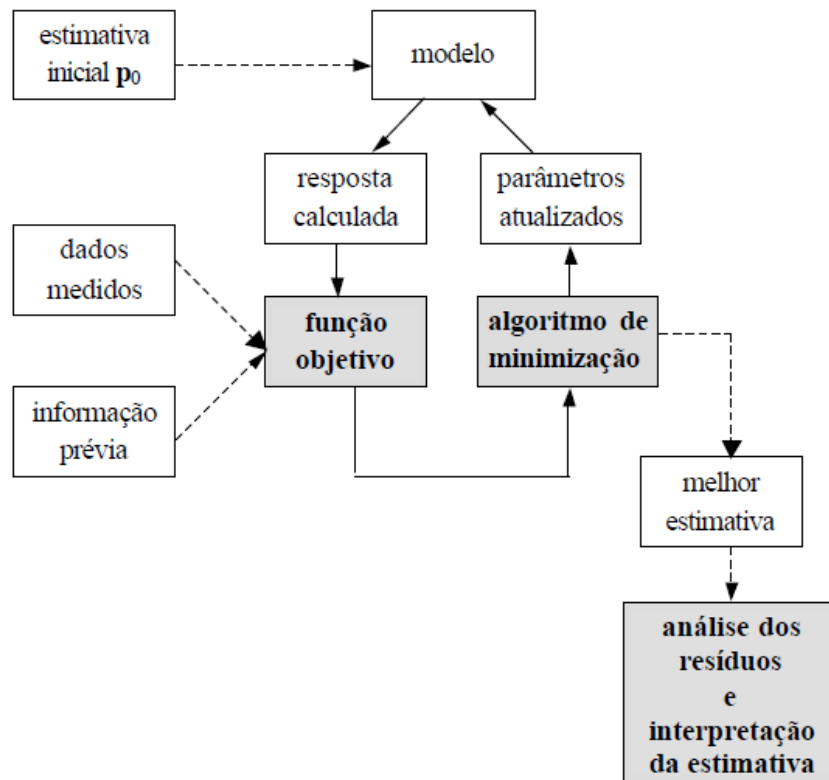


Figura 1.25 – Fluxograma de um Problema de Estimativa de Parâmetros (Velloso, 2000)

1.6.1 Métodos de Estimativa de Parâmetros

A aproximação geral para a estimativa de parâmetros do modelo deve selecionar uma função objetivo $F(p)$ que seja uma medida das diferenças das variáveis medidas e as calculadas pelo modelo. O método para determinar os parâmetros é obtido minimizando (ou maximizando, dependendo de como a função é definida) esta função objetivo. Usando o método de mínimos quadrados sugerido como o mais simples por Beck e Arnold (1977), a função objetivo é definida por:

$$F(p) = [y^* - y(p)]^T [y^* - y(p)] = \sum_{i=1}^m r_i^2(p) \quad (1.28)$$

onde r_i é o resíduo, ou seja, a diferença entre o valor observado e o calculado.

Se nenhum erro de medida existisse, o valor da função objetivo seria zero. Entretanto, caso somente o modelo seja perfeito, a medição de erros experimentais criará geralmente um valor mínimo, diferente de zero para a função objetivo. O

método de mínimos quadrados funciona quando os erros de observação são distribuídos normalmente, ou seja, são não correlacionados e têm uma variação constante, sendo que as estimativas de mínimos quadrados possuem propriedades estatísticas ótimas (Bard, 1974).

Quando o vetor de observações y^* contém diferentes tipos de dados que são expressos em diferentes unidades, o método dos mínimos quadrados, equação (1.28), pode não apresentar resultados satisfatórios. Por exemplo, o vetor de observações y^* pode ser composto por carga de pressão da ordem de 10^3 cm, vazão acumulada da ordem 10^4 cm³, e teor de umidade da ordem de 1. Não faria sentido somar números de ordens de grandeza tão diferentes, os resíduos relacionados à vazão acumulada e à carga de pressão seriam predominantes e qualquer informação relativa ao teor de umidade seria irrelevante na solução do problema. Além disso, algumas medidas podem ser mais confiáveis do que outras e deseja-se que os parâmetros estimados sejam menos influenciados pelas medidas menos precisas. Em ambos os casos, a solução seria a mesma: ponderar os resíduos de forma que a função objetivo seja dada por:

$$F(p) = [y^* - y(p)]^T W [y^* - y(p)] = \sum_{i=1}^m w_{ii} r_i^2(p) \quad (1.29)$$

onde W é uma matriz de pesos diagonal com elementos não negativos.

Quando a equação (1.29) é utilizada o método é classificado como mínimos quadrados ponderados.

Os elementos de W são determinados com base no conhecimento do problema. Valores altos são atribuídos aos elementos w_{ii} correspondentes às grandezas medidas em uma escala pequena, ou aos que são mais confiáveis, e valores baixos de w_{ii} caso contrário.

Como procedimentos subjetivos para a escolha dos pesos podem produzir resultados tendenciosos, pode-se utilizar considerações estatísticas para a escolha desta matriz de pesos.

Bard (1974) sugere a adoção da inversa da matriz de covariância dos valores medidos, C_y , como a matriz de peso:

$$F(p) = [y^* - y(p)]^T C_y^{-1} [y^* - y(p)] \quad (1.30)$$

Se as medidas forem não correlacionadas, a matriz de covariância das medidas, C_y , é uma matriz diagonal, sendo seus elementos dados pelo quadrado do desvio padrão das medidas, σ_y^2 , ou seja, a variância. Logo, a função objetivo pode ser definida como:

$$F(p) = \sum_{i=1}^m r \frac{r_i^2(p)}{\sigma_{y_i}^2} \quad (1.31)$$

O desvio padrão, σ_{y_i} , pode ser estimado pela precisão do instrumento de medida, por exemplo, se uma medida de carga de pressão é obtida por um tensiômetro cuja precisão é de 10cmH₂O e outra por outro equipamento com precisão de 1cmH₂O, a primeira medida terá peso menor na função objetivo do que a segunda. O mesmo acontece para dados de diferentes grandezas.

Algumas hipóteses sobre distribuição dos erros das medidas podem ser feitas com o objetivo de formalizar essa abordagem tão intuitiva.

Se os erros das medidas obedecem a uma distribuição normal e são aleatórios, pode-se mostrar que minimizar a soma dos resíduos de mínimos quadrados ponderados leva ao estimador de máxima probabilidade dos parâmetros desconhecidos (Bard, 1974, Beck e Arnold, 1977). A equação (1.30) pode ser obtida por intermédio do método da máxima probabilidade.

Em alguns problemas de engenharia, a experiência acumulada ao longo do tempo fornece indicações que podem contribuir para o resultado da estimativa de parâmetros. Estas informações podem ser introduzidas na função objetivo. O método bayesiano é caracterizado pela inclusão de informações prévias sobre os parâmetros a serem estimados:

$$F(p) = [y^* - y(p)]^T C_y^{-1} [y^* - y(p)] + [p - p_0]^T C_{p_0}^{-1} [p - p_0] \quad (1.32)$$

onde C_{p_0} é a matriz de covariância das estimativas iniciais dos parâmetros, p_0 .

O segundo termo da equação (1.32) atua como uma função de penalidade que mantém os parâmetros numa região próxima à estimativa inicial p_0 . À medida

que o vetor de parâmetros p se move para longe de p_0 , a contribuição do segundo termo cresce quadraticamente, logo a minimização de $F(p)$ só será concluída com êxito se p permanecer próximo a p_0 .

De acordo com Hopmans et al (2002), citado por Morales (2008), para resolver o problema inverso envolvendo condições de fluxo, existem três itens fundamentais:

- um ensaio de laboratório ou campo controlado, de fluxo transiente, onde se estabeleçam as condições de contorno e iniciais e obtenham as variáveis medidas.
- um modelo numérico de fluxo que simule o regime de fluxo transiente deste ensaio, e:
- um algoritmo de otimização, que estime os parâmetros desconhecidos p , tornando mínimas as diferenças entre os valores medidos nos ensaios e o calculado pelo modelo, definidas na função objetivo $F(p)$ através de uma solução iterativa da equação do fluxo.

1.6.2 Algoritmos de Otimização

A finalidade do algoritmo de otimização é encontrar o mínimo da função objetivo de forma iterativa atualizando os parâmetros do modelo. Desde que a resposta calculada pelo modelo $y(p)$ dependa dos parâmetros, o ajuste pode ser melhorado mudando os elementos do vetor p . A busca para o mínimo ocorre no espaço n -dimensional do parâmetro. Vários métodos de resolução para tal problema foram desenvolvidos (Bard, 1974; Beck e Arnold, 1977; Yeh, 1986; Kool et al, 1987). A maioria destes métodos é iterativa: começam com um vetor de parâmetro inicial p_0 , e um novo vetor atualizado é calculado em cada iteração. O procedimento de iteração é descrito pela equação:

$$p^{k+1} = p^k + \Delta p^k \quad k = 0,1,2,3,\dots \quad (1.33)$$

onde:

k é a iteração; e

Δp^k é a variação do vetor de parâmetros p^k . Existem diversos métodos para o cálculo de Δp^k , e, em geral, ele é composto por duas partes:

$$\Delta p^k = \beta^k d^k \quad (1.34)$$

Onde:

β é o tamanho do passo; e

d^k é a direção de busca, também denominado vetor de sentido, o que é determinado de modo tal que a função objetivo seja reduzida, isto é:

$$F(p^{k+1}) < F(p^k) \quad (1.35)$$

onde $F(p^{k+1})$ e $F(p^k)$ são funções objetivo no nível atual e posterior à iteração, respectivamente.

O processo iterativo será repetido até que as condições dadas na função objetivo sejam reduzidas ou algum outro critério de parada seja satisfeito (Arora, 1989).

Velloso (2000) resume os passos característicos do algoritmo de otimização, a partir de métodos locais:

1. Determinar a estimativa inicial, p_0 ($k = 0$);
2. Calcular a função objetivo para $p = p^k$;
3. Determinar a direção de busca, d^k ;
4. Verificar o critério de parada do algoritmo. Se satisfeito, parar o processo iterativo, caso contrário, continuar;
5. Calcular o tamanho do passo, β^k ;
6. Calcular o vetor de novos parâmetros, p^{k+1} , utilizando a equação (1.33)
7. Fazer: $k = k + 1$, voltar ao passo 2.

1.6.3 Métodos de Otimização

A seguir estão apresentados alguns métodos de otimização.

a) *Método Univariante*

O método univariante consiste em mudar uma variável de cada vez. A direção de busca é dada por vetores unitários que são colocados em ordem cíclica, e o tamanho do passo (positivo ou negativo) é escolhido de tal forma que haja um decréscimo na função objetivo.

O método univariante é tido como um método de ordem zero, visto que não há a necessidade do cálculo do gradiente da função objetivo. Este método é muito lento, se comparado com outros métodos.

b) Método do Máximo Declive

O método do máximo declive é um método de 1ª ordem já que somente o gradiente da função objetivo é calculado e utilizado para a determinação da direção de busca. A filosofia do método é encontrar a direção d na iteração corrente para a qual a função objetivo $F(p)$ decresça mais rapidamente, ao menos localmente.

De acordo com Arora (1989), a direção do máximo decréscimo da função objetivo é o negativo do seu gradiente. Qualquer pequeno movimento na direção contrária ao gradiente vai resultar na taxa local máxima de decréscimo da função objetivo. Então, o vetor que aponta na direção contrária à direção do gradiente representa a direção de máximo declive para a função objetivo. Logo, para o método do máximo declive:

$$d^k = -g^k \quad (1.36)$$

onde g é o gradiente da função objetivo.

O método do máximo declive é simples e robusto, entretanto, mesmo que a convergência do método seja garantida, um grande número de iterações pode ser necessário, tornando a convergência muito lenta quando próxima ao mínimo. Experiência prática com o método demonstra que para as primeiras iterações é grande o decréscimo da função objetivo, enquanto que nas últimas iterações o decréscimo é bastante lento (Arora, 1989).

c) Método de Newton-Raphson

A idéia básica do método de Newton-Raphson é utilizar a expansão em série de Taylor até segunda ordem da função objetivo em torno do ponto corrente. Isto fornece uma expressão quadrática para Δp . Com as condições necessárias para a minimização desta função obtém-se explicitamente a direção de busca, d .

Expandindo a função $F(p)$ em série de Taylor, até termos de segunda ordem, obtém-se:

$$F(p + \Delta p) = F(p) + g^T \Delta p + \frac{1}{2} \Delta p^T H \Delta p \quad (1.37)$$

Sendo g o gradiente (∇F) e H a matriz hessiana ($\nabla^2 F$) da função objetivo, demonstra-se que para p^* ser um ponto de mínimo local de $F(p)$ é necessário que, para $p = p^*$, (Arora, 1989):

- (i) gradiente seja nulo.
- (ii) hessiana seja positiva definida.

Escrevendo a condição de estacionaridade ($\partial F / \partial(\Delta p) = 0$) para a função da equação (1.37):

$$g + H \Delta p = 0 \quad (1.38)$$

Admitindo que H é não singular, a expressão para Δp é dada por:

$$\Delta p = -H^{-1}g \quad (1.39)$$

O método de Newton-Raphson trabalha com $\beta = 1$, sem busca linear.

Como a equação (1.39) é somente uma aproximação de F no ponto p^k , o ponto $p^{k+1} = p^k + \Delta p^k$ provavelmente não vai ser o mínimo preciso de $F(p)$. Portanto, o processo deve ser repetido para se obter melhores estimativas até que o mínimo seja encontrado (Arora, 1989).

O gradiente, g , e a hessiana, H , são obtidos derivando a função objetivo, F , em relação a p .

Para o método dos mínimos quadrados (equação (1.31)), por exemplo, o gradiente é dado por:

$$g_j = \frac{\partial F}{\partial p_j} = -2 \sum_{i=1}^m r_i \frac{\partial y_i(p)}{\partial p_j} \quad j = 1, \dots, n_p \quad (1.40)$$

e a hessiana por:

$$H_{jk} = \frac{\partial^2 F}{\partial p_j \partial p_k} = -2 \sum_{i=1}^m r_i \frac{\partial^2 y_i(p)}{\partial p_j \partial p_k} + 2 \sum_{i=1}^m \frac{\partial y_i(p)}{\partial p_j} \frac{\partial y_i(p)}{\partial p_k} \quad j, k = 1, \dots, n_p \quad (1.41)$$

Definindo a matriz jacobiana, ou matriz de sensibilidade, como:

$$J = \frac{\partial y(p)}{\partial p} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1(p)}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial y_1(p)}{\partial p_{n_p}} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial y_n(p)}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial y_n(p)}{\partial p_{n_p}} \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

O gradiente pode ser escrito como:

$$g = -2J^T r \quad (1.43)$$

e a hessiana como:

$$H = -2 \sum_{i=1}^n r_i \frac{\partial^2 y_i(p)}{\partial p_j \partial p_k} + 2J^T J \quad (1.44)$$

No método de Newton-Raphson, a hessiana (equação (1.41)) é calculada diretamente. Este método apresenta ótimas propriedades de convergência. Uma grande desvantagem do método de Newton-Raphson é o custo do cálculo das derivadas de segunda ordem (o primeiro termo da equação (1.41)). Estas derivadas, geralmente, não podem ser obtidas analiticamente. A aproximação por diferenças finitas, por exemplo, exige um número significativo de cálculos da função objetivo, isso aumenta muito o custo computacional. O método de Newton-Raphson é por esta razão pouco utilizado na solução de problemas de estimativa de parâmetros. A matriz hessiana não é somente cara para se calcular como também pode vir a ser negativa-definida se o modelo é altamente não-linear (Finsterle e Pruess, 1995), fazendo com que a convergência não seja garantida.

As modificações do método de Newton-Raphson não calculam a hessiana diretamente (equação (1.41)), mas utilizam alguma aproximação. Os métodos chamados quase-Newton (DFP e BFGS) aproximam a hessiana a partir de informações disponíveis da 1ª derivada e ainda utilizam informações obtidas das iterações anteriores. Uma matriz positiva definida é construída e atualizada a cada iteração do algoritmo de otimização de forma que produza uma aproximação de H ou de H^{-1} com muito menos esforço do que o cálculo da hessiana exige.

Já no método de Gauss-Newton admite-se que o segundo termo da equação (1.41) é uma aproximação suficiente para a hessiana:

$$H \approx 2J^T J \quad (1.45)$$

Isto é razoável quando o resíduo r é pequeno. Por outro lado, quando a solução está longe do mínimo, ou quando os resíduos permanecem grandes no mínimo, o método de Gauss-Newton pode não convergir.

1.6.3.1 Método de Levenberg-Marquardt

Marquardt (1963) propôs um método eficaz, o qual se tornou um padrão para a solução de problemas não-lineares com mínimos quadrados e tem sido considerado bastante robusto na solução de problemas de estimativa de parâmetros (Kool et al, 1985, Finsterle e Pruess, 1995, Simunek e van Genuchten, 1996).

De acordo com Silva Neto e Moura Neto (2005), um dos revisores do trabalho de Marquardt alertou para o fato de que, Levenberg (1944) havia sugerido uma proposta similar, baseada na adição de um termo na diagonal da matriz $J^T J$, por esse motivo o método é conhecido como Método de Levenberg-Marquardt.

O método representa a união entre o método de Gauss-Newton e o máximo declive, onde a matriz hessiana é aproximada por:

$$H \approx 2(J^T J + \lambda D) \quad (1.46)$$

onde:

D é uma matriz diagonal de ordem np com os elementos iguais aos elementos da diagonal da matriz $(J^T J)$.

λ é denominado parâmetro de Levenberg ($\lambda \geq 0$).

O método de Levenberg-Marquardt apresenta diversas vantagens em relação ao método de Gauss-Newton. Para valores não nulos de λ , a aproximação da hessiana é sempre positiva-definida o que garante a propriedade de descida do algoritmo, mesmo se a estimativa inicial dos parâmetros for ruim. O método de Levenberg-Marquardt pode ser visto como uma interpolação entre o método do máximo declive e o método de Gauss-Newton. Quando λ é grande, o resultado vai ser um pequeno passo na direção do máximo declive, enquanto que, quando λ se aproxima de zero, o método se aproxima de Gauss-Newton. A estratégia usual é iniciar com um valor alto de λ e então diminuí-lo, se há um decréscimo da função objetivo, e aumentá-lo, caso contrário.

1.6.3.2 Algoritmos Genéticos (AG's)

Algoritmos genéticos são métodos de busca estocástica que imitam matematicamente os mecanismos de evolução natural das espécies, compreendendo processos da genética das populações, sobrevivência e adaptação dos indivíduos (Gen e Cheng, 1996).

Os AGs foram inicialmente desenvolvidos por John Holland, em 1975, porém quem os popularizou foi um dos seus alunos (Goldberg, 1989). Os objetivos destes pesquisadores foram investigar e projetar sistemas artificiais, análogos aos mecanismos naturais das espécies (Cheung, 2007).

Dada uma função f de n variáveis x_1, x_2, \dots, x_n a otimização da função consiste em encontrar a combinação de valores de x . tal que $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ seja máximo ou mínimo.

Os algoritmos genéticos iniciam o processo gerando um conjunto inicial de soluções aleatoriamente. Cada vetor solução deste conjunto inicial é então melhorado a cada iteração pelos operadores genéticos e representam uma possível solução completa para o problema. Basicamente, os algoritmos genéticos transformam uma população de indivíduos, cada um com um valor associado de adaptabilidade, chamado de aptidão, numa nova geração de indivíduos usando os princípios Darwinianos de reprodução e sobrevivência dos mais aptos, pela aplicação de operações genéticas tais como recombinação e mutação (DA SILVA, 2002).

Segundo Goldberg (1989), citado por Prudêncio (2002) e Cheung (2007), a utilização dos AG's apresentam algumas vantagens e desvantagens:

a) podem ser utilizados em problemas complexos com muitas variáveis e um espaço de solução de dimensão elevada;

b) não há necessidade de se calcular os gradientes da função objetivo e, portanto, um algoritmo genético pode ser utilizado sem nenhuma modificação, para otimizar funções não diferenciáveis. Os métodos de otimização baseados em gradiente, por exemplo, têm a restrição forte de otimizarem apenas funções diferenciáveis;

c) trabalham com uma população de soluções candidatas simultaneamente e não com uma única solução. Muitos algoritmos de otimização trabalham apenas com um ponto no espaço de busca e usam alguma regra de transição para gerar o próximo ponto. Essa estratégia é mais sensível à escolha do ponto inicial de busca e mais suscetível a cair em mínimos locais. Iniciando com vários pontos esse problema é amenizado. Outra vantagem de se usar muitos pontos é facilitar a implementação em paralelo do algoritmo;

d) são versáteis, no sentido de que o mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema considerado;

e) são mais resistentes a se prender em ótimos locais (ponto de inflexão na função objetivo) e a ruídos;

f) utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas. O uso de regras probabilísticas pode ser útil ao algoritmo para sair de mínimos locais, o que muitos algoritmos que usam regras de transição determinísticas não são capazes de fazer.

g) são flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;

h) são facilmente hibridizados com outras técnicas e heurísticas.

Segundo Silva (2001), existem algumas desvantagens quando comparados aos métodos clássicos de otimização:

a) são computacionalmente “lentos” quando comparados a métodos de subida e outros;

b) para alguns problemas podem ser de difícil implementação.

Uma das maiores desvantagens dos AGs é a convergência lenta. Com isso tem sido recomendada a utilização de técnicas híbridas conciliando o alto grau de convergência das técnicas de otimização clássicas baseadas no gradiente (Cheung, 2007).

Um algoritmo genético pode ser entendido como uma tentativa de metáfora da Teoria de Evolução de Darwin, que incorpora conceitos da Genética, utilizando-se, inclusive, termos oriundos da Biologia:

- a) *Cromossomo (genótipo)*: possível solução do problema em estudo representado por uma cadeia de bits;
- b) *Gene*: representação de cada parâmetro da função objetivo de acordo com o alfabeto utilizado (binário, inteiro ou real);
- c) *Fenótipo*: cromossomo modificado;
- d) *População*: conjunto de cromossomos (indivíduos) que representam os atuais pontos que fazem parte do espaço de soluções;
- e) *Geração*: iteração completa do AG que gera uma nova população;
- f) *Aptidão bruta*: função usada no mecanismo de seleção, para identificar quais indivíduos irão “sobreviver” e recombinar. Está ligada ao valor da função objetivo e pode incluir uma função penalidade;
- g) *Aptidão normalizada*: aptidão bruta normalizada, entrada para o algoritmo de seleção;
- h) *Aptidão máxima*: melhor indivíduo da população corrente;
- i) *Aptidão média*: aptidão média da população corrente.

Um AG tem início com uma população de indivíduos com as características representadas pelos cromossomos. O cromossomo é um vetor unidimensional (string) cujos valores (variáveis de decisão) representam características (genes) da possível solução do problema e podem ser codificados através da representação binária ou real. A codificação depende do problema que está sendo tratado. Uma codificação real é mais apropriada para estudos de problemas cujas funções sejam contínuas. Já nos casos de problemas de otimização combinatória, a codificação binária se comporta de forma mais adequada. A partir da escolha da codificação, os vetores soluções (indivíduos) são gerados aleatoriamente através de rotinas computacionais.

A diferença entre os AG's e as demais técnicas de busca convencionais está no fato da geração de um conjunto inicial de soluções possíveis de forma aleatória, denominado “população”. Durante o processo iterativo, várias populações (conjunto de soluções) são geradas. Cada indivíduo pertencente a essas populações, intuitivamente denominado “cromossomo”, constitui uma representação completa da

solução para o problema. Novas gerações de indivíduos melhores são produzidas, gradativamente, através de sucessivas iterações.

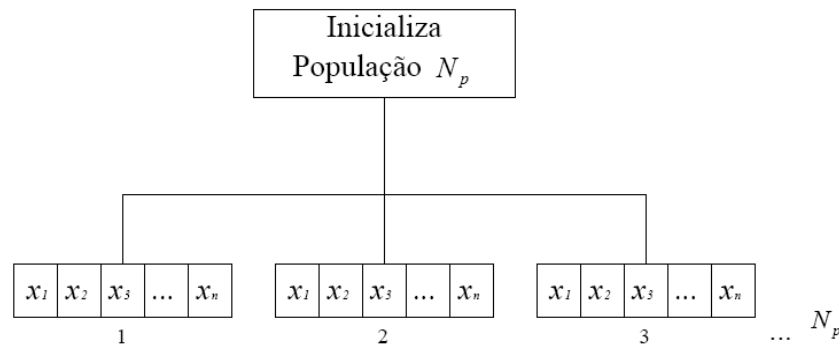


Figura 1.26 – Representação da População e seus Indivíduos (Cheung, 2007)

A representação, binária ou real, dos parâmetros na forma de cromossomo é a primeira etapa para a solução de qualquer problema por meio de algoritmos genéticos.

Para problemas com uma variável contínua a determinação do número de bits (m) para representar seus possíveis valores depende dos limites inferior (b) e superior (c) do intervalo de valores que essa variável pode assumir, no domínio do problema, bem como da precisão que a solução vai requerer, dada pelo parâmetro k . Isso é feito determinando-se o número inteiro m que satisfaz a seguinte equação:

$$2^{m-1} \leq (c-b) \times 10^k \leq 2^m - 1 \quad (1.47)$$

Cheung (2007) apresenta, como ilustração, um exemplo realizado por Castilho (2003) para a codificação binária com variáveis contínuas, considerando um problema envolvendo três variáveis (x_1, x_2 , e x_3) com valores no intervalo $[-1,0 \ 2,0]$, considerando uma precisão 2. Considerando esses parâmetros e utilizando a equação (1.47), o valor encontrado para m é 9. Isso quer dizer que cada uma das variáveis será representada no cromossomo por uma cadeia de 9 bits. Supondo-se que uma possível solução inicial, gerada randomicamente, seja:

$$S_1 = 100001011 \quad 101110101 \quad 000111110$$

cada uma das variáveis podem ser identificadas pelos seguintes valores:

$$X_1 = 100001011 \quad X_2 = 101110101 \quad X_3 = 000111110$$

ao término do algoritmo genético, a solução está codificada em binário. A decodificação do valor binário de uma variável para o correspondente valor decimal, num intervalo $[b,c]$, é dada pela equação:

$$x = b + (c - b) \frac{b_{10}}{2^m - 1} \quad (1.48)$$

onde:

b_{10} = número decimal referente à cadeia de bits e

m = tamanho da cadeia de bits.

Determinando-se o valor decimal de cada uma das variáveis (x_1 , x_2 , e x_3) e substituindo-as na equação (1.48), tem-se a representação decimal do cromossomo S:

$$S = 0,57; 1,19; -0,64$$

A representação de números reais em forma binária possui limitações com relação à precisão. Já quando as variáveis possuem a forma discreta, a forma binária torna-se adequada (Cheung,2007).

Segundo Castilho (2003), a representação de um cromossomo utilizando números reais é mais facilmente entendida pelo ser humano do que aquela usando uma cadeia de bits. Além disso, a representação usando números reais requer menos memória de computador. Outra vantagem da representação real é a sua versatilidade quando da criação de novos operadores e variações dos operadores existentes.

Após a geração dos cromossomos, o AG passa pelo processo de seleção. Nesse processo, os indivíduos com melhor aptidão têm maior probabilidade de serem escolhidos para reprodução ou cruzamento. Em contrapartida, os indivíduos com baixa aptidão podem não ser considerados para reprodução. O objetivo desse processo de seleção é escolher os indivíduos que servirão de base (pais) para o processo de reprodução.

A avaliação da população é realizada pela função de aptidão (função objetivo). Uma função-objetivo é uma função contínua, discreta ou mista que precisa ser maximizada ou minimizada, considerando um número finito de restrições ou condições (Sierksma, 1996).

A função aptidão representa uma medida que avalia a qualidade de cada indivíduo na população durante o processo de evolução. Seu valor servirá como referência na classificação de cada uma das soluções, indicando a chance de alguns vetores-solução fazerem parte da população da próxima geração. A classificação pode ser feita através de uma ordenação das soluções de forma decrescente ou crescente em relação às suas aptidões, representando, respectivamente, um problema de maximização ou minimização.

Holland (1975) propôs um método denominado seleção proporcional ou roda roleta, que permite determinar a probabilidade de seleção para cada cromossomo proporcionalmente ao seu valor de aptidão. Para cada cromossomo k , cuja avaliação é f_k , a probabilidade de seleção p_k pode ser calculada conforme a equação:

$$p_k = \frac{f_k}{\sum_{k=1}^{S_p} f_k} \quad (1.49)$$

A desvantagem do método é possuir uma alta variância, podendo levar a um grande número de cópias de um bom cromossomo, diminuindo a variabilidade da população.

Quando os indivíduos pertencentes à população possuem valores de aptidão muito próximos entre si, a possibilidade de se encontrar uma solução ruim na próxima geração é maior. Nesse caso, Cheung (2007) sugere que deve-se buscar outro procedimento de seleção, como, por exemplo, a seleção por torneio ou ainda aplicar algum procedimento de parametrização como o dado pela equação:

$$f_k = m_{\min} + (m_{\max} - m_{\min}) \left(\frac{S_p - k}{S_p - 1} \right) \quad (1.50)$$

onde:

k = índice do cromossomo na população em ordem decrescente do valor da função-objetivo

f_m = número de filhos esperados do cromossomo

$(m_{\max} - m_{\min})$ = pressão da seleção,

$$1 \leq m_{\max} \leq 2 \quad (1.51)$$

$$m_{\max} + m_{\min} = 2$$

Quando houver restrições impostas à função-objetivo, deve-se atribuir aptidão zero aos cromossomos que não satisfazem as restrições (infectíveis), essa atribuição caracteriza o método das restrições. Todavia, cromossomos infectíveis podem estar próximos das regiões factíveis e conter informações importantes para gerar filhos factíveis na geração futura. Dessa forma pode-se, apenas penalizar a aptidão de tais cromossomos, ao invés de zerá-la. Para tal, utiliza-se uma função de penalização $H_j(x)$, que define o quanto a solução viola a restrição j , ou seja, quão distante o cromossomo infectível está da região factível.

O problema de otimização (maximização ou minimização) torna-se irrestrito pela soma da antiga função-objetivo com o termo de penalização, isto é:

$$g(x) = f(x) + \lambda \sum_{j=1}^m H_j(x) \quad (1.52)$$

Os AGs são constituídos por operadores genéticos que permitem mecanismos de buscas que exploram regiões desconhecidas no espaço de investigação estudada. Os operadores genéticos empregados são o *crossover* (cruzamento) e a mutação. Esses operadores têm a função de melhorar os resultados, no momento da reprodução dos cromossomos e são responsáveis pela evolução dos AGs. De acordo com Goldberg (1989), informações relativas a solução ótima podem ser perdidas no processo de iteração, os operadores genéticos fazem com que essas informações sejam novamente inseridas no processo de iterações.

O operador de cruzamento, também conhecido como recombinação ou *crossover*, é aplicado em pares de cromossomos extraídos da população (pais) para gerar seus descendentes (filhos). A probabilidade de cruzamento deve ser igual para cada par, em geral entre 0,6 a 0,9 (Dejong, 1975 apud Cheung, 2007). Uma taxa de recombinação muito alta pode implicar na perda de tempo computacional.

A mutação é necessária para a introdução e manutenção da diversidade genética entre os novos indivíduos na população. Esse operador fornece meios para

que os novos indivíduos sejam inseridos na população, aumentando assim a abrangência do espaço de busca com intuito de obter a solução ótima.

Uma informação importante que deve ser fornecida ao se trabalhar com AGs é o critério de parada. O critério de parada deve ser definido conforme for a complexidade do estudo. Em geral, são consideradas duas condições: o número máximo de gerações permitido e/ou a convergência. A população final (solução do problema) é obtida quando uma das condições é satisfeita. A convergência pode ser estabelecida a partir da definição de um número de gerações (iterações) máximas a serem avaliadas. Estabelecer um número de iterações pode garantir que o algoritmo não seja executado por um tempo muito longo, além do tempo realmente necessário para a obtenção da solução esperada. Outra forma de definir a convergência é estabelecer um valor de aproximação da aptidão com o valor esperado. Esse limite entre o valor esperado e o valor de parada deve ser definido pelo usuário.

1.6.4 Análise de Resíduos e Interpretação da Estimativa

Depois de se obter a estimativa dos parâmetros é necessário saber se o modelo ajusta ou não os dados experimentais. Para tal, pode-se analisar os erros de medida tomando-se por base os resíduos do modelo (r_i). Caso os resíduos sejam grandes ou apresentam um comportamento não aleatório (erros sistemáticos), o modelo não ajusta os dados e deve ser rejeitado (Bard, 1974), ou pelo menos corrigido para incluir os efeitos observados nos resíduos (Finsterle e Persoff, 1997 apud Velloso, 2000).

Por outro lado, mesmo que o modelo ajuste bem os dados, é necessário avaliar os parâmetros estimados, uma vez que, podem ser altamente imprecisos devido à correlação que possa existir entre eles. A matriz de covariância dos parâmetros estimados pode ser analisada para obter os coeficientes de correlação.

1.6.4.1 Análise de Resíduos

O resíduo é dado pela soma do erro no modelo e do erro nos dados.

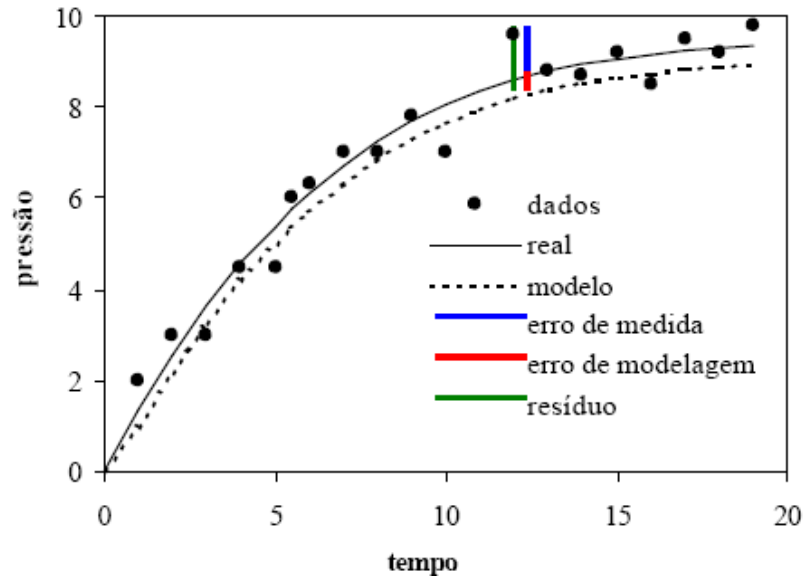


Figura 1.27 – Definição de Resíduo (Velloso, 2000)

Em ambos os erros (dados e modelagem) são compostos por um erro aleatório (ε) e outro sistemático (b). Tanto o erro nos dados quanto o erro de modelagem têm um componente sistemático, b , e um erro aleatório, ε :

$$r_i = y_i^*(p) = e_{di} + e_{mi} = (b_d + \varepsilon_d) + (b_m + \varepsilon_m) \quad (1.53)$$

onde:

ε_d é o erro nos dados

ε_m é o erro na modelagem.

Nos casos em que se possa garantir uma correta calibração dos equipamentos, os erros aleatórios de modelagem, em geral, são pequenos devidos a arredondamentos ou oscilações numéricas e podem ser desprezados ($\varepsilon_{mi} \cong 0$), o mesmo ocorre com os erros sistemáticos das medidas ($b_{di} \cong 0$).

Lembrando que a estimativa de parâmetros é baseada na hipótese de que o modelo matemático descreve o mais fielmente possível o sistema real, sendo este representado por dados pontuais modificados por ruídos de medida, pode-se considerar, ao menos inicialmente, que os erros sistemáticos de modelagem (b_{mi})

são nulos e que, então, as características estatísticas dos resíduos devem ser ao menos similares às características dos erros aleatórios das medidas (ε_{di}).

Logo, na retroanálise, a distribuição final dos resíduos deve ser consistente com a distribuição dos erros aleatórios de medida, ε_d , e a consideração inicial acerca da ausência de erros sistemáticos deve ser avaliada, verificando se o sistema verdadeiro é corretamente identificado pelo modelo (Finsterle e Persoff, 1997).

Uma hipótese sobre a distribuição dos erros de medida deve ser feita para comparar os resíduos finais com os erros aleatórios de medidas. Uma hipótese admissível sobre os erros de medida é que esses erros são variáveis aleatórias não correlacionadas, normalmente distribuídas, com média nula (Velloso, 2000).

Essas variáveis aleatórias podem ser resumidas em uma matriz de covariância C_y . Observa-se que somente a magnitude relativa dos elementos da matriz de covariância é relevante, logo pode-se introduzir um fator adimensional σ_0^2 e escrever:

$$C_y = \sigma_0^2 V_y \quad (1.54)$$

onde:

V_y é uma matriz positiva definida. Essa matriz pode ser escolhida como uma matriz identidade, caso todas as observações forem do mesmo tipo, de mesma qualidade e não correlacionadas; e

σ_0^2 é um escalar denominado variância prévia do erro.

A variância final do erro, s_0^2 , pode ser calculada pela equação da estatística que estabelece a variância dos erros (equação (1.55)), cuja dedução completa pode ser encontrada em Bard (1974):

$$s_0^2 = \frac{r^T V_y r}{m - n_p} \quad (1.55)$$

De acordo com a equação (1.55), a variância dos erros é estimada dividindo a soma dos quadrados dos resíduos pelo número de graus de liberdade, que é o

número de observações, m , menos o número de parâmetros desconhecidos, n_p , (Bard, 1974).

De acordo com Finsterle e Persoff (1997 apud Velloso, 2000), se os erros sistemáticos não prevalecem e os erros de medidas estão apropriadamente descritos por C_y , a razão s_0^2/σ_0^2 , será próximo de 1. Se σ_0^2 for muito menor que s_0^2 , provavelmente, modelo matemático não esteja representando bem o experimento ou então a hipótese sobre os erros de medida não foram muito realistas (Finsterle, 1999). A comparação entre as variâncias prévia, σ_0^2 , e estimada (ou final), s_0^2 , fornece uma medida do ajuste do modelo.

A análise dos resíduos finais também pode avaliar se a hipótese de normalidade é justificada. A violação dessa hipótese pode indicar falha na modelagem matemática. Uma maneira de se avaliar a distribuição dos erros pode ser a plotagem dos resíduos finais (Velloso, 2000).

1.6.4.2 Interpretação das Estimativas

Um bom ajuste não indica, obrigatoriamente, que a estimativa dos parâmetros seja aceitável. Alta incerteza nas estimativas pode ser causada por baixa sensibilidade ou da alta correlação entre parâmetros. Por esse motivo, além de se verificar a adequação do modelo utilizado através da análise dos resíduos, como visto no item 1.6.4.1, deve-se procurar determinar a incerteza nos parâmetros estimados.

Bard (1974) afirma que devido a característica aleatória dos erros nas medidas, o valor de p que melhor ajusta uma série de medidas difere do valor que melhor ajusta outra série de medidas. O que se espera é obter uma estimativa dos parâmetros onde não somente os dados estejam bem ajustados, como também a variação entre as séries de medidas não seja excessiva.

Para que isso ocorra é necessário que os parâmetros estimados apresentem baixos desvios padrão e não sejam correlacionados.

Os resultados do problema inverso podem ser avaliados a partir da interpretação da matriz de covariância dos parâmetros estimados, C_p (Bard, 1974, Beck e Arnold, 1977). Para o método dos mínimos quadrados a matriz de covariância dos parâmetros estimados é dada por:

$$C_p = \sigma_0^2 [J^T J]^{-1} \quad (1.56)$$

onde:

σ_0 é o desvio padrão das medidas; e

J é a matriz de sensibilidade (equação (1.42)).

Em geral, a matriz de covariância quando calculada a partir de um conjunto de dados pode ser considerada como uma estimativa grosseira. No entanto, mesmo uma aproximação grosseira da matriz de covariância pode ajudar a avaliar a confiança das estimativas (Bard, 1974).

Os elementos da diagonal de C_p contém as variâncias dos parâmetros estimados:

$$\sigma_{p_i}^2 = C_{p_{ii}} \quad (1.57)$$

A variância ($\sigma_{p_i}^2$) que é o quadrado do desvio padrão (σ_{p_i}) é uma medida de quão incerto é o parâmetro. Da equação (1.57) tem-se que a incerteza da estimativa é inversamente proporcional ao valor absoluto do coeficiente de sensibilidade.

Os elementos que não pertencem a diagonal de C_p são as covariâncias. A medida da covariância pode ser dada por um coeficiente adimensional, chamado coeficiente de correlação, definido por:

$$\rho_{ij} = \frac{C_{p_{ij}}}{\sqrt{C_{p_{ii}} C_{p_{jj}}}} \quad (1.58)$$

O coeficiente de correlação pode variar entre -1 e 1. Quando não há correlação entre os parâmetros, o coeficiente é 0. Valores maiores do que 0,90 indica alta correlação (Beck e Arnold, 1977), isto é, os dois parâmetros não podem ser determinados independentemente. Se dois parâmetros são correlacionados, uma resposta similar do modelo pode ser obtida pelo acréscimo de um parâmetro e decréscimo do outro. Numa retroanálise envolvendo três ou mais parâmetros, os coeficientes de correlação são, geralmente, difíceis de interpretar do ponto de vista físico por causa das dependências indiretas dos parâmetros (Velloso, 2000).

2 MODELOS APLICADOS A DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLOS NÃO SATURADOS

Várias técnicas de ensaios de campo e de laboratório foram propostas nas últimas décadas para determinação de parâmetros de solos não saturados. A maioria destes métodos é, entretanto, pouco utilizada na prática. A heterogeneidade dos materiais, a necessidade de equipamentos não convencionais para realização dos ensaios, o elevado tempo exigido para sua execução e a necessidade de técnicos bem preparados, restringem a obtenção corrente destes parâmetros. Face a este problema vários pesquisadores propuseram modelos matemáticos não só para reprodução das relações entre parâmetros hidráulicos, mas também para estimativa da parcela da resistência devido a sucção. Estes modelos são definidos de forma empírica e/ou semi-empírica, com base em curvas de regressão de resultados experimentais.

2.1 Curva Característica

Várias propostas foram sugeridas na literatura para simular matematicamente a curva característica. Algumas equações são baseadas no pressuposto de que a forma de a curvatura é função da distribuição de poros (Gardner, 1958; Brooks e Corey, 1964; Farrel e Larson, 1972; Roger e Hornberger, 1978; Van Genuchten 1980; Williams et al, 1983; Saxton et al, 1986; Haverkamp e Parlange, 1986; Mckee e Bumb,1987; Fredlund e Xing,1994). Com isso assume-se que os meniscos apresentam uma curvatura esférica e, portanto os vazios têm forma cilíndrica. Os parâmetros para estas equações são calibrados através de regressão linear de dados experimentais.

Outras propostas assumem que a curva característica possa ser estimada diretamente a partir da granulometria e das propriedades físicas dos solos, como as sugeridas por Ghosh (1980) e Rawls e Brakensiek (1989). Estas propostas são simples e convenientes para uso prático. Entretanto, são substancialmente incorretas visto que desprezam a influência do nível de tensões, estrutura do solo, teor de umidade e mineralogia.

Após o exame das varias proposições matemáticas para reprodução da curva característica, Leong e Rahardjo (1997) observaram que, na grande maioria dos casos, as equações derivavam da seguinte equação genérica:

$$a_1 \Theta^{b_1} + a_2 \exp(a_3 \Theta^{b_1}) = a_4 \psi^{b_2} + a_5 \exp(a_6 \psi^{b_2}) + a_7 \quad (2.1)$$

onde

a_i e b_i são constantes,

Θ o teor volumétrico normalizado; isto é:

$$\Theta = \frac{(\theta_w - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (2.2)$$

onde:

θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de umidade volumétrica residual e saturada.

Adicionalmente, comparando resultados de ajuste dos modelos de Fredlund e Xing (1994) e van Genuchten (1980), variando o número de dados experimentais disponíveis, Leong e Rahardjo (1997) observaram que um bom ajuste não depende do número de dados experimentais, mas sim da sua abrangência; isto é, os dados devem ser representativos de toda amplitude da curva característica. A inexistência de dados experimentais na região correspondente a altos valores de sucção ($\theta < \theta_r$) faz com que os erros nesta região sejam acentuados.

As propostas acima citadas estão resumidas na Tabela 2.1 e destinam-se exclusivamente a curvas unimodais; isto é, em formato de S. No caso de curvas bimodais (tipo (c) na Figura 1.7), Gitirana Jr. e Fredlund (2004) propuseram uma equação de ajuste que requer a definição de oito parâmetros. Segundo os autores, tais parâmetros têm significados similares aos do modelo original de Fredlund e Xing (1994). As equações deste modelo estão incluídas na Tabela 2.1.

Gerscovich (2001) e Gerscovich e Sayão (2002) analisaram a aplicabilidade de 12 proposições unimodais em 11 solos brasileiros e concluíram que os melhores ajustes eram obtidos com os modelos de Gardner (1958), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994). Gerscovich et al (2004) avaliaram a utilização de um método numérico, utilizando algoritmo genético por meio de um programa comercial

acoplado a uma planilha eletrônica, para a determinação dos parâmetros hidráulicos ao longo de um perfil de solo constituído por uma camada sedimentar e outra residual, adotando os modelos de Gardner (1958) e de Fredlund e Xing (1994). Uma descrição mais detalhada desses modelos está apresentada a seguir, visto que serão abordados no presente trabalho.

A metodologia de transformação da curva característica, sugerida por Camapum de Carvalho e Leroueil (2000), também será avaliada neste trabalho e será, portanto, apresentada a seguir.

2.1.1 Proposta de Gardner (1958)

Gardner (1958) foi um dos pioneiros em estabelecer uma equação para relacionar a sucção e teor de umidade:

$$\Theta = \frac{(\theta_w - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} = \frac{1}{1 + \alpha \psi^\eta} \quad (2.3)$$

onde:

α (kPa⁻¹) e η são parâmetros de ajuste

Θ o teor volumétrico normalizado.

O parâmetro α é associado à pressão de entrada de ar e η à inclinação da tangente no ponto de inflexão da curva característica. Dado que o teor de umidade volumétrico saturado é sempre conhecido, a equação de Gardner pode ser observada como tendo 03 incógnitas, a saber: α , η e θ_r . Leong e Rahardjo (1997) recomendam que esta equação seja reescrita de forma a tornar η independente da unidade; isto é:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^\eta} \quad (2.4)$$

Neste caso α representa o valor da sucção correspondente ao teor de umidade $(\theta_r + \theta_s)/2$ e η um fator dependente da inclinação da tangente à curva.

2.1.2 Proposta de van Genuchten (1980)

van Genuchten (1980) estendeu a equação de Gardner introduzindo mais um parâmetro (m), como mostra a equação (2.5). Com isso obteve-se mais flexibilidade no ajuste. O autor recomenda que m pode ser relacionado a η conforme a equação (2.6).

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + \alpha \psi^\eta} \right]^m \quad (2.5)$$

$$m = 1 - \frac{1}{\eta} \quad (2.6)$$

Similarmente, ao tratamento dado à proposta de Gardner, Leong e Rahardjo (1997) indicam que a equação pode ser escrita de forma mais atrativa, com 04 variáveis, a saber: α , η , m e θ_r , tornando os parâmetros de ajuste independente de unidade, isto é:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{ 1 + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^\eta \right\}^m} \quad (2.7)$$

De acordo com Vivian (2008), Galipolli et al (2003) sugeriram uma correção da equação de van Genuchten (1980), para modelar a curva característica em um solo não saturado deformável, considerando a influência do volume específico do solo (equação (1.17)). O parâmetro α é calculado conforme a equação:

$$\alpha = \phi(v - 1)^\psi \quad (2.8)$$

2.1.3 Proposta de Fredlund e Xing (1994),

A proposta apresentada por Fredlund e Xing (1994), mostrada na equação (2.9), baseia-se na existência de uma similaridade entre a geometria dos poros e curva granulométrica.

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left[\ln[e + (\psi / \alpha)^\eta] \right]^m} \quad (2.9)$$

sendo:

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi / \psi_r)}{\ln(1 + \psi_o / \psi_r)} \right] \quad (2.10)$$

onde:

α (kPa), m e η = parâmetros de ajuste;

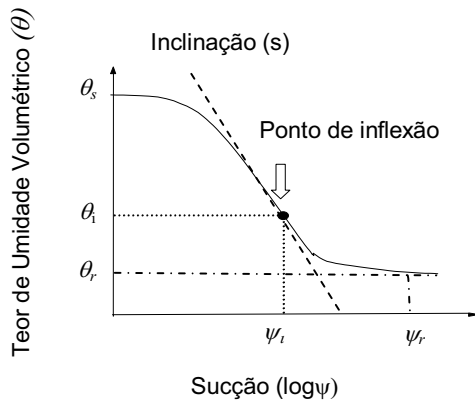
e = base logaritmo neperiano ($e = 2,718$);

ψ_r sucção associada ao teor de umidade residual;

ψ_o a sucção correspondente a condição de solo seco (sugerido adotar 10^6 kPa).

O primeiro termo da equação representa um fator de correção para ajustar os resultados para sucções elevadas. Esta correção direciona a curva para uma sucção de aproximadamente 10^6 kPa. Nesta equação quando $\theta = \theta_s$ a sucção é nula e para $\theta = 0$ seu valor tende para infinito. O parâmetro α (em unidade kPa) está associado a sucção de entrada de ar e o parâmetro η controla a inclinação da curva.

A determinação desses parâmetros (α , m e η) e, em alguns casos ψ_r , é feita por um processo de otimização de forma a obter o melhor ajuste dos resultados experimentais. Entretanto, para uma primeira estimativa dos parâmetros da equação, os autores sugeriram o uso de método gráfico como mostra a Figura 2.1. Este método baseia-se na inclinação da tangente, no ponto de inflexão da curva (s) e na definição do ponto correspondente a sucção residual; isto é:



$$\alpha = \psi_i \quad (2.11)$$

$$\eta = \frac{1,31^{m+1}}{mC(\psi)} 3,72s^* \quad (2.12)$$

$$m = 3,67 \ln \left[\frac{\theta_s C(\psi)}{\theta_i} \right] \quad (2.13)$$

$$s^* = \frac{s}{\theta_s} - \frac{\psi_i}{1,31^m (\psi_i - \psi_r) \ln \left[1 + \frac{\psi_0}{\psi_r} \right]} \quad (2.14)$$

$$s = \frac{\theta_i}{\log(\psi_r - \psi_i)} \quad (2.15)$$

Figura 2.1 – Procedimento Gráfico para Estimar os Parâmetros α , m e η

Fredlund e Xing (1994), também, concordaram que, em muitos casos, não se dispõe de dados confiáveis em relação ao teor de umidade residual (θ_r). Com isso, recomendaram o uso de outra proposta, mostrada na equação (2.16), onde são necessários ajustar 04 parâmetros: α , m , η e θ_r .

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[\ln \left[e + (\psi / \alpha)^\eta \right] \right]^m} \quad (2.16)$$

Analisando a proposta de Fredlund e Xing (1994), Leong e Rahardjo (1997) afirmaram que o fator de correção $C(\psi)$, mostrado na equação (2.10), foi uma maneira usada pelos autores para anular o teor de umidade para altos valores de sucção (10^6). Considerando não haver base teórica na definição deste parâmetro, Leong e Rahardjo recomendam 2 outras maneiras de se corrigir a equação; a saber:

$$C(\psi) = \frac{\ln \left(2 - \frac{\psi}{A} \right)^B}{\ln 2} \quad (2.17)$$

ou

$$C(\psi) = \left[1 - \left(\frac{\psi}{10^6} \right) \right]^B \quad (2.18)$$

onde

A e B são constantes

Adicionalmente, Leong e Rahardjo (1997), verificaram que o número total de pontos experimentais, utilizados na estimativa dos parâmetros dos modelos, tem pouca influência na qualidade da modelagem. Os autores, entretanto, ressaltaram a necessidade dos dados serem representativos de toda amplitude da curva característica. A inexistência de dados experimentais na região correspondente a altos valores de sucção ($\theta < \theta_r$) faz com que os erros nesta região sejam acentuados.

É interessante comentar que, face à hipótese de similaridade entre a curva característica e diâmetro de vazios, a equação (2.19) pode ser estendida para ajustar a distribuição granulométrica. Neste caso, o fator de correção ajusta a curva para diâmetros de partícula inferiores a 10^5 mm (Murray et al, 1997).

$$P = C(d) \frac{100}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha_s} \right)^{\eta_s} \right] \right]^m} \quad (2.19)$$

onde:

P= porcentagem que passa;

d = diâmetro das partículas;

α_s = parâmetro que aproxima a dimensão da maior partícula;

η_s = parâmetro relacionado ao grau de uniformidade da curva;

m_s = parâmetro relacionado com as partículas menores; e

C(d) = fator de correção

2.1.4 Proposta de Camapum de Carvalho e Leroueil (2000,2004).

Camapum de Carvalho e Leroueil (2000, 2004), buscando integrar os aspectos físicos (índice de vazios) e químicos (interação água-mineral: teor de umidade) desenvolveram um modelo de transformação da curva característica em função do índice de vazios. O modelo proposto é adequado para solos com uma mesma distribuição de poros.

Inicialmente os autores propuseram a não adoção do sistema internacional de pressão e, com isso, ao invés de se adotar a unidade kPa, utilizar o sistema pF em que a sucção é definida pelo logaritmo da poro-pressão em centímetros de coluna de água (Eq. (2.20)). Esta abordagem foi motivada pelo fato das curvas encontrarem um bom ajuste quando apresentadas em escala logarítmica.

$$pF = \log \psi(cmH_2O) \quad (2.20)$$

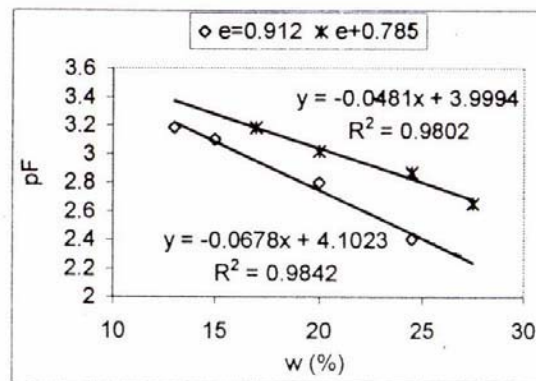
Os autores verificaram que não ocorre variação do índice de vazios no intervalo entre a sucção de entrada de ar e a sucção residual. Neste trecho, a variação do grau de saturação é aproximadamente linear. Assim sendo, considerando que a densidade dos grãos (G) é constante e que, para um mesmo índice de vazios, a relação G/e também é constante, tem-se:

$$\frac{G}{e} = const \Rightarrow S = \omega \left(\frac{G}{e} \right) \quad (2.21)$$

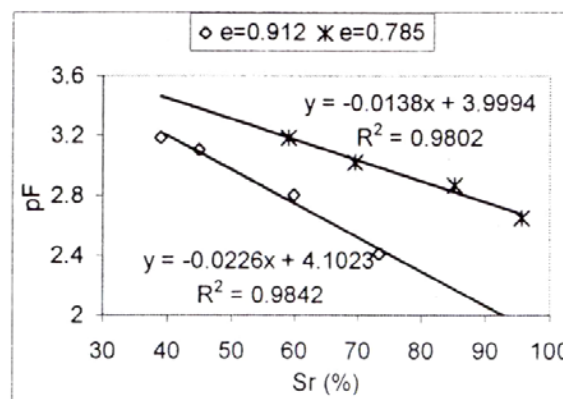
onde:

ω = teor de umidade gravimétrico

Com isso, quando se trabalha com curvas características definidas em termos de grau de saturação ao invés do teor de umidade está-se incorporando o índice de vazios. Adicionalmente os autores constataram que a relação entre as curvas características baseada no teor de umidade (pF x ω) e no grau de saturação (pF x S) seguem comportamentos semelhantes, deslocados apenas por um fator multiplicativo no coeficiente angular, como mostra a Figura 2.2.



(a) Sucção vs teor de umidade gravimetrico



(b) Sucção vs grau de saturação

Figura 2.2 – Curva Característica para Diferentes Índices de Vazios (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2000).

A alternativa de se usar a curva característica em função do grau de saturação é extremamente vantajosa, dado que se incorpora o índice de vazios, conforme equação (2.21); visto que:

a) quando se impõe uma variação no estado de tensões, o solo varia de volume (Δe) e, conseqüentemente, sofre mudanças em seu grau de saturação (ΔS). Nestes casos, dever-se-iam usar diferentes curvas características;

b) quando se segue uma trajetória de secagem ou umedecimento, o solo pode sofrer variações em seu índice de vazios, mas, para um determinado índice de vazios, a curva é única, desde que não ocorram mudanças estruturais (quebra de cimentação, por exemplo)

A partir destes dados, foi proposta transformação da curva pF x ω para pF x S, definida de acordo com a equação:

$$pF = a_i S + b_i \quad (2.22)$$

onde:

a_i = coeficiente angular de aumento de pF em função da saturação (S);

b_i = pressão de entrada de ar.

Multiplicando-se a equação (2.22) pelo índice de vazios inicial (e_i), tem-se:

$$e_i pF = e_i a_i S + e_i b_i = a_n S + b_k \quad (2.23)$$

ou, em termos de teor de umidade volumétrico:

$$e_i pF = a_i G \omega + e_i b_i = a_k \omega + b_k \quad (2.24)$$

Uma vez que a entrada de ar (b_i) aumenta com a redução do índice de vazios, pode-se admitir que b_k ($= e_i \times b_i$) é constante e a equação (2.24) pode ser reescrita como:

$$e_i pF = a_n S + const . \quad (2.25)$$

Assim sendo, independente do índice de vazios, a curva característica transformada é única para cada solo, conforme mostra a Figura 2.3. Do ponto de vista prático, torna-se possível conhecer a curva característica para diferentes valores de índice de vazios, sem que haja necessidade de determinação experimental.

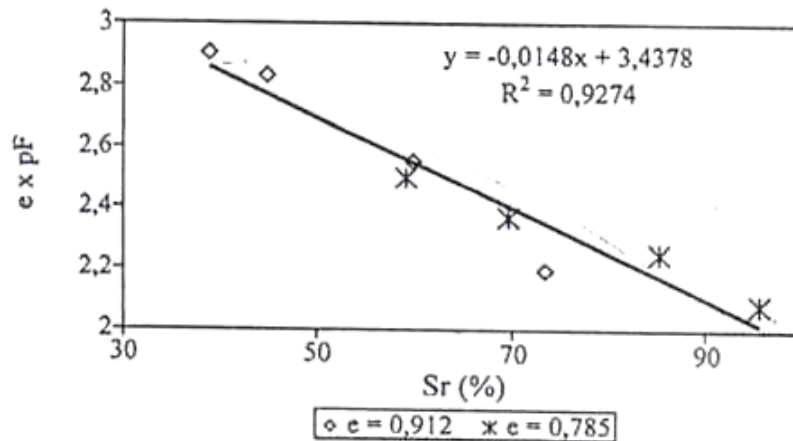


Figura 2.3 – Curva Transformada (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004).

Nos trechos onde a sucção é menor que o valor de entrada de ar e maior que a saturação residual, fora do domínio da equação, os autores sugerem a aplicação da equação apresentada por Seker (1983):

$$pF = \psi_0 \left(\frac{S_r - 1}{S_r} \right)^{\psi_1} \quad (2.26)$$

onde:

ψ_0 e ψ_1 são parâmetros diretamente ligados a natureza do solo e obtidas a partir dos parâmetros a_i e b_i (equação (2.23) e podem ser determinados a partir da solução do seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} b_i &= -4\psi_0\psi_1 \\ a_i &= \psi_0 + 2\psi_0\psi_1 \end{aligned} \quad (2.27)$$

A Tabela 2.1 resume as equações e variáveis envolvidas nas propostas apresentadas na literatura e citadas neste trabalho.

Tabela 2.1 – Propostas para Modelagem da Curva Característica
(adaptado de Gerscovich, 2001 e Vivian, 2008)

Referência	Equação	Definição de Variáveis
Gardner (1858)	$\Theta = \frac{1}{1 + \alpha \psi^\eta}$	Θ = teor de umidade normalizado (2.28) $\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$; θ , θ_r e θ_s , respectivamente os teores de umidade volumétrico, residual e saturado. η e α = parâmetros de ajuste
Brooks e Corey (1964)	$\Theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$	Θ = teor de umidade normalizado: (2.29) λ = índice de distribuição de diâmetro de vazios
Farrel e Larson (1972)	$\psi = \psi_b e^{\alpha(1-\Theta)}$	α = parâmetro de ajuste
Roger e Hornberger (1978)	$\psi = a(S_s - b)(S_s - 1)$	$S_s = \theta / \theta_s$: (2.31) a e b = parâmetros de ajuste Correção do modelo de Brooks e Corey.(1964), na faixa de baixos valores de sucção
Van Genuchten (1980)	$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \psi)^n} \right]^m$	Θ = teor de umidade normalizado: (2.32) α , m e n = parâmetros de ajuste

Tabela 2.1 (cont.) – Propostas para Modelagem da Curva Característica
(adaptado de Gerscovich, 2001 e Vivian, 2008)

Referência	Equação	Definição de Variáveis
Gosh (1980)	$\psi = \psi_b \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-\beta}$ $\beta = 2,619 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{0,2822} (\lambda_4 + 0,7)^{0,0625} \lambda_4^{0,1250} \left(5,91 \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_3} + 1,1 \right)^{0,0625}$	θ_s = teor de umidade saturado (= porosidade) (2.33) λ_1 = porcentagem da fração areia λ_2 = porcentagem da fração silte λ_3 = porcentagem da fração argila $\lambda_4 = 6,2 \sqrt{\lambda_2 / \lambda_1} - 5,91 \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_3}$
Williams et al (1983)	$\ln \psi = a + b \ln \theta$	a e b = parâmetros de ajuste (2.34)
Saxton et al (1986)	$\psi = a\theta^b$	a e b = parâmetros de ajuste (2.35)
Haverkamp e Parlange (1986)	<p>Umedecimento:</p> $\theta = \frac{n}{1 + \lambda} \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \dots \psi > \psi_b$ $\theta = n \left[1 - \left(\frac{\lambda}{1 + \lambda} \right) \left(\frac{\psi}{\psi_b} \right) \right] \dots \psi^* \leq \psi \leq \psi_b$ $\theta = \theta_s \dots \psi \leq \psi_b^*$ <p>Secagem:</p> $\theta = n \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \left[1 - \frac{\psi_b}{\psi} \left(1 - \frac{\theta}{\theta_s} \right) \right] \dots \psi > \psi_b$ $\theta = \theta_s \dots \psi \leq \psi_b$	n = porosidade λ = parâmetro de ajuste θ_s = teor de umidade para condição de saturação ao natural (< porosidade) ψ_b^* = sucção de entrada de ar para a condição de umedecimento (adotado igual a ψ_b) (2.36) (2.37)

Tabela 2.1 (cont.) – Propostas para Modelagem da Curva Característica
(adaptado de Gerscovich, 2001 e Vivian, 2008)

Referência	Equação	Definição de Variáveis
McKee e Bumb (1987)	$\Theta = \frac{1}{1 + e^{(\psi-a)/b}}$	Θ = teor de umidade normalizado a e b = parâmetros de ajuste
Rawls e Brakensiek (1989)	$\Theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$ $\psi_b = e^{\left[\begin{array}{l} 5,3396738+0,1845038(C)-2,438394546(n)-0,00213853(C^2) - \\ 0,04356349(S)(n)-0,61745089(C)(n)+0,00143598(S^2)(n^2) - \\ 0,00855375(C^2)(n^2)-0,00001282(S^2)(C)+0,00895359(C)^2(n) - \\ 0,00072472(S^2)(n)+0,0000054(C^2)(S)+0,50028060(n^2)(C) \end{array} \right]}$ $\lambda = e^{\left[\begin{array}{l} -0,7842831+0,0177544(S)-1,062498(n)-0,000005304(S^2) - \\ 0,00273493(C^2)+1,11134946(n^2)-0,03088295(S)(n)+ \\ 0,00026587(S^2)(n^2)-0,00610522(C^2)(n^2) - \\ 0,00000235(S^2)(C)+0,00798746(C^2)(n)-0,00674491(n^2)(C) \end{array} \right]}$	ψ_b em cm H ₂ O n = porosidade (θ_s) C = porcentagem de argila (5%<C< 60%) S = porcentagem de areia (5%<S< 70%) $\theta_s = -0,018242 + 0,00087269(S) + 0,000513488(C) + 0,02939286(n) -$ $0,00015395(C^2) - 0,0010827(S)(n) - 0,00018233(C^2)(n^2) +$ $0,00030703(C^2)(n) - 0,0023584(n^2)(C)$
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = C_\psi \frac{\theta_s}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^m \right) \right]^m}$ $C_\psi = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln\left(1 + \frac{\psi_o}{\psi_r} \right)}$	a, m e n = parâmetros de ajuste e = base log neperiano (e=2,718) $\psi_o = 10^6$ kPa

Tabela 2.1 (cont.) – Propostas para Modelagem da Curva Característica
(adaptado de Gerscovich, 2001 e Vivian, 2008)

Referência	Equação	Definição de Variáveis
Aubertin et al (1998)	$S_r = S_c + S_a(1 - S_c)$ $S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^{-m} e^{\left[\frac{h_{co}}{\psi} \right]^2}$ $S_a = C_\psi \frac{a}{e^{1/3} \psi^{1/6}} \psi_{90}^{2/3} \quad C_\psi = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + \psi_o/\psi_r)}$	<p>a, h_{co} e m = parâmetros de ajuste</p> <p>h_{co} = 1 a 2,5ψ_b (cm H₂O)</p> <p>S_r = θ/θ_s:</p> <p>(2.41) a ≈ 0,006 (curva de dessaturação)</p> <p>ψ_o = 10⁷ cm H₂O</p> <p>ψ_r = 15x10³cm H₂O ⇔ θ_r</p> <p>e = índice de vazios</p>
Galipolli et al (2003)	$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^\eta} \right]^m$ $\alpha = \phi(\nu - 1)^\psi$	<p>ν = volume específico;</p> <p>(2.42) φ, ψ = constantes do solo</p>
Camapum de Carvalho e Leroueil (2000, 2004)	$epF = a_n S_r + b_k$ $a_n = e_i a_i$	<p>e = índice de vazios</p> <p>(2.43) pF = logaritmo da sucção (em cm H₂O)</p> <p>S_r = grau de saturação</p> <p>a_i e b_i = parâmetros de ajuste</p>

Tabela 2.1 (cont.) – Propostas para Modelagem da Curva Característica
(adaptado de Gerscovich, 2001 e Vivian, 2008)

Referência	Equação	Definição de Variáveis
Gitirana Jr e Fredlund (2004)	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b_1} \psi_{res_1}}} \right)^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{res_1} \psi_{b_2}}} \right)^{d_2}} + \frac{S_3 - S_4}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b_2} \psi_{res_2}}} \right)^{d_2}} + S_4$	$d_j = 2 \exp(1/\ln(\psi_{j+1}^a / \psi_j^a))$ <p>(2.44) $\psi_1^a = \psi_{b_1}; \psi_2^a = \psi_{res_1}; \psi_3^a = \psi_{b_2}; \psi_4^a = \psi_{res_2}; \psi_5^a = 10^6;$ $j = 1, 2, 3$</p>
	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b_1} \psi_{res_1}}} \right)^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{res_1} \psi_{b_2}}} \right)^{d_2}} + \frac{S_3 - S_4}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b_2} \psi_{res_2}}} \right)^{d_2}} + S_4$	$\theta_i = -(\lambda_{i-1} + \lambda_i)/2;$ <p>(2.45) $r_i = \tan((\lambda_{i-1} + \lambda_i)/2);$ $\lambda_i = \arctan\left\{ (S_i - S_{i+1}) / \left[\ln\left(\frac{\psi_{i+1}^a}{\psi_i^a} \right) \right] \right\};$ $\lambda_0 = 0;$ $S_1^a = 1; S_2^a = S_{res_1}; S_3^a = S_b; S_4^a = S_{res_2}; S_5^a = 0;$ $i = 1, 2, 3, 4$</p>

2.2 Envoltória de Resistência ao Cisalhamento

A envoltória de resistência sugerida por Fredlund et al (1978), reproduzida na equação (2.46), estabelece que um dado incremento de sucção resulta em um aumento na resistência do solo.

$$\tau = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2.46)$$

onde:

c' = intercepto coesivo do solo quando as duas variáveis de estado são nulas;

ϕ' = ângulo de atrito interno do solo

ϕ_b = ângulo de atrito interno do solo com respeito a mudanças em $(u_a - u_w)$;

Esta equação pode ser reescrita de forma análoga à equação do solo saturado ou considerando a parcela de sucção (τ_{us}) como um termo independente; isto é:

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2.47)$$

onde

c = intercepto coesivo, dado por:

$$c = c' + (u_w - u_a) \tan \phi^b \quad (2.48)$$

ou considerando como um termo independente:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \tau_{us} \quad (2.49)$$

onde:

τ_{us} = parcela da resistência devido a sucção, dada por:

$$\tau_{us} = (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.50)$$

Dado que ϕ^b varia com o nível de sucção (ψ), ambas as formas (Eq. (2.48) e Eq. (2.50)) de se avaliar a contribuição da parcela de sucção na resistência do solo saturado produzem funções não lineares.

Analogamente às propostas para reprodução da curva característica, alguns autores propuseram equações para representar esta não linearidade, as quais serão descritas a seguir.

2.2.1 Escario (1988)

Escario (1988) apud Carrillo (1993) verificou por meio de resultados de ensaios de cisalhamento direto, com controle de sucção, que a resistência aumenta com o aumento de sucção até um valor máximo, a partir do qual a resistência tende a diminuir. O autor propôs uma expressão matemática baseada na equação de uma elipse de grau 2,5, isto é:

$$(\tau_m + \tau_0)^{2,5} - (\tau_0 + \tau_b)^{2,5} = (\tau_0 + \tau_b)^{1,5} s_m \tan \phi' \quad (2.51)$$

Os parâmetros da equação (2.51) podem ser obtidos graficamente tendo como base as características geométricas da elipse, como mostra a Figura 2.4.

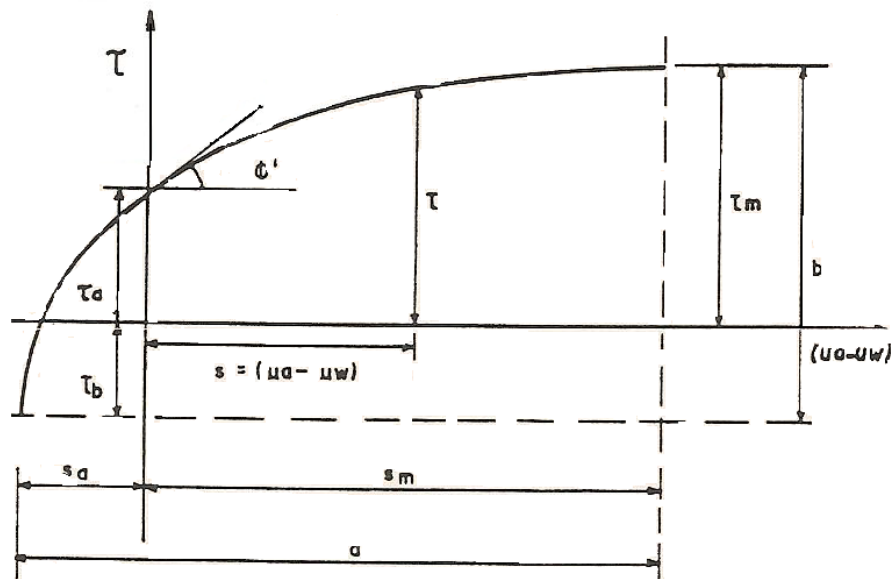


Figura 2.4 – Previsão da Resistência pela Equação da Elipse (Escario, 1988 apud Carrillo, 1995).

De acordo com Carrillo (1993), a curva obtida deve cumprir as seguintes condições:

- Na origem, a tangente é igual a ϕ' ;
- A curva atinge um valor máximo para um valor finito de sucção.

2.2.2 de Campos e Carrillo (1995)

de Campos e Carrillo (1995) analisando resultados de solos coluvionares e sedimentares do Rio de Janeiro, observaram que a proposta feita por Escario (1988) não se ajustava adequadamente às curvas obtidas nos ensaios realizados. Os diagramas tensão cisalhante (τ) vs deslocamento horizontal (δ_h) indicavam ausência de picos e um comportamento de enrijecimento, como mostra a Figura 2.5.

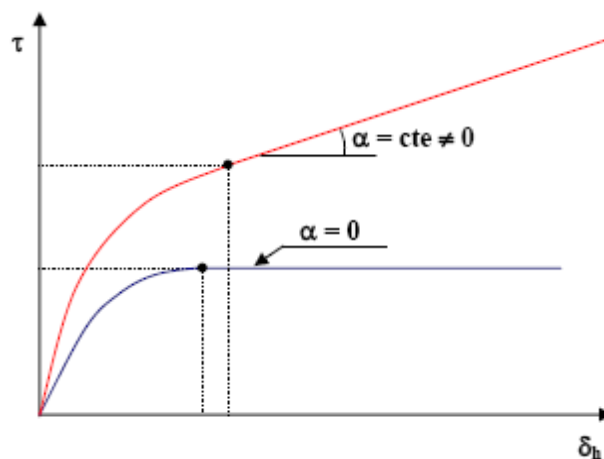


Figura 2.5 – Previsão da Resistência pela Equação da Elipse (Escario, 1988 apud Carrillo, 1995).

Os autores, então, optaram por estabelecer como critério de ruptura a tensão cisalhante para a inclinação da curva ($\alpha = \Delta\tau / \Delta\delta_h$) constante e sugeriram que o ajuste da curva $\tau \times \psi$ fosse feito por meio de regressão linear utilizando uma função polinomial de 4º grau; isto é:

$$\tau = c' + a\psi + b\psi^2 + c\psi^3 + d\psi^4 \quad (2.52)$$

onde:

c' = coesão efetiva do solo;

$\psi = u_a - u_w$

a, b, c e d são parâmetros de ajuste da equação polinomial.

2.2.3 Öberg e Sällfors (1995, 1997)

Öberg e Sällfors (1995, 1997) apontaram que a principal dificuldade no tratamento de solos não saturados era definir a influência da contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento do solo. Com base na proposta de Bishop (1959) os autores assumiram que o parâmetro χ reflete a fração da área dos poros ocupada pela água; isto é A_w/A_{total} . Assim sendo, a resistência pôde ser expressa por:

$$\tau = c' + \left(\sigma - \frac{A_w}{A_{\text{tot}}} u_w - \frac{A_a}{A_{\text{tot}}} u_a \right) \tan \phi' \quad (2.53)$$

onde:

A_w / A_{tot} = fração da área dos poros ocupada pela água

A_a / A_{tot} = fração da área dos poros ocupada pelo ar

No caso de solos ideais, formado por partículas esféricas, as frações de área dos poros (água e ar) podem ser substituídas pelo grau de saturação ($S = A_w / A_{\text{tot}}$) e por $(1-S)$. Assim sendo:

$$\tau = c' + [\sigma - S u_w - (1-S) u_a] \tan \phi' \quad (2.54)$$

ou

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (S(u_a - u_w)) \tan \phi' \quad (2.55)$$

Assim sendo

$$\tau_{us} = S(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (2.56)$$

Resultados experimentais, entretanto, mostraram que a hipótese de $S = A_w / A_{\text{tot}}$ não é totalmente válida. Quando $S < 50$, o grau de saturação (S) é inferior a A_w / A_{tot} . Os autores recomendam, portanto, que o modelo (Eq. (2.56)) seja aplicado apenas a solos não coesivos e para $S > 50\%$.

Solos coesivos possuem estrutura complexa, com micro e macroporos, que não permite estabelecer uma relação linear entre grau de saturação e fração da área dos poros ocupada pela água.

Nesta proposta, o incremento na resistência devido à sucção é calculado a partir da curva característica, definida em termos do grau de saturação vs sucção, e dos parâmetros de resistência (c' e ϕ').

Esta proposta é uma alternativa muito atraente para uso prático, visto que requer somente a determinação experimental da curva característica e envoltória de resistência do solo saturado, eliminando-se a necessidade de realização de ensaios em solos não saturados. No campo, mede-se a sucção e grau de saturação.

2.2.4 Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996)

Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996) observaram que a contribuição da sucção na resistência poderia ser assumida como sendo proporcional ao produto da sucção (ψ) e a área de água normalizada (A), isto é:

$$\tau_{us} = \frac{A_{dw}}{A_{tw}} (u_a - u_w) \tan \phi' \quad (2.57)$$

onde:

$$A = A_{dw} / A_{tw}$$

A_{dw} é a área correspondendo a qualquer valor de grau de saturação.

A_{tw} é a área correspondendo a $S=100\%$

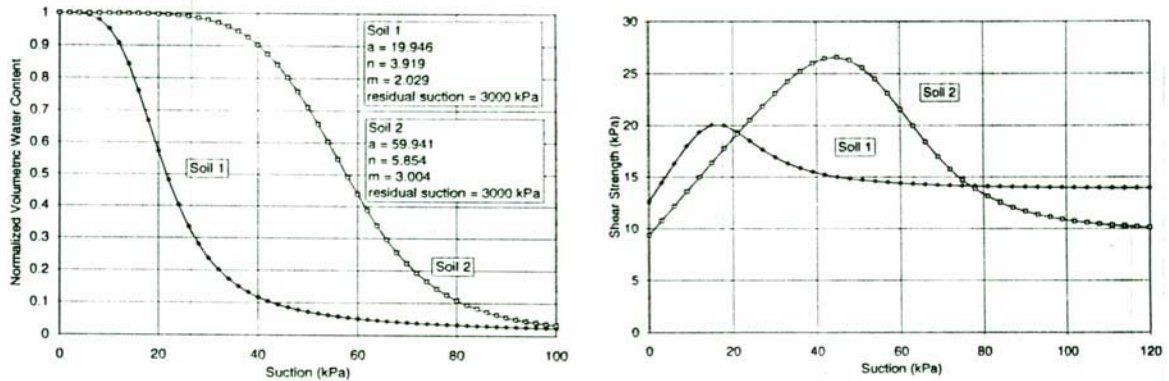
Considerando que a área normalizada pode ser correlacionada ao teor de umidade volumétrico, a Eq. (2.57) pode ser reescrita como:

$$\tau_{us} = \left[\frac{\theta}{\theta_s} \right]^\kappa (u_a - u_w) \tan \phi' \quad (2.58)$$

onde κ = parâmetro que varia com o tipo de solo.

A Figura 2.6 mostra um exemplo de aplicação do modelo em solo granular médio (solo 1) e outro granular fino (solo 2). Os resultados indicam uma taxa

constante de crescimento da resistência, até a sucção atingir o valor correspondente à entrada de ar.



(a) Curva Característica

(b) Parcela da Resistência

Figura 2.6 – Aplicação do Modelo de Fredlund et al para Previsão da Parcela de Resistência em 2 solos

Após este ponto, ocorre uma variação não linear até se atingir à condição residual, a partir da qual a quantidade de água presente no solo é extremamente baixa. Para sucções superiores à saturação residual, a curva pode-se manter constante, aumentar ou diminuir. No trecho em que a sucção é inferior à de entrada de ar, o teor de umidade é aproximadamente igual ao valor saturado ($\theta \approx \theta_s$), portanto, a inclinação da curva (ϕ^b) coincide com a inclinação ϕ' ; isto é:

$$\tan \phi^b = \frac{d\tau}{d(u_a - u_w)} = \left[\frac{\theta}{\theta_s} \right]^k \tan \phi' = \tan \phi' \quad (2.59)$$

A relação direta entre os trechos da curva característica e a parcela de sucção está mostrada esquematicamente na Figura 2.7.

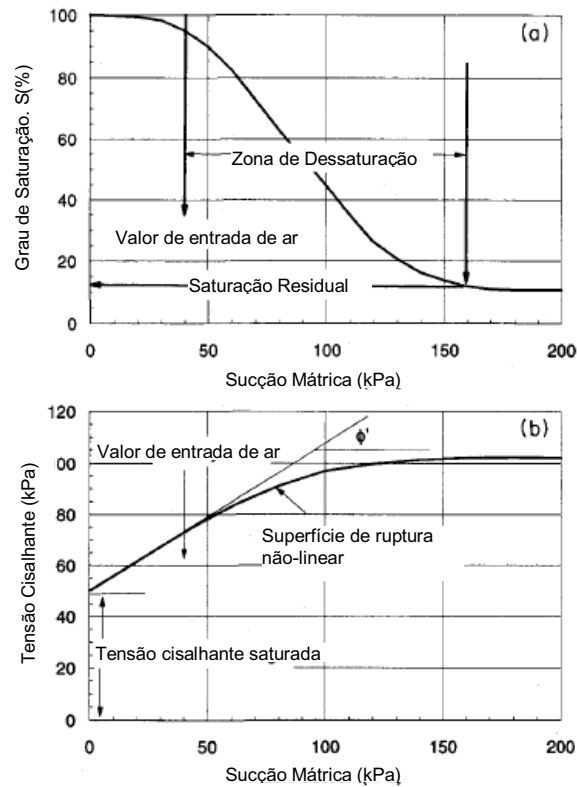


Figura 2.7 – Previsão da Variação da Resistência com a Sucção (Vanapalli et al, 1996)

O comportamento pós-pico, mostrado na Figura 2.6(b), foi observado em outros solos e estiveram sempre associados a baixos valores de tensão confinante. Para altas tensões confinantes há um crescimento constante da parcela de resistência com o aumento da sucção. A proposta dos autores sugere, então, que uma função não linear para expressar a resistência ao cisalhamento de solos não saturados, dada por:

$$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'] + (u_a - u_w) \left[\left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\kappa (\tan \phi') \right] \quad (2.60)$$

O primeiro termo da equação refere-se à parcela saturada da resistência; quando a pressão de ar (u_a) é igual à pressão de água (u_w). Este termo é função da tensão normal, uma vez que os parâmetros de resistência (c' e ϕ') são tipicamente constantes para um solo saturado. O segundo termo da equação depende exclusivamente do valor da sucção, já que os parâmetros κ e ϕ' são constantes.

Com isso, a estimativa da resistência do solo não saturado depende do conhecimento prévio da curva característica, dos parâmetros efetivos de resistência

(c' e ϕ'), obtidos em ensaios em amostras saturadas, além da definição do parâmetro de ajuste κ . Segue-se, portanto a seguinte metodologia:

- Determinar os parâmetros de ajuste para reproduzir a curva característica;
- Estimar os valores de grau de saturação (S_r) e sucção (ψ_r) correspondentes à condição residual;
- Determinar os parâmetros de resistência do solo saturado (c' e ϕ');
- Determinar τ_{us} para diferentes valores de sucção, admitindo um determinado valor para o parâmetro κ

O parâmetro κ foi introduzido para melhorar a qualidade dos ajustes de resultados experimentais. O valor de κ interfere na taxa de decréscimo de ϕ^b , para valores de sucção superiores à entrada de ar. Segundo Fredlund et al (1996), $\kappa = 1$ fornece resultados satisfatório em solos granulares; para solos coesivos $1 < \kappa < 3$. A Figura 2.8 mostra um exemplo de aplicação do método, em amostras de solo compactado, considerando-se diferentes valores de κ .

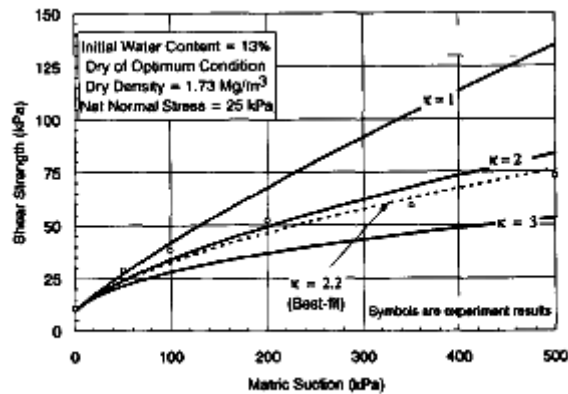


Figura 2.8 – Influência do Parâmetro κ na Previsão da Variação da Resistência com a Sucção (Vanapalli et al, 1996)

No caso de se considerar o valor de κ igual a unidade, Vanapalli et al (1996) propuseram as seguintes equações:

$$\tau_{us} = (u_a - u_w) \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) (\tan \phi') \right] \quad (2.61)$$

ou

$$\tau_{us} = (u_a - u_w) \left[\left(\frac{S - S_r}{100 - S_r} \right) (\tan \phi') \right] \quad (2.62)$$

onde S_r é o grau de saturação residual

Vanapalli e Fredlund (2000a, 2000b) realizaram um estudo estatístico baseado em dados de ensaios de solos compactados obtidos na literatura, no qual o parâmetro κ é relacionado com o índice de plasticidade dos solos. Os resultados deste estudo estão apresentados na Figura 2.9 e mostram um bom ajuste com os resultados experimentais.

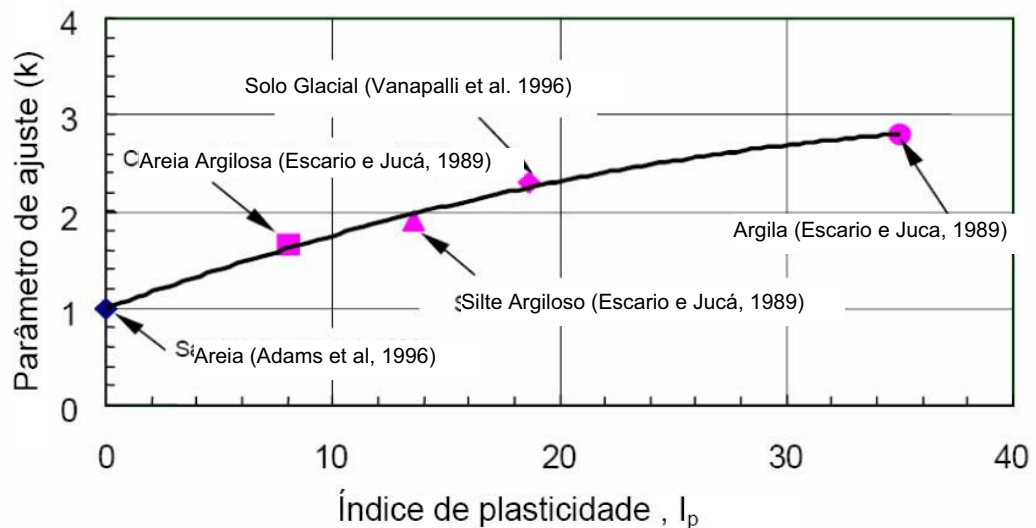


Figura 2.9 – Relação entre o Parâmetro κ e o Índice de Plasticidade (Vanapalli e Fredlund, 2000)

Vanapalli (2001) estendeu a equação (2.60) também para condições não drenadas. Neste caso, o teor de umidade não varia e, conseqüentemente, não há variações no valor da sucção durante o cisalhamento. Assumindo que a contribuição da sucção na resistência é aproximadamente a mesma para as condições drenadas e não drenada, os autores propuseram a equação:

$$c_u = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{c' \cos \phi' + (u_a - u_w) \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^k (\tan \phi') \right]}{(1 - \sin \phi')} \quad (2.63)$$

Com isso, os autores sugerem que, para a determinação do parâmetro κ , sejam realizados ensaios de compressão não confinada, em amostras com diferentes teores de umidade, simples de serem executados,

A proposta de Vanapalli et al (1996), além da sua simplicidade, mostra-se atraente do ponto de vista prático, já que permite a estimativa da resistência do solo não saturado sem a necessidade de realização de ensaios de sucção controlada.

2.2.5 Vilar e colaboradores

Teixeira e Vilar (1997), Machado e Vilar (1998), Vilar (2007) e Vilar e Rodrigues (2007) também associaram a forma da curva característica com a parcela de resistência devido à sucção e recomendaram o uso de uma equação hiperbólica, como indicado na Figura 2.10. Com isso, a parcela da resistência atribuída à sucção fica, então, definida como:

$$c = c' + \frac{\psi}{a + b\psi} \quad (2.64)$$

onde:

c' = coesão efetiva obtida em amostras de solo saturado

$\psi = u_a - u_w$

a e b parâmetros do modelo

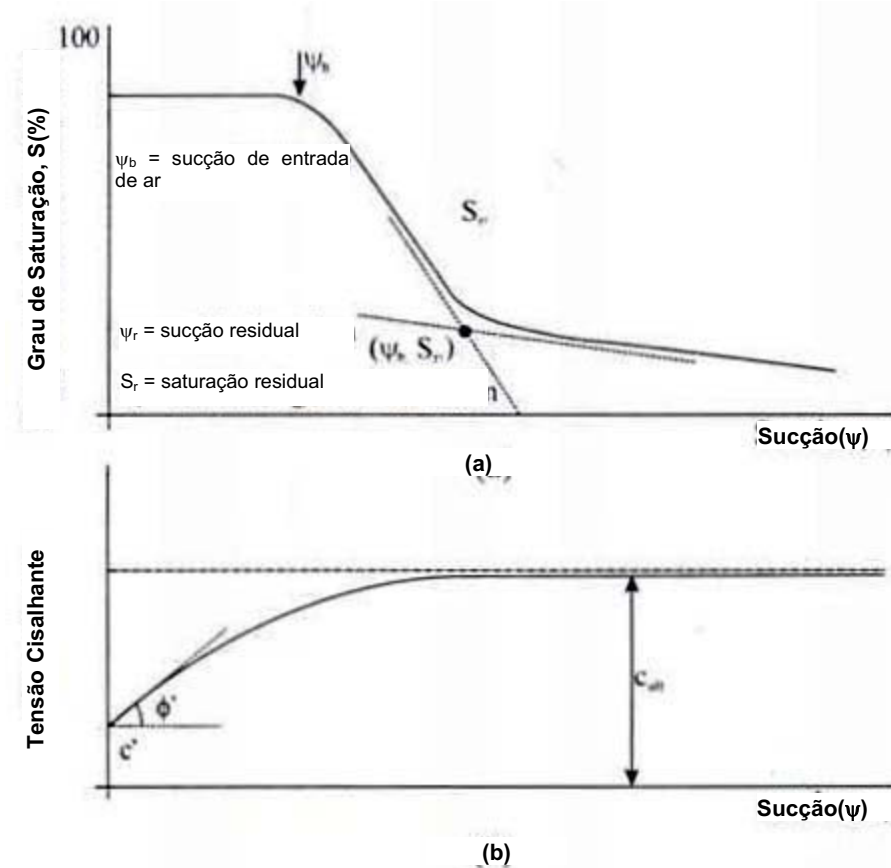


Figura 2.10 – Estudos de Vilar e Colaboradores: (a) Curva de Característica; (b) Função Hiperbólica (Vilar, 2007).

Face aos bons ajustes da hipérbole com os resultados experimentais, os autores (Vilar, 2007 e Vilar e Rodrigues, 2007) avaliaram a possibilidade de obtenção dos parâmetros a e b a partir de outros ensaios. Foram adotadas as seguintes premissas:

i) o solo permanece saturado para sucções inferiores ao valor de entrada de ar; portanto, neste trecho $\phi^b = \phi'$. Com isso:

$$\left. \frac{dc}{d\psi} \right|_{\psi \rightarrow 0} = \frac{1}{a} = \tan \phi' \Rightarrow a = \frac{1}{\tan \phi'} \quad (2.65)$$

onde:

ϕ' = ângulo de atrito efetivo

ii) com o aumento da dessaturação, a sucção e, conseqüentemente, a parcela de resistência tendem a atingir um valor limite. Com isso:

$$c_{ult} = \lim_{\psi \rightarrow 0} c = c' + \frac{1}{b} \Rightarrow b = \frac{1}{c_{ult} - c'} \quad (2.66)$$

A determinação do parâmetro a é relativamente simples, pois depende do ângulo de atrito, obtido em ensaios de resistência em amostras saturadas. Já o parâmetro b requer a estimativa do intercepto (c) para altos valores de sucção, o que exigiria a realização de ensaios especiais de sucção controlada.

Com o intuito de encontrar alternativas simples para determinação dos parâmetros do solo não saturado, os autores propuseram assumir que, na condição do solo seco ao ar, a variação da sucção pouco afeta a resistência. Assim sendo, c_{ult} poderia ser determinado a partir de ensaios de resistência convencionais, em amostras na umidade seca ao ar.

A aplicação deste procedimento reproduziu adequadamente alguns resultados experimentais, mas também mostrou ser conservativo para algumas amostras. Conforme pode ser visto na Figura 2.11, em alguns casos a envoltória de resistência prevista pelo modelo posicionou-se abaixo dos valores observados experimentalmente.

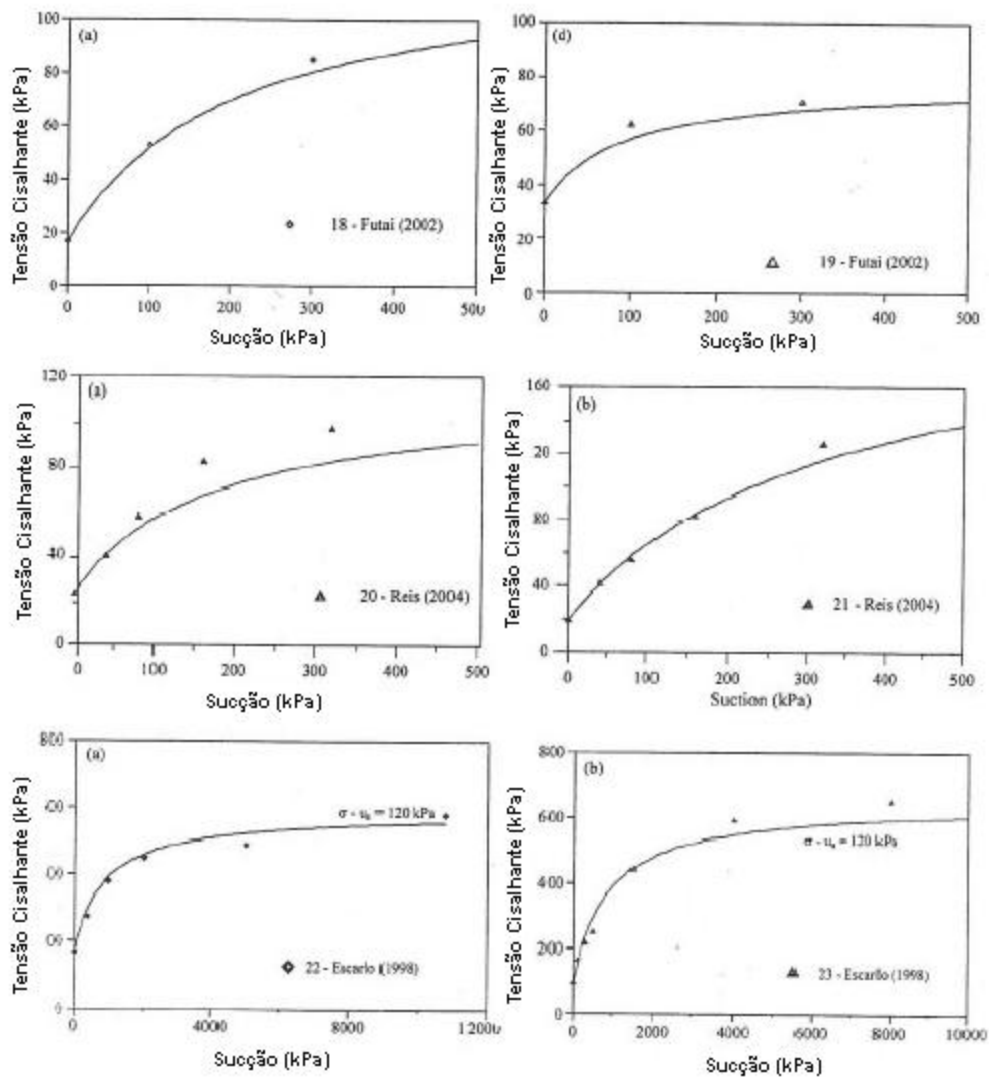


Figura 2.11 – Ajuste da Curva de Resistência ao Cisalhamento (Vilar,2007).

Os autores atribuíram o resultado conservativo à hipótese de c_{ult} estar associado à condição de umidade da amostra seca ao ar. Assim sendo, propuseram uma equação para estimativa do parâmetro b , de acordo com as equações:

$$b = \frac{1}{c_m - c'} - \frac{a}{u_a - u_w} \quad (2.67)$$

ou

$$b = \frac{1}{c_m - c'} - \frac{1}{(u_a - u_w) \tan \phi'} \quad (2.68)$$

onde

c_m = máxima coesão medida

Os resultados deste novo ajuste, apresentados na Figura 2.12, mostraram-se adequados, em solos cujas curvas correspondentes à parcela de sucção possam ser efetivamente representadas por uma hipérbole.

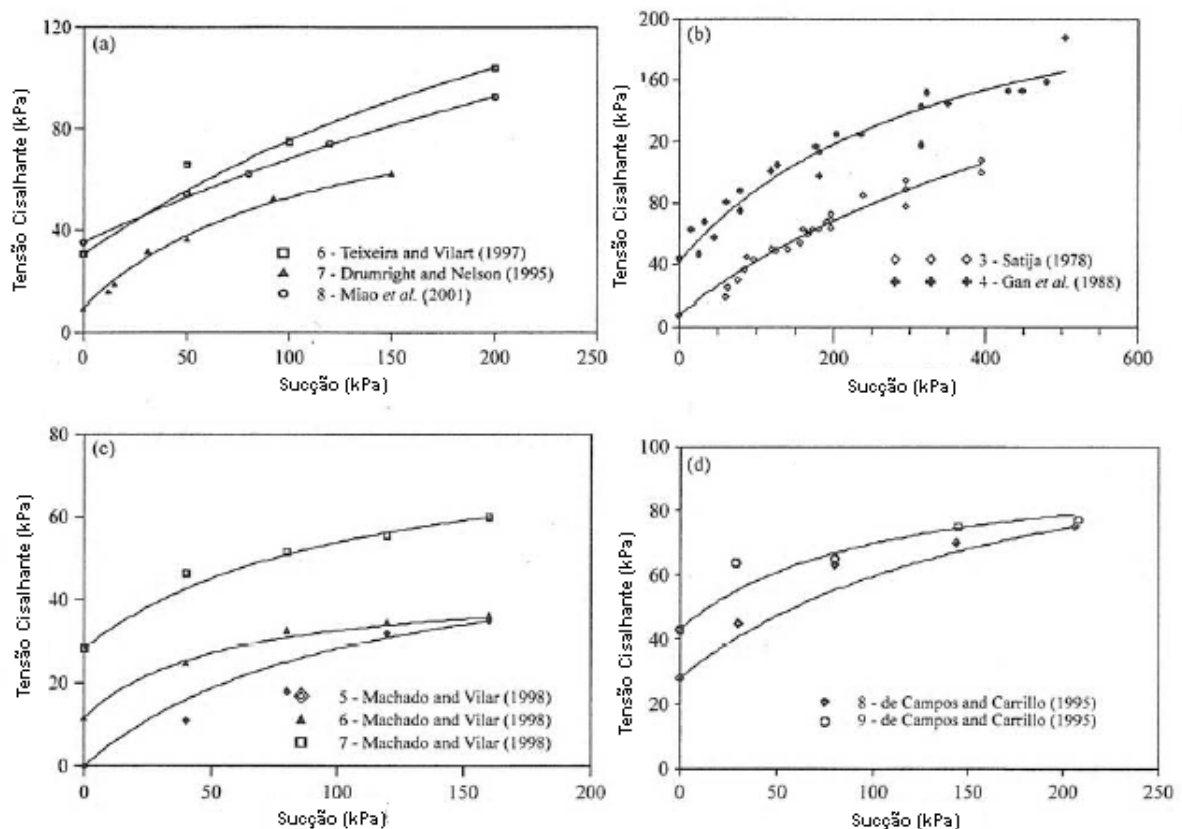


Figura 2.12 – Ajuste da Curva de Resistência ao Cisalhamento (Vilar,2007).

Os autores verificaram que nem sempre esta premissa pode ser adotada. Existem alguns resultados experimentais que mostram curvas de resistência vs sucção com pico bem definido, como mostra a Figura 2.13.

Em solos granulares, a sucção está principalmente associada a efeitos capilares e os efeitos da água adsorvida são desprezíveis. Quando o solo tem um comportamento dilatante, o aumento de volume induz variações na curvatura do menisco, reduzindo as forças capilares e, conseqüentemente, a sucção. Com isso, todo o comportamento mecânico que depende da sucção é afetado. Para estes

casos Vilar (2007) propõe uma equação de ajuste, que reproduz o acréscimo da resistência até um valor de pico e posterior redução, mostrada abaixo:

$$c = c' + \frac{\psi}{a + b_1 \psi^\lambda} \quad (2.69)$$

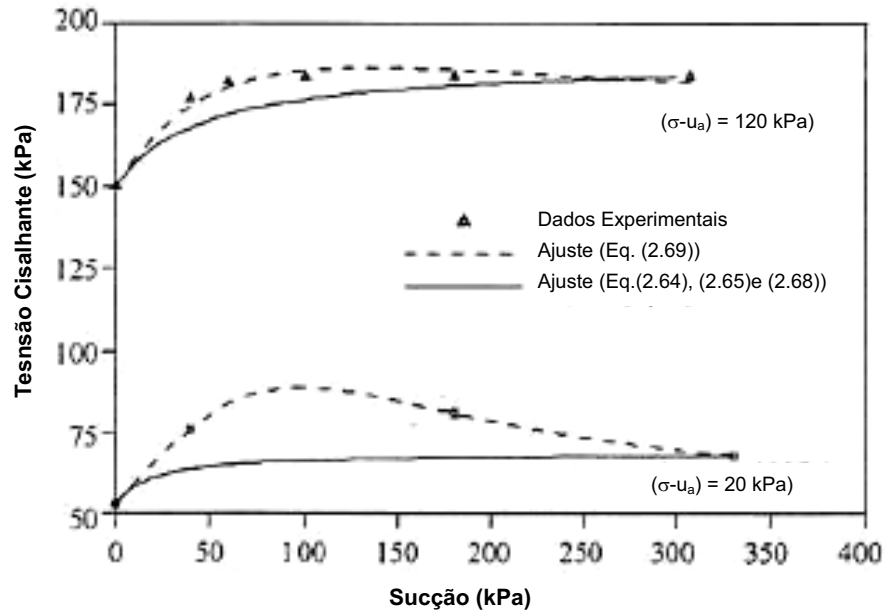


Figura 2.13 – Picos na Curva de Resistência em Função da Sucção (Vilar,2007).

Nesta nova proposta, a determinação dos parâmetros b_1 e λ requer a realização de ensaios para 2 níveis de sucção e ao contrário do que ocorre com os parâmetros a e b da equação (2.64), esses parâmetros não tem significado físico.

Para a validação da equação (2.69), Vilar (2007) utilizou resultados obtidos por Gan e Fredlund (1996), cujos ensaios apresentavam um pico bem definido. A Figura 2.13 apresenta o ajuste feito por Vilar (2007) a esses resultados utilizando as equações (2.64) e (2.69). Os resultados mostraram que o ajuste proposto pela equação (2.69) foi melhor, porém, o autor ressalta que os parâmetros b_1 e λ são mais difíceis de serem determinados em comparação aos parâmetros a e b .

2.2.6 Khallili e Khabbaz (1998)

Khallili e Khabbaz (1998) estenderam a equação de Bishop (1959) para condição não saturada. Os autores ratificaram que a ineficácia da proposta de Bishop residia no fato de se tentar relacionar o parâmetro χ com o grau de

saturação. Na realidade o parâmetro χ é extremamente sensível à estrutura; portanto, dificilmente poderia ser relacionado a um parâmetro estritamente volumétrico.

Assumindo-se que os parâmetros c' e ϕ' independem da sucção, o valor de χ pode ser determinado experimentalmente, em ensaios de resistência com sucção controlada, subtraindo-se a parcela da resistência na condição saturada ($u_a = u_w$), como mostra as equações (2.70), (2.71) e (2.72).

$$\tau - \tau_{sat} = \chi(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (2.70)$$

$$\tau_{sat} = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2.71)$$

$$(u_a = u_w)$$

$$\chi = \frac{\tau - \tau_{sat}}{(u_a - u_w) \tan \phi'} \quad (2.72)$$

A partir da análise de resultados experimentais de 13 solos naturais, os autores calcularam valores de χ que, correlacionados à sucção (ambos em escala logarítmica), geraram relações lineares, com inclinações variando entre 0,4 e 0,65, como mostra a Figura 2.14 (a).

Considerando-se a sucção normalizada em termos do valor correspondente à condição de entrada de ar, chega-se a um melhor ajuste, como mostrado na Figura 2.14(b). Com isso o parâmetro χ pode ser definido conforme a equação:

$$\chi = \left[\frac{(u_a - u_w)_f}{(u_a - u_w)_b} \right]^\eta \quad (2.73)$$

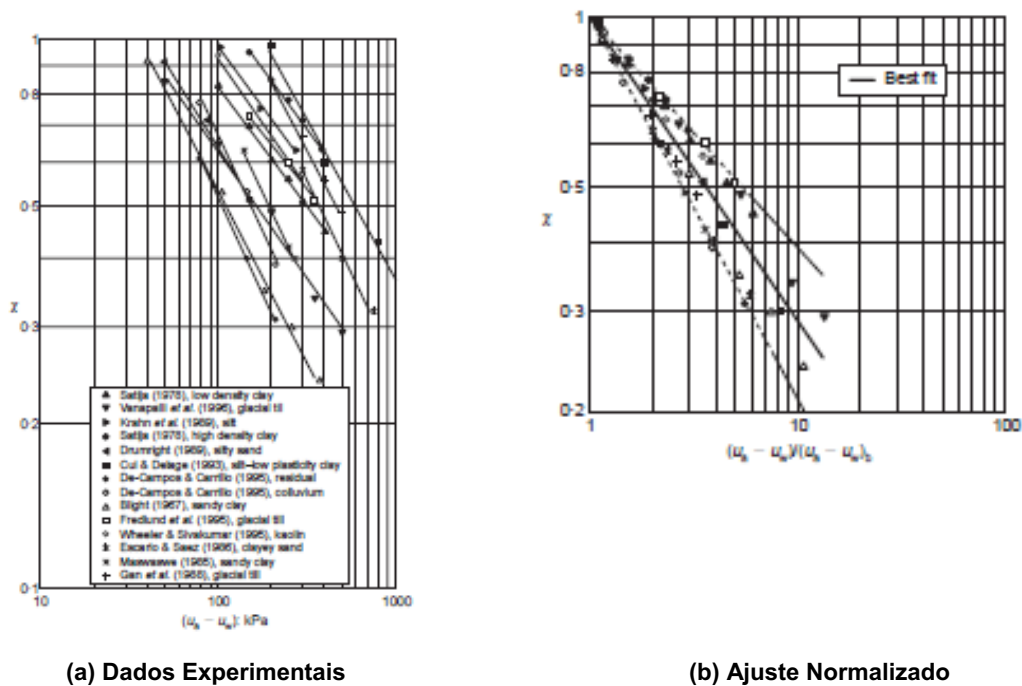
onde:

$(u_a - u_w)_f$ = sucção na ruptura;

$(u_a - u_w)_b$ = sucção de entrada de ar;

η = parâmetros de ajuste

Com base em resultados experimentais em 13 solos, os autores sugerem a adoção de $\eta = -0,55$. Na Figura 2.14 (b), o limite superior corresponde a solos granulares mais grossos e o inferior a solos mais finos.



(a) Dados Experimentais

(b) Ajuste Normalizado

Figura 2.14 – Variação de χ em Função da Sucção (Khallili e Khabbaz, 1998)

2.2.7 Bao et al (1998)

Bao et al (1998), de acordo com Vanapalli e Fredlund (2000), propuseram uma equação para previsão da resistência, tendo como base a existência de uma variação linear da curva característica na região entre a sucção de entrada de ar e a residual. Os autores propõem a expressão:

$$\tau_{us} = (u_a - u_w) [\xi_a - \xi_b \log(u_a - u_w)] \tan \phi \quad (2.74)$$

onde:

$$\xi_a = \frac{\log(u_a - u_w)}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b} \quad (2.75)$$

e

$$\xi_b = \frac{1}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b} \quad (2.76)$$

$(u_a - u_w)_r$ = sucção residual;

$(u_a - u_w)_b$ = sucção de entrada de ar;

2.2.8 Futai e colaboradores

Futai et al (2004) observaram que a resistência ao cisalhamento do solo não saturado, obtida a partir da envoltória de resistência do solo saturado e da curva característica, não fornecia um bom ajuste, quando comparadas com ensaios de resistência com sucção controlada. O principal causador desta divergência foi o fato deste tipo de abordagem não incorporar a variação de ϕ^b com a sucção $(u_a - u_w)$. Com isso, os autores realizaram ajustes hiperbólicos conforme as equações propostas por Futai (2002), reproduzidas abaixo:

$$c_{(s)} = c' + \left\{ c_{(u_a - u_w) \rightarrow \infty} - c' \right\} \left(1 - 10^{a(u_a - u_w)} \right) \quad (2.77)$$

$$\phi_{(s)} = \phi' + \left\{ \phi_{(u_a - u_w) \rightarrow \infty} - \phi' \right\} \left(1 - 10^{b(u_a - u_w)} \right) \quad (2.78)$$

onde

$c_{(s)}$ = coesão aparente;

c' = coesão efetiva na condição saturada;

$c_{(u_a - u_w) \rightarrow \infty} = c_{\max}$ = máxima coesão do solo

$\phi'_{(s)}$ = ângulo de atrito em função da sucção;

ϕ' = ângulo de atrito efetivo na condição saturada;

$\phi_{(u_a - u_w) \rightarrow \infty} = \phi_{\max}$ = máximo valor do ângulo de atrito do solo

a e b = parâmetros de ajuste

A equação (2.77), de acordo com os autores, só pode ser utilizada para solos que apresentem coesão sempre crescente com a sucção.

A máxima coesão do solo (c_{max}) assim como o máximo valor do ângulo de atrito do solo (ϕ_{max}) podem ser obtidos em ensaios com amostras secas ao ar (Figura 2.15).

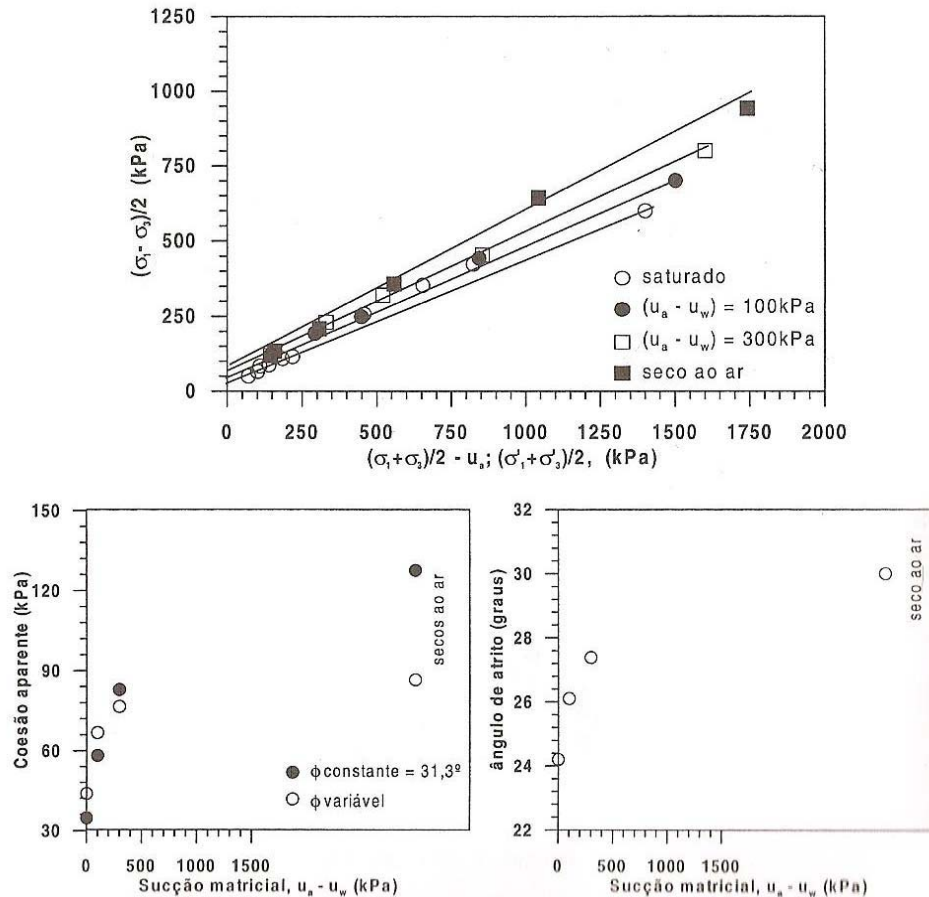


Figura 2.15 – Variação dos Parâmetros de Resistência com a Sucção (Futai, 2004)

2.2.9 Comparação entre Alguns Métodos

Vanapalli e Fredlund (2000) compararam alguns dos métodos de previsão da parcela de resistência devido à condição não saturada em 03 solos com diferentes porcentagens de argila e índice de plasticidade (Argila de Madri, Argila siltosa vermelha e Areia argilosa de Madri). A Figura 2.16 mostra as curvas características e a Figura 2.17 um exemplo de resultado obtido no caso da Argila de Madri, para uma ampla faixa de sucção. Observou-se que o método de Öberg e Sällfors é o que apresenta o pior ajuste. Os demais se mostram adequados para a faixa de valores de sucção inferiores a 1.000kPa. Ressalta-se, entretanto, que o método de Vanapalli, com parâmetro κ diferente de zero, foi capaz de reproduzir toda a curva de resistência vs sucção.

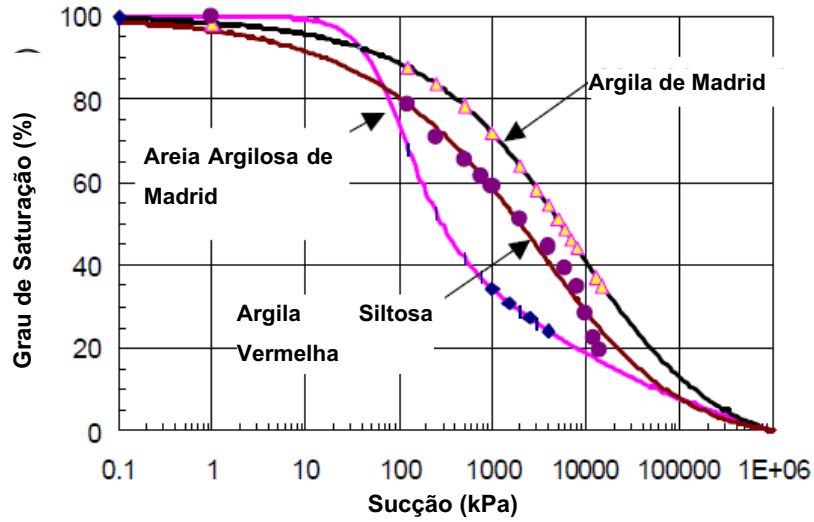


Figura 2.16 –Curva Característica dos Solos (Vanapalli e Fredlund, 2000)

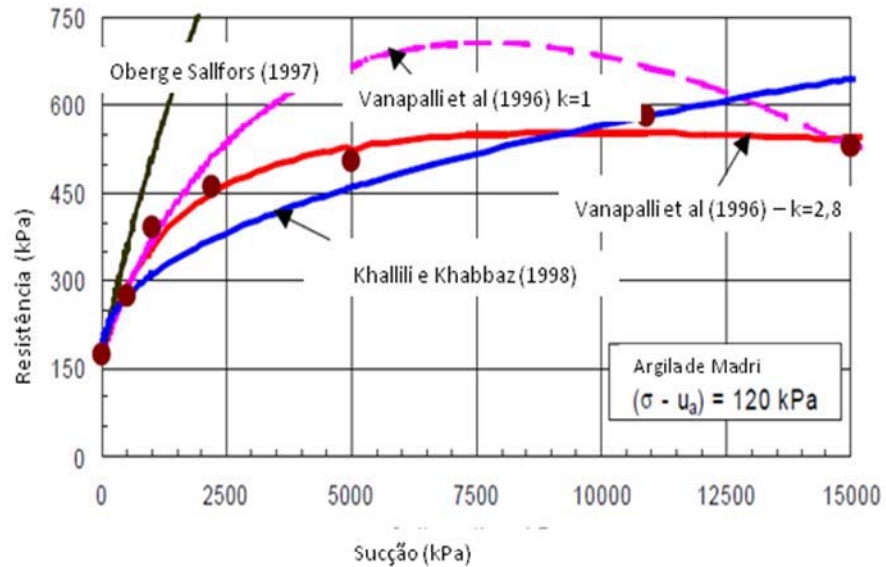


Figura 2.17 –Comparação entre Curva Medida e as Prevista para Argila de Madrid (Vanapalli e Fredlund, 2000)

A Tabela 2.2 resume todas as propostas de previsão da parcela de resistência devido à sucção descritas no presente trabalho.

Tabela 2.2 – Propostas para Modelagem da Resistência ao Cisalhamento

Referência	Equação	Definição de Variáveis
Öberg e Sällfors (1995, 1997)	$\tau = c' + (\sigma - S_r u_w - (1 - S_r) u_a) \tan \phi'$	(2.79)
Escario (1988)	$(\tau_m + \tau_0)^{2,5} - (\tau_0 + \tau_b)^{2,5} = (\tau_0 + \tau_b)^{1,5} s_m \tan \phi'$	(2.80)
de Campos e Carrillo (1995)	$\tau = c' + a\psi + b\psi^2 + c\psi^3 + d\psi^4$	a, b, c e d = parâmetros de ajuste (2.81)
Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996)	$\tau = [c' + (\sigma - u_a) \tan \phi'] + (u_a - u_w) \left[\left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\kappa (\tan \phi') \right]$	κ = parâmetro de ajuste Se $\kappa = 1$ $\left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\kappa = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$ Ou $\left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\kappa = \left(\frac{S - S_r}{100 - S_r} \right)$ (2.82)
Khalilii e Khabbaz (1998)	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \chi (u_a - u_w) \tan \phi$ $\chi = \left[\frac{(u_a - u_w)_f}{(u_a - u_w)_b} \right]^\eta$	$(u_a - u_w)_f$ = sucção na ruptura; $(u_a - u_w)_b$ = sucção de entrada de ar; η = parâmetros de ajuste (2.83)

Tabela 2.2 (cont) – Propostas para Modelagem da Resistência ao Cisalhamento

Referência	Equação	Definição de Variáveis
Bao et al (1998)	$\tau_{us} = (u_a - u_w) \left[\xi_a - \xi_b \log(u_a - u_w) \right] \tan \phi$ $\xi_a = \frac{\log(u_a - u_w)}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b}$ $\xi_b = \frac{1}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b}$	$(u_a - u_w)_f$ = sucção na ruptura; $(u_a - u_w)_b$ = sucção de entrada de ar;
Futai (2002)	$c = c' + \left\{ c_{(u_a - u_w) \rightarrow \infty} - c' \right\} \left(1 - 10^{a(u_a - u_w)} \right)$ $\phi = \phi' + \left\{ \phi_{(u_a - u_w) \rightarrow \infty} - \phi' \right\} \left(1 - 10^{b(u_a - u_w)} \right)$	a e b = parâmetros de ajuste $c_{\max} = c_{(u_a - u_w) \rightarrow \infty}$ = máxima coesão do solo $\phi_{\max} = \phi_{(u_a - u_w) \rightarrow \infty}$ = máximo valor do ângulo de atrito do solo
Vilar (2007)	$c = c' + \frac{\psi}{a + b\psi}$	a e b = parâmetros de ajuste

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS SOBRE O COMPORTAMENTO DE SOLOS RESIDUAIS NÃO SATURADOS BRASILEIROS

O banco de dados, apresentado no presente trabalho, foi construído a partir de resultados disponibilizados na literatura, relativos a estudos de solos residuais brasileiros, não saturados. Alguns apresentavam apenas informações sobre o comportamento da curva característica, outros de resistência e, ainda alguns, com ambas as informações. Os dados foram organizados a partir do local de extração das amostras e do ano de publicação dos resultados.

3.1 Bahia – Salvador – Região Metropolitana (Machado e Lima Jr, 2001; Machado e Dourado, 2001)

Machado e colaboradores estudaram o comportamento de solos não saturados da região Metropolitana da cidade de Salvador (BA), constituído por um solo residual de granulito. Os solos estudados foram extraídos de três localidades: Avenida Garibaldi (AvG), Avenida Paralela - berma superior (AvPS) e Avenida Paralela - berma inferior (AvPI) e descritos como residual jovem (AvG), residual maduro (AvPS) e saprolítico (AvPI).

Machado e Lima Jr (2001), estudando as características de elastoplasticidade do solo extraído da Avenida Garibaldi (AvG), realizaram ensaios de caracterização, cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.1. Foram também executados ensaios para determinação da curva característica, utilizando placa de pressão (câmara de Richards), segundo trajetória de secagem. Os resultados estão mostrados na Figura 3.1.

Tabela 3.1 – Caracterização do Solo AvG (Machado e Lima Jr, 2001).

Areia	Silte	Argila	LL (%)	LP (%)	w_{campo}	γ_g (kN/m ³)	e	θ_s (%)	ψ_b (kPa)
35,0%	40,0%	25,0%	55	15	28,9	26,1	1,1	0,524	20

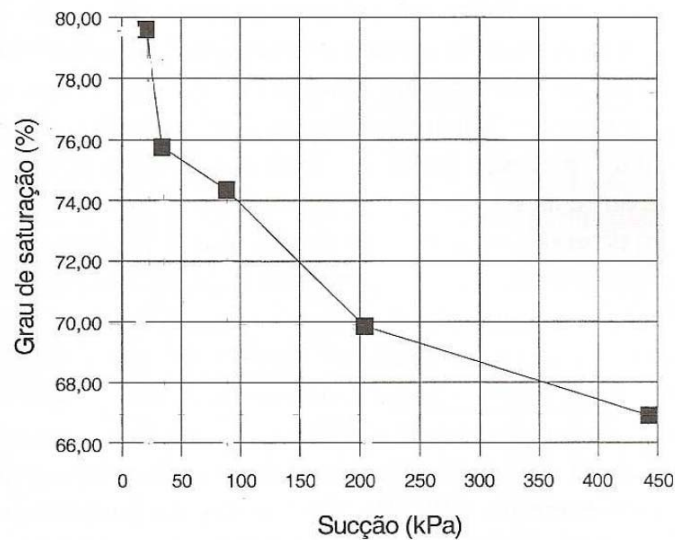


Figura 3.1 – Curva Característica – Salvador - AvG (Machado e Lima Jr, 2001).

Machado e Dourado (2001) também avaliaram a aplicabilidade da técnica de obtenção da curva característica proposta por Fourie e Papageorgian (1995). A técnica baseia-se na aplicação de uma grande pressão de ar na amostra, a qual deflagra um processo de drenagem. A drenagem é interrompida em estágios, medindo-se a quantidade de água liberada e acompanhando-se a variação da pressão da água até o equilíbrio. Os valores de umidade do corpo de prova, para cada valor de sucção, são obtidos após o final do ensaio, utilizando-se os valores das quantidades de água expulsa em cada etapa. Os autores compararam os resultados obtidos a partir dessa proposta com a técnica da Câmara de Richard e concluíram que a proposta de Fourier e Papageorgian (1995), baseada no equilíbrio de pressão, apresenta boa concordância. Outra vantagem destacada pelos autores, diz respeito ao tempo de execução do ensaio, já que este foi menor que o tempo gasto pela técnica tradicional e, com isso, permitiu a construção da curva característica com um número maior de pontos.

Os resultados dos ensaios de caracterização e de curvas característica, realizados nas amostras extraídas da Avenida Paralela (AvPI e AvPS) estão resumidos na Tabela 3.2, Figura 3.2 e Figura 3.3.

Tabela 3.2 – Caracterização do Solo (Machado e Lima Jr, 2001)

Amostra	Areia	Silte	Argila	LL (%)	LP (%)	W_{campo} (%)	G	e
AvPI	52%	25%	23%	46	33	29,98	2,61	1,03
AvPS	31,0%	7,0%	61,0%	58	32	23,70	2,10	1,15

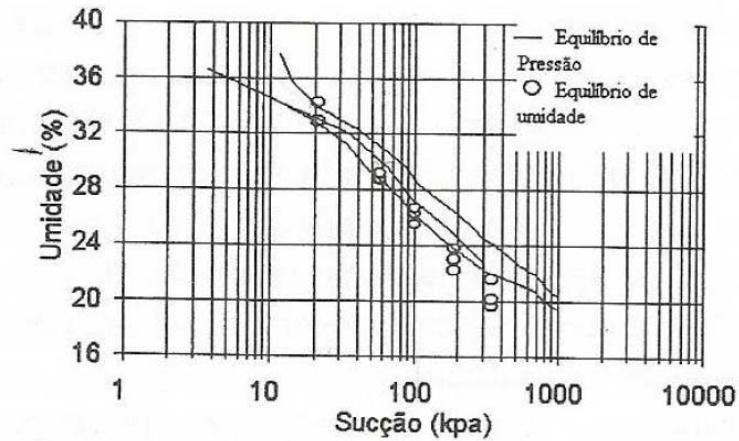


Figura 3.2 – Curva Característica – Salvador - AvPI (Machado e Dourado, 2001)

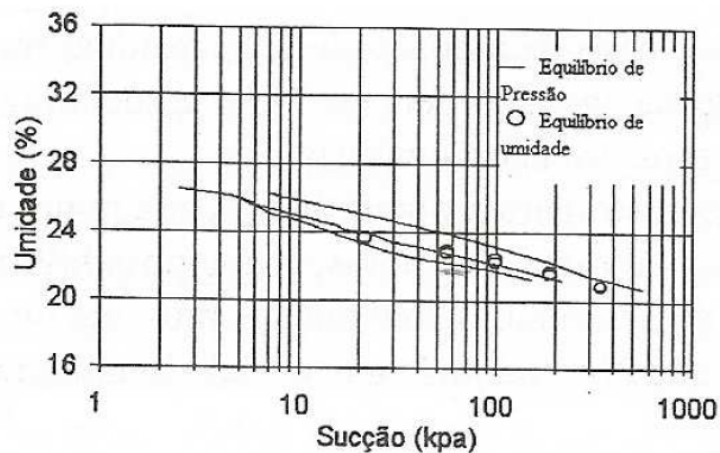


Figura 3.3 – Curva Característica – Salvador - AvPS (Machado e Dourado, 2001)

3.2 Bahia - Salvador – Encosta do Alto do Bom Viver (Jesus, 2008)

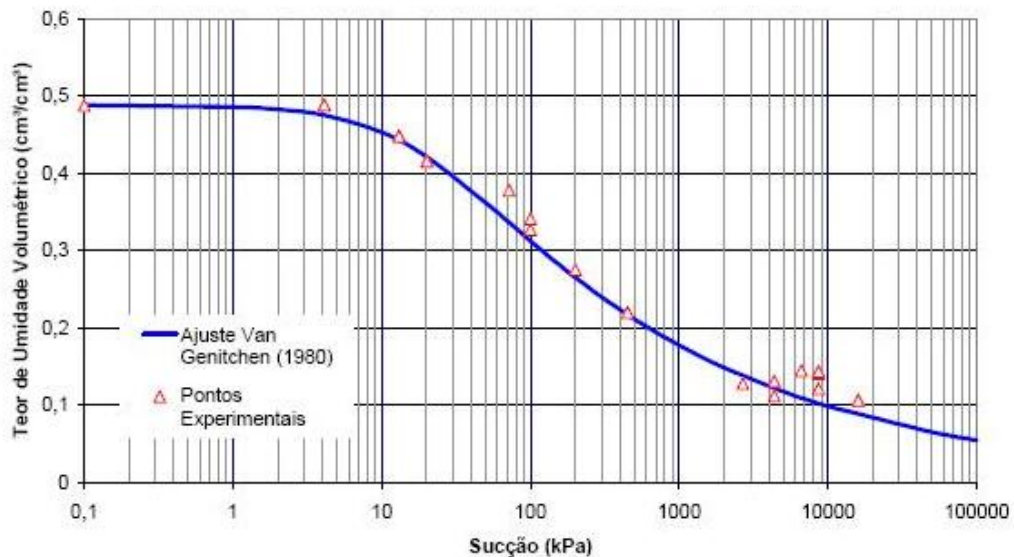
Jesus (2008) realizou retroanálises de cinco casos de escorregamentos de taludes em solo residual, ocorridos na Bahia, baseado em informações preexistentes referentes às rupturas ocorridas. Dentre os casos estudados, o autor escolheu o da encosta do Alto do Bom Viver para realizar campanha de investigação complementar com intuito de, por meio de simulações numéricas e de conceitos de mecânica dos solos não saturados, reproduzir as condições que possivelmente levaram o talude à ruptura.

Na crista da encosta, tensiômetros foram instalados a 1m de profundidade, e amostras indeformadas retiradas a 2m de profundidade. No laboratório foram realizados ensaios de caracterização, de determinação de características hidráulicas (condutividade hidráulica saturada e curva característica) e de resistência ao cisalhamento (amostra saturada e seca ao ar). A Tabela 3.3 apresenta a caracterização do solo.

Tabela 3.3 – Alto do Bom Viver – Caracterização do Solo (Jesus, 2008)

Areia	32,0%	Gs	2,73
Silte	51,0%	W _{nat} (%)	29,9
Argila	17,0%	S _{r (campo)} (%)	77,1
LL (%)	39	γ _{campo} (kN/m ³)	16,9
LP (%)	28	γ _g (kN/m ³)	26,7
IP (%)	11	γ _d (kN/m ³)	11,7
e	1,04	γ _{sat} (kN/m ³)	18,3

A curva característica foi obtida a partir da técnica do papel filtro e ajustada pela equação de van Genuchten (1980), conforme indicada na Figura 3.4.



α	m	n	θ_s	ψ_b
0,0521	0,2038	1,2558	0,488	10

Nota: ψ_b em kPa

Figura 3.4 – Alto do Bom Viver – Curva Característica (Jesus, 2008)

Ensaio triaxiais, realizados em amostras na condição saturada e seca ao ar, possibilitaram identificar a influência da sucção na resistência do material. A Figura

3.5 mostra a variação da parcela de coesão com a sucção, conforme a proposta de Vilar (2007).

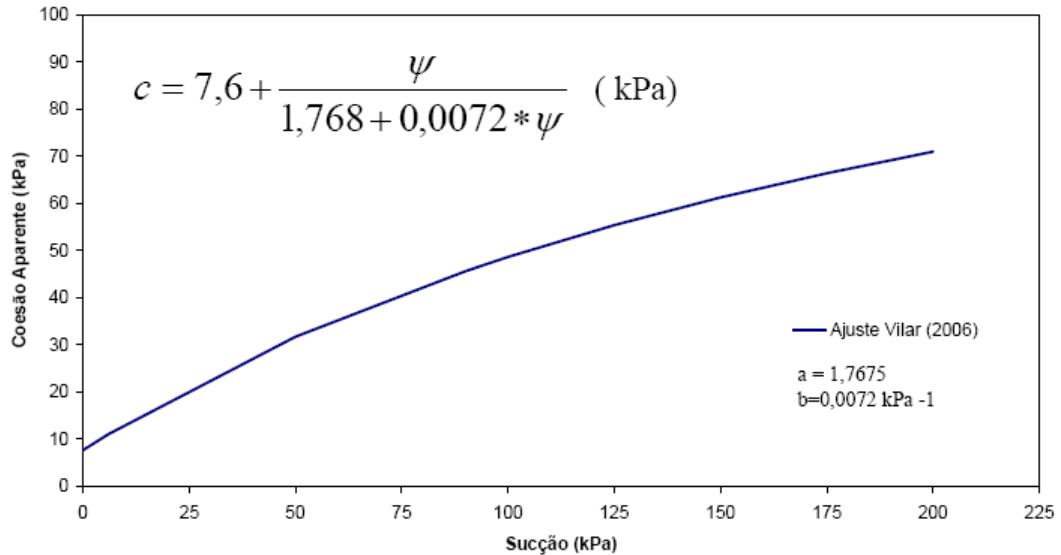


Figura 3.5 – Alto do Bom Viver – $c \times \psi$ (Jesus, 2008)

3.3 Minas Gerais – Juiz de Fora - Chapéu D'Uvas (de Campos et al, 1992)

De Campos et al (1992) apresentaram um resumo dos resultados dos ensaios realizados por Fonseca (1991) em amostras de solo residual arenoso de Chapéu D'Uvas, distrito do município de Juiz de Fora (MG). A Tabela 3.4 apresenta a caracterização granulométrica dos materiais ensaiados e a Figura 3.6 as curvas característica de cada solo.

Tabela 3.4 – Distribuição Granulométrica Chapéu D'Uvas (adaptado de de Campos et al, 1992)

Pedregulho	Areia	Silte	Argila	LL	LP	IP	G_s
10,0%	76,0%	8,0%	6,0%	31,00%	2,10%	28,90%	2,66

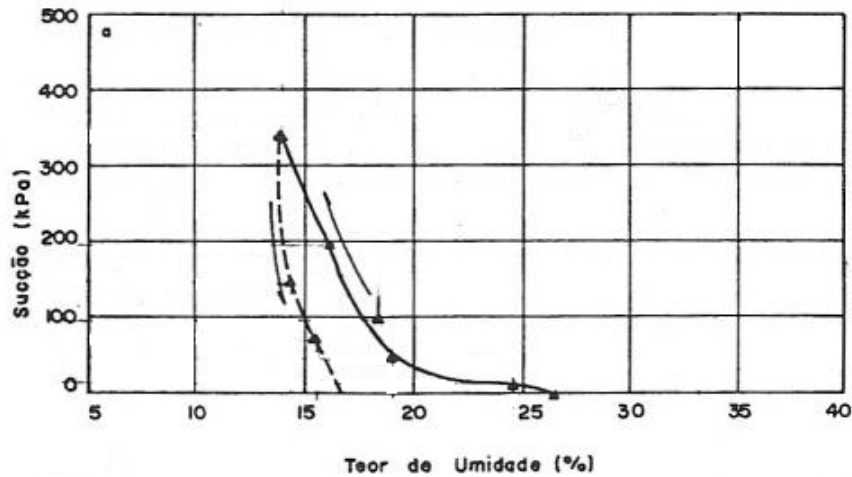


Figura 3.6 – Curva Característica: Solo Saprolítico de Gnaise Kinzigítico Chapéu D'Uvas (de Campos et al, 1992).

3.4 Minas Gerais - Viçosa (Reis, 2004)

Reis (2004) estudou o comportamento tensão-deformação de dois horizontes de um solo residual de gnaise, na cidade de Viçosa (MG), considerando a condição saturada e sob diferentes valores de sucção. O perfil de solo estudado é constituído por um horizonte de solo residual maduro e um horizonte de solo residual jovem, de onde foram extraídas amostras deformadas e indeformadas das profundidades de 3 e 5 m, respectivamente. A Tabela 3.5 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de caracterização. O índice de vazios indicado refere-se a média dos valores obtidos nos corpos de prova de todos os ensaios triaxiais.

Tabela 3.5 – Viçosa – Caracterização do Solo (Reis, 2004)

Solo	Areia	Silte	Argila	LL (%)	LP (%)	γ_s (kN/m ³)	e
Maduro	27%	15%	58%	68	39	27,20	1,08
Jovem	50%	45%	5%	38	23	26,70	0,73

Os ensaios de determinação da curva característica foram executados em câmara de Richards para ambos os solos e um ensaio com papel filtro, em alta sucção, para a amostra de solo jovem. Os dados experimentais obtidos foram ajustados pela equação de van Genuchten (1980), conforme indicada na Figura 3.7.

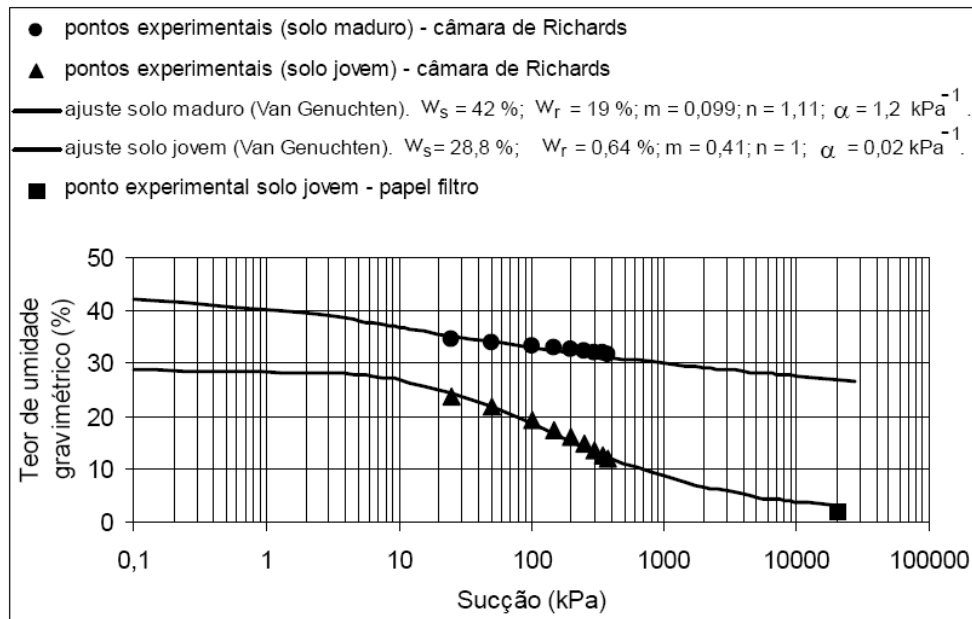


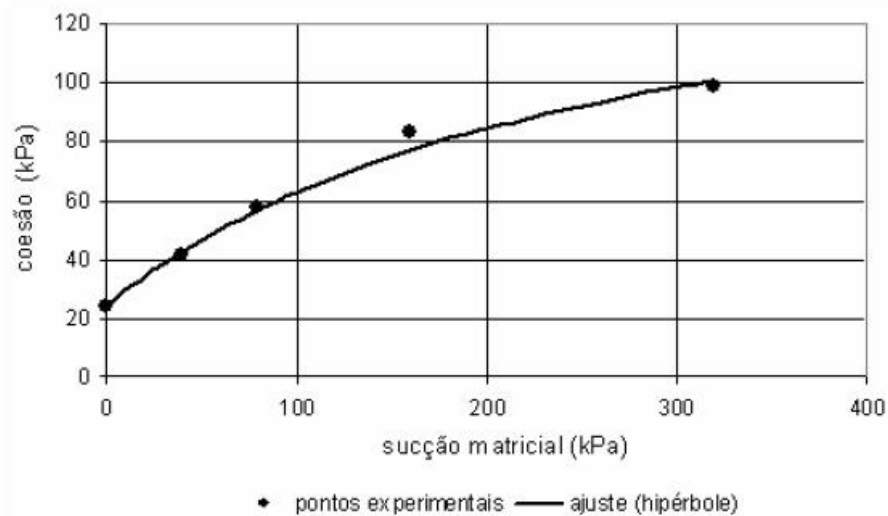
Figura 3.7 – Viçosa – Curva Característica (Reis, 2004)

Foram realizados ensaios de resistência a compressão triaxial em amostras saturadas e não saturadas. Os ensaios em amostras não saturadas foram executados por meio do controle da sucção e por ensaios de amostras secas ao ar.

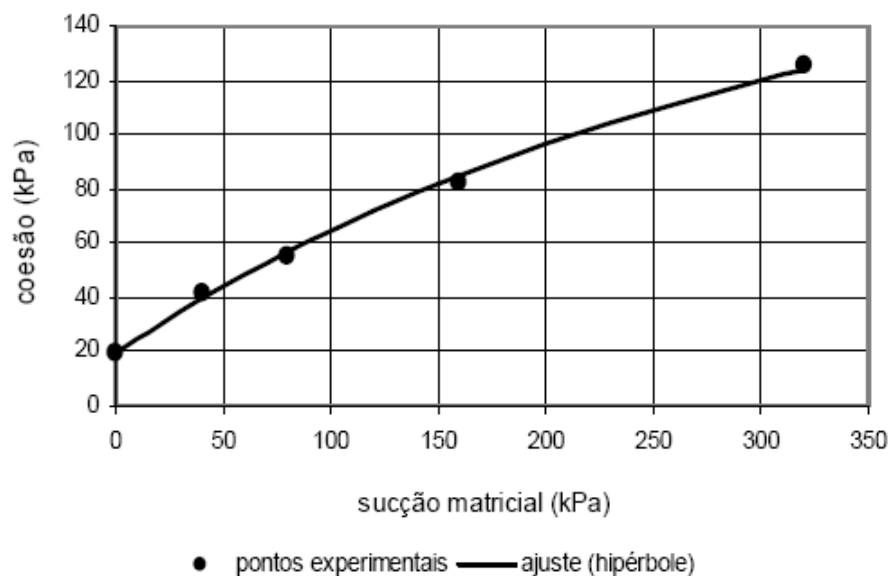
Os ensaios em amostras não saturadas foram realizados com sucção controlada de 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa e 320 kPa. Os ensaios com amostras secas ao ar foram realizados com intuito de checar os resultados obtidos nos ensaios com controle de sucção e para utilização, em conjunto com os resultados de amostras saturadas, para a previsão da curva coesão vs sucção matricial resultante dos ensaios com sucção controlada.

A Figura 3.8 apresenta as curvas coesão vs sucção matricial de cada solo ajustadas a partir dos resultados dos ensaios realizados.

O autor observou que a sucção influenciou o comportamento tensão-deformação de ambos os solos, a partir da verificação de que para altos valores de sucção o solo se apresentou-se mais rígido e que o comportamento na ruptura, em sucções mais baixas, é mais plástico do que em condições de altas sucções.



(a) Residual Jovem



(b) Residual Maduro

Solo	c' (kPa)	a	b
Jovem	24,0	1,86	0,0072
Maduro	19,2	1,80	0,0039

(c) Parâmetros de Ajuste do Modelo Hiperbólico de Vilar e colaboradores

Figura 3.8 – Curvas $c \times \psi$ - Viçosa (adaptado de Reis, 2004)

3.5 Rio Grande do Sul - Alvorada (Bastos, 1999 e Bastos et al, 2001)

Bastos e colaboradores realizaram um estudo sobre a erodibilidade de solos residuais tropicais não saturados. Para tal, além dos ensaios de caracterização e de quantificação da susceptibilidade à erosão por fluxo superficial, foram também

determinadas as envoltórias de resistência a partir de ensaios convencionais e de sucção controlada, além da curva característica.

Os solos estudados pertencem a um perfil de intemperismo de rocha granítica (horizontes B e C), localizado no município de Alvorada, na região metropolitana de Porto Alegre. A caracterização geotécnica, assim como os índices físicos das amostras, identificadas como solos ALGB e ALGC (nomenclatura original dos autores), estão apresentados na Tabela 3.6. Os resultados mostram claramente tratar-se de um solo predominantemente arenoso.

Tabela 3.6 – Caracterização Geotécnica (Bastos, 1999 e Bastos et al, 2001)

	ALGB	ALGC
Areia Grossa	1,0%	12,0%
Areia Média	16,0%	43,0%
Areia Fina	29,0%	21,0%
Silte	12,0%	17,0%
Argila	42,0%	7,0%
w_i	41,0%	39,0%
IP	10,0%	5,0%
w_{campo}	20,7 a 30,1%	9,2 a 21,9%
Classif. SUCS	ML	SM
Classif. MCT	LG'	NS'
γ (kN/m ³)	16,90	15,90
γ_d (kN/m ³)	13,40	13,50
γ_g (kN/m ³)	26,80	26,80
e	0,99	0,97
S	55,9 a 81,3%	25,3 a 60,1%

As curvas características foram determinadas pela técnica do papel filtro (Marinho, 1994,1995), complementada com a utilização do transdutor de pressão de alta capacidade (Ridley e Burland, 1993). Os ensaios foram executados seguindo as trajetórias de umedecimento e de secagem. Analisando os dados obtidos em ambas as trajetórias, o autor verificou que os efeitos de histerese não foram consideráveis e, por isso, considerou os dados obtidos em ambas trajetórias como uma única tendência.

A Figura 3.9 apresenta as curvas característica em termos de teor de umidade gravimétrico ($\psi \times w$) para todos os ensaios. Nesta figura o símbolo PF representa o uso do papel filtro e TR o de transdutor. Observa-se que os resultados são consistentes, independentemente da técnica de medição.

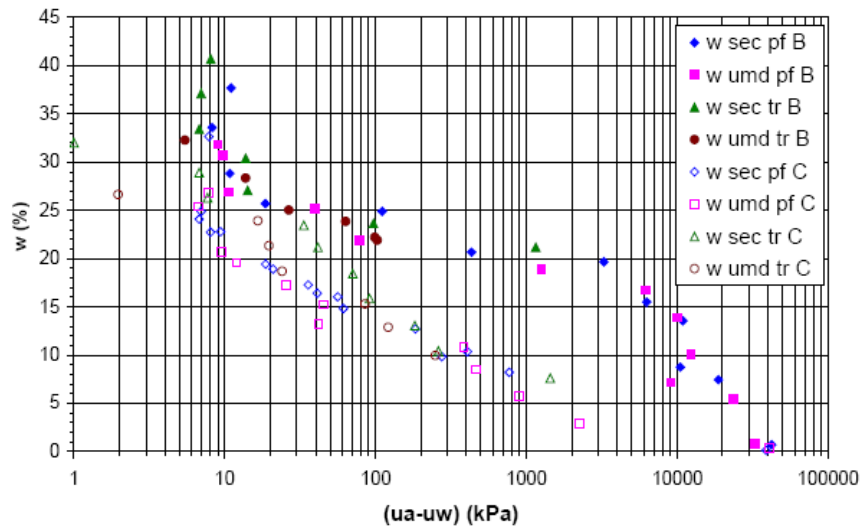
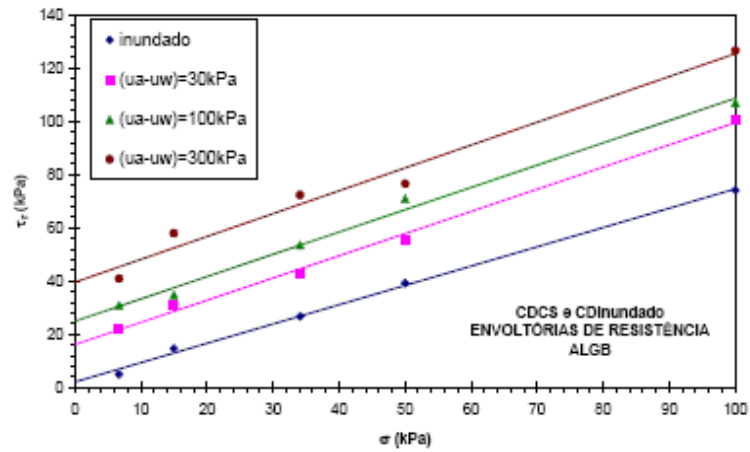


Figura 3.9 – Curva Característica – Trajetórias de Umedecimento (umd) e Secagem(sec) (Bastos, 1999)

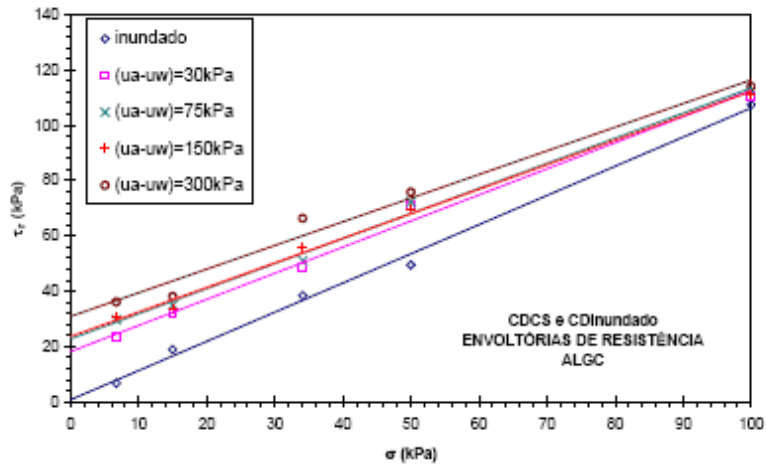
Ensaio de cisalhamento direto foram executados em amostras cilíndricas mantendo-se a umidade natural e na condição inundada. Já os ensaios de cisalhamento direto, com sucção controlada, foram executados em um equipamento projetado e construído de acordo com modelo proposto por Gan e Fredlund (1988). Neste ensaio a amostra também apresentava forma cilíndrica.

Os resultados apresentados na Figura 3.10 mostram, no caso da amostra ALGB, envoltórias de resistência praticamente paralelas evidenciando a influência uniforme da parcela de sucção. Já a amostra ALGC indica uma redução da contribuição da sucção em função do aumento da tensão normal. Os autores atribuem esta diferença de comportamento à estrutura das amostras.

A Figura 3.11 ilustra a variação da coesão com a sucção dos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada e de ensaios convencionais inundados. Observa-se aumento na parcela de coesão com o aumento da sucção e um bom ajuste a partir do uso de uma função hiperbólica (Eq (2.64)). Nesta figura estão também mostrados os valores dos parâmetros de ajuste a e b determinados pelos autores.

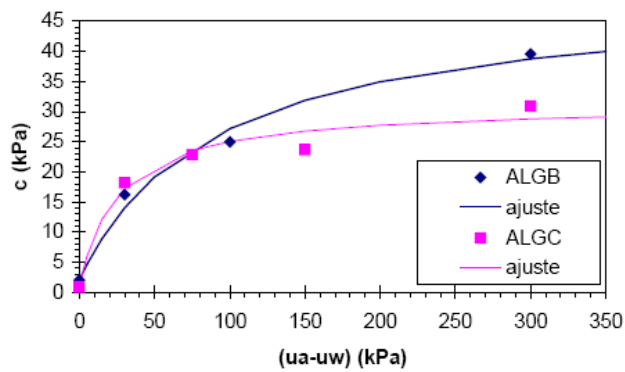


(a) Amostra ALGB



(b) Amostra ALGC

Figura 3.10 – Envoltórias de Resistência (Bastos, 1999)



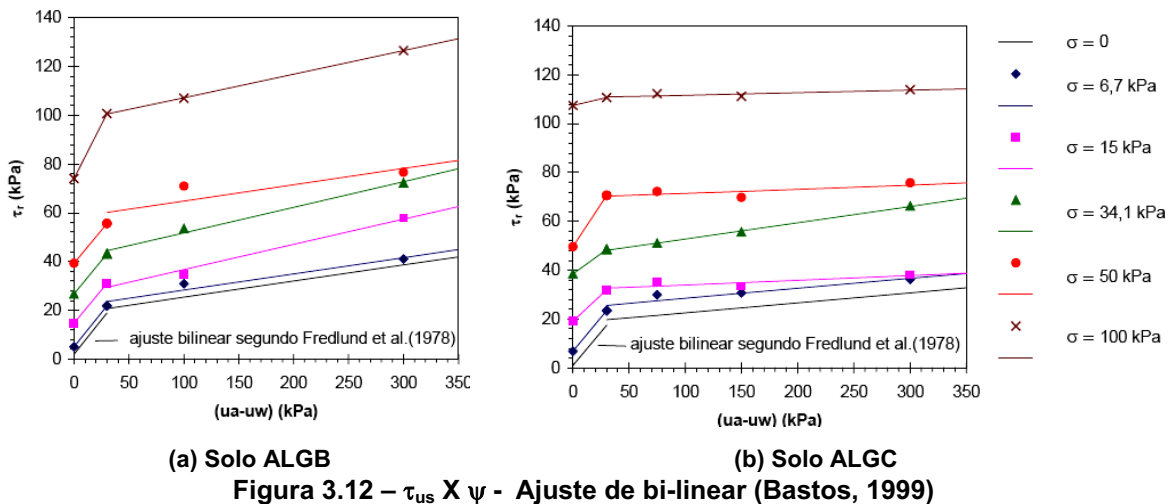
SOLO	c' (kPa)	a	b (kPa) ⁻¹	R ²
ALGB	2,0	1,87	0,021	0,986
ALGC	0,9	0,85	0,033	0,971

Figura 3.11 – Ajuste de acordo com o Modelo Proposto por Vilar e Colaboradores (Bastos, 1999).

O ângulo de resistência com relação à sucção (ϕ^b) foi determinado considerando-se que a condição de saturação completa era atingida nos ensaios com amostras inundadas (Tabela 3.7). Os resultados, mostrados na Figura 3.12, indicam um comportamento bi-linear, sendo os valores de ϕ^b apresentados na Tabela 3.7. Em ambas amostras a relação ϕ^b / ϕ' foi sempre inferior a 1.

Tabela 3.7 – Parâmetros de Resistência (Bastos, 1999)

Parâmetros	ALGB	ALGC
c' (kPa)	2,0	0,9
ϕ'	36,0	46,5
ϕ^b ($0 < \psi < 30$ kPa)	28,9	26,4
ϕ^b ($\psi > 30$ kPa)	5,0	1,8



Os autores ainda estudaram a aplicação de modelos de previsão de resistência ao cisalhamento com a sucção matricial. Foram analisados os modelos Öberg e Sällfors (1995, 1997), Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996). A curva característica foi expressa em termos de grau de saturação de acordo com uma função exponencial demonstrada na Tabela 3.8. Os parâmetros de ajuste estão indicados na Tabela 3.9 e, segundo o autor, o modelo de Vanapalli forneceu o melhor ajuste com relação aos resultados experimentais. Os detalhes das análises são apresentados em Bastos (1999).

Tabela 3.8 – Ajuste da Curva Característica (Bastos, 1999)

Solo	Ajuste exponencial
ALGB	$S = 0,943(u_a - u_w)^{-0,103}$
ALGC	$S = 1,038(u_a - u_w)^{-0,241}$

Tabela 3.9 – Parâmetros para Previsão da Resistência ao Cisalhamento

Modelo	ALGB	ALGC
Öberg e Sällfors	-	-
Fredlund et al	Válida de $\psi = 0,6$ a 1000kPa Sr = 15,5% $\psi_r = 4000\text{kPa}$	Válida de $\psi = 1,2$ a 1000kPa Sr = 12,8% $\psi_r = 5000\text{kPa}$
Vanapalli et al	$\kappa_{\text{medio}} = 2,54$	$\kappa_{\text{medio}} = 1,98$

3.6 Rio Grande do Sul - Porto Alegre - Escudo Sul-Riograndense (Oliveira et al, 2001)

Oliveira et al (2001) realizaram simulações numéricas do avanço da frente de saturação em um furo de sondagem de um solo residual de granito não saturado. Os autores compararam os resultados medidos e/ou estimados com os valores obtidos pela simulação ao redor do furo. Foram realizadas simulações numéricas para as profundidades de 2,00 e 3,25 m, com sucção inicial de 22 e 55 kPa, respectivamente. Os valores adotados para a sucção inicial foram baseados nas medidas obtidas a partir de tensiômetros elétricos instalados a 30 e 60 cm de distância em relação ao centro do furo de sondagem.

O material estudado é constituído por um solo residual de granito, de horizonte C (saprolítico), extraído na cidade de Porto Alegre (RS). A distribuição granulométrica do solo é apresentada na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Distribuição Granulométrica (Oliveira et al, 2001)

Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
3,0%	25,0%	24,0%	15,0%	19,0%	14,0%

A curva característica do solo foi obtida através de medições *in situ* através de tensiômetros elétricos, minitensiômetros elétricos, tensiômetros elétrico com circulação d'água e por meio da técnica do papel filtro (Oliveira et al, 2001). Foram consideradas trajetórias de umedecimento e de secagem, não tendo sido detectada

diferenças significativas que expressassem o fenômeno de histerese no material, conforme indicado na Figura 3.13. Os índices físicos do solo estão resumidos na Tabela 3.11.

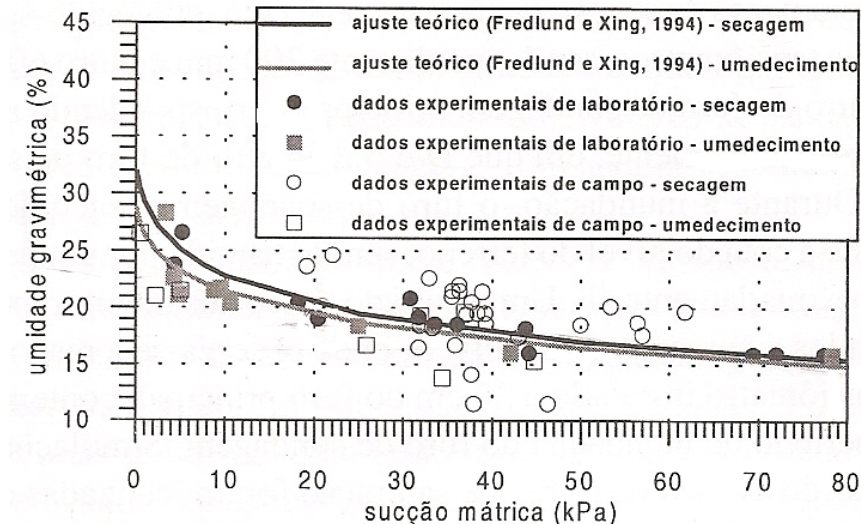


Figura 3.13 – Curva Característica – Escudo Sul-Riograndense (Oliveira et al, 2001)

Tabela 3.11 – Índices Físicos do Solo (Oliveira et al, 2001)

Índice Físico	Varição
Peso específico natural (kN/m^3)	16,4 - 17,7
Peso específico real dos grãos (kN/m^3)	26,8 - 28,2
Índice de vazios	0,78 - 1,01
Umidade (%)	10,3 - 19,7
Grau de Saturação (%)	41,2 - 61,1

3.7 Rio de Janeiro - Lagoa e Joatinga (de Campos et al, 1992)

De Campos et al (1992) apresentaram os resultados obtidos de ensaios executados em equipamento de placa de pressão, desenvolvido na PUC/RJ. O equipamento foi desenvolvido adaptando-se uma célula triaxial e utilizando uma bomba de injeção de mercúrio. Foram ensaiadas amostras de solos residuais, coluvionares e sedimentares.

Neste trabalho serão tratados apenas os dados referentes aos solos residuais, a saber:

- Solo Residual de Gnaisse Kinzigitico, extraído do Chapéu D'Uvas (MG) e Lagoa (RJ) (Fonseca, 1991, apud de Campos et al, 1992);

- Solo Residual de Gnaiss Facoidal retirado da Joatinga (RJ), na cidade do Rio de Janeiro (Maciel, 1991, apud de Campos et al, 1992).

3.7.1 Lagoa

De Campos et al (1992) apresentam os resultados dos ensaios realizados por Fonseca (1991) na área da encosta do morro dos Cabritos próximo a Lagoa Rodrigo de Freitas, na cidade do Rio de Janeiro. A Tabela 3.12 apresenta a distribuição granulométrica do material ensaiado e a Figura 3.14 a curva característica do solo.

Tabela 3.12 – Distribuição Granulométrica Lagoa (adaptado de de Campos et al, 1992)

Pedregulho	Areia	Silte	Argila	LL	LP	IP	G _s
3,0%	25,0%	7,0%	65,0%	38,00%	NP	NP	2,58

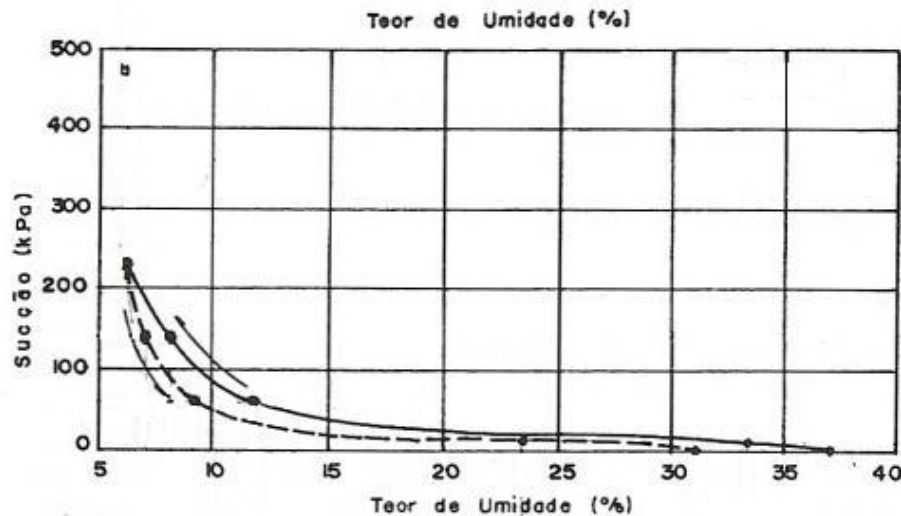


Figura 3.14 – Curva Característica: Solo Saprolítico de Gnaiss Kinzigítico Lagoa (de Campos et al, 1992).

3.7.2 Joatinga

Os ensaios foram realizados por Maciel (1991) por meio da técnica de saturação preliminar dos corpos de prova. Foram ensaiadas amostras retiradas de 3 profundidades diferentes de um perfil de intemperismo de um gnaiss facoidal no bairro Joatinga, na cidade do Rio de Janeiro (RJ). As 3 amostras foram classificadas

como residual maduro e saprolito, tendo sido extraídas duas amostras de profundidades diferentes do material saprolítico (N1 e N2). A Tabela 3.13 apresenta a distribuição granulométrica de cada material e a Figura 3.15 a curva característica para cada amostra (N1, N2 e Maduro).

Tabela 3.13 – Caracterização Geotécnica (adaptado de de Campos et al, 2001)

	Residual Maduro	Saprolítico N1	Saprolítico N2
Pedregulho	3,0%	10,0%	8,0%
Areia	25,0%	76,0%	84,0%
Silte	7,0%	8,0%	2,2%
Argila	65,0%	6,0%	5,8%
G_s	2,58	2,66	2,65

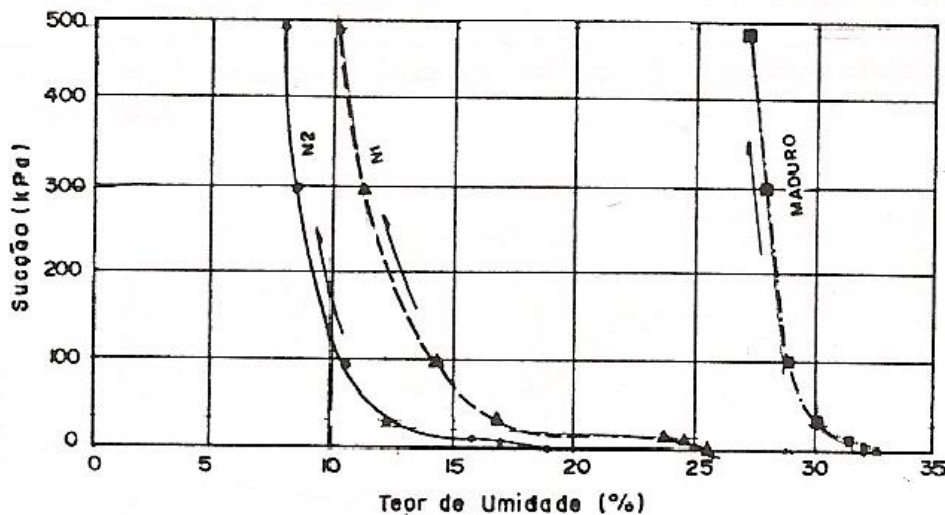


Figura 3.15 – Curva Característica: Solo Residual de Gnaiss Facoidal (de Campos et al, 1992).

3.8 Rio de Janeiro - Vista Chinesa (Delgado, 1993)

Delgado (1993) realizou estudos de resistência ao cisalhamento e da relação sucção-umidade em solos residuais e coluvionares não saturados provenientes de um escorregamento ocorrido em 1988, na Vista Chinesa (Floresta da Tijuca), na cidade do Rio de Janeiro.

A determinação da resistência foi realizada a partir de ensaios de cisalhamento direto em amostras submersas e através de ensaios de cisalhamento direto com controle de sucção em um equipamento desenvolvido por Fonseca (1991) nos laboratórios da PUC-Rio.

O equipamento é constituído por uma câmara de compressão, que torna possível a aplicação de pressão de ar na amostra, e da caixa de cisalhamento, no interior da câmara. O controle da sucção é realizado por um disco cerâmico com valor de pressão de borbulhamento de 300 kPa, instalado na base da caixa de cisalhamento; e por meio de uma câmara de água, abaixo do disco cerâmico, conectada com o sistema de medição de vazões através de duas saídas, que servem para a aplicação de contra-pressão. Por ser dotado de câmaras independentes de ar e água, o controle e aplicação de pressões de água e ar podem ser efetuados individualmente no topo e na base do corpo de prova. Os ensaios foram realizados com valores aproximados de 30, 80, 150 e 250 kPa de sucção aplicada em cada material.

Delgado (1993) introduziu duas modificações no equipamento com a finalidade de melhorar seu desempenho:

- a) Inclusão de uma união tipo universal no contato entre a célula de carga e o top-cap com intuito de corrigir a variação de tensões normais ocasionadas pela existência de uma força inclinada gerada sobre o pino da base da célula de carga;
- b) Introdução de um sistema tipo bomba de bolhas para permitir uma melhor avaliação da variação de volume de água contido na amostra.

O autor desenvolveu um sistema de placa de pressão para a determinação da curva característica. O sistema desenvolvido é composto, basicamente, por três partes:

- uma tampa constituída por uma válvula para a pressurização do ar dentro da câmara;
- o corpo da câmara com espessura de 11,4 mm, suficiente para suportar pressões da ordem de 1000 kPa; e
- uma base formada por um disco cerâmico de alto valor de entrada de ar e por uma câmara de ar.

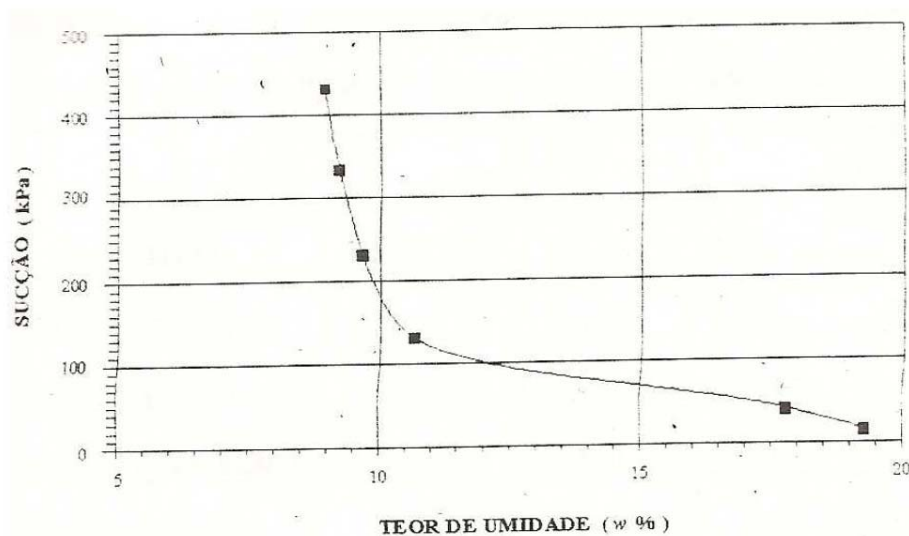
No equipamento, a pressão de ar é aplicada na tampa do equipamento por meio de ar comprimido; e a pressão de água, na base, através de uma interface ar/água. A faixa de sucção da placa desenvolvida é de 100 a 1500 kPa. Maiores detalhes sobre o equipamento de placa de pressão desenvolvido, sobre as modificações no equipamento de cisalhamento direto com sucção controlada e sobre as técnicas de ensaios adotadas podem ser obtidos em Delgado (1993).

Nesse trabalho serão tratados apenas os dados referentes as amostras de solos residuais decorrentes da alteração da rocha Biotita-Gnaiss predominante na área de estudo e denominadas pelo autor como residual vermelho (RV) e residual típico (RT), retiradas de profundidades entre 0,5 e 1,5 m. A Tabela 3.14 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização.

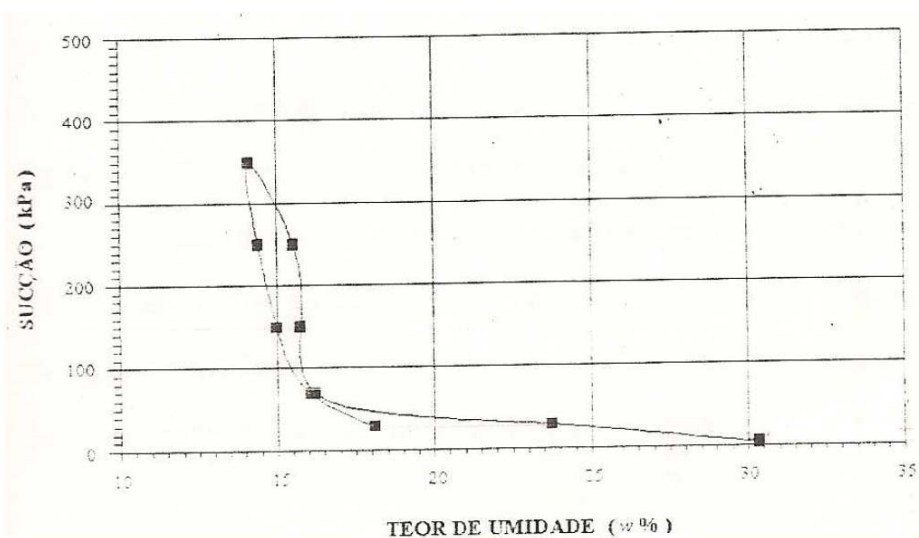
Tabela 3.14 – Caracterização Geotécnica (Delgado, 1993)

	Residual Vermelho	Residual Típico
Pedregulho	9,12%	8,38%
Areia Grossa	26,91%	26,21%
Areia Média	12,84%	20,99%
Areia Fina	20,27%	24,57%
Silte	6,46%	12,17%
Argila	24,69%	7,69%
LL	50,65%	30,3%
LP	32,21%	NP
IP	18,44%	-
G	2,77	2,79

Delgado (1993) verificou que todos os materiais apresentaram pequena histerese, decorrente de fatores como o efeito de ar aprisionado nos poros e diferente ângulo de contato do menisco durante as trajetórias de umedecimento e secagem. Tal conclusão foi possível a partir da observação de que a variação volumétrica ocorrida nas amostras foi pequena na faixa de sucção adotada nos ensaios e pelo fato dos materiais apresentarem estruturas rígidas quanto à sucção. A partir dessa constatação, o autor considerou razoável a adoção de uma única curva para cada material, conforme apresenta a Figura 3.16.



(a) Residual Vermelho



(b) Residual Típico

Figura 3.16 – Curvas Características – Vista Chinesa (Delgado, 1993)

Analisando os índices físicos das amostras dos ensaios de curva característica dos materiais ensaiados (Tabela 3.15), verificou-se, no caso da amostra de solo residual típico, que para uma sucção de 5 kPa, cuja amostra apresentava índice de vazios de 1,32 e teor de umidade em peso de 30,57%, a saturação equivalente seria de 62% considerada muito baixa para o nível de sucção correspondente.

Tabela 3.15 – Índices Físicos das Amostras (Delgado, 1993)

Solo	Amostra	e	S%	w_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_{nat} (kN/m ³)
RV	1	0,88	41,61	13,22	14,56	16,52
	2	0,84	38,21	11,59	14,85	16,62
RT	1	1,32	47,35	22,40	11,79	14,43
	2	1,16	37,82	15,72	12,65	14,64

Cabe ressaltar que os valores obtidos para os índices de vazios das amostras do solo residual típico são considerados muito altos. Dada essas observações adotou-se utilizar nesse trabalho os resultados médios dos demais ensaios realizados pelo autor, conforme apresentado na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 – Índices Físicos Adotados (médios) (Delgado, 1993)

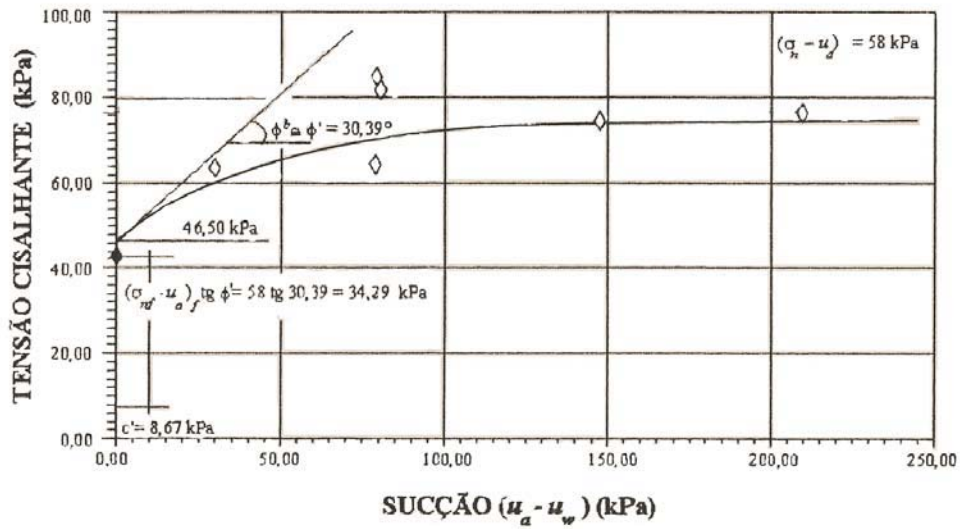
Solo	e	S%	w_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_{nat} (kN/m ³)
RV	0,93	54,49	17,88	14,16	16,69
RT	1,09	58,70	22,64	16,04	16,13

A Figura 3.17 apresenta as envoltórias de resistência com relação à sucção para as amostras ensaiadas.

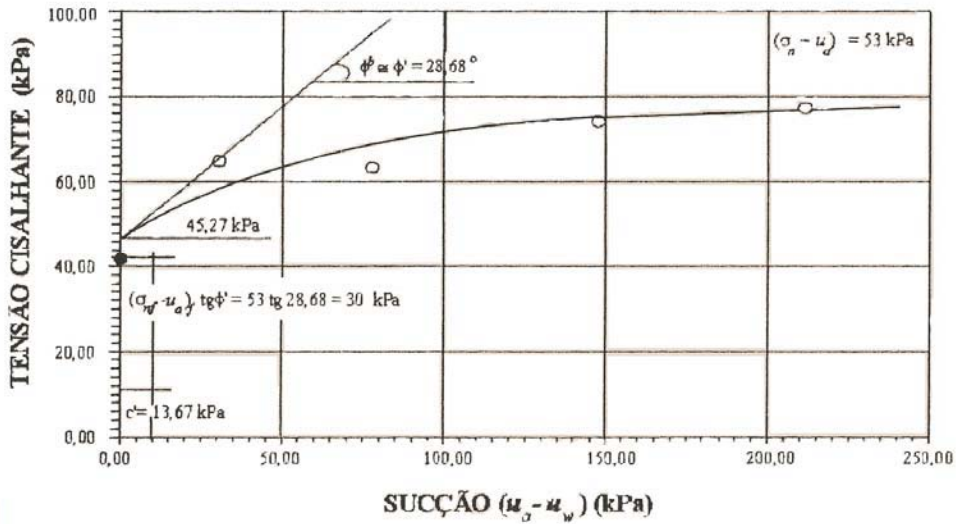
3.9 São Paulo - São Carlos - Campo Experimental da USP (Machado e Vilar, 1998; Vieira e Marinho, 2001).

Diversos estudos sobre comportamento de solos não saturados têm sido realizados no campo experimental da Universidade de São Paulo (USP).

Machado e Vilar (1998) realizaram ensaios de sucção controlada em amostras indeformadas num perfil de solo constituído, até aproximadamente 6,5 m de profundidade, por sedimentos cenozóicos adjacentes a rochas do grupo São Bento formada por arenitos e magmatitos. Os ensaios foram realizados em amostras extraídas ao longo de profundidades representativas de todo o perfil, sendo 2 amostras na camada sedimentar e 1 amostra na camada de solo residual. A Tabela 3.17 e a Figura 3.18 apresentam as informações da caracterização e da curva característica da amostra representativa do solo residual.



(a) Residual Vermelho



(b) Residual Típico

Figura 3.17 – Envoltória de Resistência com Relação à Sucção Vista Chinesa (Delgado, 1993)

Tabela 3.17 – Caracterização do Solo (Machado e Vilar, 1998)

Prof. (m)	8,0	w_{campo} (%)	16,7
Areia	68,9%	w_{ot} (%)	11,2
Silte	13,7%	γ_{campo} (kN/m ³)	19,2
Argila	17,4%	γ_g (kN/m ³)	27,1
LL (%)	28	γ_{dmax} (kN/m ³)	18,9
LP (%)	17		

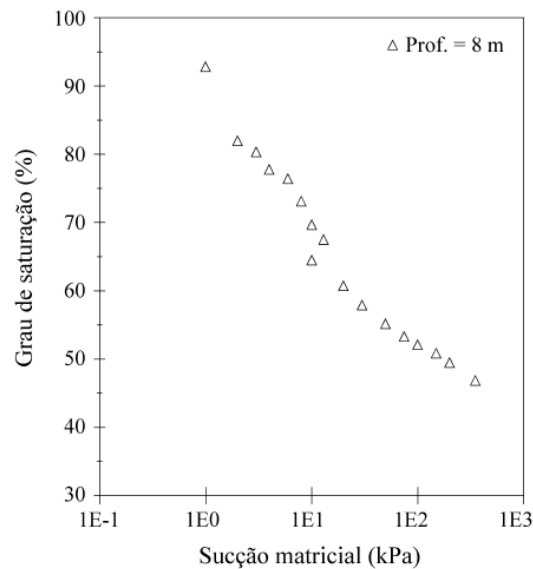


Figura 3.18 – Curva Característica – São Carlos-USP (Machado e Vilar, 1998)

Os autores também realizaram ensaios triaxiais convencionais em conjunto com ensaios triaxiais com controle de sucção e em estágios múltiplos. As sucções matriciais utilizadas nos ensaios foram de 40, 80, 120 e 160 kPa. A Figura 3.19 apresenta a envoltória de resistência obtida nos ensaios realizados pelos autores e ajustada conforme a proposta de Vilar (1997).

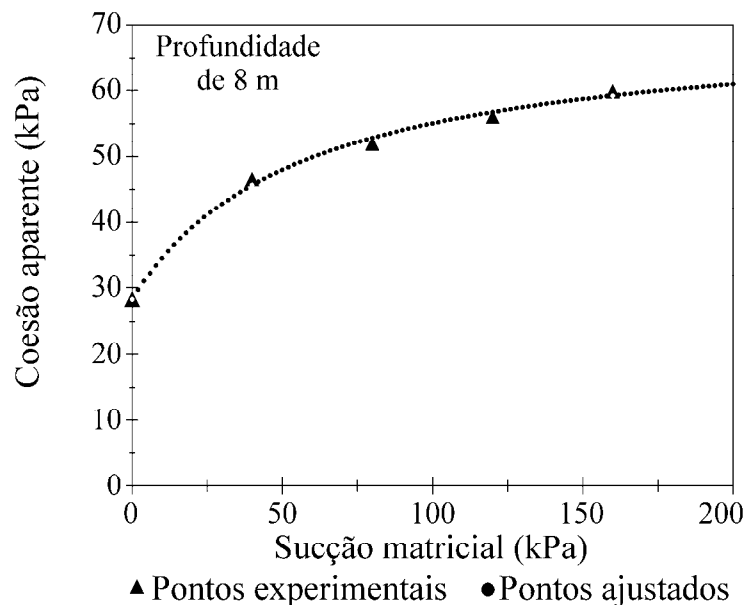


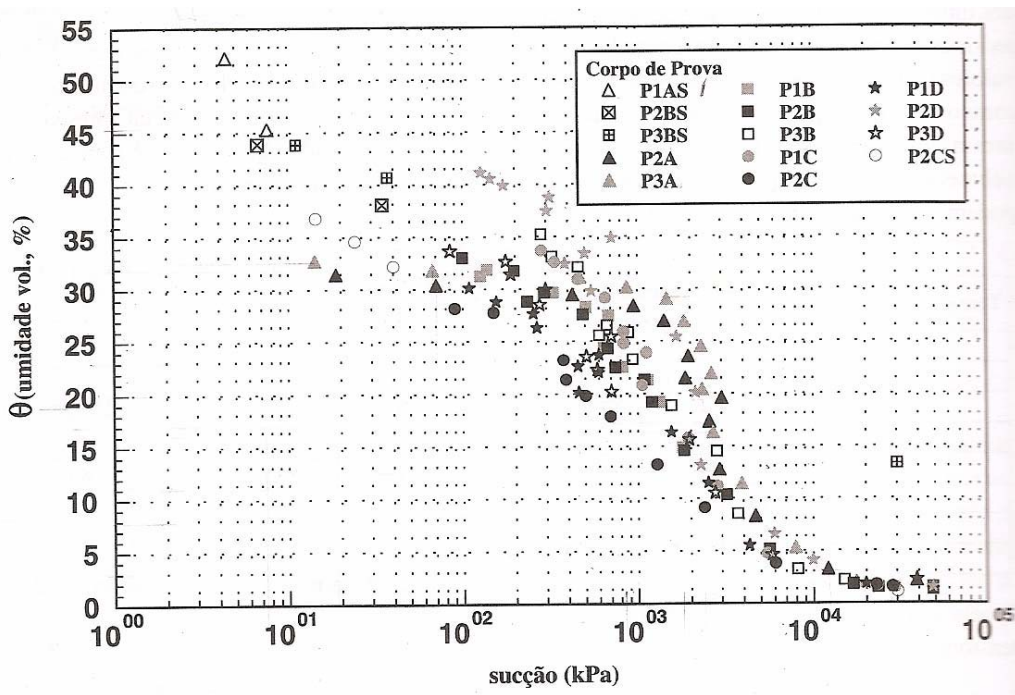
Figura 3.19 – Envoltória de Resistência com Relação à Sucção São Carlos-USP (Machado e Vilar, 1998)

Vieira e Marinho (2001) realizaram ensaios de monitoramento da sucção por meio de tensiômetros, num período de aproximadamente 1 ano, com intuito de obter

informações sobre o comportamento sazonal do perfil de sucção em taludes verticais.

De acordo com os autores, o solo estudado é formado por um solo residual de gnaiss, constituído por dois horizontes claramente definidos, o solo residual maduro com aproximadamente 2 metros de espessura e o solo saprolítico, que ultrapassa 25 metros de profundidade. Para a determinação da curva característica, foram extraídos 12 amostras indeformadas nas profundidades de 1,6m, 3,0m, 4,4m e 6,0m.

As curvas de retenção, apresentadas na Figura 3.20, foram obtidas no ramo de secagem, a partir da umidade de campo. As sucções foram medidas utilizando-se a técnica do papel filtro descrita por Marinho (1994). Após a secagem, 4 amostras foram umedecidas com o objetivo de se obter informações sobre a capacidade de retenção na faixa de baixo valores de sucção, essas amostras estão identificados na legenda com a letra "S".



Profundidade	Nomenclatura
1,6 m	P1AS/P2A/P3A
3,0 m	P1B/P2B/ P2BS/P3B/P3BS
4,4 m	P1C/P2C/P2CS
6,0 m	P1D/P2D/P3D

Figura 3.20 – Curva Característica – USP (Vieira e Marinho, 2001)

3.10 São Paulo - São Carlos - Rodovia Engenheiro Thales de L. Peixoto - SP (Calle, 2000)

Calle (2000) realizou ensaios de resistência, de curva de retenção e de condutividade hidráulica saturada e não saturada, com intuito de retro-analisar um talude de solo residual, localizado Km 261 na Rodovia Engenheiro Thales de L. Peixoto (SP 318), São Carlos.

Foram realizadas sondagens de simples reconhecimento, com medida de N do SPT e ensaios de caracterização a cada metro de profundidade. Foram extraídas amostras deformadas de três locais de amostragem localizados no topo (AI1 e AI3) e na base do talude (AI2) e 2 blocos indeformados (25 x 25 x 25 cm) de cada local a uma profundidade de 1,50 m.

Os resultados da caracterização do material e da campanha de sondagem são apresentados na Tabela 3.18, Figura 3.21 e na Figura 3.22, respectivamente.

Tabela 3.18 - Caracterização Geotécnica (adaptado de Calle, 2000)

Amostra	w (%)	γ_t (kN/m ³)	γ_g (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e	S _r (%)
AI1 (Topo)	21,50	16,00	29,00	13,20	1,20	52,10
AI2 (Base)	16,90	18,0	29,00	15,40	0,88	55,50
AI3 (Topo)	21,00	16,00	29,00	13,20	1,20	50,90

A Figura 3.23 apresenta os perfis dos limites de consistência, de umidade e grau de saturação, relativos à sondagem SP-01.

Para os ensaios da curva de retenção, utilizou-se a técnica de papel filtro e de câmara de pressão, adotando-se a trajetória de secagem. A Tabela 3.19,

Tabela 3.20 e Tabela 3.21 apresentam os dados experimentais obtidos nos ensaios para cada amostra indeformada. É curioso observar que, em todas as amostras, ocorre uma diferença significativa no valor da sucção para os dois menores valores de teor de umidade. Este fato demonstra a boa resposta da técnica de papel filtro para determinação de altos valores de sucção.

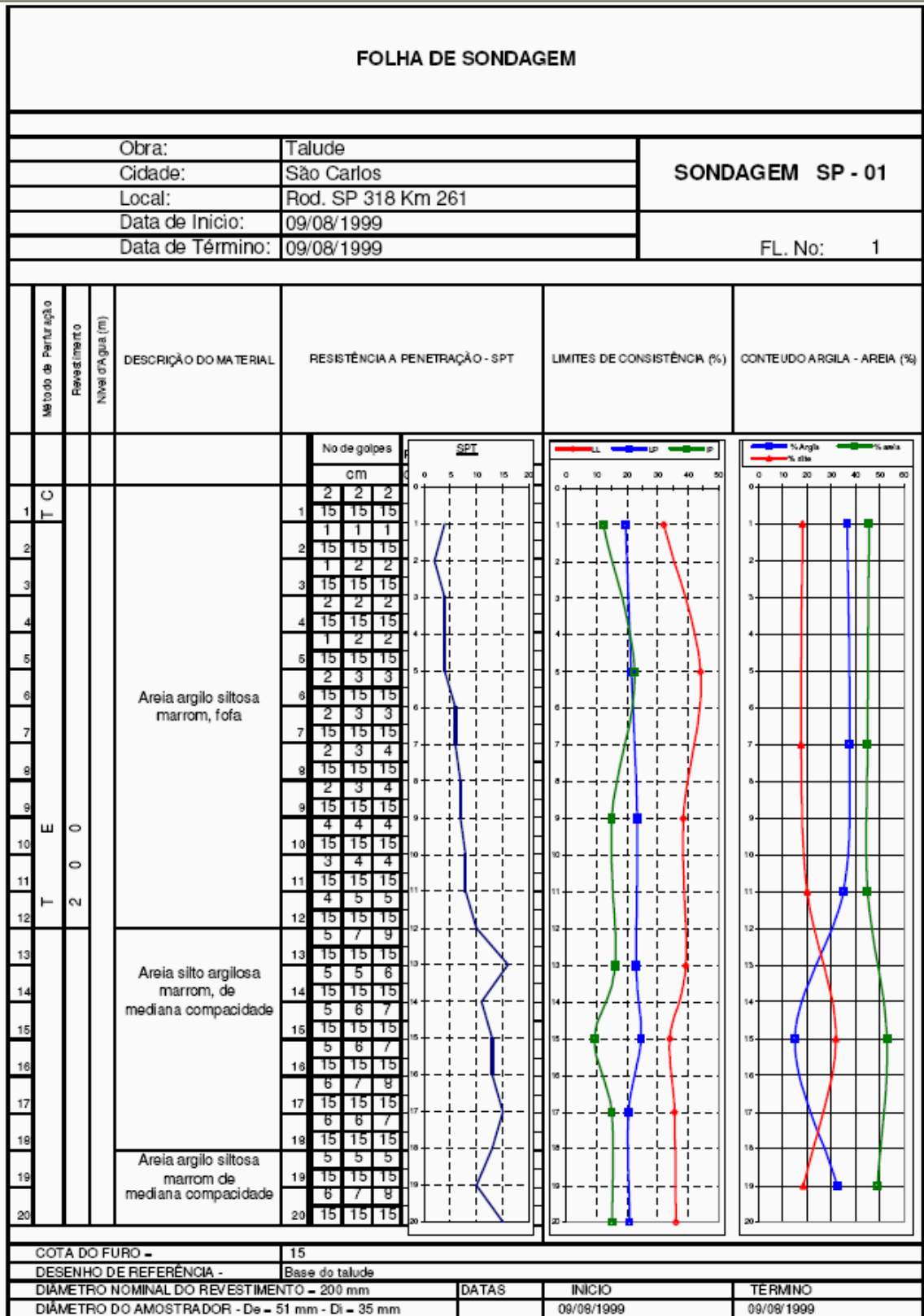


Figura 3.21 – Perfil de Sondagem - SP-01 (Calle, 2000).

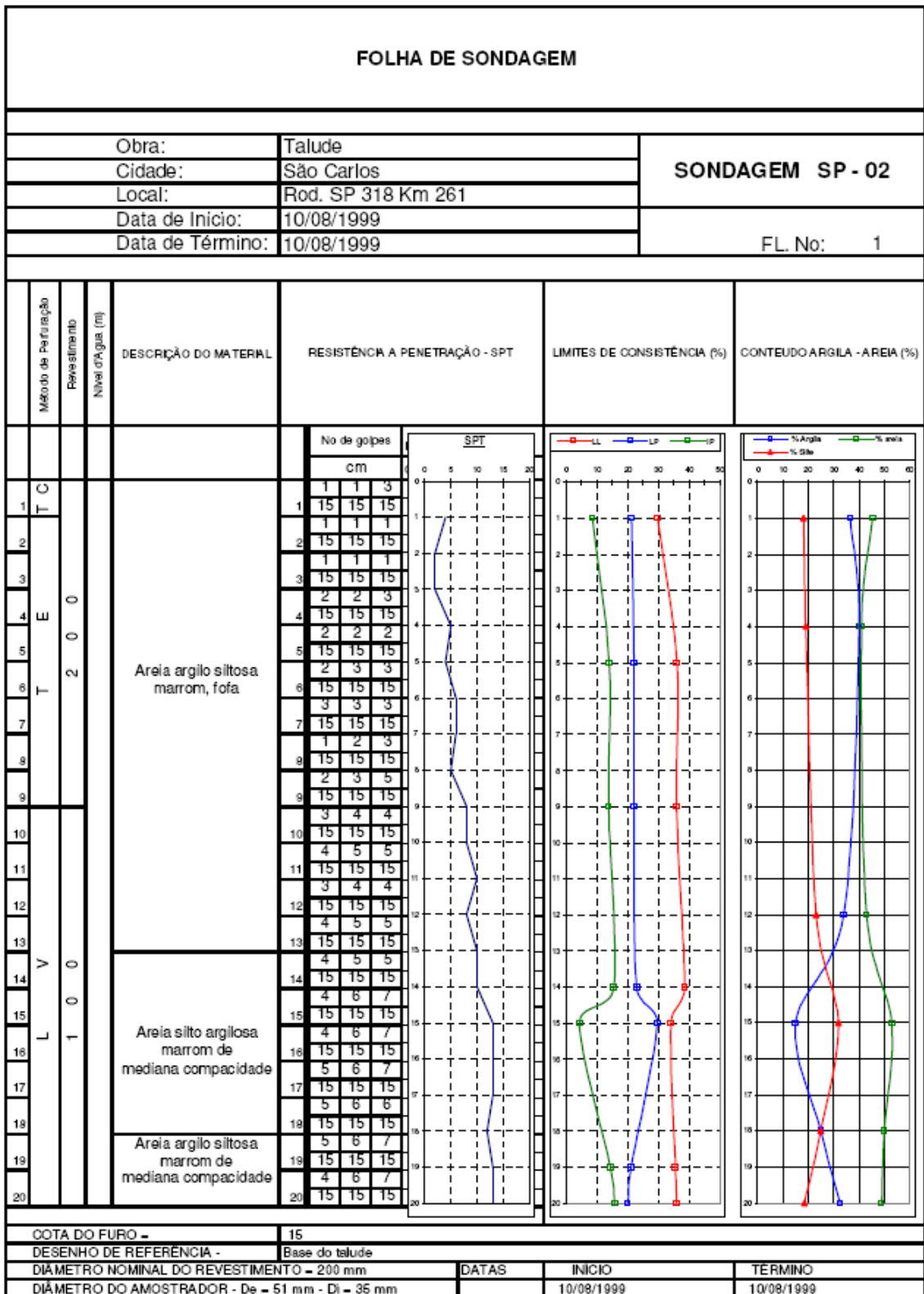


Figura 3.22 – Perfil de Sondagem - SP-02 (Calle, 2000).

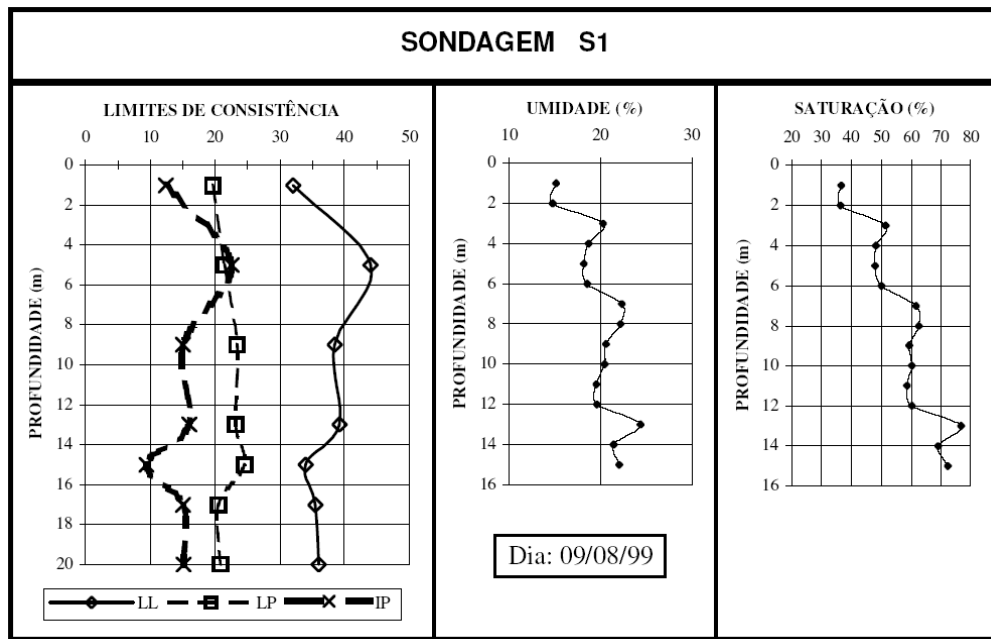


Figura 3.23 – Limites de Consistência e Umidade - SP-01 (Calle, 2000)

Tabela 3.19 - Dados Experimentais – Amostra AI1 (adaptado de Calle, 2000)

ψ (kPa)	θ (%)	Técnica	ψ (kPa)	θ (%)	Técnica
0,10	53,40	Papel Filtro	4,46	33,80	Papel Filtro
2,63	40,40	Papel Filtro	5,00	33,28	Câmara de Pressão
3,15	37,00	Papel Filtro	5,25	33,40	Papel Filtro
3,25	38,90	Papel Filtro	10,00	29,03	Câmara de Pressão
3,30	38,90	Papel Filtro	24,06	25,50	Papel Filtro
3,39	37,60	Papel Filtro	27,06	25,50	Papel Filtro
3,42	37,00	Papel Filtro	50,00	22,84	Câmara de Pressão
3,75	36,60	Papel Filtro	61,16	22,30	Papel Filtro
3,82	37,60	Papel Filtro	61,82	22,30	Papel Filtro
3,92	36,60	Papel Filtro	100,00	21,28	Câmara de Pressão
3,92	38,60	Papel Filtro	300,00	20,39	Câmara de Pressão
4,14	38,60	Papel Filtro	400,00	19,30	Câmara de Pressão
4,22	33,40	Papel Filtro	13.552,30	17,20	Papel Filtro
4,30	33,80	Papel Filtro	13.997,00	17,20	Papel Filtro

Tabela 3.20 – Dados Experimentais – Amostra AI2 (adaptado de Calle, 2000)

ψ (kPa)	θ (%)	Técnica	ψ (kPa)	θ (%)	Técnica
0,10	46,70	Papel Filtro	25,74	32,60	Papel Filtro
2,74	40,40	Papel Filtro	25,84	31,90	Papel Filtro
2,78	40,40	Papel Filtro	26,25	32,60	Papel Filtro
4,21	38,50	Papel Filtro	26,67	31,90	Papel Filtro
4,56	38,50	Papel Filtro	26,80	32,10	Papel Filtro
4,78	39,40	Papel Filtro	27,57	32,10	Papel Filtro
5,02	39,40	Papel Filtro	31,74	30,60	Papel Filtro
7,19	37,20	Papel Filtro	33,26	30,60	Papel Filtro
7,72	35,60	Papel Filtro	41,07	30,40	Papel Filtro
7,96	35,60	Papel Filtro	42,14	30,40	Papel Filtro
8,64	37,30	Papel Filtro	3.542,60	23,20	Papel Filtro
8,77	37,30	Papel Filtro	4.292,15	23,20	Papel Filtro

Tabela 3.21 - Dados Experimentais – Amostra AI3 (adaptado de Calle, 2000)

ψ (kPa)	θ (%)	Técnica	ψ (kPa)	θ (%)	Técnica
0,10	52,40	Papel Filtro	4,42	31,20	Papel Filtro
2,02	40,60	Papel Filtro	4,80	31,20	Papel Filtro
2,09	38,80	Papel Filtro	5,14	31,20	Papel Filtro
2,36	33,90	Papel Filtro	5,30	31,20	Papel Filtro
2,70	38,00	Papel Filtro	5,60	31,20	Papel Filtro
2,70	33,90	Papel Filtro	6,00	29,60	Papel Filtro
2,76	40,60	Papel Filtro	6,40	29,60	Papel Filtro
2,84	33,30	Papel Filtro	6,60	29,40	Papel Filtro
2,90	35,20	Papel Filtro	7,01	29,40	Papel Filtro
3,08	31,50	Papel Filtro	10,00	25,83	Câmara de Pressão
3,11	31,50	Papel Filtro	50,00	24,10	Câmara de Pressão
3,22	35,40	Papel Filtro	56,30	22,80	Papel Filtro
3,22	35,20	Papel Filtro	60,00	22,80	Papel Filtro
3,28	31,2	Papel Filtro	100,00	21,28	Câmara de Pressão
3,54	35,4	Papel Filtro	300,00	19,86	Câmara de Pressão
3,70	35,2	Papel Filtro	400,00	18,67	Câmara de Pressão
3,86	33,30	Papel Filtro	12.039,00	15,80	Papel Filtro
4,00	35,20	Papel Filtro	14.404,00	15,80	Papel Filtro
4,40	31,2	Papel Filtro			

Foram realizados 8 ensaios triaxiais com controle de sucção com a amostra indeformada coletada no topo do talude (AI1). As sucções matriciais utilizadas foram de 30, 50, 75, 100, 150 e 300 kPa. Independente do nível de sucção, o valor do

ângulo de atrito foi da ordem de 35° e está em consonância com os resultados obtidos nos ensaios triaxiais consolidado e drenado.

A Tabela 3.22 reproduz as condições de ensaios e a Figura 3.24 apresenta a envoltória de resistência não saturada obtida no ensaio.

Tabela 3.22 – Condição de Ensaio (Calle, 2000)

CP	σ_3 (kPa)	u_w (kPa)	u_a (kPa)	$u_w - u_a$ (kPa)	$\sigma_3 - u_a$ (kPa)
1	80	0	30	30	50
2	100	0	50	50	50
3	200	50	100	50	100
4	125	0	75	75	50
5	150	0	100	100	50
6	240	40	140	100	100
7	200	0	150	150	50
8	350	0	300	300	50

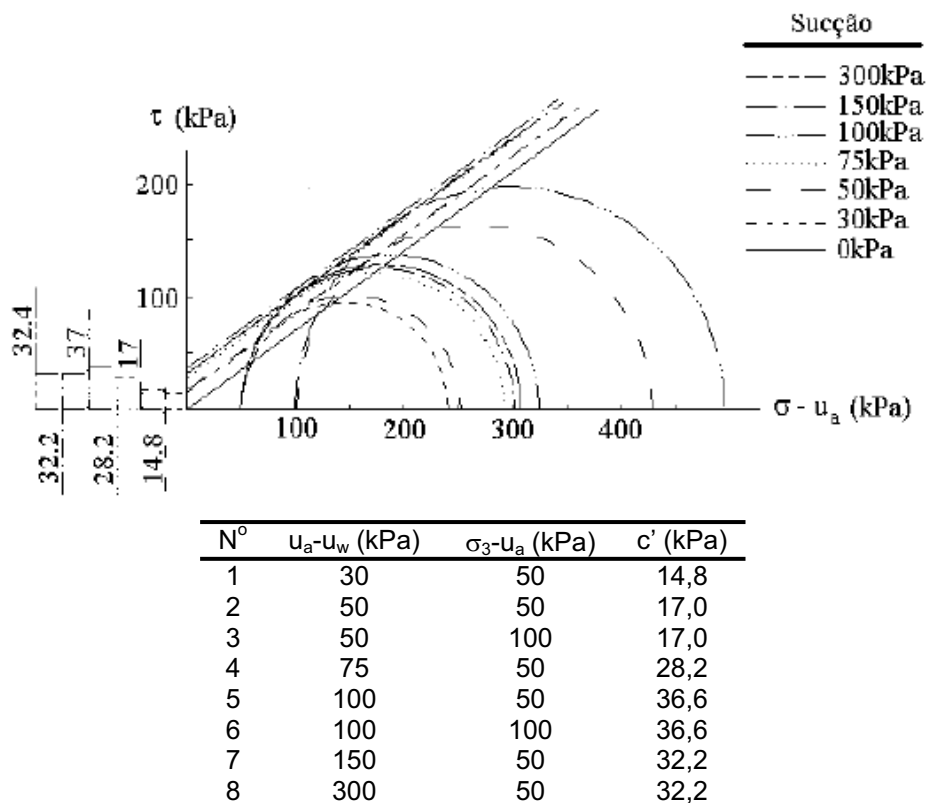


Figura 3.24 – Envoltória de Resistência – A11 (adaptado de Calle, 2000).

Maiores detalhes quanto a metodologia aplicada para cada ensaio, incluindo os ensaios de condutividade hidráulica, não citadas nesse trabalho, bem como os parâmetros adotados e os resultados da retroanálise do talude podem ser obtidas na dissertação de mestrado de Calle (2000).

4 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DE SOLOS NÃO SATURADOS

4.1 Introdução

O presente capítulo descreve as ferramentas numéricas, o critério de erro dos modelos e a qualidade dos ajustes adotados no presente trabalho. Também será apresentada uma série de análises preliminares realizadas com o intuito de validar e comparar as ferramentas numéricas.

O estudo consistiu na verificação do número de iterações necessárias para obtenção do resultado de cada modelo. Esse estudo serviu como parâmetro de definição do número de iterações utilizadas nos demais ajustes.

4.2 Ferramentas Numéricas

Neste trabalho foram utilizadas duas ferramentas numéricas na solução dos problemas inversos envolvendo os dados experimentais descritos no capítulo anterior: MATLAB 7.0[®] e EVOLVER 5.5.

4.2.1 Matlab 7.0

O Matlab[®] (abreviatura de MATrix LABoratory - Laboratório de Matrizes) é um software de simulação matemática que realiza operações matriciais, constrói gráficos (2D e 3D), além de manipular funções especializadas (França et al, 2008). As funções disponibilizadas pelo software permitem solucionar desde problemas envolvendo redes neurais, distribuições estatísticas a problemas de otimização envolvendo problemas inversos.

O programa trabalha com uma linguagem de programação de alto nível, na qual suas funções são constituídas por um alto desempenho numérico, capazes de resolver problemas computacionais de forma eficiente se comparada com as linguagens de programação usuais.

O Matlab[®] é constituído por um ambiente interativo para o desenvolvimento de algoritmos, análise e visualização de dados e computação numérica. Outro aspecto positivo é quanto à possibilidade de execução de arquivos texto contendo uma sequência de instruções definidas pelo usuário. Esses arquivos texto, que têm

extensão '.m', podem ser criados e editados no ambiente de trabalho do Matlab[®] ou até mesmo no simples bloco de notas do Windows. Maiores informações quanto as estruturas das funções disponíveis e outras particularidades podem ser obtidas no arquivo de ajuda (“help”) do próprio programa (Mathworks Inc, 2008).

Dentre os diversos métodos para a solução de problemas inversos disponíveis no Matlab[®] foram adotados dois métodos: o proposto por Marquardt (1963) e o de Algoritmos Genéticos (Goldberg, 1989).

Para o método de Levenberg-Marquardt foi utilizada a função “lsqnonlin” e para o método de algoritmos genéticos (AG’s) foi utilizado toolbox do próprio programa. Os Apêndice A ao Apêndice C apresentam a estrutura dos arquivos texto elaborados para cada modelo e o Anexo A, o algoritmo da função “lsqnonlin”.

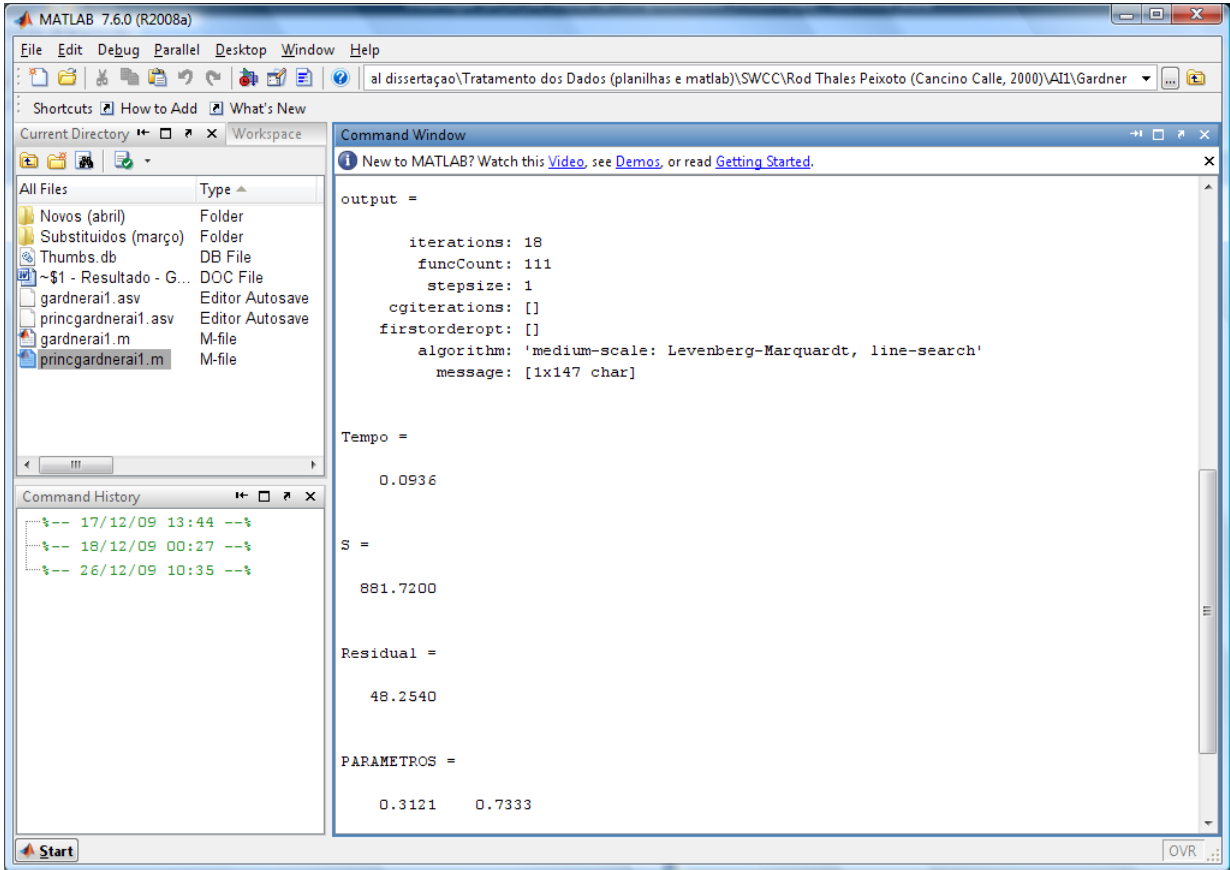
A Figura 4.1 mostra as telas de trabalho do programa Matlab[®]: (a) corresponde a janela de criação e edição dos arquivos com extensão .m que contem as rotinas a serem executadas pelo algoritmo; (b) apresenta a tela principal do programa, onde é apresentado o resultado final da análise (janela “Command Window”); (c) apresenta o resultado gráfico obtido para a análise.

```

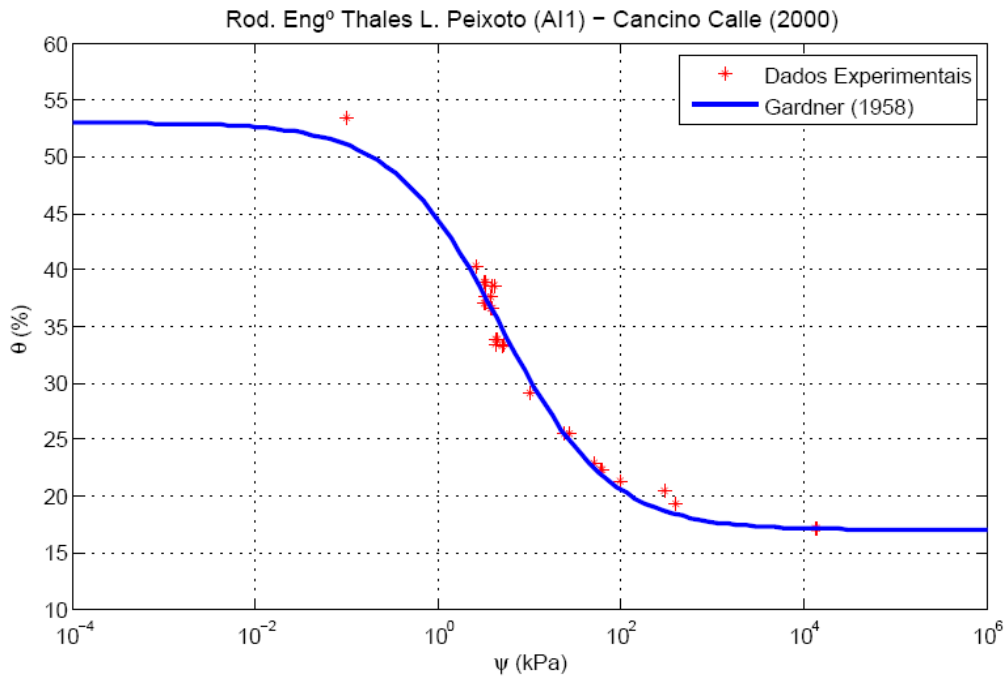
1 - echo off
2 - clc
3 - t0=cputime
4 - x0 = [0.1 0.1];
5 - %options = optimset('LargeScale','off');
6 - options = optimset('LargeScale','off','MaxFunEvals',50000,'MaxIter',10000,'TolFun',0.01);
7 - [x,resnorm,residual,exitflag,output]=lsqnonlin('gardnerai1',x0,[],[],options)
8 - fiexp=[0.10 2.63 3.15 3.25 3.30 3.39 3.42 3.75 3.82 3.92 3.92 4.14 4.22 4.30 4.46 5.00 5.25 10.00 24.06 27.06 50.00 61.16 61.82 100.00 300.00 400.00]
9 - tetaexp=[53.40 40.40 37.00 38.90 38.90 37.60 37.00 36.60 37.60 36.60 36.60 38.60 33.40 33.80 33.80 33.28 33.40 29.03 25.50 25.50 22.84 22.30 22.30 2]
10 - tetas=0.53;
11 - tetar=0.17;
12 - t=tetas-tetar;
13 - fib=0.1;
14 - t1=cputime;
15 - Tempo = t1-t0
16 - % TRACADO GRÁFICO
17 - A=x(1);
18 - B=x(2);
19 - P=logspace(-4,6,100);
20 - for z=1:100;
21 - Q=P(z);
22 - tetagraf=100*((1/(1+(A*(Q^B))))*(t))+tetar;
23 - y(z)=tetagraf;
24 - end
25 - semilogx (fiexp,tetaexp,'r',P,y,'m')\plotar os valores experimentais + a curva calculada.
26 - title ('Rod. Engo Thales L. Peixoto (All) - Cancino Calle, 2000') %insere um titulo no grafico.
27 - xlabel ('\psi (kPa)') %insere um titulo ao eixo y
28 - ylabel ('\theta (%)') %insere um titulo ao eixo x
29 - grid
30 - axis([1e-4 1e6 10 60])
31 - legend ('Dados Experimentais','Gardner (1958)')
32 - %RESULTADOS
33 - S = sum (tetaexp)
34 - Residual = [residual]

```

(a) Editor – Janela de criação e edição do arquivo de extensão .m



(b) Tela Principal – Resultado da Análise



(c) Resultado Gráfico

Figura 4.1 – Exemplo do programa Matlab®

4.2.2 Evolver 5.5

O pacote de software Evolver fornece aos usuários uma maneira fácil de encontrar as melhores soluções para diversos tipos de problemas, a partir do uso acoplado ao Microsoft Excel[®], utilizando AG para o processo de otimização. A utilização do software consiste basicamente na criação do modelo a ser estudado em uma planilha eletrônica do Excel[®] e em seguida a resolução do problema por meio da ferramenta numérica.

A planilha utilizada pode ser estruturada a partir das funções, fórmulas, gráficos e macros disponibilizados pelo Microsoft Excel[®], o que possibilita a criação de modelos realistas do problema. O Evolver fornece a interface para descrever a incerteza do modelo e suas variáveis. Em conjunto, esses softwares podem encontrar as melhores soluções para praticamente qualquer tipo de problema que possa ser modelado.

O método de solução adotado pelo Evolver é o de algoritmo genético, que podem ser associados a distribuições de probabilidades e simulações para determinar a incerteza do modelo proposto. A partir do modelo estruturado na planilha, basta indicar as células que contém as variáveis do modelo e a célula a ser maximizada, minimizada ou pré-definida com um valor específico, conforme for o caso em estudo (Figura 4.2). Esta célula deve conter uma fórmula, a qual depende das células ajustáveis. Outras informações que devem ser fornecidas ao programa é a população a ser considerada e condição de parada do processo.

The screenshot displays the Evolver software interface within Microsoft Excel. The main window shows a spreadsheet with mathematical formulas and data tables for "van Genuchten (1964)". The "Evolver-Model" dialog box is open, showing the optimization goal set to "Minimum" for cell "=F108". The "Adjustable Cell Ranges" section lists three constraints: "0 <= =B16 <= 5 Any", "0 <= =C16 <= 5 Any", and "0 <= =D16 <= 5 Any". The "Constraints" section is currently empty.

A detailed view of the "Evolver-Model" dialog box. It shows the "Optimization Goal" set to "Minimum" for cell "=F108". The "Adjustable Cell Ranges" section is expanded, showing three rows of constraints: "0 <= =B16 <= 5 Any", "0 <= =C16 <= 5 Any", and "0 <= =D16 <= 5 Any". The "Constraints" section is empty.

Figura 4.2 – Exemplo do programa Evolver – Indicação das Células a serem Ajustadas

Uma vantagem da utilização do software é a familiarização com o ambiente de trabalho oferecido pelo Excel[®]. Maiores detalhes sobre o uso e as utilidades do software podem ser obtidas em seu manual do usuário (Palisade Corporation, 2009).

4.3 Critério de Erro e Qualidade do Ajuste

Os parâmetros de ajuste das proposições de modelagem da curva característica e da resistência serão obtidos usando método dos mínimos quadrados. Assim sendo, a função objetivo, definida como o somatório do quadrado da diferença entre valores medidos e previstos, deve ser minimizada com relação aos parâmetros dos modelos. Desta forma, a função objetivo apresentada na equação (1.28), toma as seguintes formas:

$$F(p) = \sum_{i=1}^N (\theta_{med_i} - \theta_{prev_i})^2 \quad (4.1)$$

e

$$F(p) = \sum_{i=1 \rightarrow N} (\tau_{us med_i} - \tau_{us prev_i})^2 \quad (4.2)$$

onde:

θ_{med} = teor de umidade medido experimentalmente;

θ_{prev} = teor de umidade previsto pelo ajuste realizado;

τ_{usmed} = parcela de coesão devida a sucção medido experimentalmente;

τ_{usprev} = parcela de coesão devida a sucção previsto pelo ajuste realizado;

N = número de dados

A função objetivo não é adequada para comparar os ajustes de pontos experimentais em situações em que se dispõe de um número variável de amostras. Nesses casos, um maior número de amostras pode promover um valor maior de $F(p)$. Por outro lado, esta função poderia ser adotada, com sucesso, na comparação de resultados de um único solo.

Uma alternativa para minimizar este problema seria normalizar o valor da função objetivo em relação aos dados experimentais, adotando, por exemplo:

$$\varepsilon = \frac{F(p)}{\sum \theta_{med}^2} \quad (4.3)$$

Todavia, essa equação também não é capaz de avaliar a eficácia global de um modelo, uma vez que os resultados finais seriam influenciados diretamente pelo número de amostras. Em outras palavras, o resultado poderia indicar menores erros (ε) para situações em que se dispõe de maior número de amostras.

Outro aspecto a ser considerado na adoção da função objetivo é o fato desta não incorporar o número de parâmetros a serem ajustados. Assim sendo, comparando-se modelos que necessitam de um número diferente de parâmetros de ajuste, não há como ter uma medida concreta da eficácia de um determinado modelo com relação a outro.

Este problema poderia também ser minimizado introduzindo o número de variáveis (n_p) no critério de erro; isto é

$$Erro (\varepsilon) = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^N (\theta_{med} - \theta_{prev})^2 \quad (4.4)$$

A influência do número de amostras disponíveis (N) também poderia ser incorporada ao critério de erro considerando através da adoção da seguinte equação:

$$Erro (\varepsilon) = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^N (\theta_{med} - \theta_{prev})^2 \quad (4.5)$$

onde:

$$v = (N - n_p)$$

No presente trabalho, observou-se que a influência do número de amostras afetava significativamente o valor do erro e a incorporação deste dado ao critério de erro alterava a classificação qualitativa de um modelo de ajuste com relação a outro.

Assim sendo, optou-se, neste trabalho, por manter a função objetivo para cálculo do erro e definir um novo critério para estabelecer a qualidade do ajuste dentre os diversos modelos e materiais. Adotou-se, portanto, como critério de qualidade (CQ) a relação entre a função objetivo obtida no ajuste do modelo i ($(F(p))_i$) e a menor função objetivo ($(F(p))_{\min}$) obtida para a mesma análise; isto é:

$$CQ = \frac{F(p)_i}{F(p)_{min}} \quad (4.6)$$

Pela equação (4.6), verifica-se que o valor da qualidade (CQ) deverá ser igual ou maior a 1. Valores próximos a 1 indicam que o modelo teve um ajuste mais adequado em comparação ao melhor ajuste.

O somatório das qualidades de cada modelo ou simplesmente ajuste global (AG_{mod}), de acordo com a equação (4.6), deverá indicar qual o modelo que melhor se ajusta aos solos estudados, sendo considerado o melhor modelo àquele que apresentar o menor valor para esse somatório.

$$AG_{mod} = \sum Q_{mod} \quad (4.7)$$

4.4 Análise Preliminar – Curva Característica

Esta análise teve como objetivo definir o número mínimo, necessário, de iterações de cada modelo e, com isso, nortear as demais análises. Para tal, foram utilizados os dados das amostras AI1 e AI3 (Calle, 2000) por se tratarem das amostras com a maior quantidade de ensaios de curva característica.

As análises consistiram em prefixar o número de iterações de cada modelo e, a partir dos resultados da função objetivo, verificar o número mínimo de iterações necessárias para que diferença na função objetivo entre iterações sucessivas fosse pequena o bastante para ser considerada como erro mínimo do processo de ajuste.

Foram utilizadas as duas ferramentas (Evolver/GA e Matlab/Levenberg-Marquardt) e foram estudados os resultados de ajuste para um total de iterações de: 30.000, 50.000, 75.000, 100.000 e 150.000.

Em todas as análises realizadas no Evolver, todos os parâmetros de ajuste das equações foram considerados inicialmente nulos; isto é:

$$X_0 = [0] \quad (4.8)$$

Tal conjunto de pontos não teria influência sobre o resultado final quando analisados no Evolver, uma vez que é utilizado um algoritmo estocástico para a análise, todavia, o programa utiliza o valor descrito nas células ajustáveis como um possível conjunto solução para o problema. Considerando essa particularidade e como forma de normalizar o estudo, adotou-se o critério de partida nula descrita acima em todas as análises desta etapa.

Diferentemente do Algoritmo Genético (AG), o algoritmo de Levenberg-Marquardt por se tratar de um método de gradientes, o ponto de partida é uma informação importante a ser fornecida, pois é a partir deste ponto que o algoritmo busca a solução do problema. Nas análises realizadas no Matlab, foi considerado um vetor inicial não nulo, uma vez que, ao utilizar um vetor nulo, o algoritmo utilizado pelo software fornece como resultado o mínimo local mais próximo desse ponto, em geral, formado por um conjunto solução onde apenas um dos valores não é nulo. Dada essa constatação, considerou o vetor inicial com valor de 0,1 para cada parâmetro, para que fosse possível a avaliação do modelo. Numa etapa posterior, foi proposta a utilização de um método híbrido, no qual a solução obtida pelo AG é utilizada como ponto inicial do método de Levenberg-Marquardt.

A Figura 4.3 compara os resultados da função objetivo ($F(p)$), obtidos para a amostra AI1, para valores crescentes de número de iterações. Observa-se que, independentemente do método ou ferramenta numérica, 50 mil iterações garantem a convergência do processo.

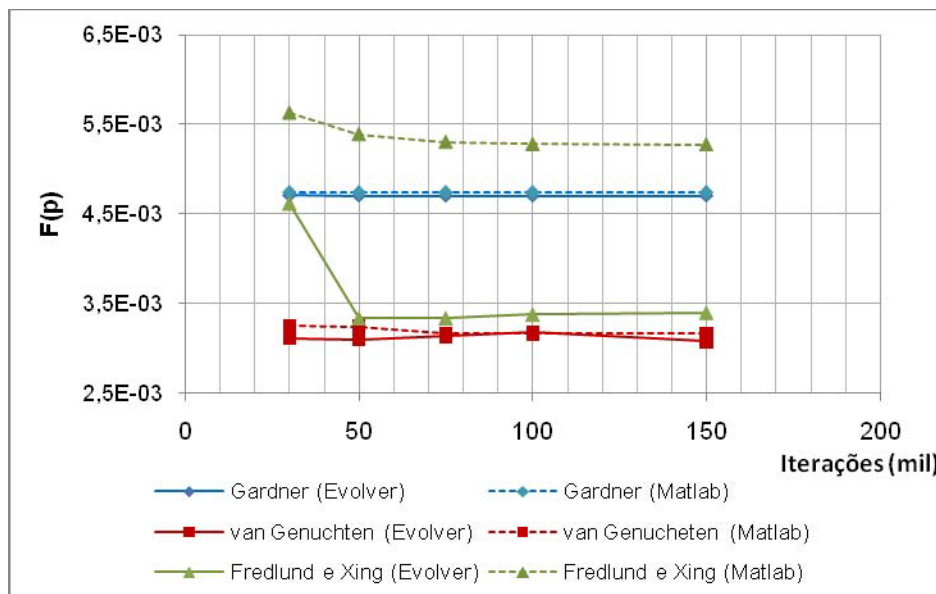


Figura 4.3 – Análise Preliminar – $F(p)$ x Iterações – AI1

No caso da amostra AI3 (Figura 4.4) somente o modelo de Gardner converge para um baixo número de iterações e mostra-se independente da ferramenta numérica. O modelo de van Genuchten e o de Fredlund e Xing convergem após 75.000 iterações. Entretanto, há que se observar que, do ponto de vista prático, as diferenças observadas na função objetivo são praticamente desprezíveis

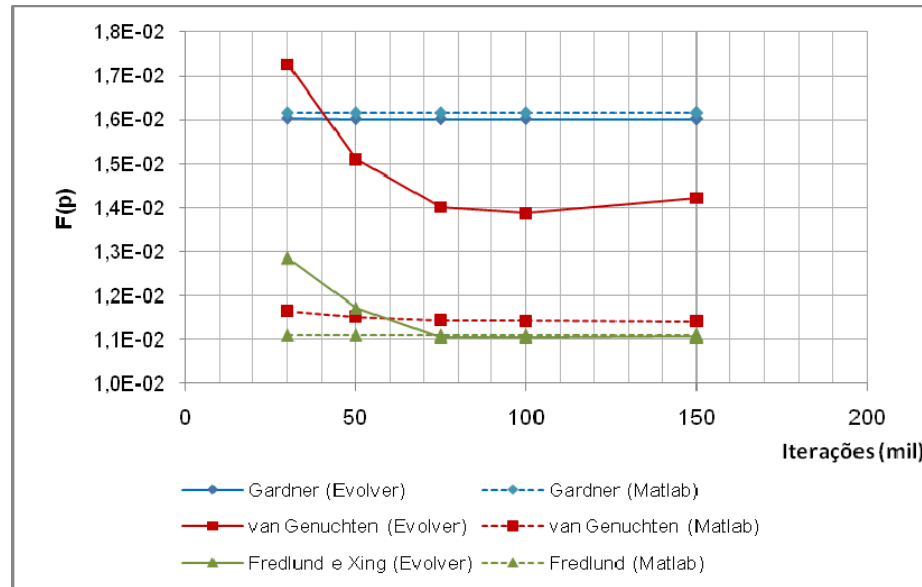


Figura 4.4 – Análise Preliminar – $F(p)$ x Iterações – AI3

É interessante notar que o modelo de Fredlund e Xing converge para diferentes valores de $F(p)$ dependendo da ferramenta numérica, em ambas as análises, sendo este fato mais expressivo na amostra AI1. O mesmo também ocorre nos resultados obtidos para o modelo de van Genuchten, na amostra AI3. Esta diferença pode ser atribuída ao fato das funções de ajuste possuírem vários mínimos. O AG (Evolver), por se tratar de um algoritmo estocástico, tende a convergir para um mínimo global, ao contrário do algoritmo de Levenberg-Marquardt (Matlab) que pode convergir para um mínimo local.

A influência da convergência dos modelos para diferentes valores de função objetivo $F(p)$ foi avaliada comparando-se os parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten, para diferentes números de iterações. Os resultados obtidos pelo programa Evolver estão mostrados na Figura 4.5. Observa-se que o parâmetro η é bastante sensível, enquanto que α e m permanecem praticamente constantes. Este resultado pode ser usado em contraposição a hipótese de se associar os parâmetros

de ajuste às características físicas do solo. A existência de diferentes conjuntos de parâmetros, satisfazendo o mínimo da função, demonstra esta impossibilidade.

Adicionalmente, diferentes análises usando o Evolver, resultaram em diferentes valores para a função objetivo, considerando-se um número fixo de iterações. Conseqüentemente, diferentes combinações de parâmetros de ajuste eram obtidas. Estes fatos corroboraram a hipótese da função objetivo apresentar vários mínimos no domínio do problema.

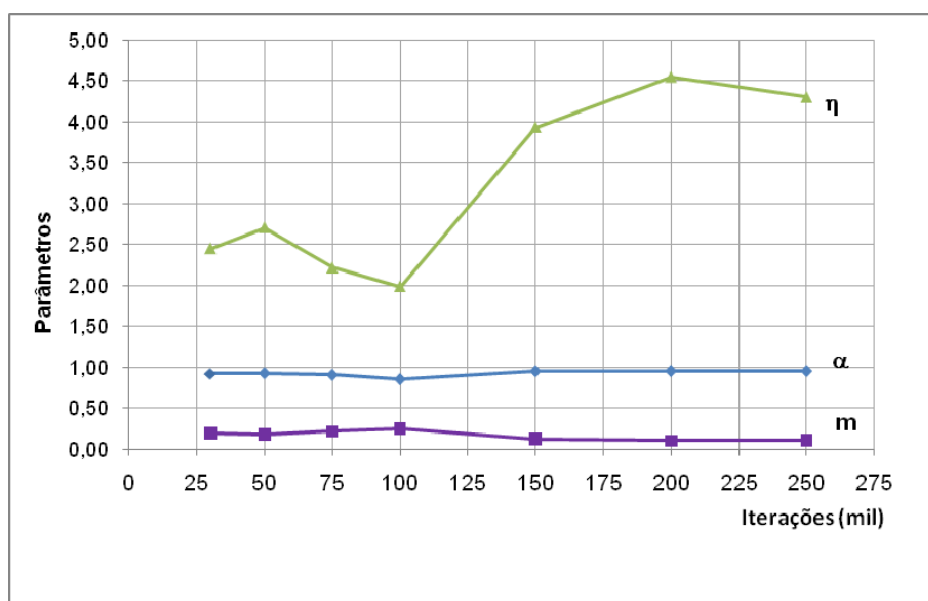


Figura 4.5 – Parâmetros de Ajuste do Modelo de van Genuchten obtidos pelo Evolver – Amostra AI1

Há que se ressaltar também o fato de alguns modelos associarem os parâmetros dos modelos às características físicas do solo. A existência de diferentes conjuntos de parâmetros satisfazendo o mínimo da função, pode se contrapor a esta premissa.

A influência da população utilizada no processo de otimização com AG (Evolver) foi também avaliada. Nas análises anteriores foi considerada uma população pequena com somente 2 indivíduos. Na Figura 4.6 observa-se que o processo de convergência é mais instável quando se adota um número pequeno de indivíduos; análises realizadas com 10 e 20 indivíduos apresentaram resultados mais consistentes entre si. No entanto, para número elevado de iterações, a influência do número de indivíduos é desprezível.

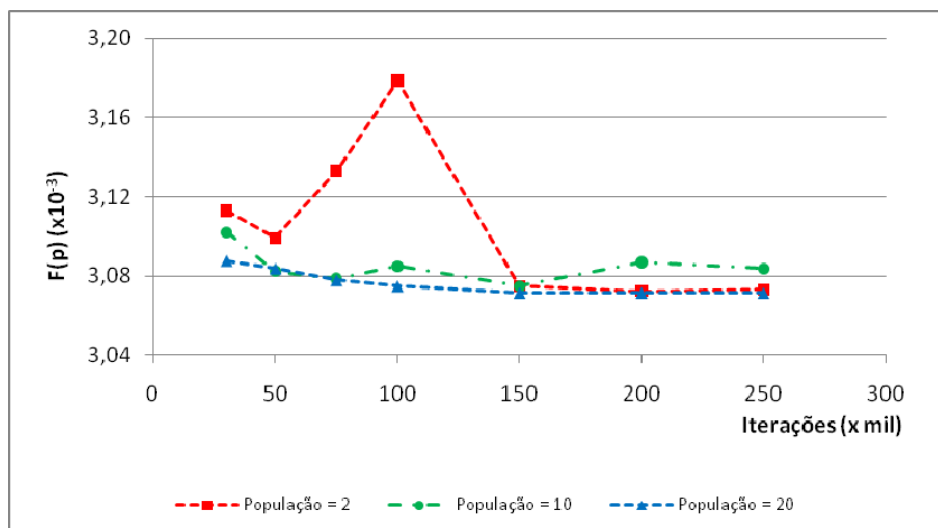


Figura 4.6 – Análise Preliminar – $F(p)$ X Iterações – Avaliação da População.

A não linearidade do processo de otimização gera um aumento exponencial no tempo de execução, quando se amplia o número de iterações. Na Figura 4.7 é possível constatar que, até 100 mil iterações, o tempo gasto para a realização de cada análise é praticamente o mesmo independente do número de indivíduos. Porém, acima desse valor, o tempo de passa a aumentar conforme o número de indivíduos e de iterações.

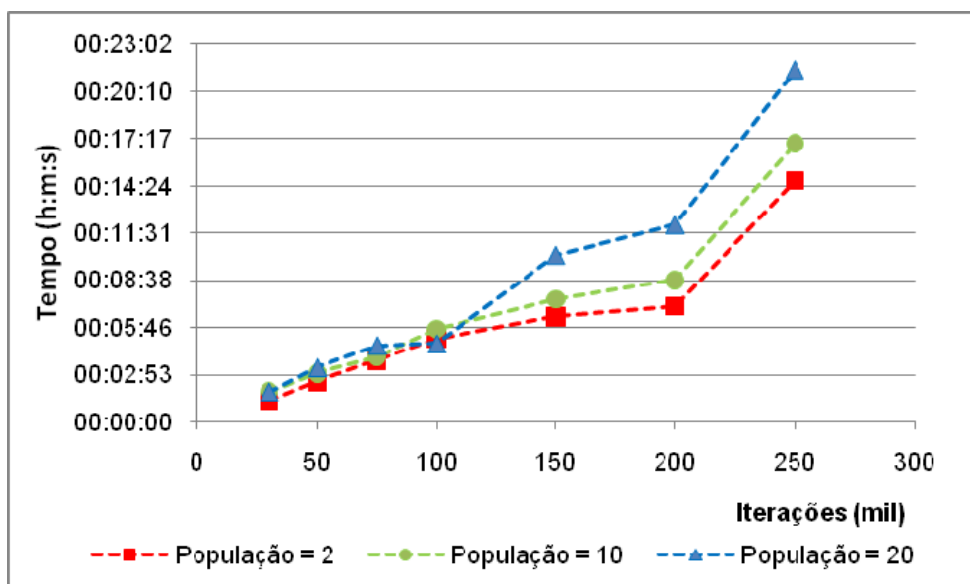


Figura 4.7 – Análise Preliminar – Tempo X Iterações – Avaliação da População.

Considerando a possibilidade da existência de diversos mínimos nas funções adotadas e a disponibilidade de utilização de ambos os métodos, foi considerada a possibilidade do emprego dos dois softwares em conjunto. O uso em conjunto das

ferramentas numéricas permite um refinamento no resultado com um menor número de iterações. O resultado obtido pelo AG serve como ponto de partida para a análise por Levenberq-Marquardt, desta forma é possível utilizar menos iterações em ambos os métodos. Em outras palavras, as análises elaboradas a partir dos AG's convergem para um mínimo global que é melhorado pelo método de Levenberq-Marquardt, que converge para o mínimo local mais próximo do ponto de saída (mínimo global). Por outro lado, existe a desvantagem da utilização de duas ferramentas que nem sempre são disponíveis.

Considerando os resultados obtidos nessa fase preliminar, adotaram-se os valores apresentados na Tabela 4.1 como valores de referência para cada modelo.

Tabela 4.1 – Valores de Referência para as Análises.

Modelo	Evolver			Matlab	
	Iteração ^{*1}	Iteração ^{*2}	População	Iteração ^{*3}	Iteração ^{*2}
Gardner	50.000	30.000	20 indivíduos	50.000	30.000
Van Genuchten	75.000	50.000		75.000	30.000
Fredlund e Xing	75.000	50.000		75.000	30.000

*¹Considerando apenas o uso do Evolver; *²Considerando o uso do Matlab a partir do resultado do Evolver ;

*³Considerando apenas o uso do Matlab.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MODELAGEM

Nesse capítulo serão apresentados os resultados dos ajustes realizados para a modelagem da curva característica e da resistência ao cisalhamento dos solos disponibilizados. Serão discutidas as particularidades constatadas no decorrer das análises, a comparação entre as equações propostas na literatura e, por fim, pretende-se relacionar os resultados obtidos com os parâmetros dos solos.

5.1 Modelagem Numérica aplicada à Curva Característica

A modelagem numérica adotada para a curva característica foi realizada com os resultados de ensaios apresentado no capítulo 3 e as considerações observadas na análise preliminar descrita no capítulo anterior. Foram analisados os modelos de Gardner (1958), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) para a determinação da curva característica, além da proposta de transformação da curva característica (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2000), descrita no item 2.1.

5.1.1 Comparação entre os Modelos de Gardner, van Genuchten e Fredlund e Xing

A Tabela 5.1 resume todos os parâmetros necessários para aplicação dos modelos. Na maioria dos casos não se dispunha de todas as informações relativas à curva característica, particularmente o teor de umidade volumétrico e a sucção, ambos na condição residual. No caso da condição saturada, o teor de umidade volumétrico era computado em função da porosidade. Quando desconhecidos θ_r e ψ_r eram incorporados ao processo de otimização como variáveis a serem ajustadas.

Tabela 5.1 – Parâmetros dos Modelos

Modelo	Dados Experimentais	Ajuste
Gardner (1958)	θ_r	α (kPa ⁻¹)
van Genuchten (1980)	$\theta_s = n$	η
Fredlund e Xing (1994)	ψ_r θ_s $\psi_o = 10^6$ kPa	α (kPa ⁻¹) η m

Os ajustes foram realizados considerando o método híbrido, isto é, os resultados obtidos a partir do Evolver foram utilizados como dados de partida para a otimização utilizando o método de Levenberg-Marquardt.

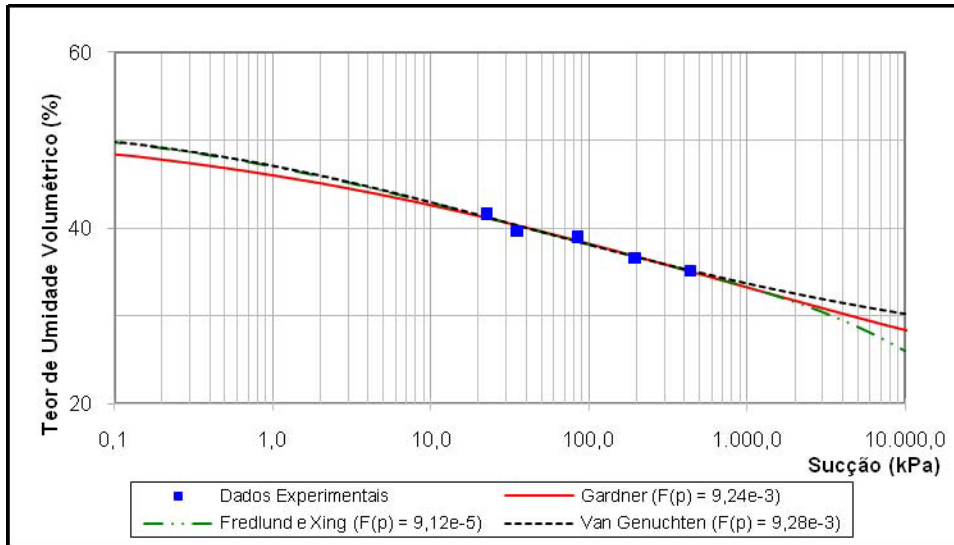
Os parâmetros ajustados para a reprodução dos resultados experimentais das três amostras extraídas da Região Metropolitana de Salvador (BA) e da Encosta do Alto do Bom Viver estão resumidos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Parâmetros de Ajuste – Salvador

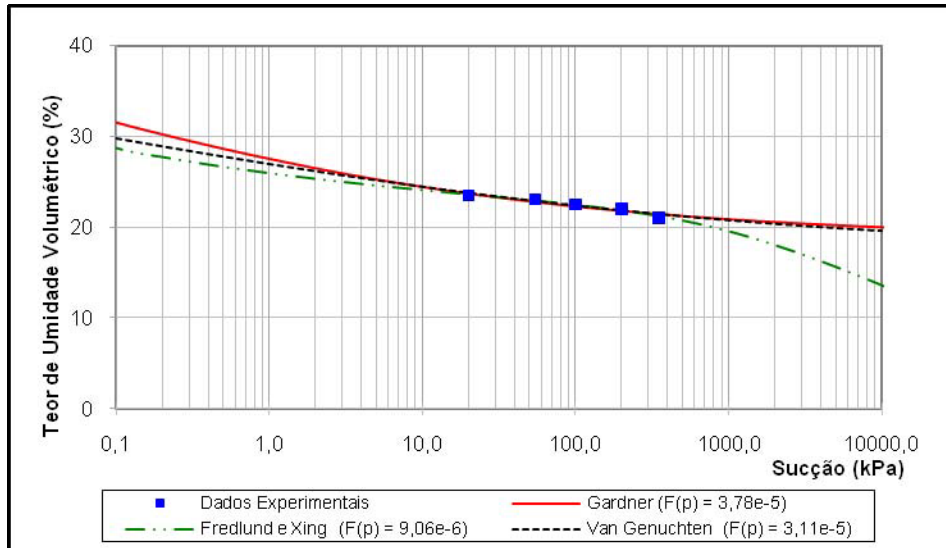
Modelo	Parâmetro	Amostra			Alto do Bom Viver
		AvG	AvPI	AvPS	
Gardner	θ_r	0,1564	0,0552	0,1867	0,1220
	α	0,2096	0,1862	2,9174	0,0095
	η	0,2382	0,4019	0,2353	0,9317
van Genuchten	θ_r	0,2212	0,1108	0,1752	0,1170
	α	0,2426	0,0774	0,0170	0,0098
	η	0,3939	0,5751	0,1161	0,9934
	m	0,4243	0,6783	2,7808	0,7676
Fredlund e Xing	ψ_r	$1,0000 \times 10^4$	$1,0000 \times 10^3$	$1,0000 \times 10^3$	$1,3593 \times 10^3$
	α	1,1552	0,0006	4,2067	28,1455
	η	0,3894	0,5985	2,0598	1,2622
	m	0,4179	0,8094	0,2665	0,5248

α e ψ_r em kPa

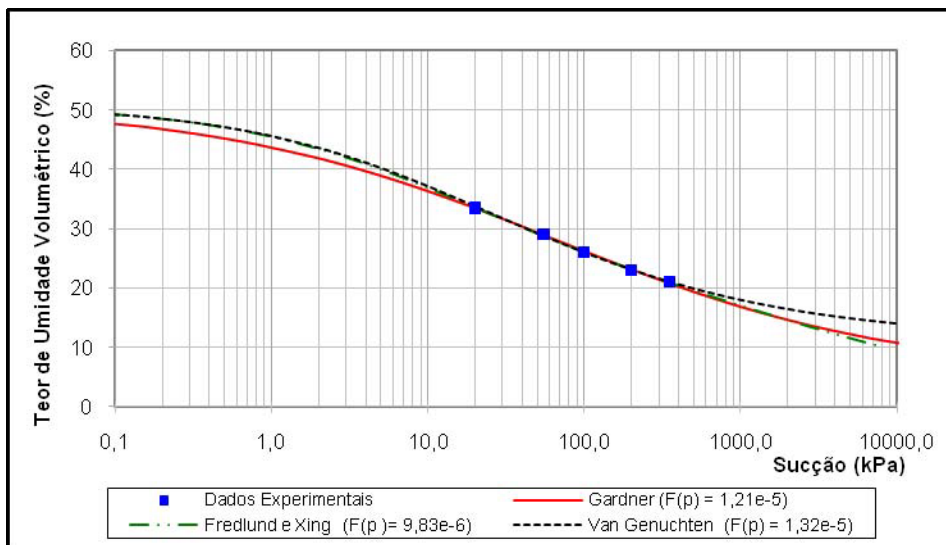
A Figura 5.1 apresenta as curvas obtidas analiticamente em conjunto com os dados experimentais. Os resultados da função objetivo de cada modelo também estão mostrados na figura e indicam valores razoavelmente baixos, sendo o menor associado ao modelo de Fredlund e Xing (1994)



(a) AvG



(b) AvPS



(c) AvPI

Figura 5.1 – Modelagem da Curva Característica – Salvador

Os dados experimentais obtidos para a amostra de solo extraído da Encosta do Alto do Bom Viver (BA) são correspondentes a uma larga faixa de sucção que varia de 0,10 a 18.000 kPa. Esses dados experimentais permitiram uma modelagem representativa e consistente para os modelos de Gardner (1958) e van Genuchten (1980), que apresentaram resultados e comportamento semelhante. Já o modelo de Fredlund e Xing (1994) apresentou variações a partir de sucções superiores a 200 kPa, fazendo com que a modelagem apresentasse uma discrepância no trecho final da curva (Figura 5.2). Todavia, esse comportamento já era previsto, uma vez que o modelo proposto apresenta um fator de correção para sucções elevadas conforme descrito no item 2.1.1.

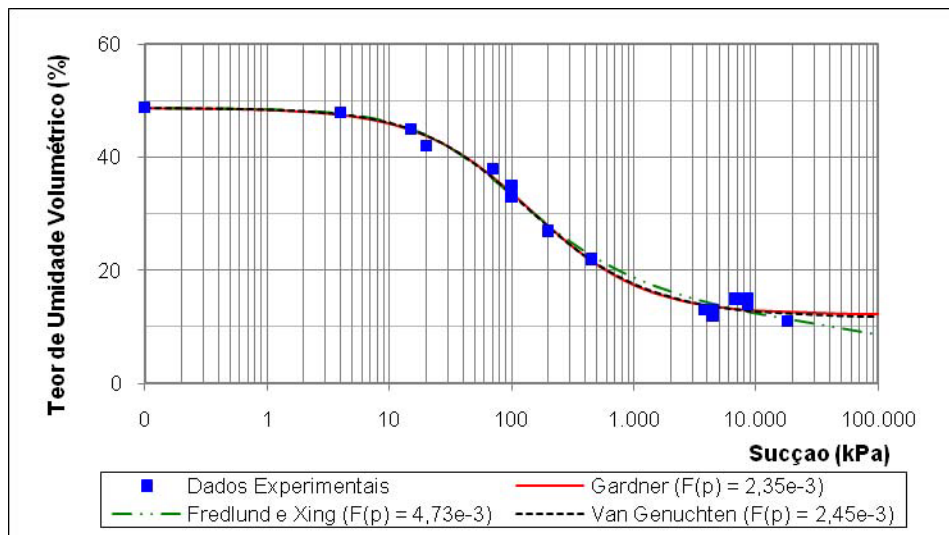


Figura 5.2 – Modelagem da Curva Característica – Alto do Bom Viver.

Cabe ressaltar que para essa análise os parâmetros θ_r , nos modelos de Gardner e van Genuchten, e ψ_r no modelo de Fredlund e Xing foram considerados como parâmetros de ajustes dos modelos, portanto, seus valores são diferentes em cada resultado. Os valores de θ_r obtidos foram: 12,20% (Gardner) e 11,70% (van Genuchten), que correspondem a valores de ψ_r na ordem de 5×10^6 kPa. Porém, o ajuste de Fredlund e Xing indicou, como resultado, o valor de 10^8 kPa para a sucção residual (ψ_r).

Reavaliando o ajuste de Fredlund e Xing, considerando a sucção residual de 5×10^6 kPa, observou-se que o resultado obtido é equivalente ao anteriormente realizado, apresentando parâmetros e um valor de $F(p)$ muito próximos, conforme apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros para o Modelo de Fredlund e Xing (1994), com ψ_r Ajustado Numericamente e $\psi_r = 5 \times 10^6$ kPa – Alto do Bom Viver

	α	η	m	ψ_r	$F(p)$
ψ_r ajustado	44,704	1,086	0,769	1×10^8	$2,9588 \times 10^{-3}$
ψ_r fixo	44,424	1,092	0,765	5×10^6	$2,9622 \times 10^{-3}$

α e ψ_r em kPa

5.1.1.1 Influência do Número de Amostras

A Figura 5.3 e a Figura 5.4 mostra o ajuste das amostras ALGB e ALGC que apresentam, diferentemente das demais, um número superior a 25 ensaios. Porém, os ensaios não foram realizados para a faixa de baixa sucção (inferior a 5 kPa). Desta forma, pode-se dizer que dentro da faixa de sucção ensaiada (5 a 10^4 kPa), todos os modelos apresentaram comportamento similar, tendo o de Fredlund e Xing (1994) apresentado o melhor ajuste em ambas as amostras. A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros ajustados obtidos nas análises.

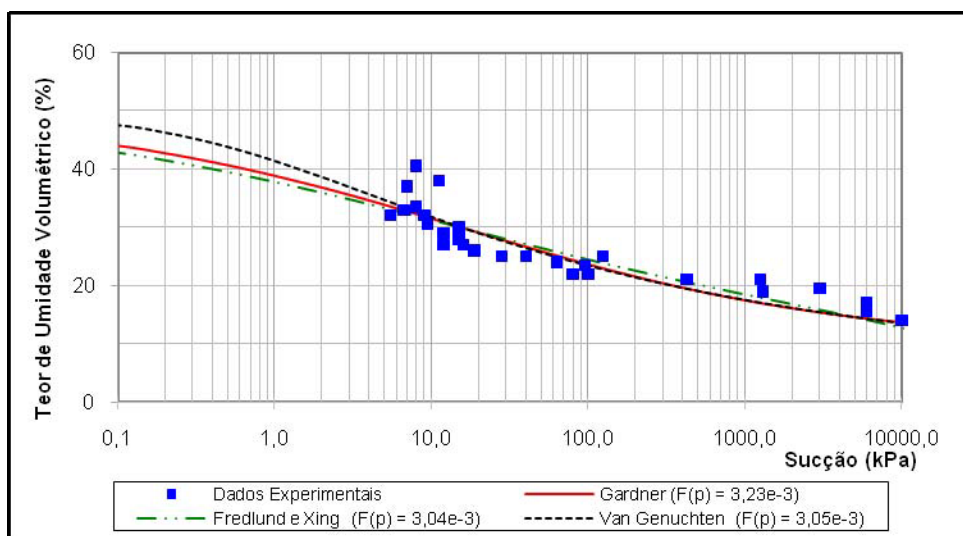


Figura 5.3 – Modelagem da Curva Característica – Alvorada (ALGB)

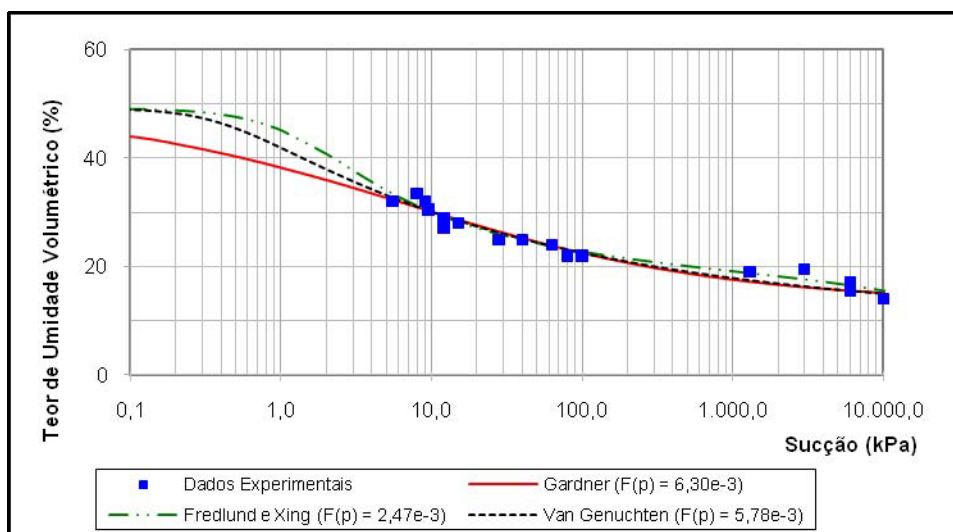


Figura 5.4 – Modelagem da Curva Característica – Alvorada (ALGC)

Tabela 5.4 – Parâmetros de Ajuste - Alvorada
Amostra

Modelo	Parâmetro	Amostra	
		ALGB	ALGC
Gardner	θ_r	0,0990	0,1336
	α	0,3742	0,449
	η	0,3528	0,410
van Genuchten	θ_r	0,055	0,104
	α	1,742	2,528
	η	0,7710	1,969
Fredlund e Xing	m	0,2261	0,107
	ψ_r	$1,638 \times 10^4$	$2,0925 \times 10^4$
	α	1,784	1,1739
	η	0,3156	1,61081
	m	1,1623	0,39325

α e ψ_r em kPa

5.1.1.2 Influência do Arranjo Estrutural

Os dados experimentais apresentados na Figura 5.5 são expressivos de uma larga faixa de sucção, mas concentrada, principalmente, entre 100 e 3.000 kPa. Verifica-se que os dados experimentais indicam um comportamento de curva bimodal. Este comportamento foi condicionante para que o ajuste não fosse

adequado, uma vez que, nenhuma das propostas analisadas consideram a influência desse tipo de resposta.

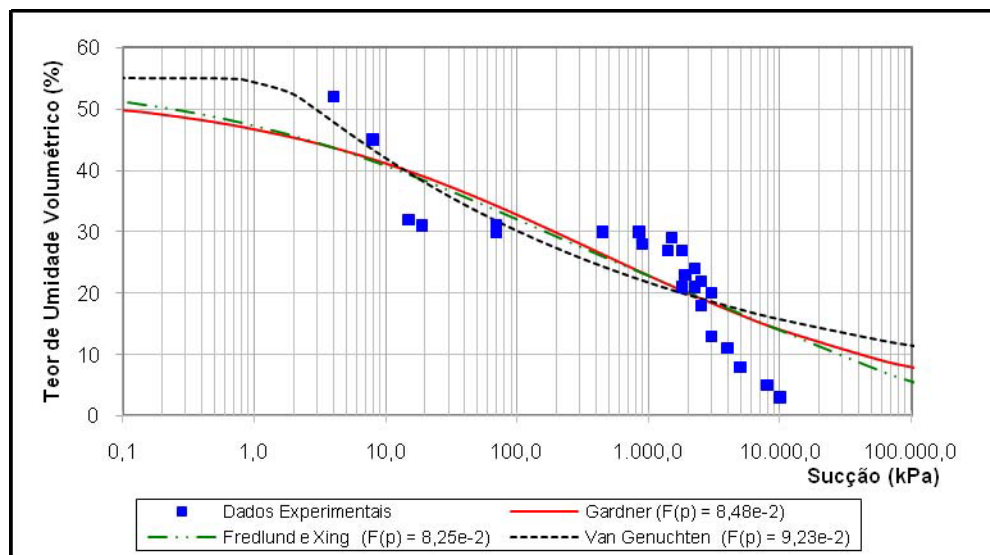


Figura 5.5 – Modelagem da Curva Característica – USP – Prof. 1,6m (Vieira e Marinho, 2001)

Desprezando-se os pontos de sucção inferior a 10 kPa, a curva torna-se unimodal e os ajustes tornam-se satisfatórios, como mostra a Figura 5.6.

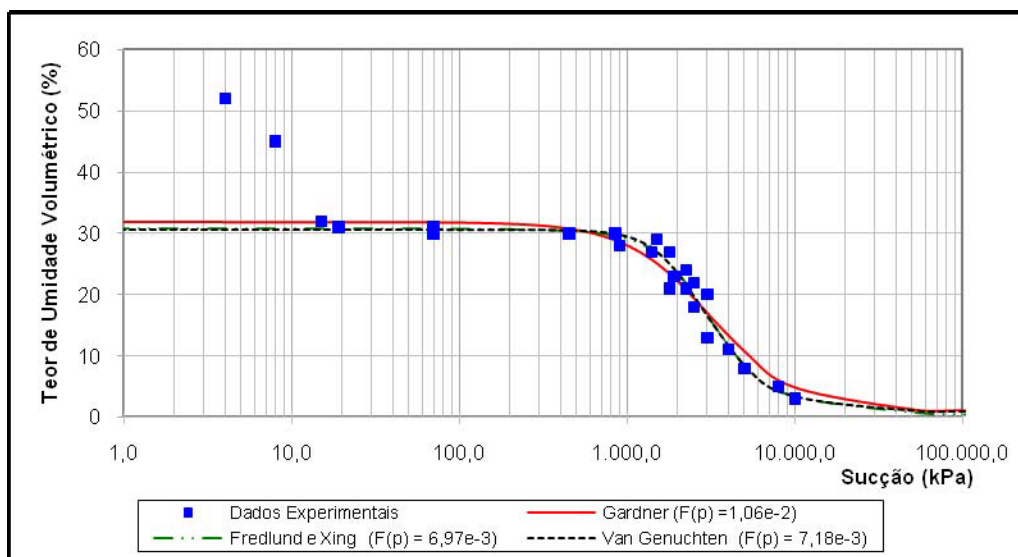
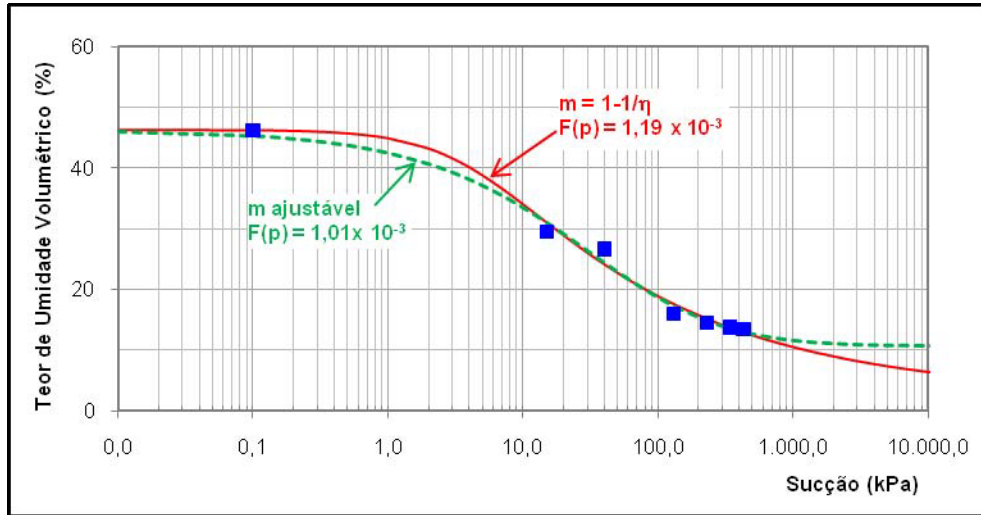


Figura 5.6 – Ajuste Unimodal – USP (1,6 m)

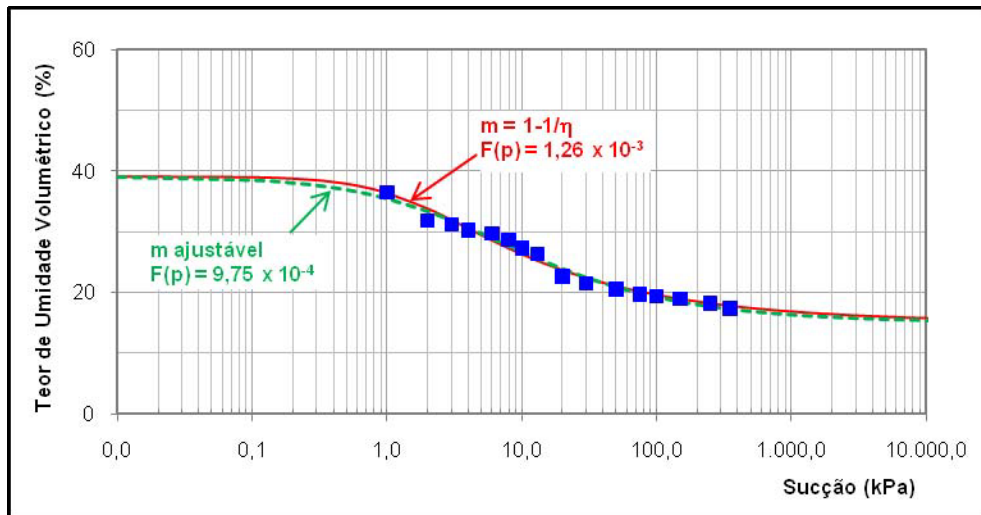
O Apêndice D apresenta os resultados das demais análises realizadas para a determinação da curva característica e a tabela resumo com os parâmetros obtidos para cada ajuste.

5.1.1.3 Análise dos Parâmetros do modelo de van Genuchten (1980)

A Figura 5.7 apresenta o ajuste para duas amostras, considerando a relação entre os parâmetros m e η , explicitada na equação (2.6). Observa-se que quando m independe de η a função objetivo é menor. Os parâmetros utilizados nestas análises estão resumidos na Tabela 5.5



(a) Residual Vermelho (Vista Chinesa)



(b) USP (Machado e Vilar, 1998)

Figura 5.7 – Modelo de van Genuchten (1980) considerando m ajustável e dependente de η .

Tabela 5.5 – Parâmetros de Ajuste

Local	m independente				m = 1 - 1/η			
	θ_r	α	η	m	θ_r	α	η	m
Residual Vermelho	0,1064	0,0095	0,6378	2,1959	0,0248	0,2315	1,3123	0,238
USP	0,150	0,2706	0,8751	0,5916	0,150	0,6280	1,4021	0,287

α e ψ_r em kPa

5.1.1.4 Análise Global – Curva Característica

Conforme descrito no item 4.3, a função objetivo ($F(p)$), definida na equação (4.1), foi adotada como forma de medição do erro de cada ajuste. A relação entre a função objetivo obtida num dado ajuste ($F(p)_i$) e a menor função objetivo ($F(p)_{\min}$) obtida para a mesma análise, conforme equação (4.6), foi considerada como critério de qualidade do ajuste. O ajuste global, que indica o modelo que melhor se aplica, foi definido como sendo o somatório das qualidades de cada modelo. O melhor ajuste é dado pelo menor valor deste somatório.

A Tabela 5.6 apresenta os valores da função objetivo e do critério de qualidade (CQ) obtidos em cada ajuste e, por fim, o resultado do somatório de CQ que indica o modelo de Fredlund e Xing (1994)

Tabela 5.6 – Análise Global - Resumo dos Resultados das Análises de Curvas Características.

Amostra	Gardner			van Genuchten			Fredlund e Xing		
	F(p)	CQ	$\Sigma CQ = 35,11$	F(p)	CQ	$\Sigma CQ = 30,88$	F(p)	CQ	$\Sigma CQ = 28,85$
AVG	$9,24 \times 10^{-5}$	1,01		$9,28 \times 10^{-5}$	1,02		$9,12 \times 10^{-5}$	1,00	
AvPI	$3,78 \times 10^{-5}$	4,17		$3,11 \times 10^{-5}$	3,43		$9,06 \times 10^{-6}$	1,00	
AvPS	$1,21 \times 10^{-5}$	1,23		$1,32 \times 10^{-5}$	1,34		$9,83 \times 10^{-6}$	1,00	
Alto do Bom Viver	$2,35 \times 10^{-3}$	1,00		$2,45 \times 10^{-3}$	1,04		$4,73 \times 10^{-3}$	2,01	
Chapéu d'Uvas	$1,11 \times 10^{-3}$	1,02		$1,10 \times 10^{-3}$	1,01		$1,08 \times 10^{-3}$	1,00	
Viçosa (SRM)	$6,64 \times 10^{-5}$	1,98		$5,42 \times 10^{-5}$	1,62		$3,35 \times 10^{-5}$	1,00	
Viçosa (SRJ)	$2,70 \times 10^{-4}$	1,31		$2,05 \times 10^{-4}$	1,00		$6,20 \times 10^{-4}$	3,02	
ALGB	$3,44 \times 10^{-2}$	1,67		$3,00 \times 10^{-2}$	1,46		$2,06 \times 10^{-2}$	1,00	
ALBC	$6,30 \times 10^{-3}$	2,55		$5,78 \times 10^{-3}$	2,34		$2,47 \times 10^{-3}$	1,00	
Escudo Sul-Riograndense	$4,44 \times 10^{-3}$	1,01		$4,38 \times 10^{-3}$	1,00		$5,42 \times 10^{-3}$	1,24	
Lagoa	$1,10 \times 10^{-3}$	1,00		$1,25 \times 10^{-3}$	1,14		$1,68 \times 10^{-3}$	1,53	
Joatinga - N1	$4,78 \times 10^{-4}$	2,55		$1,87 \times 10^{-4}$	1,00		$2,20 \times 10^{-4}$	1,17	
Joatinga - N2	$8,69 \times 10^{-5}$	1,75		$5,58 \times 10^{-5}$	1,12		$4,96 \times 10^{-5}$	1,00	
Joatinga - RM	$3,93 \times 10^{-4}$	1,09		$8,00 \times 10^{-4}$	2,21		$3,61 \times 10^{-4}$	1,00	
Vista Chinesa - RV	$1,05 \times 10^{-3}$	1,03		$1,01 \times 10^{-3}$	1,00		$1,08 \times 10^{-3}$	1,07	
Vista Chinesa - RT	$3,12 \times 10^{-3}$	1,01		$3,09 \times 10^{-3}$	1,00		$3,31 \times 10^{-3}$	1,07	
USP	$1,09 \times 10^{-3}$	1,12		$9,75 \times 10^{-4}$	1,00		$1,09 \times 10^{-3}$	1,11	
USP (1,6m)	$8,48 \times 10^{-2}$	1,03		$9,23 \times 10^{-2}$	1,12		$8,25 \times 10^{-2}$	1,00	

Tabela 5.6 (cont.) – Análise Global - Resumo dos Resultados das Análises de Curvas Características.

Amostra	Gardner			van Genuchten			Fredlund e Xing		
	F(p)	CQ	F(p)	F(p)	CQ	F(p)	CQ	F(p)	CQ
USP (3,0m)	2,38 X 10 ⁻²	1,52	1,57 X 10 ⁻²	1,00	1,00	1,70 X 10 ⁻²	1,09		
USP (4,4m)	3,43 X 10 ⁻²	1,04	3,30 X 10 ⁻²	1,01	1,01	3,29 X 10 ⁻²	1,00		
USP (6,0m)	5,63 X 10 ⁻²	1,04	5,42 X 10 ⁻²	1,00	1,00	5,44 X 10 ⁻²	1,00		
AI1	4,74 X 10 ⁻³	1,49	3,19 X 10 ⁻³	1,00	1,00	4,61 X 10 ⁻³	1,45		
AI2	9,38 X 10 ⁻⁴	1,04	9,04 X 10 ⁻⁴	1,00	1,00	1,35 X 10 ⁻⁴	1,49		
AI3	1,60 X 10 ⁻²	1,44	1,14 X 10 ⁻²	1,03	1,03	1,11 X 10 ⁻²	1,00		

5.1.2 Transformação da Curva Característica

A proposta de transformação da curva característica, sugerida por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004) aparece como uma alternativa completamente diferente das demais. A curva é apresentada em termos de grau de saturação e a sucção em pF (logaritmo da poro-pressão em centímetros de coluna de água), multiplicada pelo índice de vazios.

A Figura 5.8 mostra a curva transformada e a curva característica convencional, correspondente a amostra AvPI (Salvador). Ambas as curvas indicaram um ótimo ajuste para todos os modelos. Entretanto, o uso da curva transformada, além de simplificar a equação matemática, incorpora o índice de vazios. Conforme os autores, desta forma, introduz-se o conceito de curva única independente da estrutura do solo.

A Figura 5.9 (a) mostra os ajustes realizados para as amostras de Chapéu D'Uvas, onde a regressão linear fornece um coeficiente de correlação ($R^2 = 0,5064$) relativamente baixo. Este mau resultado poderia ser atribuído aos efeitos de histerese nas trajetórias de umedecimento e secagem. Entretanto, na forma convencional da curva característica, Figura 5.9 (b), não se consegue identificar grandes diferenças no alinhamento dos pontos experimentais.

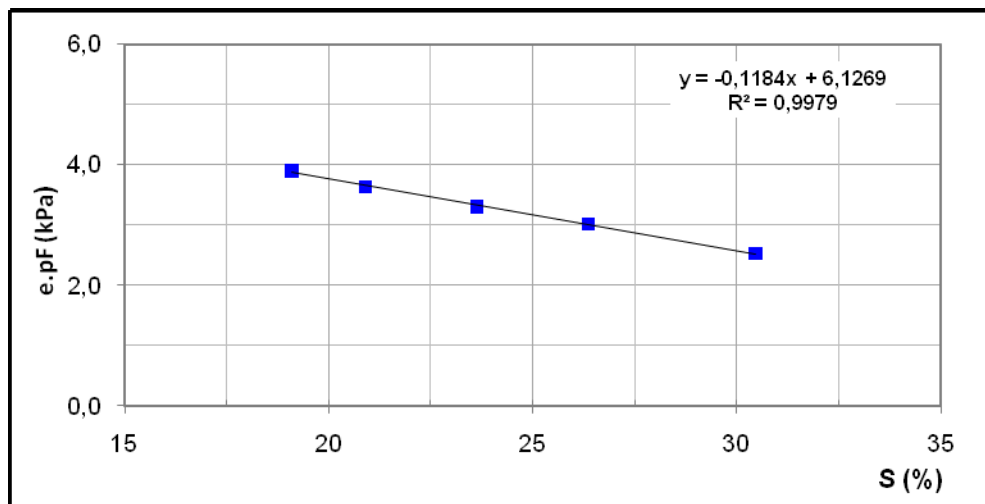
A Tabela 5.7 resume os parâmetros do ajuste linear e o coeficiente de correlação (R^2). Conforme pode ser observado, os ajustes apresentaram um alto valor de R^2 , o que indica uma boa adequação da proposta aos solos estudados. Os demais ajustes estão apresentados no Apêndice E.

5.2 **Modelagem Numérica aplicada à Resistência**

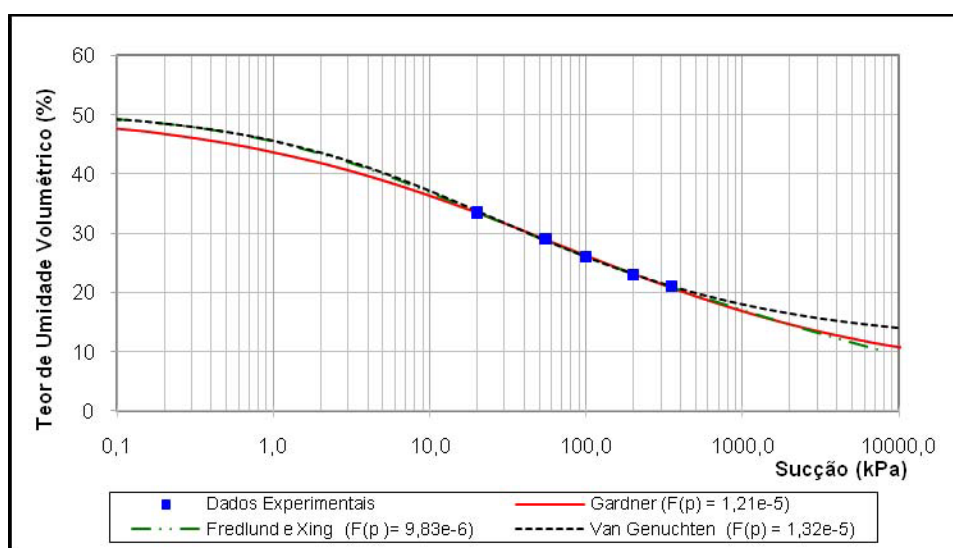
Para a modelagem da parcela de resistência atribuída à sucção foram considerados os modelos de Öberg e Sällfors (1995, 1997), Vanapalli et al (1996), Vilar e colaboradores e Futai e colaboradores. Por se tratarem de modelos simples, com até dois parâmetros de ajuste, as análises foram realizadas com 30.000 iterações e população de 10 indivíduos, no caso do uso do Evolver, para que não houvesse um esforço computacional desnecessário. As análises foram realizadas com os dados experimentais obtidos das seguintes amostras:

- Viçosa (Reis, 2004);
- Alvorada (Bastos, 1999);
- Vista Chinesa (Delgado, 1993);
- Campo Experimental da USP (Machado e Vilar, 1997);
- Rodovia Eng^o Thales de L. Peixoto (Calle, 2000).

Os demais modelos (Escario; de Campos e Carrillo, Khallili e Khabbaz e Bao et al), apresentados no item 2.2, não foram incluídos no presente trabalho por se tratarem de simples determinação de parâmetros, obtidos por ábacos e/ou formulação matemática.

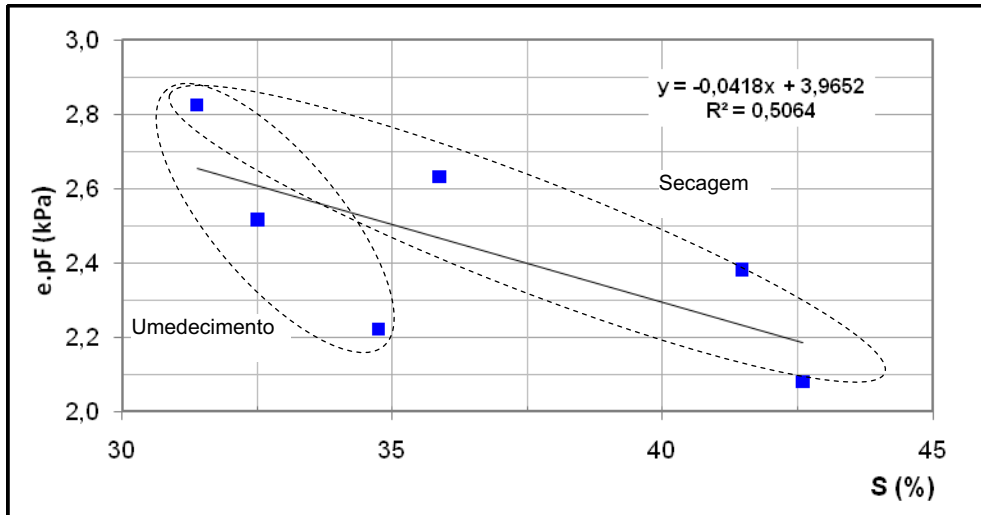


(a) Transformada

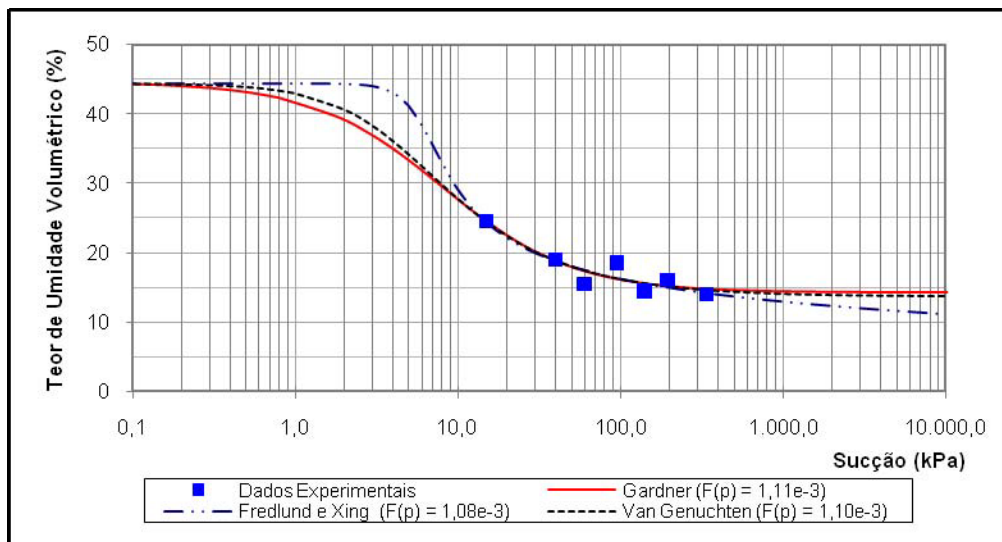


(b) Curva Característica

Figura 5.8 – Curva Característica– Salvador (AvPI)



(a) Transformada



(b) Curva Característica

Figura 5.9 –Curva Característica– Chapéu D' Uvas

5.2.1 Modelo de Öberg e Sällfors (1995, 1997)

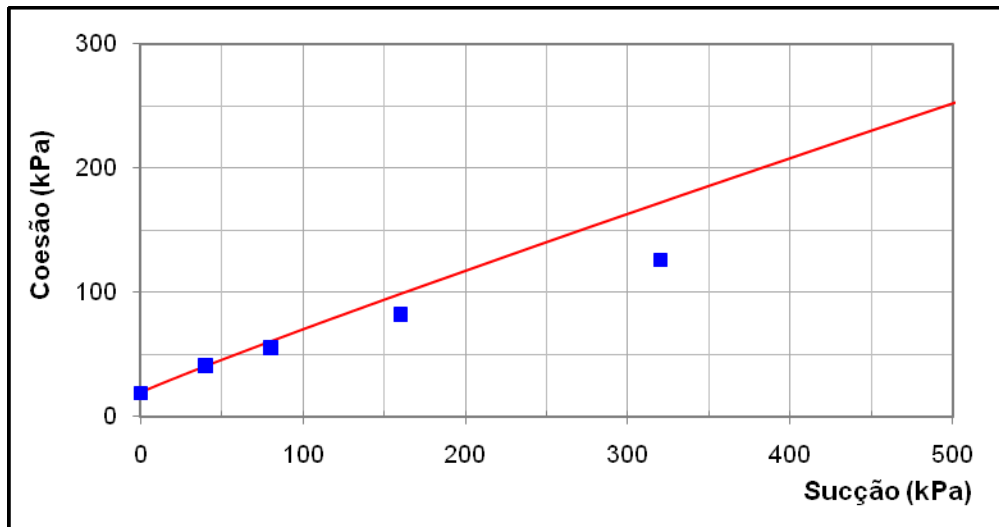
O modelo de Öberg e Sällfors (1995, 1997) prevê a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento a partir da equação (2.56), a qual depende do grau de saturação, sucção mátrica e ângulo de atrito efetivo. Para aplicação do modelo, a curva característica, definida em termos de teor de umidade volumétrico, que apresentou o melhor ajuste, foi convertida para grau de saturação (S) vs sucção (ψ) conforme equação (1.6).

Tabela 5.7 –Parâmetros de Ajuste – Normalização das Curvas Características.

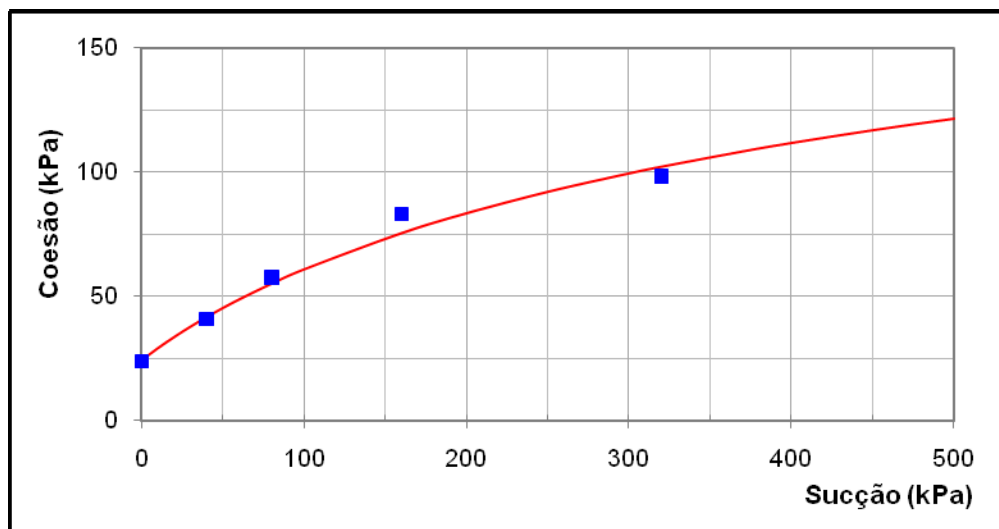
Amostra	Parâmetros		R ²
	a	b	
AvG	- 0,246	11,842	0,965
AvPI	- 0,118	6,126	0,997
AvPS	- 0,614	15,307	0,938
Alto do Bom Viver	-0,040	6,094	0,963
Chapéu d'Uvas	-0,041	3,965	0,506
Viçosa (SRM)	-0,109	12,510	0,981
Viçosa (SRJ)	-0,023	3,790	0,974
ALGB	-0,134	6,380	0,764
ALBC	-0,1643	7,006	0,848
Escudo Sul-Riograndense	-0,051	3,645	0,787
Lagoa	-0,095	7,068	0,769
Joatinga - N1	-0,125	10,78	0,975
Joatinga - N2	-0,035	3,463	0,945
Joatinga - RM	-0,071	3,928	0,850
Vista Chinesa - RV	-0,075	4,280	0,968
Vista Chinesa – RT	-0,108	5,379	0,948
USP	-0,058	3,719	0,955
AI1	-0,055	5,624	0,917
AI2	-0,065	6,813	0,902
AI3	-0,073	6,093	0,813

A Figura 5.10 mostra os ajustes do modelo para as amostras de Viçosa, onde observa-se, exceto para a amostra de solo residual jovem, uma tendência de superestimar a resistência do solo.

Resultado análogo foi verificado nas demais amostras analisadas, sendo suas respectivas curvas apresentadas no Apêndice F.



(a) Residual Maduro



(b) Residual Jovem

Figura 5.10 – Proposta de Öberg e Sällfors (1995,1997) – Viçosa

5.2.2 Modelo de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996)

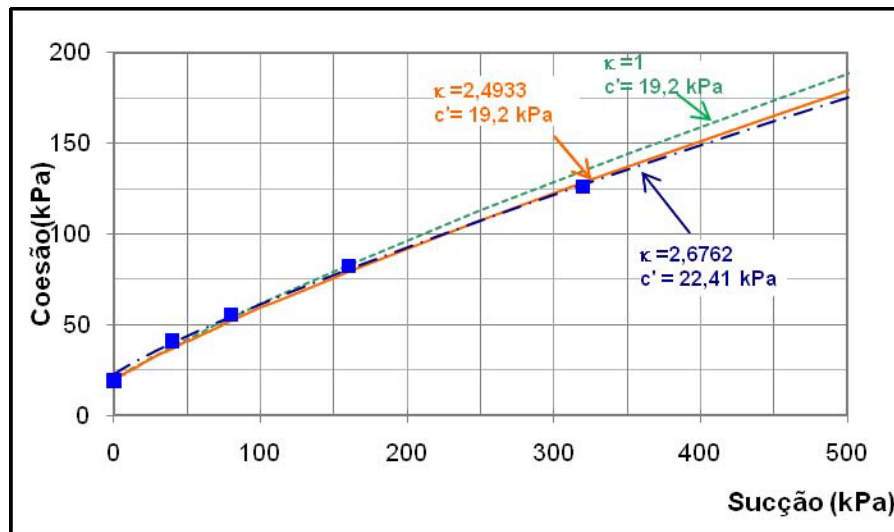
A modelagem da proposta pelos autores foi elaborada a partir da consideração de uma função não linear para expressar a resistência ao cisalhamento de solos não saturado, como mostra a equação (2.58).

A metodologia adotada consistiu em:

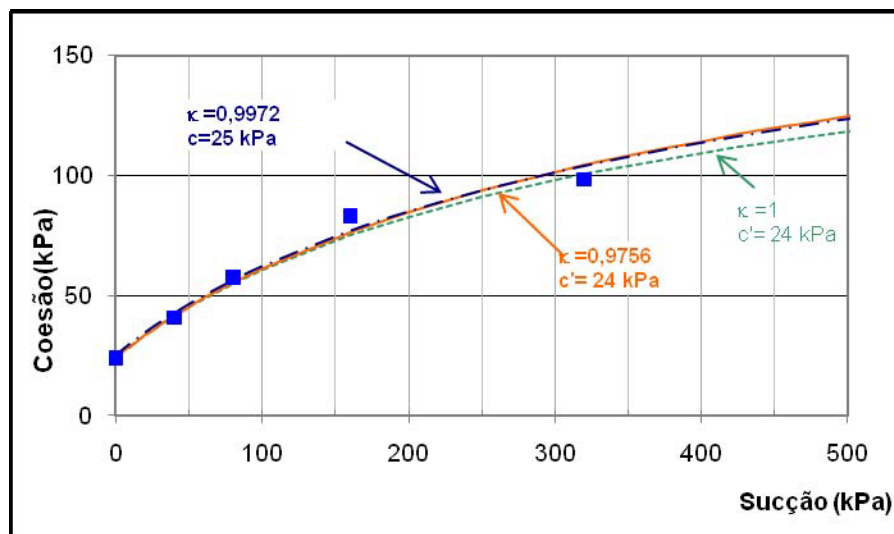
- definir o teor de umidade volumétrico a partir da curva característica que apresentou o melhor ajuste;
- avaliar a condição de ajuste do parâmetro κ ;

- dada à incerteza das informações quanto aos ensaios realizados, a coesão efetiva foi considerada de duas formas distintas: como dado fornecido e como um parâmetro adicional a ser ajustado. Cabe ressaltar que, tal consideração só deve tomada quando há incerteza quanto ao valor da coesão efetiva, uma vez que, uma alteração da coesão efetiva interfere numa alteração no ângulo de atrito (ϕ') e, por consequência, na resistência não saturada

A Figura 5.11 apresenta os resultados obtidos para as amostras de Viçosa, fixando-se a coesão efetiva ($c' = 19,2 \text{ kPa}$) e variando-se o parâmetro de ajuste κ , além do resultado com κ e c' variáveis. Observa-se claramente que os melhores ajustes ocorrem para κ variável e que a influência da coesão efetiva é desprezível.



(a) Residual Maduro



(b) Residual Jovem

Figura 5.11 – Proposta de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996) – Viçosa

A Tabela 5.8 resume os parâmetros de ajuste obtidos para as amostras estudadas, considerando a condição da coesão (c') como um parâmetro ajustado ou não.

Tabela 5.8 – Parâmetros de Ajuste – Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996)

Amostra	κ = ajustado	κ e c' = ajustados	
	κ	κ	c
Viçosa (Maduro)	2,4933	2,6762	22,4089
Viçosa (Jovem)	0,9756	0,9972	25,0000
ALGB	2,0091	2,2044	6,7699
ALBC	2,4987	2,4872	3,0000
Vista Chinesa – Residual Vermelho	1,1452	1,3244	10,0000
Vista Chinesa – Residual Típico	1,1640	1,4097	20,0000
USP	1,3193	1,6056	33,3444
AI1	1,4860	1,1590	5,0000

Resultados semelhantes foram observados nas demais amostras e as curvas estão mostradas no Apêndice F.

Os resultados obtidos no presente trabalho foram comparados com o estudo estatístico (Figura 2.9), apresentado por Vanapalli e Fredlund (2000a, 2000b), no qual sugerem haver uma relação entre o parâmetro κ e o índice de plasticidade do solo.

Na Figura 5.12, além dos valores de κ estão mostradas as frações granulométricas de todas as amostras analisadas. Observa-se que os materiais tratados possuem uma fração areia predominante e situam-se na maioria dos casos na faixa de IP entre 10 e 20. Cabe ressaltar que uma das amostras forneceu um ajuste ótimo para κ menor que 1 (Figura 5.11(b)).

Cabe destacar que nos estudos realizados pelos autores foram adotadas amostras compactadas, o que pode ocasionar uma variação de comportamento em relação ao solo em condição natural.

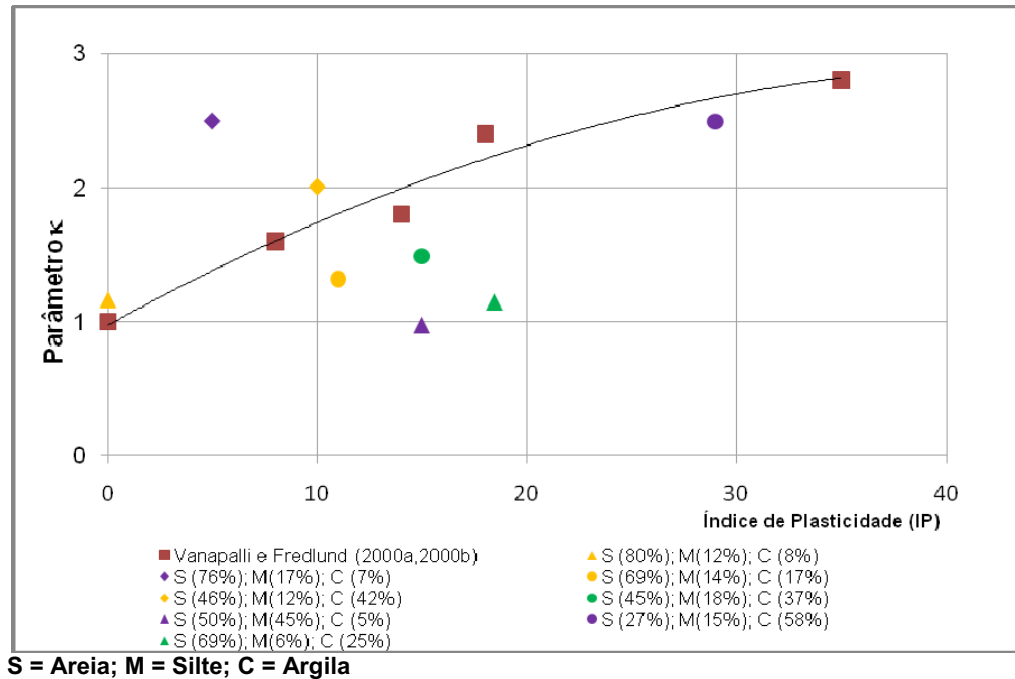


Figura 5.12 – κ x IP – Comparação com estudos de Vanapalli e Fredlund (2000a, 2000b)

5.2.3 Vilar e Colaboradores

A proposta de Vilar e colaboradores foi avaliada considerando duas formas distintas: uma por meio do ajuste numérico e outra a partir da previsão proposta para determinação dos parâmetros a e b, conforme equações (2.65) e (2.67).

Os resultados indicaram um bom ajuste considerando ambas as metodologias. Observou-se, entretanto, uma tendência a menores valores da função objetivo quando os parâmetros a e b eram incluídos como parâmetros de ajuste (Tabela 5.9)

Cabe ressaltar que os valores da função objetivo apresentados na Tabela 5.9 não devem ser comparados entre as amostras e, sim, avaliados individualmente. Um valor numérico alto como o da amostra AI1 não indica que o ajuste seja pior do que outro cujo valor tenha sido menor.

A Figura 5.13 mostra as curvas obtidas com as amostras de Viçosa (Reis, 2004), estando as demais apresentadas no Apêndice F.

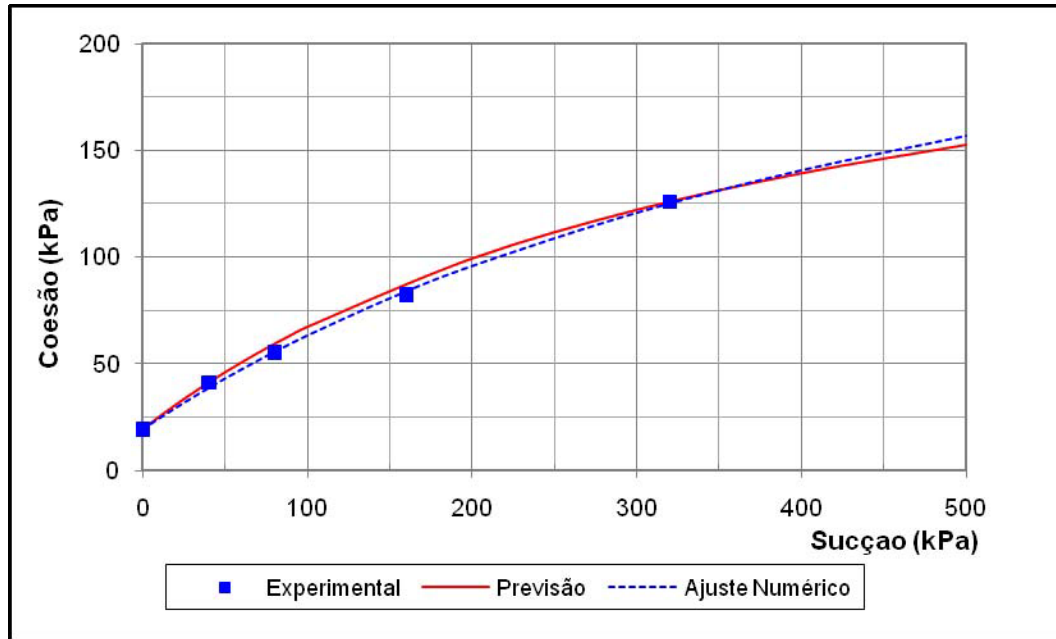
Tabela 5.9 – Resultados Obtidos para o Modelo de Vilar e Colaboradores.

Amostra	Ajuste Numérico			Previsão		
	a	b	F(p)	a	b	F(p)
Viçosa – Residual Maduro	1,931	0,003	9,62	1,664	0,0042	44,15
Viçosa – Residual Jovem	1,775	0,007	49,28	1,881	0,0075	57,39
Alvorada - ALGB	1,868	0,021	10,40	1,376	0,0220	24,83
Alvorada - ALGC	0,853	0,033	14,89	0,949	0,0303	24,35
Vista Chinesa – RV	0,898	0,027	25,46	1,705	0,0226	58,43
Vista Chinesa – RT	0,932	0,028	72,79	1,828	0,0218	102,80
USP	1,440	0,025	13,34	1,732	0,0208	18,38
AI1	1,058	0,024	108,95	1,428	0,0261	196,99

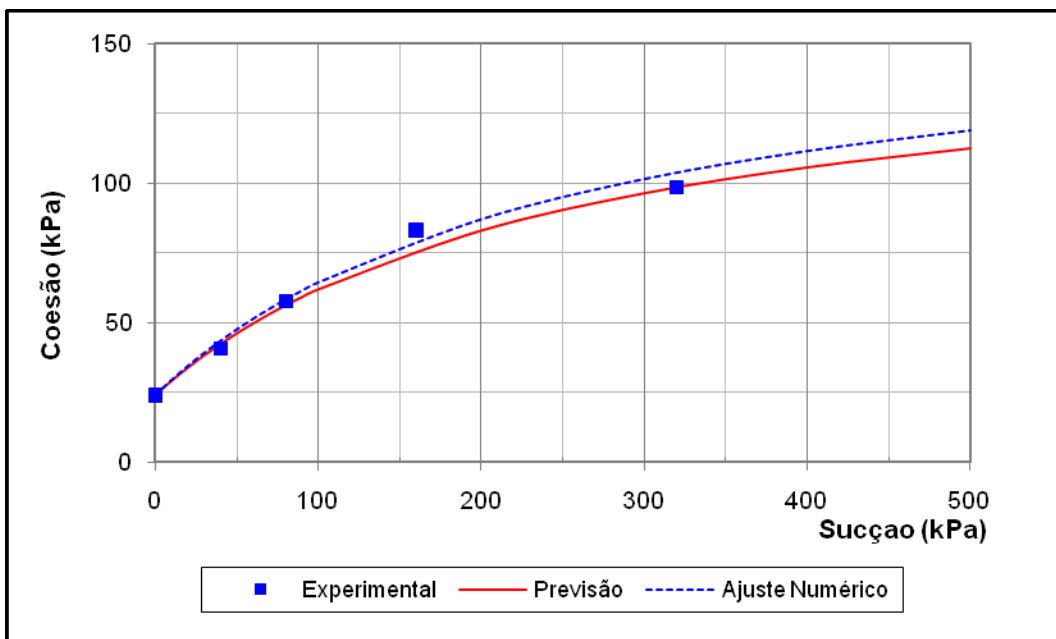
5.2.4 Futai e Colaboradores

A proposta de Futai e colaboradores requer o conhecimento da máxima coesão do solo (c_{max}), obtida por meio de ensaios com amostras secas ao ar. Porém, os dados experimentais disponibilizados para esse trabalho não foram obtidos em amostras secas ao ar. Considerando que o modelo proposto só pode ser utilizado para solos que apresentam coesão sempre crescente com a sucção, optou-se por utilizar o ajuste deste modelo, considerando o parâmetro c_{max} como um parâmetro a ser ajustado.

Os ajustes realizados apresentaram-se adequados aos dados experimentais como pode ser observado na Figura 5.14. Resultado semelhante foi obtido nas demais amostras cujos resultados estão apresentados no Apêndice F.

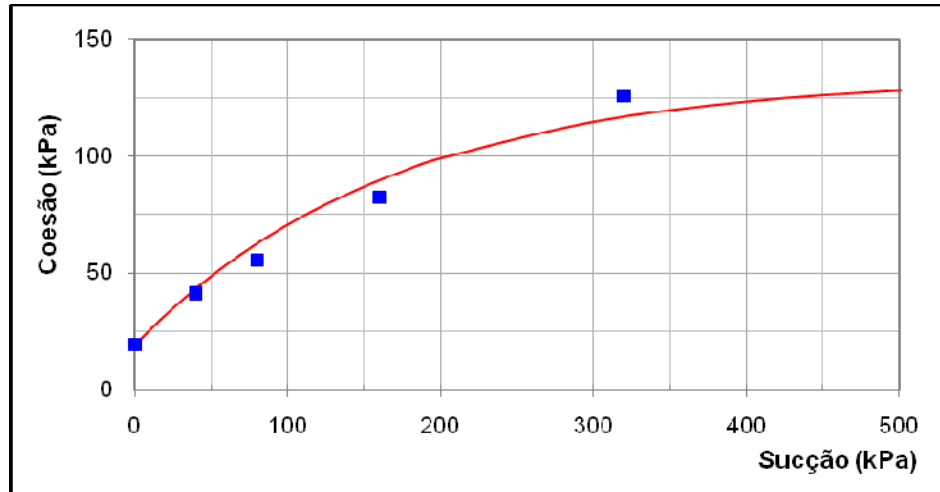


(a) Residual Maduro

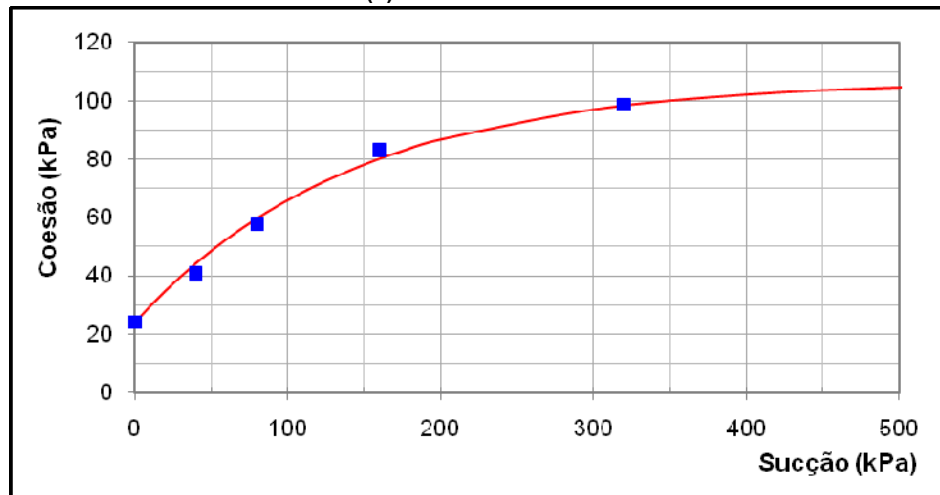


(b) Residual Jovem

Figura 5.13 – Proposta de Vilar e Colaboradores – Viçosa



(a) Residual Maduro



(b) Residual Jovem

Figura 5.14 – Proposta de Futai e Colaboradores – Viçosa

A Tabela 5.10 resume os parâmetros obtidos nos ajustes da proposta de Futai e colaboradores.

Tabela 5.10 – Parâmetros de Ajuste – Futai e Colaboradores.

Amostra	a	c_{ψ}
Viçosa (Maduro)	-0,0026	133,7711
Viçosa (Jovem)	-0,0031	107,0532
ALGB	-0,0049	39,9730
ALBC	-0,0134	27,1221
Vista Chinesa – Residual Vermelho	-0,0100	40,6698
Vista Chinesa – Residual Típico	-0,0089	45,4776
USP	-0,0075	59,9100
A11	-0,0086	34,8801

5.2.1 Comparação entre os Modelos Analisados

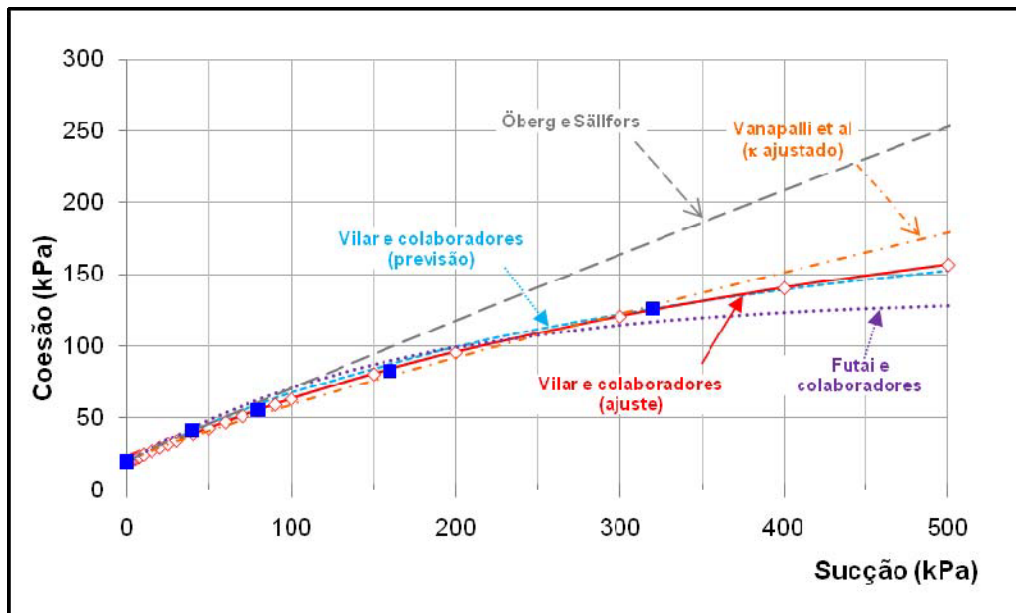
Dentre as propostas analisadas, a que melhor se ajustou aos dados experimentais foi a proposta de Vilar e colaboradores, que obteve o melhor resultado em 6 das 8 amostras analisadas. Os resultados também apontam o modelo de previsão de Vilar e colaboradores, baseado em resultados de ensaios saturados, como um método capaz de reproduzir a curva de resistência. A Figura 5.15 apresenta os ajustes realizados para as amostras de Viçosa (Residual Maduro) e Alvorada solo (ALGC). Observa-se que o modelo de Öberg e Sällfors foi o que obteve o ajuste mais distante dos pontos experimentais e que a previsão e o ajuste do modelo de Vilar e colaboradores e o ajuste da proposta de Futai e colaboradores apresentam resultados coerente com os dados experimentais.

5.2.2 Relação ϕ^b/ϕ'

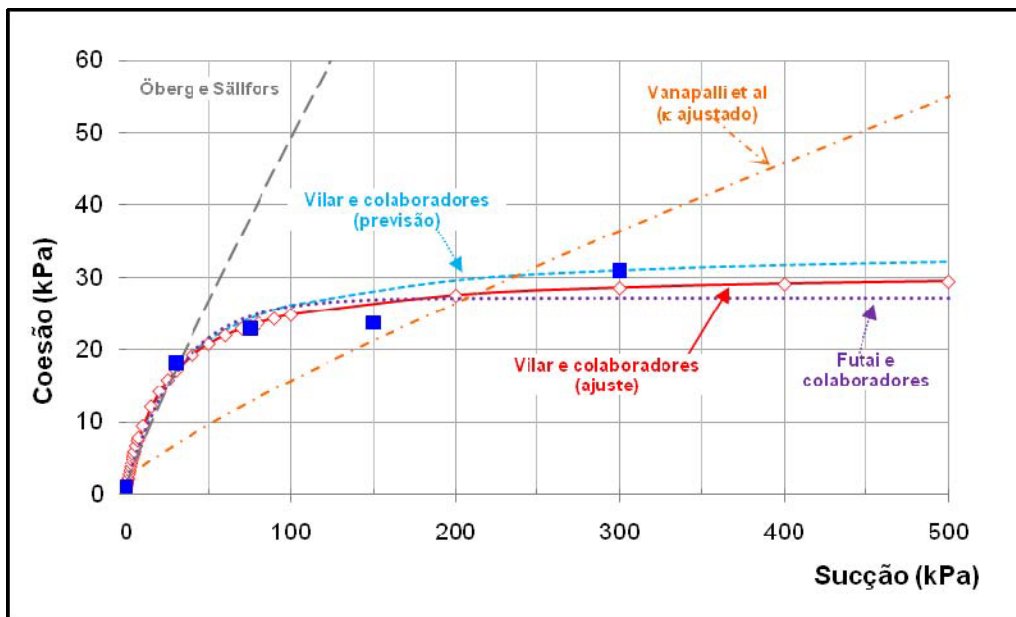
A partir das curvas previstas pelos modelos, obteve-se a relação ϕ^b/ϕ' para os diversos níveis de sucção. A Figura 5.16 mostra que os resultados obtidos para as amostras de Alvorada (ALGB), Vista Chinesa (Residual Típico) e USP indicam um decréscimo significativo da relação ϕ^b/ϕ' até aproximadamente 100 kPa, a partir deste valor o decréscimo passa a ser menos expressivo, tendendo a zero para altas sucções. Já no caso do solo de Viçosa (Maduro e Jovem), a redução de ϕ^b/ϕ' se deu de forma mais suave e no trecho inicial ϕ^b é da ordem de ϕ' .

Os dados coletados neste trabalho corroboram, na maioria dos casos, os resultados de Campos (1997) e Franch e Futai (2009), que indicam valores de ϕ^b maiores que ϕ' ($\phi^b/\phi' > 1$), para baixas sucções. Futai (2009), inclusive, atribui $\phi^b/\phi' > 1$, à não linearidade da envoltória efetiva de resistência, o que acarretaria em valores ϕ' superiores aos definidos usualmente, uma vez que se adota uma função linear.

As curvas obtidas para todas as amostras são apresentadas individualmente no Apêndice G.



(a) Residual Maduro (Viçosa)



(b) ALGC

Figura 5.15 – $c \times \psi$ - Comparação entre os Modelos– ALGC

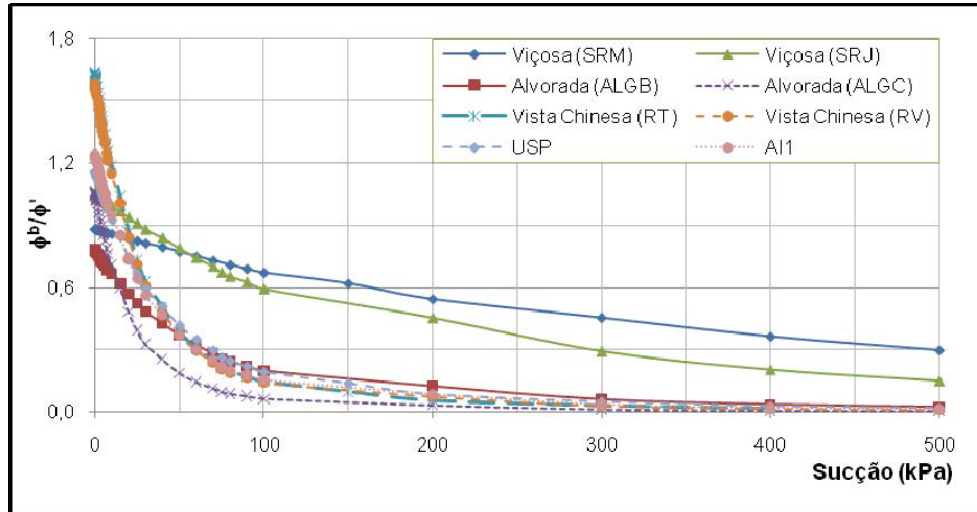


Figura 5.16 – Relação ϕ^b/ϕ'

5.2.3 Análise Global – Previsão da Resistência

A Tabela 5.11 apresenta a análise global dos ajustes realizados para a previsão da resistência, onde o ΣCQ representa a soma dos valores atribuídos a qualidade dos ajustes. Assim sendo, o modelo Vilar e colaboradores foi o que melhor reproduziu a curva coesão vs sucção.

Tabela 5.11 – Análise Global - Análises de Previsão da Resistência.

Amostra	Öberg e Sällfors		Vanapalli et al ($\kappa = 1$)		Vanapalli et al ($\kappa =$ ajustado)		Vanapalli et al (κ e $c' =$ ajustados)	
	$\Sigma CQ = 1.424,55$ F(p)	CQ	$\Sigma CQ = 202,00$ F(p)	CQ	$\Sigma CQ = 53,12$ F(p)	CQ	$\Sigma CQ = 36,41$ F(p)	CQ
Viçosa (SRM)	2.122,72	220,72	98,25	10,22	45,67	4,75	19,09	1,98
Viçosa (SRJ)	169,10	6,42	77,98	2,96	83,72	3,18	75,25	2,86
ALGB	3.382,84	325,27	301,28	28,97	92,44	8,89	44,97	4,32
ALBC	11.702,05	785,97	353,64	23,75	262,26	17,62	199,72	13,41
Vista Chinesa - RV	599,33	23,54	418,48	16,43	171,75	6,75	199,92	7,85
Vista Chinesa - RT	1.316,23	17,37	1.770,75	23,36	275,22	3,63	157,25	2,07
USP	236,58	17,74	870,59	65,27	72,94	5,47	30,16	2,26
A11	2.080,98	27,54	2.345,25	31,03	215,29	2,85	124,15	1,64

Tabela 5.11 (cont.) – Análise Global - Análises de Previsão da Resistência.

Amostra	Vilar e Colaboradores (ajuste)		Vilar e Colaboradores (previsão)		Futai e Colaboradores	
	F(p)	CQ	F(p)	CQ	F(p)	CQ
Viçosa (SRM)	9,62	1,00	44,15	4,59	194,48	20,22
Viçosa (SRJ)	49,28	1,87	57,39	2,18	26,36	1,00
ALGB	10,40	1,00	24,83	2,39	18,91	1,82
ALBC	14,89	1,00	24,35	1,64	29,05	1,95
Vista Chinesa - RV	25,46	1,00	58,43	2,29	45,11	1,77
Vista Chinesa - RT	75,79	1,00	102,80	1,36	110,79	1,46
USP	13,34	1,00	18,38	1,38	18,28	1,37
A11	108,95	1,44	196,99	2,61	75,57	1,00

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Introdução

A presente dissertação teve como objetivo discutir a aplicabilidade de equações para previsão da curva característica (Gardner, 1958; van Genuchten, 1980; e Fredlund e Xing, 1994); e para a previsão da relação entre a sucção matricial e resistência ao cisalhamento (Öberg e Sällfors, 1995, 1997; Vanapalli et al, 1996; Vilar, 2007 e Futai, 2002). Também foi investigada a adequação do uso da curva característica normalizada proposta por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004).

Para tal estudo, foi formado um banco de dados, a partir de uma pesquisa bibliográfica, com resultados de ensaios realizados em solos residuais brasileiros, não saturados. Os parâmetros dos modelos foram determinados por ajuste de curva utilizando técnicas de problemas inversos, por meio de duas ferramentas numéricas (Evolver e Matlab) que adotam dois métodos de otimização: algoritmo genético e Levenberq-Marquardt.

Na etapa preliminar do trabalho, foram realizadas análises com o intuito de definir o número mínimo de iterações nos processo de otimização. Em seguida, realizou-se os ajustes para determinação dos parâmetros de cada modelo, considerando as particularidades da cada proposta. Os resultados foram confrontados e discutidos.

A função objetivo foi usada para cálculo do erro e o critério para se estabelecer a qualidade do ajuste foi definido pela a relação entre a função objetivo, obtida no ajuste do modelo i , e a menor função objetivo $(F(p))_{\min}$ obtida para a mesma análise. Para indicar o modelo que melhor se aplica, foi considerado o somatório dos critérios de qualidade obtidos para cada ajuste, sendo considerado o melhor modelo àquele que apresentou o menor valor para esse somatório.

6.2 Conclusões

6.2.1 Quanto ao Estudo da Convergência dos Métodos e Ferramentas

- ✓ O número de iterações necessárias para atingir um valor constante da função objetivo varia conforme o modelo a ser estudado;
- ✓ No modelo de Fredlund e Xing (1994), a variação da sucção residual (ψ_r) não indicou peso nos resultados.
- ✓ Do ponto de vista prático, as diferenças observadas na função objetivo são praticamente desprezíveis;
- ✓ Existência de diferentes conjuntos de parâmetros, satisfazendo o mínimo da função, demonstra uma possível impossibilidade de associar os parâmetros de ajuste às características físicas do solo;
- ✓ O processo de convergência é mais instável quando se adota um número pequeno de indivíduos; análises realizadas com 10 e 20 indivíduos apresentaram resultados mais consistentes entre si. No entanto, para número elevado de iterações, a influência do número de indivíduos é desprezível;
- ✓ A não linearidade do processo de otimização gera um aumento exponencial no tempo de execução, quando se amplia o número de iterações;
- ✓ Análises com 10 indivíduos é satisfatório, se comparado com o tempo e o resultado obtido para análises com 20 indivíduos.

6.2.2 Quanto aos Modelos Aplicados

- ✓ A proposta de Fredlund e Xing (1994) é a que apresenta melhor ajuste para a determinação da curva característica e a proposta de Vilar e colaboradores para a determinação da envoltória de resistência.

- ✓ O modelo de previsão de Vilar e colaboradores, baseado em resultados de ensaios saturados, apresentou-se como um método eficaz para a reprodução da curva coesão vs sucção, sendo indicado para estimar, de forma preliminar, a resistência não saturada.
- ✓ O modelo de Öberg e Sällfors (1995, 1997) fornece valores superestimados para a resistência do solo, apresentando o pior ajuste, em acordo com a observação de Vanapalli e Fredlund (2000)
- ✓ Assim como verificado por Vanapalli et al (1996), os resultados aqui apresentados denotam a importância de se permitir variar o parâmetro κ , para se alcançar um melhor ajuste na adoção da curva de previsão da resistência pelo modelo proposto por Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996).
- ✓ Foi observado que as amostras estudadas não apresentaram resultados coerentes com o ajuste estatístico realizado por Vanapalli e Fredlund (2000a, 2000b). Cabe ressaltar que nos estudos realizados pelos autores foram adotadas amostras compactadas e que os ajustes realizados neste trabalho consideraram amostras naturais, logo, os resultados obtidos pelos autores não podem ser estendidos para solos naturais.
- ✓ Os resultados mostraram que a relação ϕ^b/ϕ reduz significativamente com aumento da sucção. Na maioria dos casos, partir de 100kPa, esta redução se dava de forma suave, tendendo a zero para sucções superiores a 400 kPa. Foram observados valores de $\phi^b > \phi'$ para sucções até 20kPa.

6.2.3 Quanto ao Número de Amostras

- ✓ Os melhores ajustes tendem a ocorrer nas amostras que apresentam dados experimentais ao longo de toda amplitude da curva característica.

- ✓ Quanto ao ajuste da envoltória de resistência, nada pode ser concluído quanto ao número e dispersão de dados, uma vez que, os ensaios foram realizados com valores limitados de sucção.

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a continuidade dos estudos envolvendo o comportamento de solos não saturados, sugere-se:

- ✓ Estender o banco de dados relativos a solos residuais e incluir outros tipos de solos, tais como: sedimentares, coluvionares e compactados;
- ✓ Aplicar a mesma abordagem para a análise das equações de previsão da condutividade hidráulica não saturada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, B.A., WULSOHN, D., FREDLUND, D.G. **Application of Unsaturated Soil Mechanics for Agricultural Conditions**. Canadian Agricultural Engineering, Vol. 38 (3), pp. 171-131, 1996.
- AITCHISON, G.D.; RUSSAM, K. e RICHARDS, B.G. **Engineering Concepts of Moisture Equilibrium and Moisture Changes in Soils**. Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Butterworths, Sidney, Australia, 66-84, 1965.
- ALONSO, E.E.; GENS, A. e HIGHT, D.W., **Special Problems Soils**. Proceedings 9th E.C.S.M.F.E., Dublin, General Report, Session 5, 5.1-5.60, 1987.
- ANDERSON, M.G. **Prediction of Soil Suction for Slopes in Hong-Kong**. GCO Publication, n 1/84, Geotechnical Control Office, Hong- Kong. 1984
- ARBHAHIRAMA, A. e KRIDAKORN. **Steady Downward Flow to a Water**, Water Resources Research, v. 4, 1698.
- ARORA, J.S. **Introduction to Optimum Design**. McGraw-Hill, Inc. 1989.
- AUBERTIN, M., RICARD, J.F., CHAPUIS, R.P. **A Predictive Model for the Water Retention Curve: Application to Tailings from Hard-Rock Mines**. Canadian Geotechnical Journal, v. 35 (1) p. 55-69, 1998.
- BAO, C.G., GONG, B. e ZHAN, L. **Properties of Unsaturated Soils and Slope Stability of Expansive Soil**. 2nd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 98, Beijing, Keynote Lecture, 1998.
- BARBOUR, S.L. **The Soil-Water Characteristics Curve – A Historical Perspective**. 19th Canadian Geotechnical Colloquium. Canadian Geotechnical Journal, v. 35, p. 873-794, 1998
- BARD, Y. **Nonlinear Parameter Estimation**. Academic Press, Inc., San Diego, Ca. 1974.
- BASTOS, C.A.B. **Estudo Geotécnico sobre a Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados**. 303f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre - RS. 1999

- BASTOS, C.A.B; GEHLING, W.Y.Y.; BICA, A.V.D. **Aplicação de Modelos de Previsão da Resistência ao Cisalhamento com relação à Sucção para Solos Residuais de um Perfil Granítico**. 4º. Simpósio Brasileiro de Solos Não-saturados, v. 1, p. 46-62, Porto Alegre – RS, 2001.
- BECK, J.V. e ARNOLD, K.J. **Parameter Estimation in Engineering and Science**. John Wiley & Sons, Inc. 1977
- BISHOP, A. W. **The Principle of Effective Stress**. Tecknis Ukeblad, v. 106, pp.859-863, 1959
- BISHOP, A. W., ALPAN, I., BLIGHT, G.E., DONALD, I.B. **Factors Controlling the Shear Strength or Partly Saturated Cohesive Soils**. ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, University of Colorado, Boulder, CO, p. 500 – 532, 1960.
- BISHOP, A. W. e DONALD, I. B. **The Experimental Study of Partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus**. 5th ICSMFE, Paris, p. 13-21, 1961.
- BROOKS, R.H. e COREY, A.T. **Hydraulics Properties of Porous Media**, Colorado State Univ. Hydrol. Paper No.3, 1964.
- BROOKS, R.H. e COREY, A.T. **Properties of Porous Media affectubg Fluid Flow**, J. Irrig. Drain. Div. Am; Soc. Civ. Eng., v 92, p 61-66, 1968.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. e LEROUEIL, S. **Modelo de Normalização da Curva Característica**. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, p. 96-106, Brasília-DF, 2000.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LEROUEIL, S. **Curva Característica de Sucção Transformada**. Solos e Rochas, São Paulo, v. 27 (3), p. 231-242, 2004.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Solos Expansivos e Colapsíveis**. Anais do 6ª Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v.2, p-641-655, Salvador-Bahia, 2007
- CALLE, J.A.C **Análise de Ruptura de Talude em Solo Não Saturado**. 177f. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2000.
- CASTILHO, V.C. **Otimização de Componentes de Concreto Pré-Moldado Protendidos mediante Algoritmos Genético**. 283f. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2003

- CASTRO, A.L. **Métodos de Retroanálise na Interpretação do Comportamento de Barragens de Betão**. Tese de Doutorado. Universidade Técnica de Lisboa/LNEC. 1997
- CIVIDINI, A. e GIODA, G.. **Deterministic and Probabilistic back Analysis in Rock Mechanics**. Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering. A.A. Balkema. 1997
- CHEUNG, A.B. **Modelo Estocástico de Pressões de Produtos Armazenados para a Estimativa da Confiabilidade Estrutural de Silos..** 333f. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2007
- CÔTÉ, J.; KONRAD, J. M.; ROY, M. **Influence of Grain Size Distribution and Mineralogy of Unbound Aggregates on Soil-Water Characteristic Curves..** 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brasil, v. 1, p. 255-260, 2002.
- DA SILVA, A. R. **Projeto e Implementação de uma Ferramenta para o Pós-Processamento de Regras de Conhecimento Utilizando Algoritmos Genéticos**. São Carlos: ICMC-USP, 2002
- DE CAMPOS, L.E.P., **Influência da Sucção na Estabilidade de Taludes Naturais em Solos Residuais**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1984.
- DE CAMPOS, T.M.P.; DELGADO, C.C.; TIBANA, S.; SAENZ AGUILAR, S.A. e FONSECA, E.C., **Determinação da Curva Característica de Sucção em Laboratório**. 1^o Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (1^o COBRAE). Rio de Janeiro, v.3, p.835-851, 1992.
- DE CAMPOS, T.M.P e CARRILLO, C.W **Direct Shear Testing on an Unsaturated Soil from Rio de Janeiro**. 1st International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris, França, p. 31-38, 1995.
- DE CAMPOS, T.M.P **Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados**. Anais do 3^o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v.2, p. 399-417, Rio de Janeiro, 1997.
- DEJONG, K. **The Analysis and Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems**. PhD Thesis. University of Michigan, 1975.

- DELAGE, P.; SURAJE, D.E.; SILVA, G.P.R. e DE LAURE, E. **Un Nouvel Appareil Triaxial Pour les Sols Non-Saturés**. IX ECSMFE, Dublin, v.1, pp. 25-28, 1987.
- DELGADO, C.W.C. **Resistência ao Cisalhamento dos Solos Não Saturados da Vista Chinesa – RJ**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.1993
- EDIL, T.B.; MOTAN, S.E. e TOHA, F. X. **Mechanical Behavior and Testing Methods of Unsaturated Soils**. Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM, STP 740, p. 114-129, 1981.
- ESCARIO, V. **Suction Controlled Penetration and Shear Teste**. Proc. 4th Int. Conf. Expansive Sols, Denver, ASCE, v.2, p. 781-797. 1980
- ESCARIO, V. e SAEZ, J. **The Shear Strength of Partly Saturated Soils**. Geotechnique v.36 (3), pp. 453-456, 1986.
- ESCARIO, V. e SAEZ, J. **Shear Strength of Soils under Hight Suction Values**. IX ECSMFE, Discussion, v. 3, pp. 1157, Dublin, 1987.
- ESCARIO, V. **Formulaciones para la Definición de la Resistencia a Esfuerzo Cortante de los Suelos Parcialmente Saturados**. Revista Ing. Civil. CEDEX, n 68, p. 45-54. 1988
- ESCARIO, V. e JUCÁ, J. F. T. **Strength and Deformation of Partly Saturated Soils**. XII ICSMFE, v.1, pp. 43-46, Rio de Janeiro, 1989.
- FARREL, D. A e LARSON, W. E. **Modelling the Pore Structure of Porous Media**, Water Res. Res., no. 3, p.699-706,1972.
- FEUERHARMEL, C. **Aspectos do Comportamento Não Saturado de Dois Solos Coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasil**. 148f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre - RS. 2003
- FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W.Y.Y.; BICA, A.V.D. **Determination of the Soil-Water Characteristic Curve of Undisturbed Colluvium Soils**. In: International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, EXPERUS 2005, Trento (Itália), Proceedings., Vol.1, p. 345-349, 2005

- FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W.Y.Y.; BICA, A.V.D. **The Use of Filter-Paper and Suction-Plate Methods for Determining the Soil-Water Characteristic Curve of Undisturbed Colluvium Soils.** Geotechnical Testing Journal, Vol. 29 (5), p. 419-425. 2006
- FEUERHARMEL, C. **Estudo da Resistência ao Cisalhamento e da Condutividade Hidráulica de Solos Coluvionares Não Saturados da Formação Serra Geral.** 329f. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007.
- FINSTERLE, S. e PRUESS, K. **Solving the Estimation Identification Problem in Two-Phase Flow Modeling.** Water Resource Research, v. 31 (4), p. 913-923, 1995.
- FINSTERLE, S. e PERSOFF, P. **Determining Permeability of Tight Rock Samples Using Inverse Modeling.** Water Resources Res., 33(8), 1803-1811.1997
- FINSTERLE, S. **iTOUGH2 User's guide.** Report LBNL-40041, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. 1999
- FONSECA E. C. **Ensaio de Cisalhamento Direto com Sucção Controlada em Solos Não Saturados.** Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro. 1991.
- FOURIE, A.B e PAPAGEORGIAN, G. **A Technique for the Rapid Determination of the Soil Moisture Retention Relationship and Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.** 1st International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris, França, 1995.
- FRANÇA, I. F.; RIBEIRO, B, C; LIMA, V. S.; DE LA VEJA, A. S. **Apostila de Introdução ao Matlab.** 52 f. (versão 2k80801). Programa de Educação Tutorial. Escola de Engenharia – Curso de Engenharia de Telecomunicações. Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ. 2008.
- FRANCH, F. A. J.e FUTAI, M. M, A.M. **Estudo da Variação da Sucção ao Longo do Ano de um Talude de Solo Residual.** 5^a Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (V COBRAE). São Paulo, CD-ROM, 2009.
- FREDLUND, D.G. e MORGENSTERN, N. R. **Stress State Variables for Unsaturated Soils.** ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Division GT5, v. 103: p. 447-466, 1977.

- FREDLUND, D. G., MORGESTERN, N. R. e WIDGER, R. A. **The Shear Strength of Unsaturated Soils**. Canadian Geotechnical Journal, v. 15 (3), p. 313-321, 1978.
- FREDLUND, D.G., **Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils**. Canadian Geotechnical Journal, v.16 (3), p. 521-531, 1979.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. e GAN, J. K. M. **Non-Linearity of Strength Envelope for Unsaturated Soils**. Proc. Int. Conf. On Exp. Soils. New Dehli , v.1, pp. 49-54, 1987.
- FREDLUND, D.G. e RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soil**. John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- FREDLUND, D.G. e XING, A. **Equations for the Soil-Water Characteristic Curve**. Canadian Geotechnical Journal, v. 31(3): p. 521-532, 1994.
- FREDLUND, D.G. **Teaching Unsaturated Soil Mechanics as Part of The Undergraduate Civil Engineering Curriculum**. Apredizaje de Ingenieria Geotecnica, Guayaquil - Equador, 2002.
- FUTAI, M.M. **Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Solos Tropicais Não-Saturados: Aplicação a um Caso de Voçorocamento**. 597f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro. 2002.
- FUTAI, M.M.; ALMEIDA, M.S.S; LACERDA, W.A.. **Resistência ao Cisalhamento de Solos Tropicais Não-Saturados**. In: 5º. Simpósio Brasileiro de Solos Não-saturados, São Carlos. Simpósio Brasileiro sobre Solos Não Saturados, 2004.
- GALLIPOLI, D.G, WHEELER, S.J e KARSTUNEN, M. **Modeling the Variation of Degree of Saturation in a Deformable Unsaturated Soil**. Géotechnique, v. 53(1), p. 105-112. 2003
- GAN. J.K.M e FREDLUND, D.G. **Shear Strength Characteristics of two Saprolitic Soils**. Canadian Geotechnical Journal, v. 33 (4), p. 595-609, 1996.
- GARDNER, W.R. **Some Steady-State of the Unsaturated Moisture Flow Equation with application to Evaporation from Water Table** - Soil Sci., n. 85, Vol.3, pp228-232,1958.
- GEN, M. e CHENG. R. **Genetic Algorithms and Engineering**. John Wiley & Sons, Inc. London, 1996.

- GERSCOVICH, D. M. S. **Modelagem Numérica de Fluxo em Meios Porosos Saturados e Não Saturados com Aplicação Estudo de Encostas do Rio de Janeiro**. 244f. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil . Rio de Janeiro. 1994.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Equações para Modelagem da Curva Característica Aplicadas a Solos Brasileiros**. 4º. Simpósio Brasileiro de Solos Não-saturados, v. 1, p. 76-92, Porto Alegre – RS, 2001.
- GERSCOVICH, D. M. S; SAYÃO, A. S. F. J. **Evaluation of the Soil-Water Characteristic Curve Equations for Soils from Brazil**. 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brasil, v. 1, p. 295-300, 2002.
- GERSCOVICH, D. M. S. e GUEDES, M. N. **Avaliação das Relações de Condutividade Hidráulica em Solos Brasileiros Não Saturados** 5º. Simpósio Brasileiro de Solos Não-saturados, v. 1, p. 249-254, São Carlos – SP, 2004.
- GERSCOVICH, D. M. S., GUEDES, M. N. e FONSECA, E.T. **Evaluation of Soil-Water Characteristic Curves for Problems of Unsaturated Flow in Soils from Brazil**. Solos e Rochas – Revista Brasileira de Geotecnia, v 27(1), p. 57-68. 2004.
- GOLDBERG, D.E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Massachusetts: Addison- Wesley, Reading, 1989
- GHOSH, R.K. **Estimation of Soil Moisture Characteristics from Mechanical Properties of Soils** - Soil Sci., v.130, No 1.2, p.60-63, 1980.
- GITIRANA JR., G.F.N e FREDLUND, D G. **Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V. 130 (2), p. 209-212, 2004
- HAVERKAMP,R. D.G. e PARLANGE, J.Y. – **Predicting the Water-Retention Curve from Particle Size Distribution: 1. Sandy Soils Without Organic Matter**. Soil Sci., vol.142, no.6, pp.325-339,1986.
- HILLEL, D. **Soil Water-Physical Principles and Processes**. New York, Acadmic Press,Cap 1-5, 1971.
- HO, D. Y. F. e FREDLUND, D. G. **A Multistage Triaxial Test for Unsaturated Soils**. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, v.5, n1/2 , p. 18-25, 1982.

- HOLAND, J.H. **Adaptation in Natural in Artificial Systems**. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press. (reimpresso por MIT Press, 1992.)
- HOPMANS, J.W, SIMUNEK, J., ROMANO, N, DURNER, W. **Inverse Modeling of Transient Water Flow**. Methods os Soil Analysis, Physical Methods. Third Edition, SSSA, Madison, p. 963-1008. 2002
- HUYAKORN, P.S, THOMAS, S.D. e THOMPSON, B.M. **Techniques for Making Finite Elements Competitive in Modelling Flow in Variable Saturated Porous Media**. Inverse Modeling of Transient Water Flow. Water Resources Research, v. 20(8). p. 1099-1115, 1984.
- JESUS, A.C **Retroanálise de Escorregamento em Solos Residuais Não Saturados**. 283f. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2008.
- KHALLILI, N. e KHABBAZ, M.H. **A Unique Relationship for the Determination of the Shear Strength of Unsaturated Soils**. Geotechnique, v. 48(5); pp. 681-687, 1998.
- KOOL, J.B., PARKER, J.C., van GENUTCHEN, M.T. **Determining Soil Hydraulic Properties from One-step Outflow Experiments by Parameter Estimation: I. Theory and Numerical Studies**. Soil Science Society of America Journal, v 49, p. 1348-1354, 1985.
- KOOL, J.B., PARKER, J.C., van GENUTCHEN, M.T. **Parameter Estimation for Unsaturated Flow and Transport Models**. A Review. Journal of Hydrology, v. 91, p- 255-293, 1987.
- KRAHN, J. e FREDLUND, D.G. **On Total Matric and Osmotic Suction**. Journal of Soil Science, vol.114, n. 5, pp. 339-348, 1972.
- LEONG, E.C. e RAHARDJO, H. **Review of Soil-Water Characteristic Curve Equation**. J. Geot. And Geoenv. Eng., dez., p. 1106-1117, 1997.
- LEVENBERG, K. **A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares**. The Quarterly of Applied Mathematics 2: 164–168. 1944
- MACHADO, S. L e VILAR, O. M. **Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados: Ensaio de Laboratório e Determinação Expedita**. Solos e Rochas, AMBS – ABGE, v. 21 (2), pp. 65-78, 1998

- MACHADO, S. L. e LIMA JR, E. M. **Desenvolvimento da Superfície de Escoamento de um Solo Residual Jovem de Granulito**. 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. v. 1, p. 63-75, 2001.
- MACHADO, S. L. e DOURADO, X. X. **Novas Técnicas para Obtenção da Curva Característica de Sucção do Solo**. 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Porto Alegre (RS). v. 1, p. 325-36, 2001.
- MACIEL, I. C. Q. **Aspectos Microestruturais e Propriedades Geomecânicas de um Perfil de Solo Residual de Gnaiss Facoidal**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 1991.
- MARQUARTD, D.W. **An Logarithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameter**. SIAM Journal on Applied Mathematics, v. 11, p. 431-411. 1963.
- MARINHO, F.A.M. **Shrinkage Behaviour of Some Plastic Soils**. PhD Thesis – Imperial College, University of London, 216p, 1994.
- MARINHO, F. A. M., **Medição de Sucção em Solos**. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v.2, p. 373-398, Rio de Janeiro, 1997.
- MARINHO, F. A. M. **Nature of Soil-Water Characteristic Curve for Plastic Soils**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 131 (5), p. 654-661, 2005.
- MATHWORKS, INC. **Matlab – The Language of Technical Computing – User’s Guide**. USA, versão 7.6.324, 2008
- McKEE, C.R. e BUMB, A C. **Flow-Testing Coal Bed Methane Production Wells in the Presence of Water and Gas**, SPE Formation Evaluation, dec., p.599-608,1987.
- MELGAREJO, M. L; RIDLEY, A. M.; DINEEN, K. **A Comparison of the Soil Water Characteristic Curve for Reconstituted and Undisturbed Samples of a Colluvium from Rio de Janeiro**. 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brasil, v. 1, p. 313-316, 2002.
- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of Soil Behavior**. University of California, John Wiley & Sons, Inc. 1976
- MONCADA, M.P.H. **Avaliação de Propriedades Hidráulicas de Solos Tropicais Não Saturados** 324f. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil . Rio de Janeiro. 2008

- MORALES, M.S.T. **Estudo Numérico e experimental de problemas de fluxo saturado – Não Saturado em Solos** 125 f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 2008.
- NEUMAN, S.P. **Saturated-Unsaturated Seepage by Finite Elements**. Journal of Hydraulics Division, Hy12,. ASCE. V.99, n. 12, p.2233-2250. 1973
- ÖBERG, A. L.; SÄLLFORS, G. **A Rational Approach to the Determination of the Shear Strength Parameters of Unsaturated Soils**. 1st International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris, França, p. 151-158, 1995.
- ÖBERG, A. L.; SÄLLFORS, G. **Determination of Shear Strength Parameters of Unsaturated Silts and Sands Based on the Water Retention Curve**. Geotechnical Testing Journal, v. 20:1, pp. 40-48, 1997
- OLIVEIRA, L. A. K., GEHLING, W. Y. Y. e SCHNAID, F. **Avaliação do Avanço da Frente de Saturação em um Solo Residual de Granito Não Saturado**. 4^o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. v. 1, p. 203-217, 2001
- OLIVEIRA, O. M. e MARINHO, F. A. M. **Aspectos da Curva de Retenção de Água de um Solo Residual Compactado**. 5^o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. v. 1, p. 279-287, 2004
- PALISADE CORPORATION. **Evolver - The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel[®] – User's Guide**. Ithaca, NY USA, versão 5.5, 2009
- PRUDÊNCIO, R.B.C. **Projeto Híbrido de Redes Neurais**. 111f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática. Recife. 2002
- RAMOS JÚNIOR, A.S.. **Modelos Computacionais para Avaliação de Danos, Tensões e Ações em Estruturas**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil . Rio de Janeiro. 1997.
- RAWLS, W.J. e BRAKENSIEK **Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties, Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling: Theory and Practice**, ed H.J. Morel-Seytoux, Kuwer Academic Publishers, pp.275-300, 1989.
- REIS, R. M. **Comportamento Tensão-Deformação de Dois Horizontes de um Solo Residual de Gnaisse**. 222f. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2004.

- REIS, R. M. e VILAR, O. M. **Resistência ao Cisalhamento de Dois Solos Residuais de Gnaisse Não Saturados**. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. v. 1. p. 109-114., 2004
- REMSON, I., HORNBERGER, G.M. e MOLZ, F. **Numerical Methods in Surface Hydrology**. J. Wiley. 1971.
- ROGER, B.C. e HORNBERGER, G.M. **Empirical equations for some soil hydraulic properties**. Water Res. Res., 14, pp.601-604, 1978.
- RÖHM, S. A. e VILAR, O. M. **A influência da Estrutura de um Solo Arenoso Laterizado Não Saturado na sua Resistência ao Cisalhamento**. 2º. Simpósio Brasileiro de Solos Não-saturados, Recife, p. 211-216, 1994.
- RÖHM, S. A.; VILAR, O. M. **Shear Strength Of An Unsaturated Sandy Soil**. 1st International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris, França, p. 189-193, 1995
- RÖHM, S.A. **Solos Não Saturados**. Monografia geotécnica nº4, Departamento de Geotecnia, EESC-USP, São Carlos – SP. 1997.
- SILVA NETO, A.J. e MOURA NETO, F.D. **Problemas Inversos: Conceitos Fundamentais e Aplicações**. EdUERJ, 172p, Rio de Janeiro, 2005.
- SANTOS, M.A.A.. **Influência das Condições Tridimensionais de Tensão e Fluxo na Estabilidade de um Talude em Solo Não Saturado**. 204f. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil. Brasília. 2005.
- SAXTON, K.E., RAWLS, W.J, HOMBERGER, J.S. e PAPENDICK, R.I. **Estimating Generalized Soil-Water Characteristics from Texture**. Soil Sci. Soc. Am. J., n.50 (4), pp.1031-1036. 1986.
- SEKER, E. **Étude de la Déformation d'un Massif de Sol no Saturé**. Thèse de Docteur ès Sciences Techniques, n. 492, E.P.F Lausanne. p. 224, 1983
- SIERKSMA, G. **Linear and Integer Programming: Theory and Practice**. Marcel Dekker, Inc. New York, 1996
- SILVA, E.E. **Otimização de Estruturas de Concreto Armado Utilizando Algoritmos Genéticos** 131f. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

- SIMUNEK, J. e van GENUCHTEN, M.T. **Estimating Unsaturated Soil Hydraulic Properties from Tension Disc Infiltration Data by Numerical Inversion.** Water Resource Research, v 32 (9), p. 2683-2696, 1996
- SOARES, A.P.A.L. **Avaliação do Mecanismo de Ruptura em Solo Não Saturado da Encosta da Vista Chinesa.** 129f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Distrito Federal. 2007.
- TEIXEIRA, R. S e VILAR, O. M, **Resistência ao Cisalhamento de um Solo Compactado Não Saturado.** Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v.1, p. 161-169, Rio de Janeiro, 1997.
- TERZAGHI, K. **The Shearing Resistance of Saturated Soil and the Angle Between the Planes of Shear.** International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. International Society Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, v 1, p. 54-56, 1936
- TINJUM, J.M; BENSON, C.H; BLOTZ, L.R **Soil-Water Characteristic Curves for Compacted Clays.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 123, n. 11,; p. 447-466, 1997
- VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E. e CLIFTON, A.W. **Model for Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction,** Canadian Geotechnical Journal, v. 33 (3), p. 379-392, 1996.
- VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G. e PUFAHL, D.E. **The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till.** Géotechnique, v. 49 (2), p. 143-159. 1999.
- VANAPALLI, S.K. e FREDLUND, D. G. **Comparison of Different Procedures to Predict Unsaturated Soil Strength.** AASTM Proceedings, Unsaturated Soils, Geo-Denver, p. 195-209, 2000.
- VANAPALLI, S.K, WRIGHT, A. e FREDLUND, D.G. **Shear Strength of Two Unsaturated Silty Soils Over the Suction Range From 0 to 1.000.000 kPa.** 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal, p. 1161-1168, 2000.
- VANAPALLI, S.K. **A Simple Experimental Procedure for Determining the Fitting Parameter, κ for Predicting the Shear Strength of an Unsaturated Soil.** Proceedings of the 54th Canadian Geotechnical Conference, Calgary, p. 622-629, 2001.

- VANAPALLI, S.K e LOBEZZO, J.P. **A Normalized Function for Predicting the Coefficient of Permeability of Unsaturated Soils**, UNSAT 2002, p 839-844, 2002.
- van GENUCHTEN, M. Th. **A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils**, Soil Sci. Soc. Am.; J 44, p. 892-898. 1980
- VARGAS JUNIOR, E.A.; COSTA FILHO, L.M. e DE CAMPOS, T.M.P. **Análise de Infiltração em Solos de Encostas no Rio de Janeiro e sua Consequência na Estabilidade**. 1º Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (1º COBRAE). Rio de Janeiro, v. 3, p.759-770, 1992.
- VELLOSO, R.Q. **Estudo Numérico da Estimativa de Parâmetros Hidráulicos em Solos Parcialmente Saturados**. 91f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 2000.
- VIEIRA, A.M.; MACHADO, F. A. M. **Variação Sazonal de Sucção em um Talude de Solo Residual em São Paulo**. 3ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (III COBRAE). Rio de Janeiro, p.287-295, 2001.
- VILAR, O. M. **An expedite Method to Predict the Shear Strength of Unsaturated Soil**. Soils & Rocks, AMBS – ABGE, v. 30 (1), pp. 51-62, 2007.
- VILAR, O. M. e RODRIGUES, R. A. **Métodos Expeditos para Previsão da Resistência de Solos Não Saturados e Identificação de Solos Colapsíveis** Anais do 6ª Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v.1, p-575-592, Salvador-Bahia, 2007
- VIVIAN, J. B. **Utilização do Método do Papel Filtro para a Determinação das Curvas Características de um Solo Coluvionar Não Saturado Contaminado com Óleo Diesel**. 100f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre - RS. 2008
- WILLIAMS, J., PREBBLE, R.E., WILLIAMS, W.T. e HIDNETT, C.T. **The Influence of Texture, Structure and Clay Mineralogy on the Soil Moisture Characteristic Curve**. Australian J. Soil Res., 21, pp.15-32. 1983
- YEH, W. **Review of Parameter Identification Procedure in Groundwater Hydrology: The Inverse Problem**. Water Resource Research, v 22 (2), p. 95-108, 1986.

APÊNDICE A – ESTRUTURA DO ARQUIVO TEXTO – GARDNER

Arquivo Fonte

```
t0=cputime %armazena o valor “tempo inicial” de cálculo
x0 = [0.1 0.1]; %valor inicial para cada variável do problema
options = optimset ('LargeScale', 'off', 'MaxFunEvals', 50000, 'MaxIter', 10000,
'TolFun',0.0001); %definição do parâmetros de parada para a função adotada.
```

[x,resnorm,residual,exitflag,output]=lsqnonlin('gardner',x0,[],[],options) %definição dos parâmetros de saída, escolha da função (lsqnonlin). Entre parênteses são indicados o nome da função (arquivo principal), a variável inicial e as opções pré definidas. A função adotada lê o arquivo principal e efetua o cálculo das variáveis do estudo.

```
t1=cputime; %armazena o valor “tempo final” de cálculo
```

```
Tempo = t1-t0 %calcula o tempo de cálculo.
```

```
PARAMETROS = [x] %apresenta o resultado das variáveis calculadas no arquivo principal.
```

```
% TRAÇADO GRÁFICO
```

```
A=x(1); %armazena em A o valor da variável q
```

```
B=x(2); %armazena em B o valor da variável η
```

```
psiexp=[0.10 2.02 2.09 2.36 2.70]; %ψ experimental
```

```
tetaexp=[52.40 40.60 38.80 33.90 38.]; %θ experimental
```

```
tetas=0.530; %θs
```

```
tetar = 0.170; %θr
```

```
t=tetas-tetar;
```

```
P=logspace(-2,6,100); %intervalo para os valores de ψ para o cálculo do gráfico.
```

```
for z=1:100; %z = intervalo de ψ, varia de 1 ao 100
```

```
Q=P(z); %atribui a Q o valor da posição z no vetor P.
```

```
tetagraf=100*(((1/(1+(A*(Q^B))))*(t))+tetar); %efetua o cálculo de θk a partir do valor de Q e dos parâmetros encontrados (A e B)
```

```
y(z)=tetagraf; %atribui a y(z) o valor obtido para “tetagraf” na posição z no vetor P.
```

```
end %finaliza o programa quando o valor de z + 1 for maior que o indicado no intervalo de valores de ψ
```

```
semilogx (psiexp,tetaexp,'r',P,y,'m') %Traça um gráfico semilog no eixo x com os valores experimentais e a curva calculada.
```

```
title ('LOCAL - FONTE') %Insere um título para o gráfico
```

```

xlabel ('\psi (kPa)') %Insere um título ao eixo x
ylabel ('\theta (%) ') %Insere um título ao eixo y
grid %Traça o grido do gráfico
legend ('Dados Experimentais','Gardner (1958)') %Insere a legenda do gráfico
%RESULTADOS
Residual = [residual] %Indica o resultado da função objetivo
PARAMETROS = [x] %Indica o resultado das variáveis

```

Arquivo Principal

```

function F=gardner1(x)
psiexp=[0.10 2.02 2.09 2.36 2.70]; % $\psi$  experimental
tetaexp=[52.40 40.60 38.80 33.90 38.]; % $\theta$  experimental
tetas=0.530; % $\theta_s$ 
tetar = 0.170; % $\theta_r$ 
t=tetas-tetar;
F=0.0; %valor inicial da função objetivo
for k = 1:5; %k = intervalo de dados, varia de 1 ao n° de amostras
    tetae=tetaexp(k); %define o valor de  $\theta_k$  a ser utilizado no cálculo, conforme a
ordem indicada em "tetaexp"
    tetacap = 1/(1+x(1)*(psiexp(k)^x(2))); %efetua o cálculo de  $\Theta_k$ 
    tetaperc=(tetacap*(t)+tetar)*100; %efetua o cálculo de  $\theta_k$ 
    F=F+(tetaperc-tetae)^2; %calcula o valor da função objetivo para o valor de  $\theta_k$ ,
armazena o valor na incógnita F e retorna para o calculo de  $\theta_{k+1}$ .
end%finaliza o programa quando o valor de k + 1 for maior que o indicado no
intervalo de dados

```

APÊNDICE B – ESTRUTURA DO ARQUIVO TEXTO – VAN GENUCHTEN

Arquivo Fonte

```

t0=cputime %armazena o valor “tempo inicial” de cálculo
x0 = [0.1 0.1 0.1]; %valor inicial para cada variável do problema
options = optimset ('LargeScale', 'off', 'MaxFunEvals', 50000, 'MaxIter', 10000,
'TolFun',0.0001); %definição do parâmetros de parada para a função adotada.
[x,resnorm,residual,exitflag,output]=lsqnonlin('van',x0,[],[],options) %definição dos
parâmetros de saída, escolha da função (lsqnonlin). Entre parênteses são indicados o nome
da função (arquivo principal), a variável inicial e as opções pré definidas. A função adotada
lê o arquivo principal e efetua o cálculo das variáveis do estudo.
t1=cputime; %armazena o valor “tempo final” de cálculo
% TRAÇADO GRÁFICO
A=x(1); %armazena em A o valor da variável  $\alpha$ 
B=x(2); %armazena em B o valor da variável  $\eta$ 
C=x(3); %armazena em C o valor da variável  $m$ 
psiexp=[0.10 2.02 2.09 2.36 2.70]; % $\psi$  experimental
tetaexp=[52.40 40.60 38.80 33.90 38.]; % $\theta$  experimental
tetas=0.530; % $\theta_s$ 
tetar = 0.170; % $\theta_r$ 
t=tetas-tetar;
P=logspace(-2,5,100); %intervalo para os valores de  $\psi$  para o cálculo do gráfico.
for z=1:100; %z = intervalo de  $\psi$ , varia de 1 ao 100
Q=P(z); %atribui a Q o valor da posição z no vetor P.
tetagraf=(((1/(1+(A*Q)^B))^C)*(t)+tetar)*100;%efetua o cálculo de  $\theta_k$  a partir do
valor de Q e dos parâmetros encontrados (A, B e C)
y(z)=tetagraf; %atribui a y(z) o valor obtido para “tetagraf” na posição z no vetor P.
end %finaliza o programa quando o valor de z + 1 for maior que o indicado no
intervalo de valores de  $\psi$ 
semilogx (psiexp,tetaexp,'r',P,y,'m') %Traça um gráfico semilog no eixo x com os
valores experimentais e a curva calculada.
title ('LOCAL - FONTE') %Insere um título para o gráfico
xlabel ('\psi (kPa)') %Insere um título ao eixo x

```

```

ylabel ('theta (%) ') %Insere um título ao eixo y
grid %Traça o gride do gráfico
legend ('Dados Experimentais','van Genuchten (1980)') %Insere a legenda do gráfico
%RESULTADOS
Tempo = t1-t0 %calcula o tempo de cálculo.
Residual = [residual] %Indica o resultado da função objetivo
PARAMETROS = [x] %Indica o resultado das variáveis

```

Arquivo Principal

```

function F=van(x)
psiexp=[0.10 2.02 2.09 2.36 2.70]; %ψ experimental
tetaexp=[52.40 40.60 38.80 33.90 38.]; %θ experimental
tetas=0.530; %θs
tetar = 0.170; %θr
t=tetas-tetar;
F=0.0; %valor inicial da função objetivo
for k = 1:5; %k = intervalo de dados, varia de 1 ao n° de amostras
    tetae=tetaexp(k); %define o valor de θk a ser utilizado no cálculo, conforme a
ordem indicada em “tetaexp”
    tetacap = (1/(1+(x(1)*fiexp(k))^x(2)))^x(3); %efetua o cálculo de Θk
    tetaperc=(tetacap*(tetas-tetar)+tetar)*100; %efetua o cálculo de θk
    F=F+(tetaperc-tetae)^2; %calcula o valor da função objetivo para o valor de θk,
armazena o valor na incógnita F e retorna para o calculo de θk + 1.
end %finaliza o programa quando o valor de k + 1 for maior que o indicado no
intervalo de dados

```

APÊNDICE C – ESTRUTURA DO ARQUIVO TEXTO – FREDLUND E XING

Arquivo Fonte

```

t0=cputime %armazena o valor “tempo inicial” de cálculo
x0 = [0.1 0.1 0.1]; %valor inicial para cada variável do problema
options = optimset ('LargeScale', 'off', 'MaxFunEvals', 50000, 'MaxIter', 10000,
'TolFun',0.0001); %definição do parâmetros de parada para a função adotada.
[x,resnorm,residual,exitflag,output]=lsqnonlin('fredlund',x0,[],[],options) %definição
dos parâmetros de saída, escolha da função (lsqnonlin). Entre parênteses são indicados o
nome da função (arquivo principal), a variável inicial e as opções pré definidas. A função
adotada lê o arquivo principal e efetua o cálculo das variáveis do estudo.
t1=cputime; %armazena o valor “tempo final” de cálculo
Tempo = t1-t0 %calcula o tempo de cálculo.
PARAMETROS = [x] %apresenta o resultado das variáveis calculadas no arquivo
principal.
% TRAÇADO GRÁFICO
A=x(1); %armazena em A o valor da variável  $\alpha$ 
B=x(2); %armazena em B o valor da variável  $\eta$ 
C=x(3); %armazena em C o valor da variável  $m$ 
psiexp=[0.10 2.02 2.09 2.36 2.70]; % $\psi$  experimental
tetaexp=[52.40 40.60 38.80 33.90 38.]; % $\theta$  experimental
tetas=0.530; % $\theta_s$ 
psib=0.1; % $\psi_b$ 
psir=1e4; % $\psi_r$ 
e=exp(1); %e = 2,781
P=logspace(-2,5,100); %intervalo para os valores de  $\psi$  para o cálculo do gráfico.
for z=1:100; %z = intervalo de  $\psi$ , varia de 1 ao 100
Q=P(z); %atribui a Q o valor da posição z no vetor P.
tetagraf=100*((1 - ((log (1 + (psiexp(k) / fir))) / (log (( 1 + (1e6 / psir)))))) * (tetas /
((log (e + ((psiexp(k) / A) ^ B))) ^ C))); %efetua o cálculo de  $\theta_k$  a partir do valor de Q e dos
parâmetros encontrados (A, B e C)
y(z)=tetagraf; %atribui a y(z) o valor obtido para “tetagraf” na posição z no vetor P.

```


end %finaliza o programa quando o valor de $z + 1$ for maior que o indicado no intervalo de valores de ψ

semilogx (psiexp,tetaexp,'*r',P,y,'m') %Traça um gráfico semilog no eixo x com os valores experimentais e a curva calculada.

title ('LOCAL - FONTE') %Insere um título para o gráfico

xlabel ('\psi (kPa)') %Insere um título ao eixo x

ylabel ('\theta (%)') %Insere um título ao eixo y

grid %Traça o gride do gráfico

legend ('Dados Experimentais','Fredlund e Xing (1994)') %Insere a legenda do gráfico

%RESULTADOS

Residual = [residual] %Indica o resultado da função objetivo

PARAMETROS = [x] %Indica o resultado das variáveis

Arquivo Principal

function F=fredlund(x)

psiexp=[0.10 2.02 2.09 2.36 2.70]; % ψ experimental

tetaexp=[52.40 40.60 38.80 33.90 38.]; % θ experimental

tetas=0.530; % θ_s

psib=0.1; % ψ_b

psir=1e4; % ψ_r

e=exp(1); %e = 2,781

F=0.0; %valor inicial da função objetivo

for k = 1:5; %k = intervalo de dados, varia de 1 ao n° de amostras

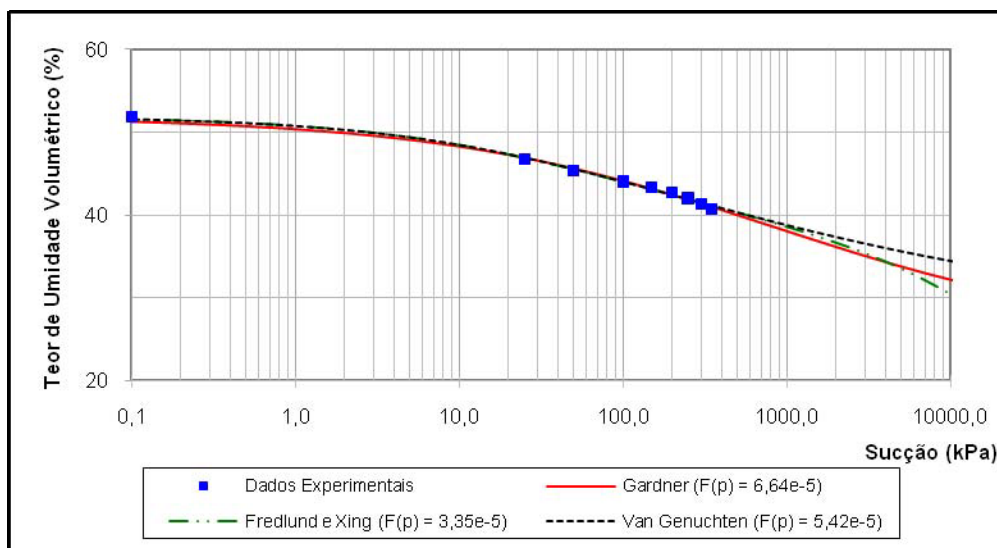
tetae=tetaexp(k); %define o valor de θ_k a ser utilizado no cálculo, conforme a ordem indicada em "tetaexp"

tetaperc=100*((1 - ((log (1 + (psiexp(k) / fir))) / (log ((1 + (1e6 / psir)))))) * (tetas / ((log (e + ((psiexp(k) / x(1)) ^ x(2)))) ^ x(3))))); %efetua o cálculo de θ_k

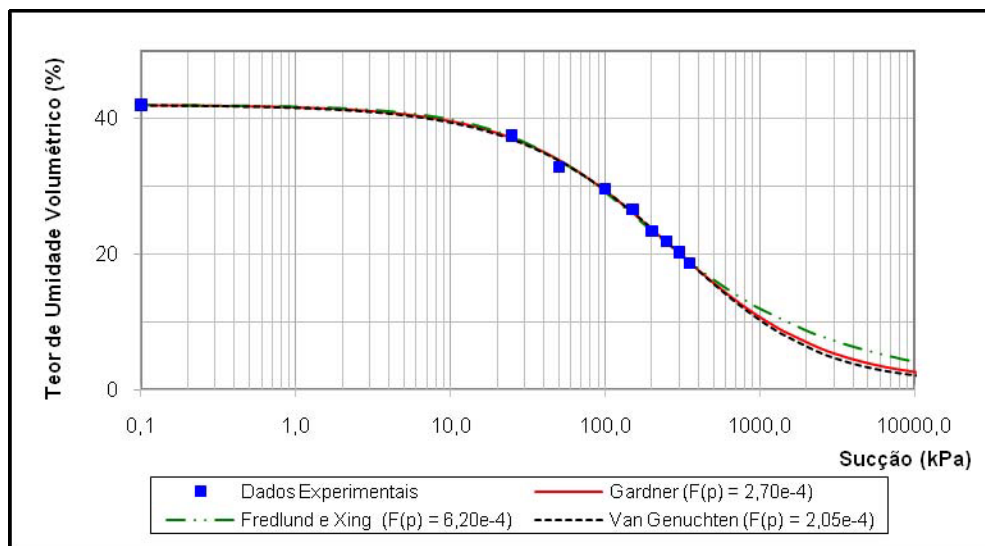
F=F+(tetaperc-tetae)^2; %calcula o valor da função objetivo para o valor de θ_k , armazena o valor na incógnita F e retorna para o calculo de θ_{k+1} .

end %finaliza o programa quando o valor de $k + 1$ for maior que o indicado no intervalo de dados

APÊNDICE D – RESULTADOS DA MODELAGEM DA CURVA CARACTERÍSTICA

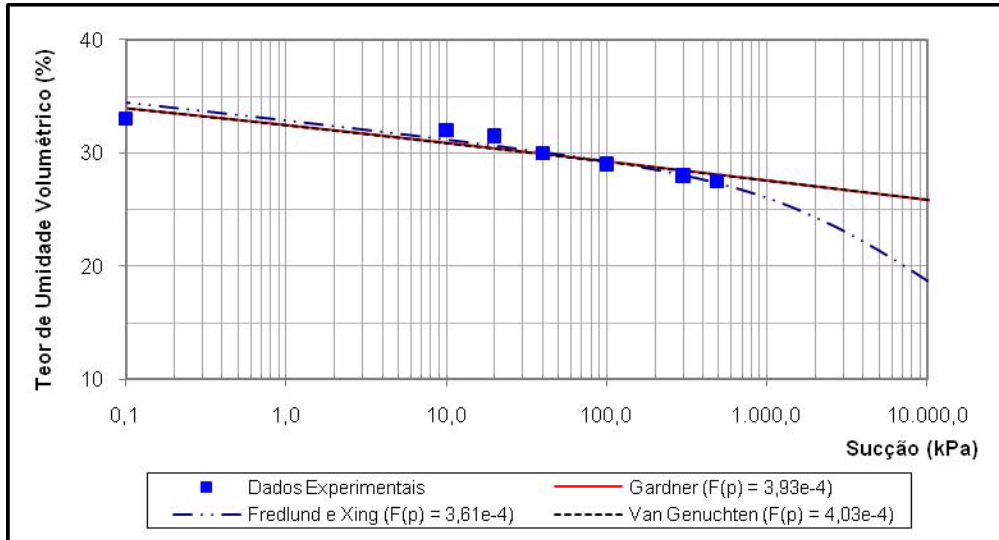


(a) Residual Maduro

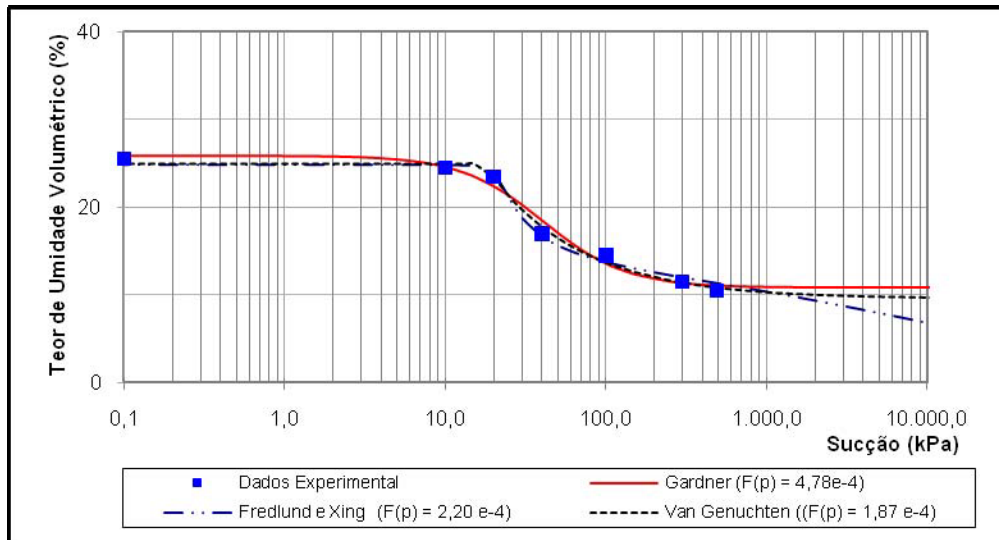


(b) Residual Jovem

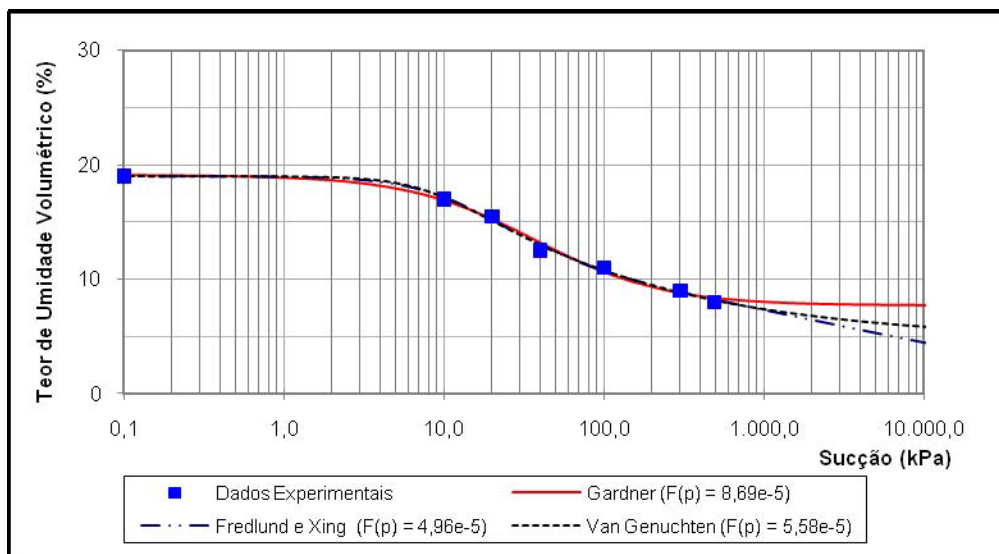
Figura D. 1 – Modelagem da Curva Característica – Viçosa



(a) RM



(b) N1



(c) N2

Figura D. 2 – Modelagem da Curva Característica – Joatinga

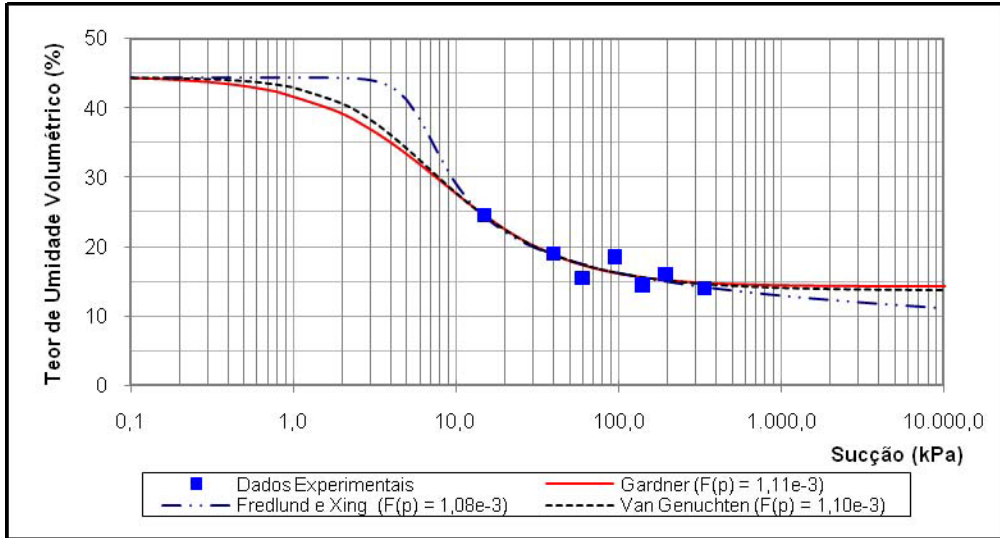
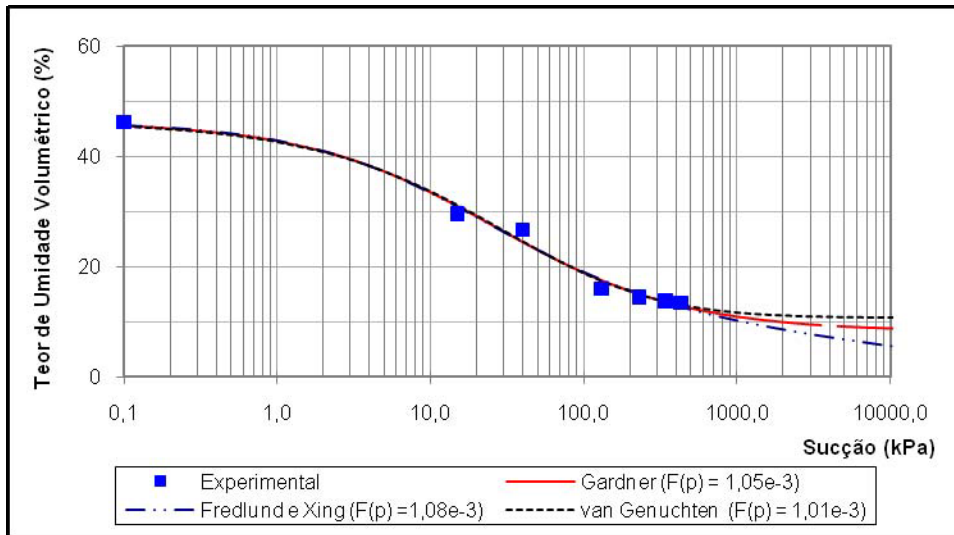
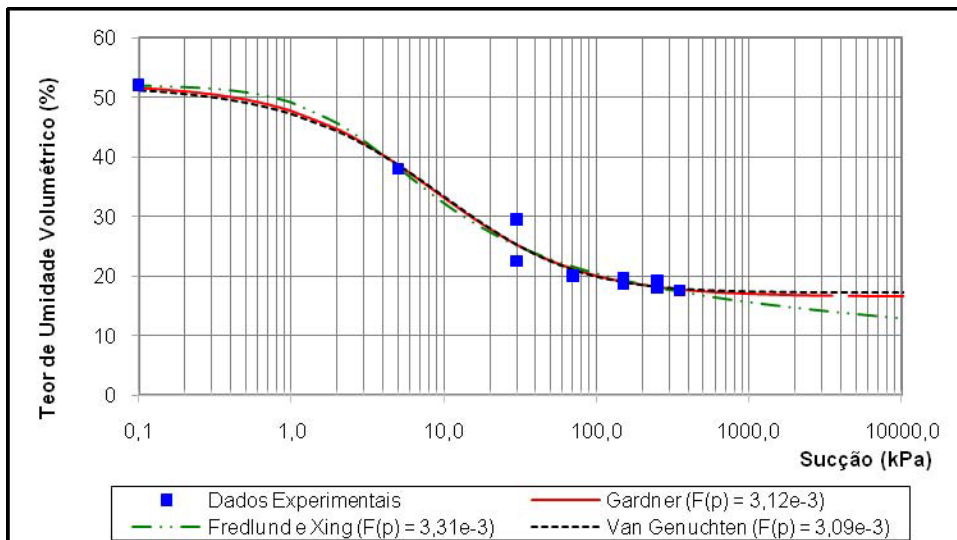


Figura D. 3 – Modelagem da Curva Característica – Chapéu D’Uvas

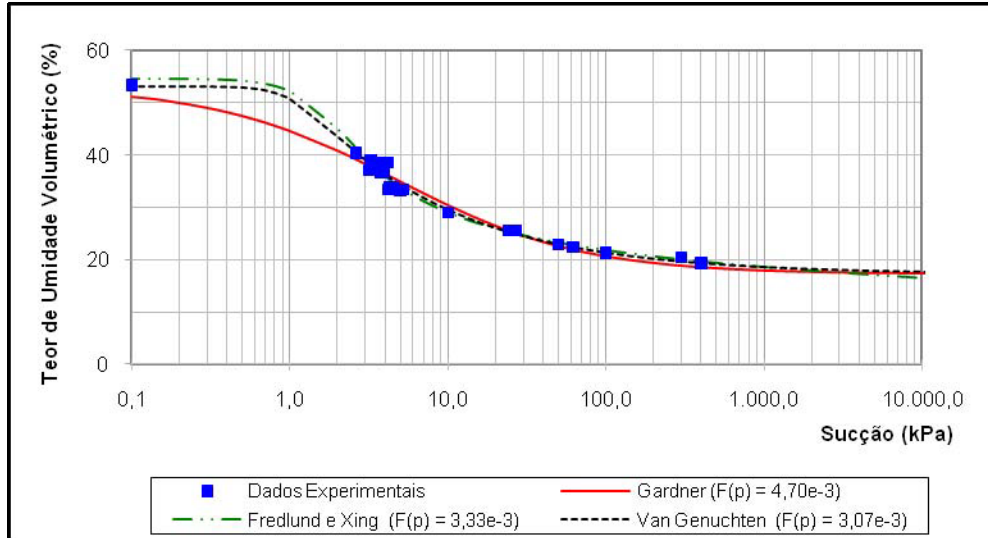


(a) Residual Vermelho

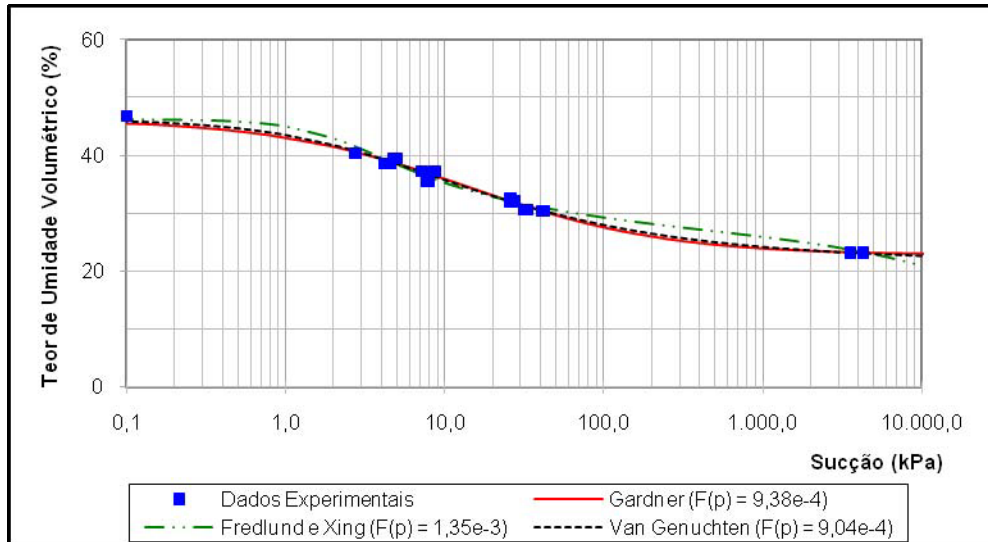


(b) Residual Típico

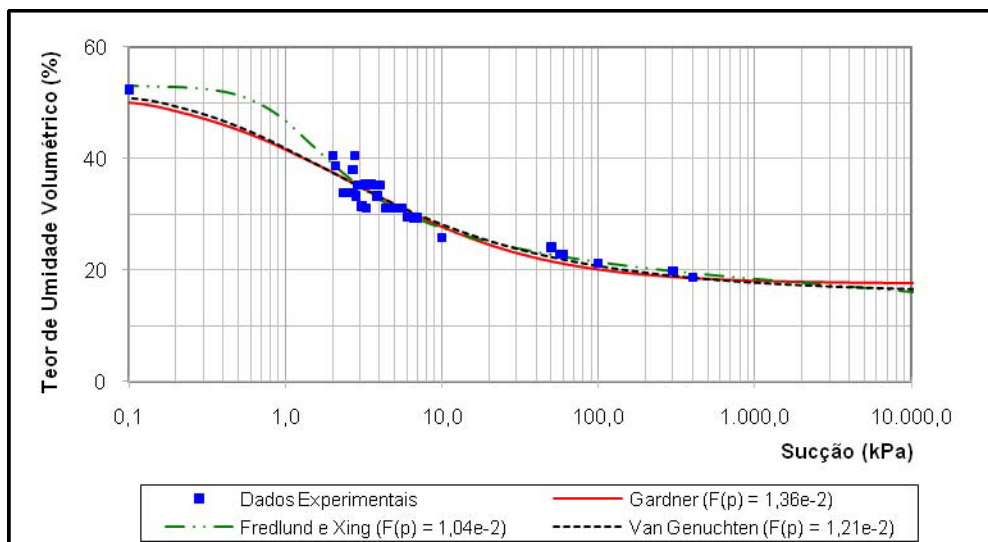
Figura D. 4 – Modelagem da Curva Característica – Vista China.



(a) AI1

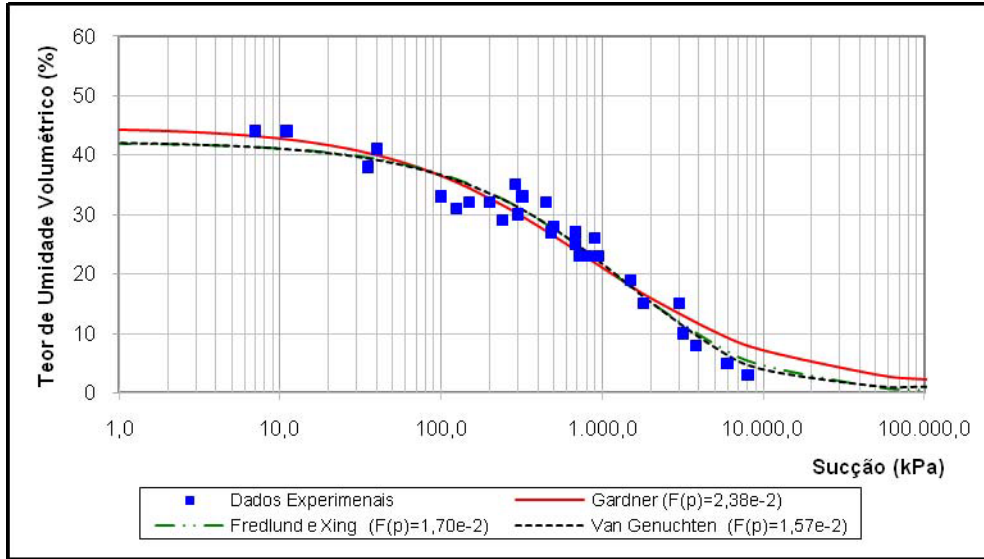


(b) AI2

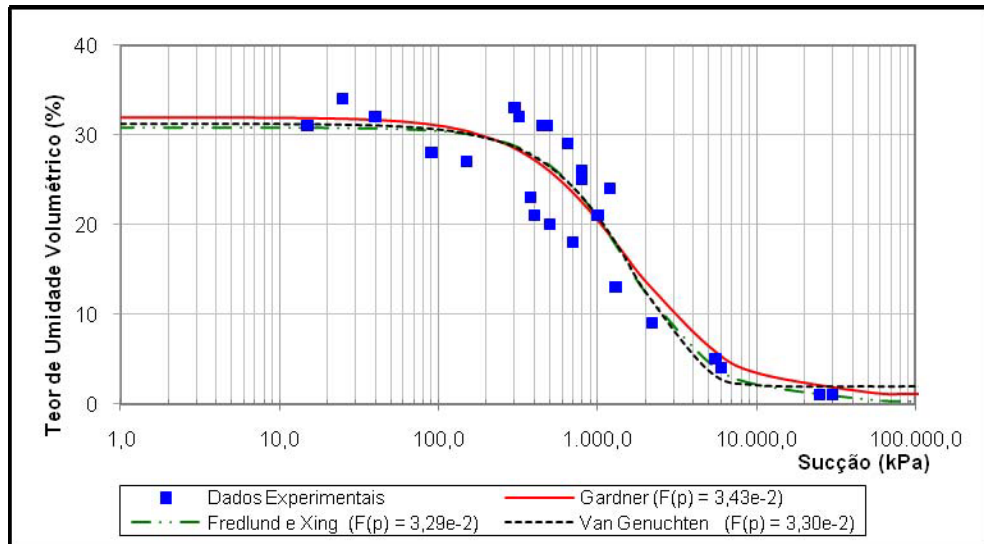


(c) AI3

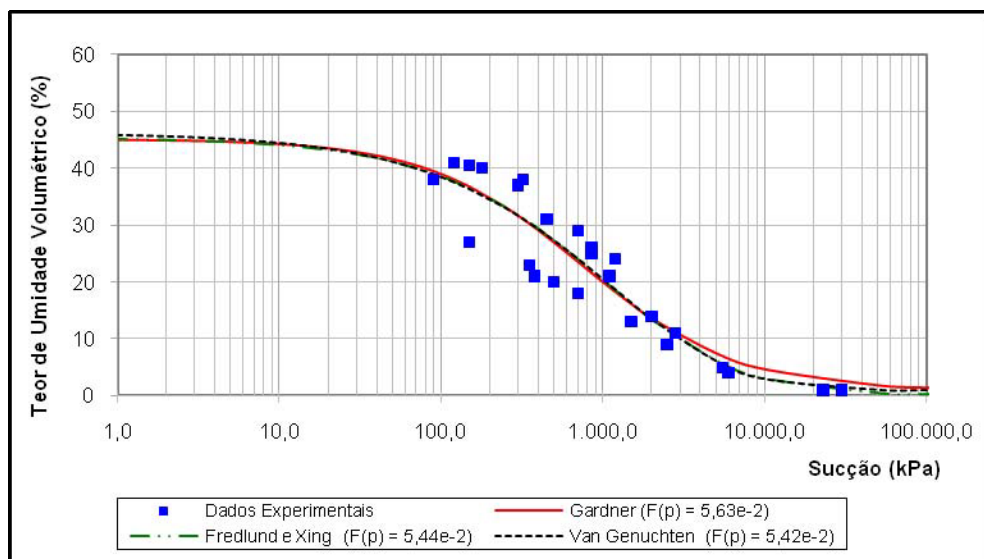
Figura D. 5 – Modelagem da Curva Característica – Rod. Engº Thales L. Peixoto



(a) Prof. = 3,0 m



(b) Prof. = 4,4 m



(c) Prof. = 6,0 m

Figura D. 6 – Modelagem da Curva Característica – USP (Vieira e Marinho, 2001)

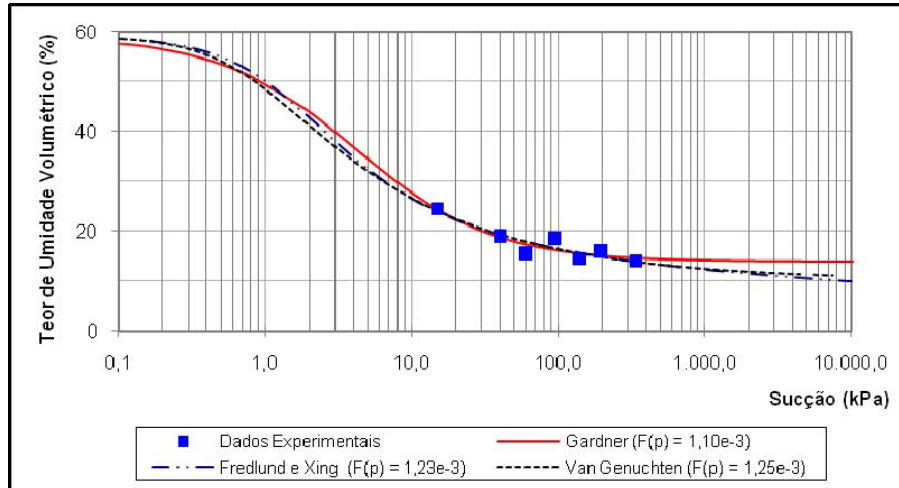


Figura D. 7 – Modelagem da Curva Característica – Lagoa

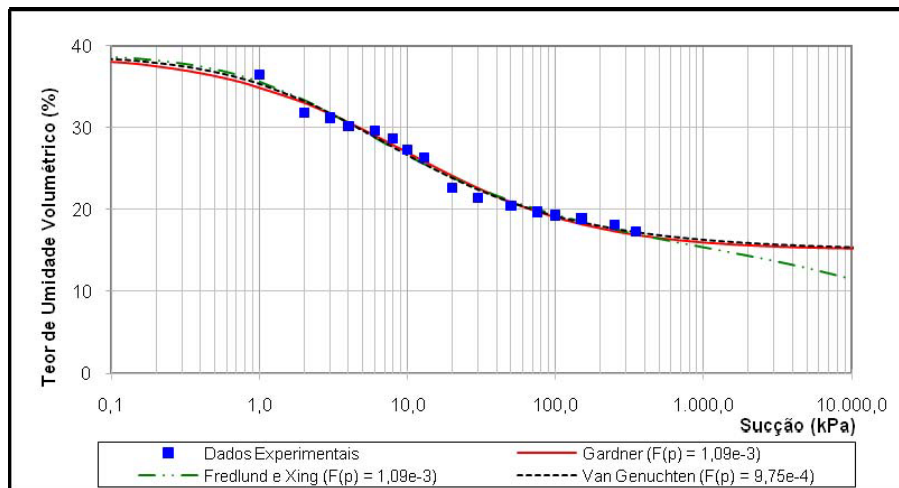


Figura D. 8 – Modelagem da Curva Característica – USP (Machado e Vilar, 1998)

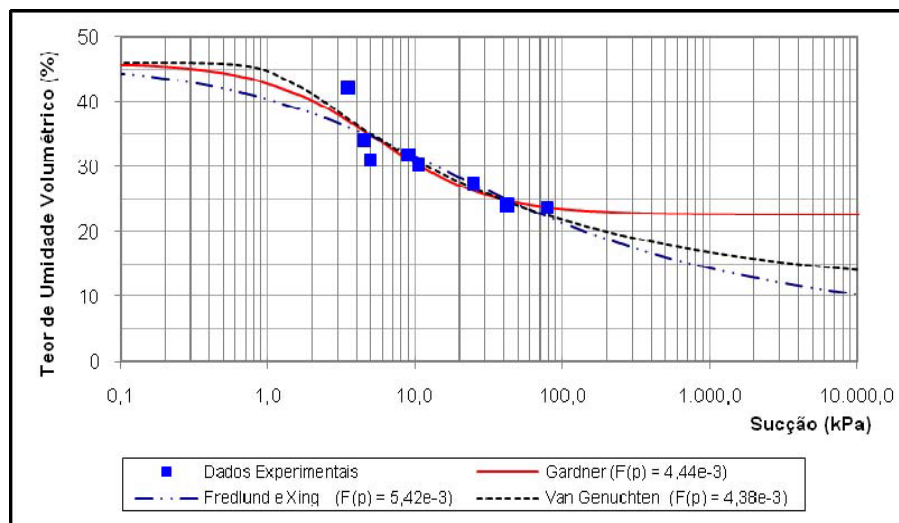


Figura D. 9 – Modelagem da Curva Característica – Escudo Sul-Riograndense.

A Tabela D. 1 apresenta os parâmetros obtidos em cada ajuste realizado.

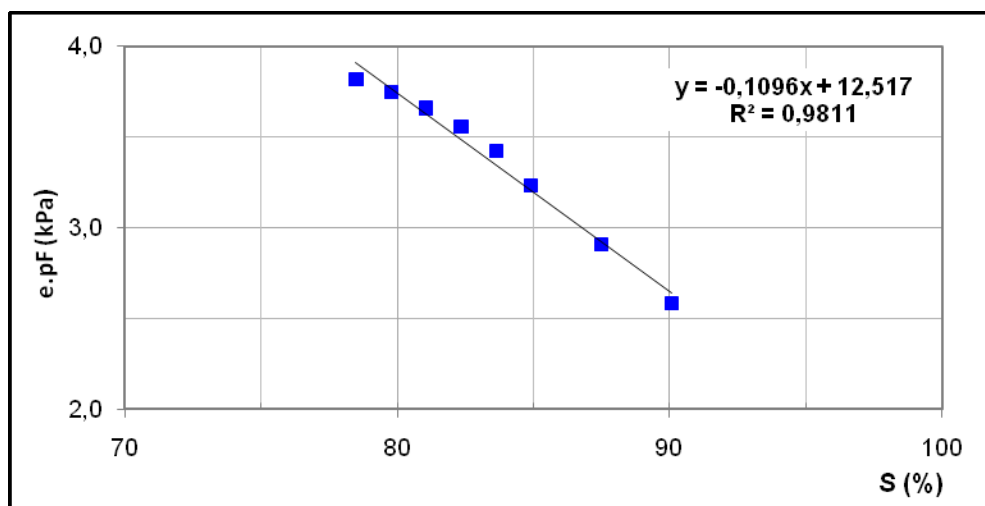
Tabela D. 1 – Parâmetros de Ajuste - Análises de Curvas Características.

Amostra	Gardner			van Genuchten				Fredlund e Xing			
	θ_r	α	η	θ_r	α	η	m	ψ_r	α	η	m
AvG	0,1867	0,2268	0,2529	0,1925	0,0532	0,3080	0,5707	$1,019 \times 10^4$	1,2528	0,3797	0,4307
AvPI	0,0552	0,1862	0,4019	0,1108	0,0774	0,5751	0,6783	$1,000 \times 10^3$	4,2067	0,5985	0,8094
AvPS	0,1867	2,9174	0,2353	0,1752	⁰ 0,170	0,1161	2,7808	$1,000 \times 10^3$	0,0006	2,0598	0,2665
Alto do Bom Viver	0,1220	0,0095	0,9317	0,1170	0,0098	0,9934	0,7676	$1,000 \times 10^8$	44,7039	1,0859	0,7688
Chapéu d'Uvas	0,1422	0,1033	1,0874	0,1365	0,2273	1,5545	0,5168	$1,000 \times 10^7$	5,4029	4,6604	0,3845
Viçosa (SRM)	-	0,0594	0,4204	-	0,0353	0,5738	0,3141	$1,000 \times 10^4$	11,4494	0,5938	0,2646
Viçosa (SRJ)	-	0,0087	0,8562	-	0,0022	0,7965	1,4179	$1,837 \times 10^3$	99,9968	0,9545	1,3179
ALGB	0,0994	0,3742	0,3529	0,0546	1,7419	0,7710	0,2261	$1,638 \times 10^4$	1,7840	0,3156	1,1623
ALBC	0,1336	0,4490	0,4101	0,1036	2,5281	1,9693	0,1071	$2,092 \times 10^4$	1,1739	1,6108	0,3933
Escudo Sul-Riograndense	0,2270	0,1565	1,1041	0,1089	0,8250	3,0862	0,0858	$9,981 \times 10^6$	4,1942	0,5866	0,9692
Lagoa	0,1390	0,2643	0,9330	0,0997	1,3163	1,6005	0,2628	$9,857 \times 10^6$	1,1350	1,3964	0,6977
Joatinga - N1	0,1083	0,0020	1,6770	0,0961	0,0586	26,409	0,0283	$1,000 \times 10^3$	20,6385	9,8914	0,2106
Joatinga - N2	0,0765	0,0204	1,0762	0,0460	0,1170	2,2027	0,1562	$1,000 \times 10^3$	11,0122	1,7029	0,4171
Joatinga - RM	0,0655	0,4971	0,0769	0,0166	0,7918	0,0858	0,5117	$2,256 \times 10^3$	0,6375	0,0899	1,1417

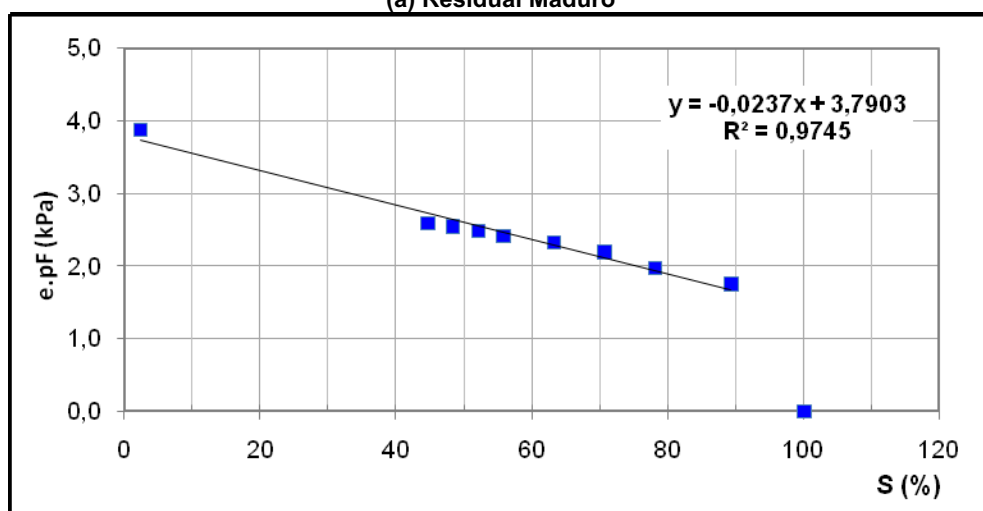
Tabela D.1 (cont) – Parâmetros de Ajuste - Análises de Curvas Características.

Amostra	Gardner			van Genuchten			Fredlund e Xing				
	θ_r	α	η	θ_r	α	η	m	ψ_r	α	η	m
Vista Chinesa Residual Vermelho	0,0821	0,1002	0,7051	0,1064	0,0095	0,6378	2,1959	$1,000 \times 10^4$	9,9156	0,7331	1,1971
Vista Chinesa Residual Típico	0,1657	0,1435	0,9034	0,1725	0,0532	0,8007	1,6331	$9,999 \times 10^6$	2,3039	1,3883	0,5665
USP	-	0,2073	0,6908	-	0,2706	0,8751	0,5916	-	1,5841	0,9997	0,4866
USP (1,6m)	0,0100	0,1349	0,3359	0,0100	1,1841	2,8239	0,0523	$1,000 \times 10^4$	22,926	0,3498	1,3718
USP (3,0m)	0,0100	0,0088	0,7069	0,0100	0,0001	0,6978	3,9395	$2,749 \times 10^3$	$1,47 \times 10^3$	0,7606	2,8482
USP (4,4m)	0,0100	0,0001	1,2845	0,0193	0,0002	1,3150	5,1208	$1,000 \times 10^4$	$1,35 \times 10^3$	1,6336	2,0560
USP (6,0m)	0,0100	0,0024	0,9128	0,0100	0,0001	0,6788	4,8004	$1,106 \times 10^4$	$1,94 \times 10^3$	0,7560	4,2760
A11	-	0,3101	0,7457	-	0,9512	3,9314	0,1212	-	1,3905	2,8492	0,3649
A12	-	0,1587	0,6956	-	0,2765	0,9097	0,4440	-	1,7469	1,8158	0,2293
A13	-	0,4931	0,5482	-	2,2610	4,7645	0,0701	-	0,8708	2,3727	0,3727

APÊNDICE E – RESULTADOS DA TRANSFORMAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

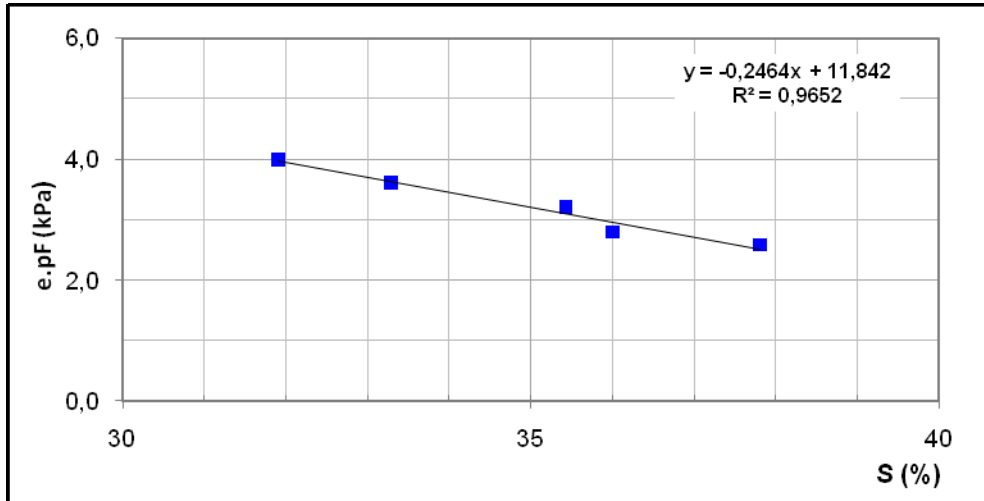


(a) Residual Maduro

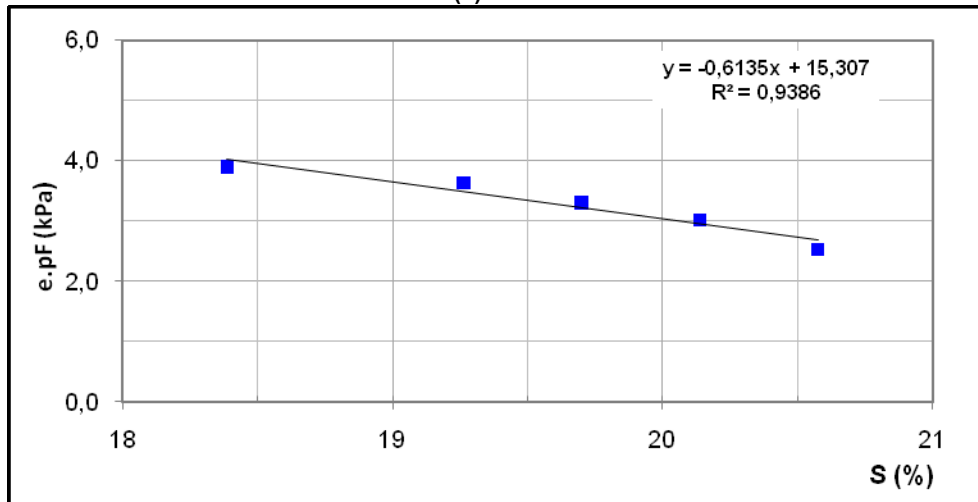


(b) Residual Jovem

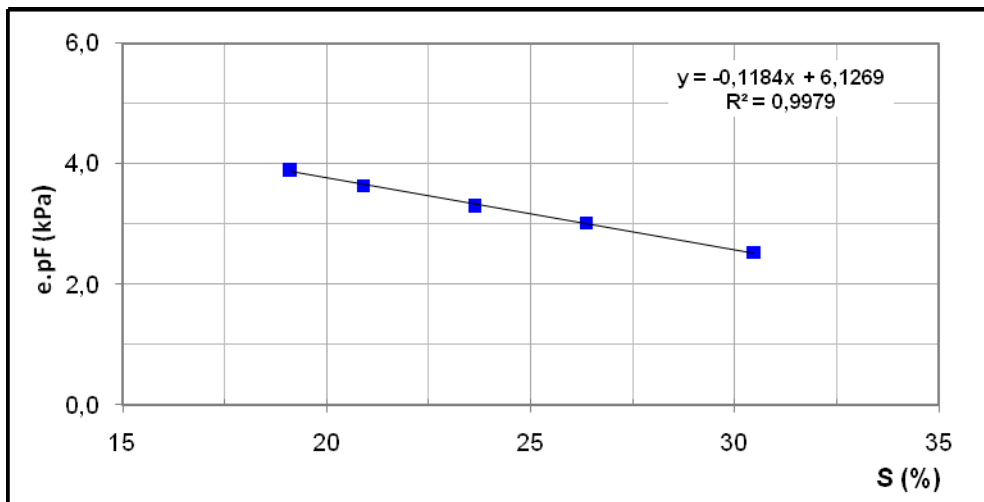
Figura E.1– Transformação da Curva Característica – Viçosa



(a) AvG



(b) AvPS



(c) AvPI

Figura E.2 – Transformação da Curva Característica – Salvador

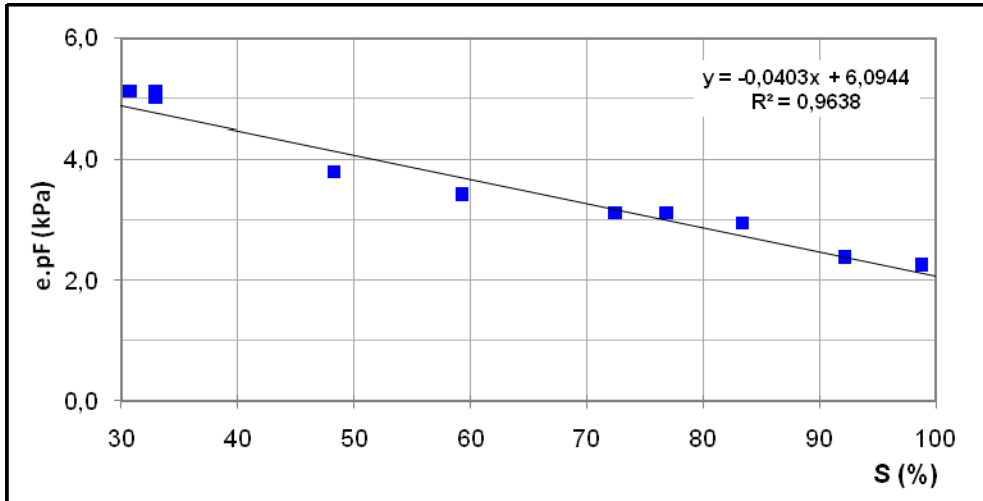
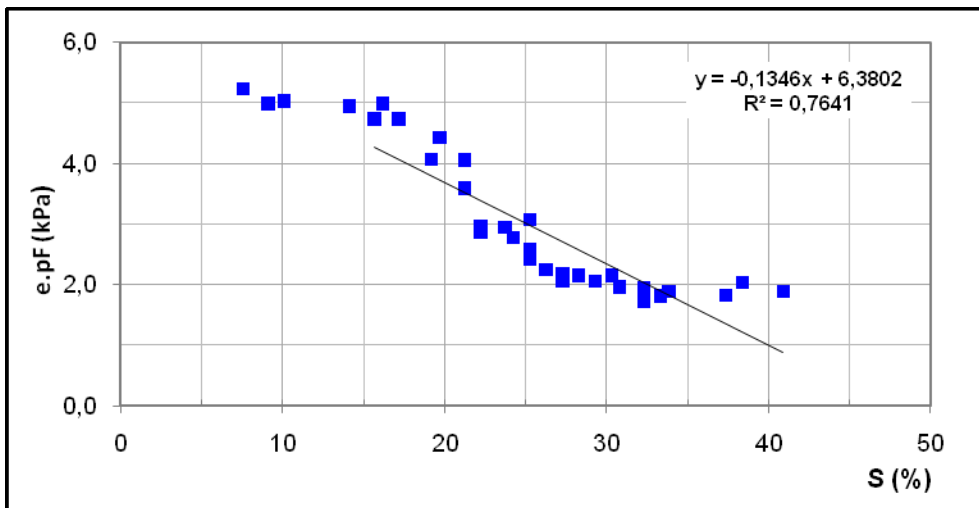
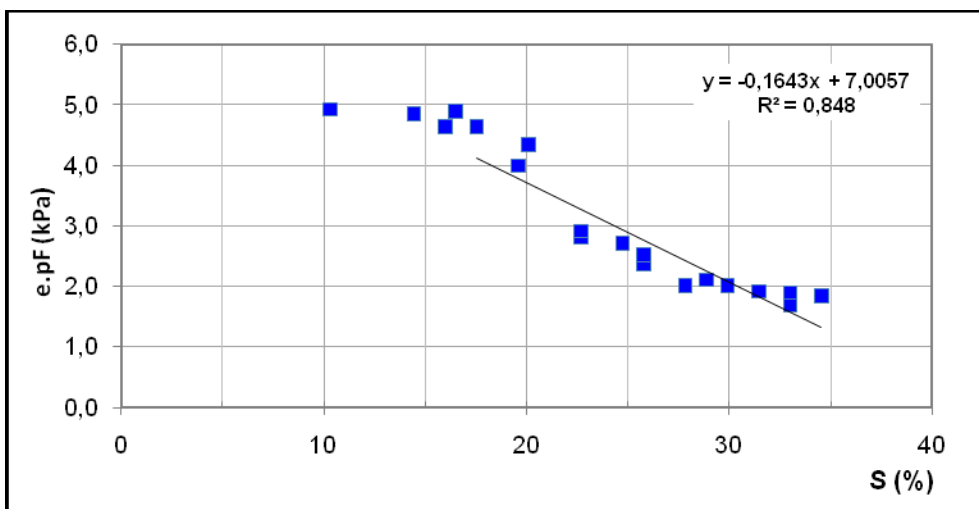


Figura E.3 – Transformação da Curva Característica – Alto do Bom Viver.

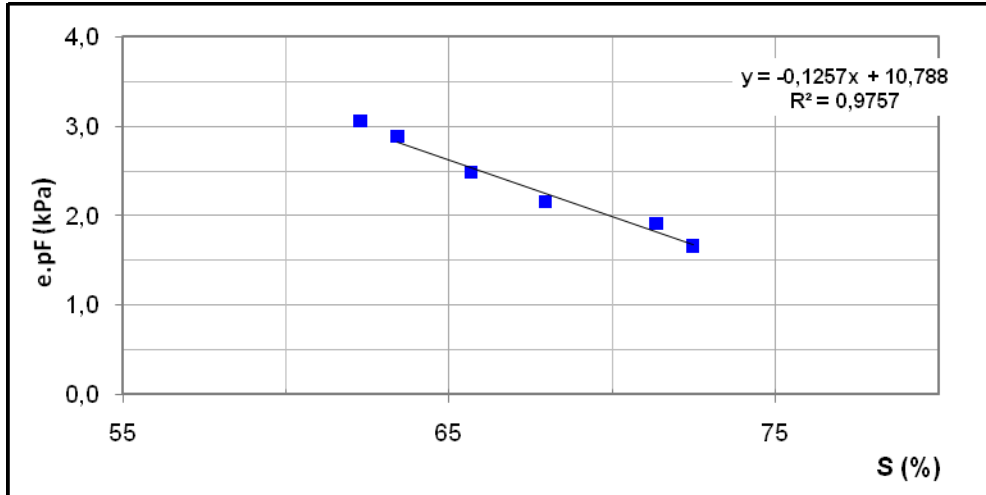


(a) ALGB

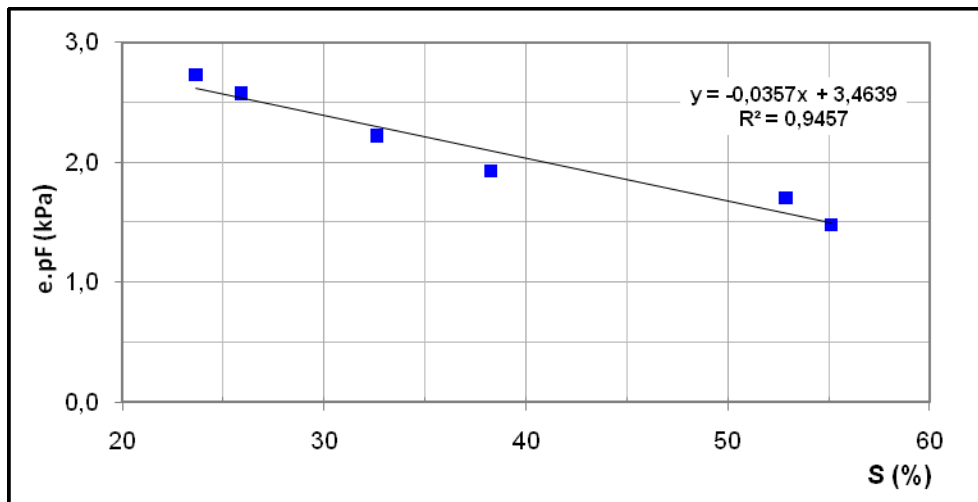


(b) ALGC

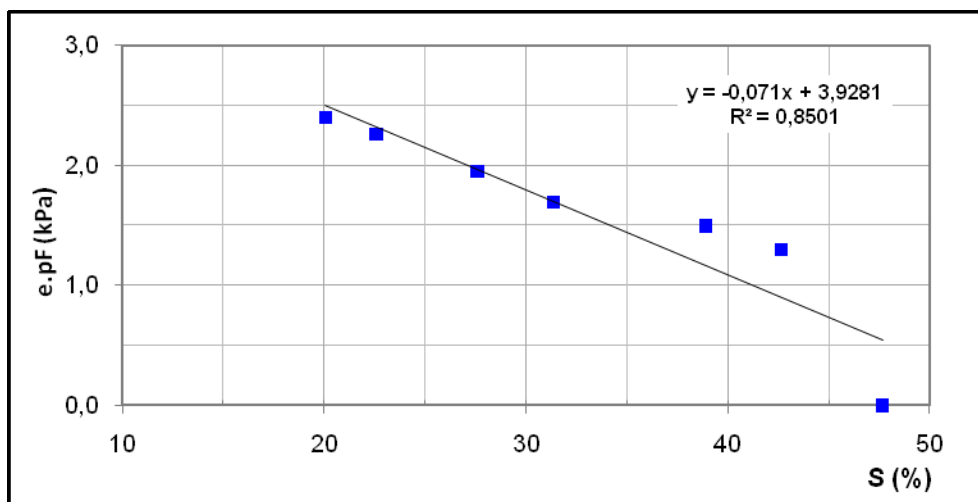
Figura E.4 – Transformação da Curva Característica – Alvorada



(a) RM



(b) N1



(c) N2

Figura E.5 – Transformação da Curva Característica – Joatinga

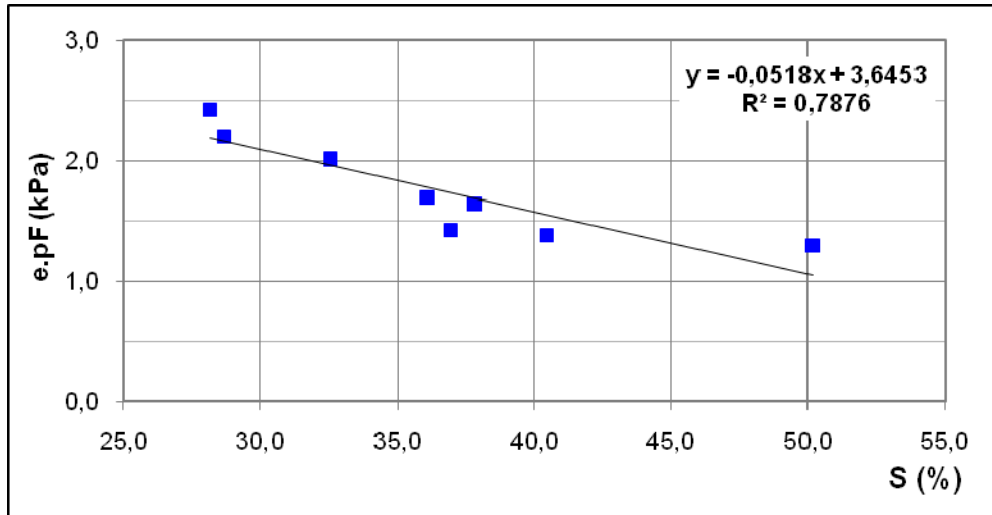
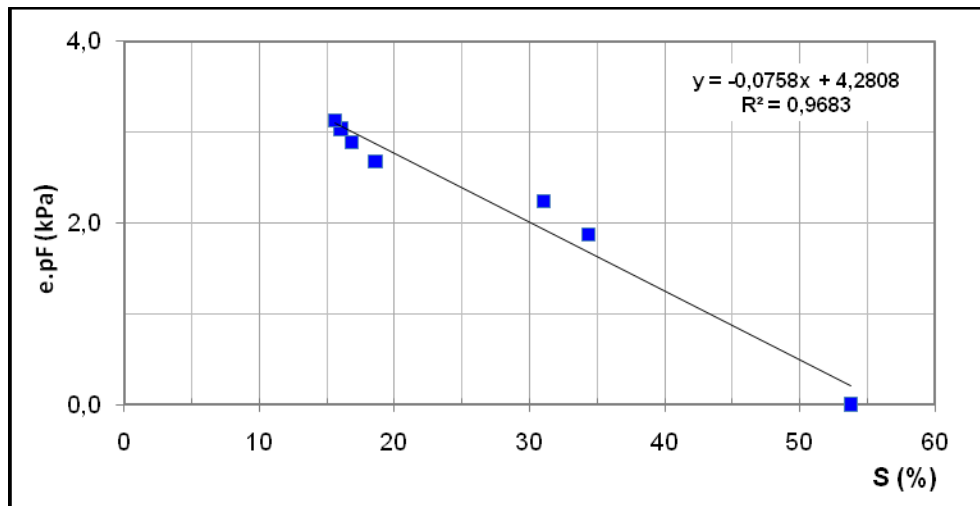
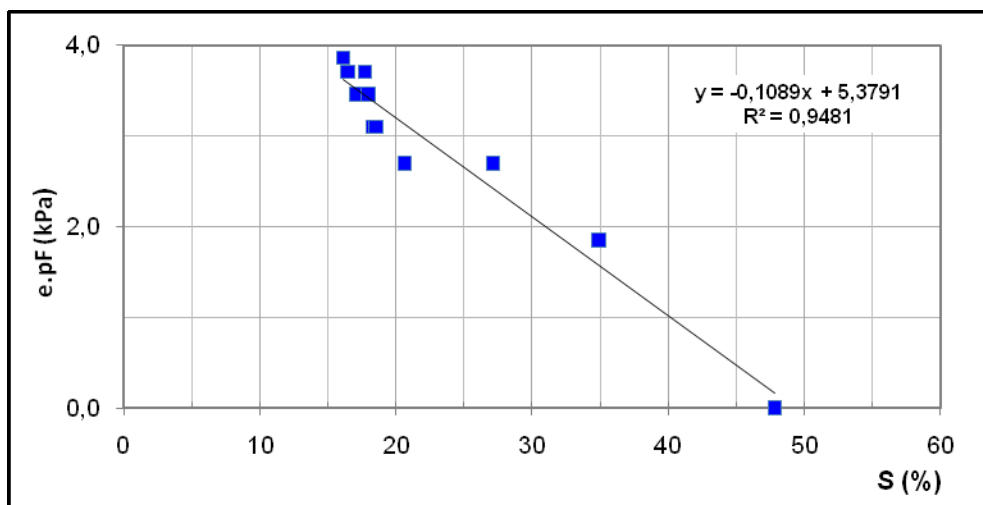


Figura E.6 – Transformação da Curva Característica – Escudo Sul-Riograndense.

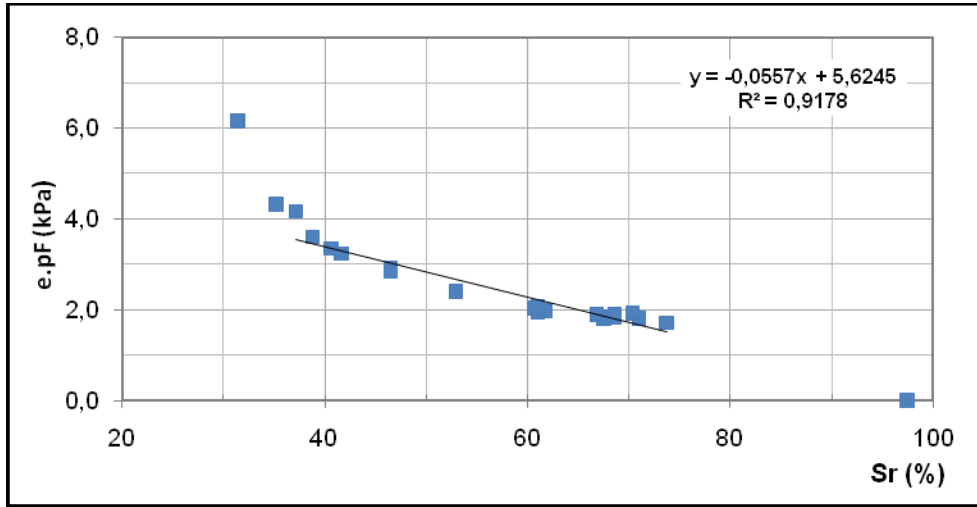


(a) Residual Vermelho

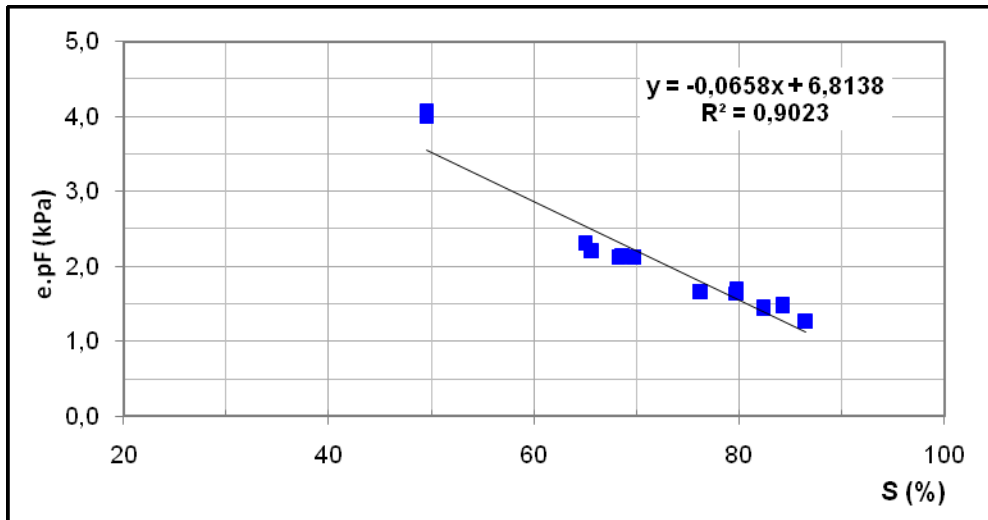


(b) Residual Típico

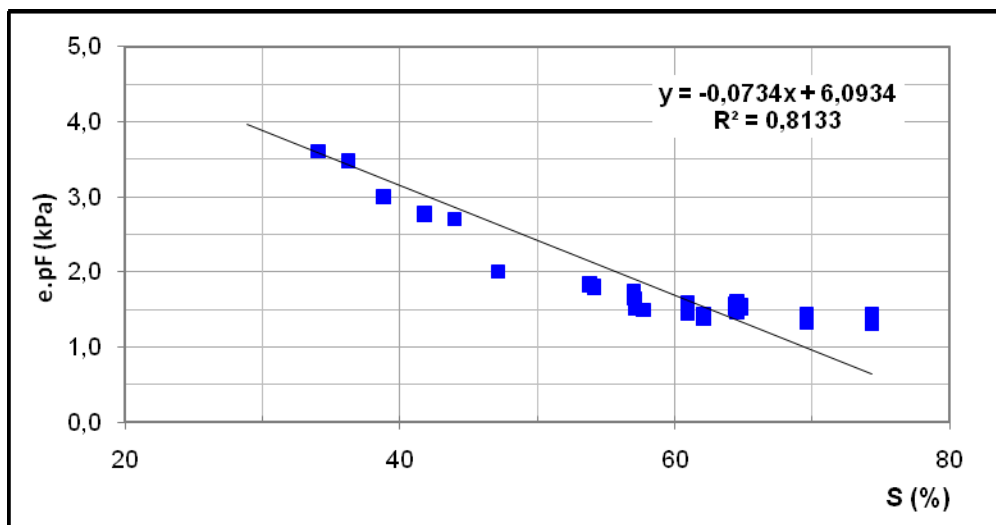
Figura E.7 – Transformação da Curva Característica – Vista Chinesa.



(a) AI1



(b) AI2



(c) AI3

Figura E.8 – Transformação da Curva Característica– Rod. Engº Thales L. Peixoto

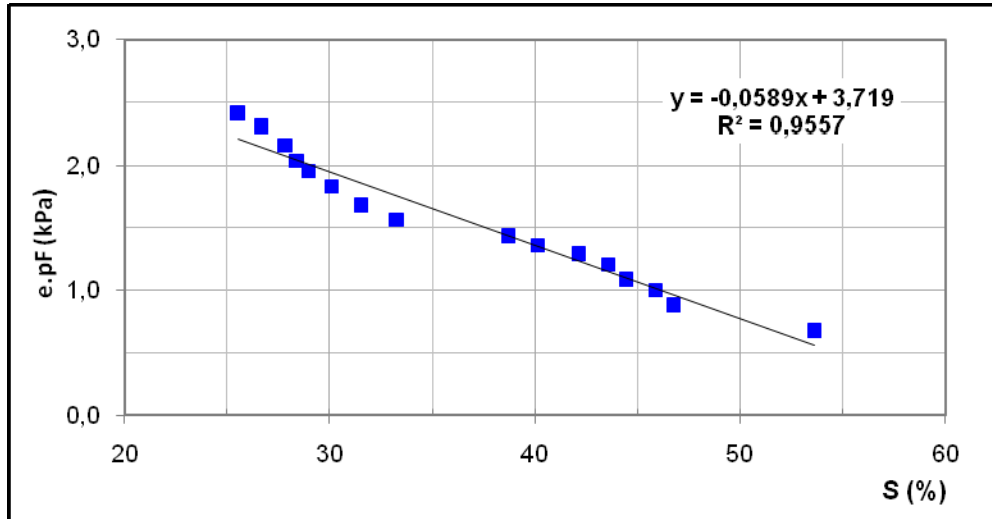


Figura E.9 – Transformação da Curva Característica – USP (Machado e Vilar, 1998)

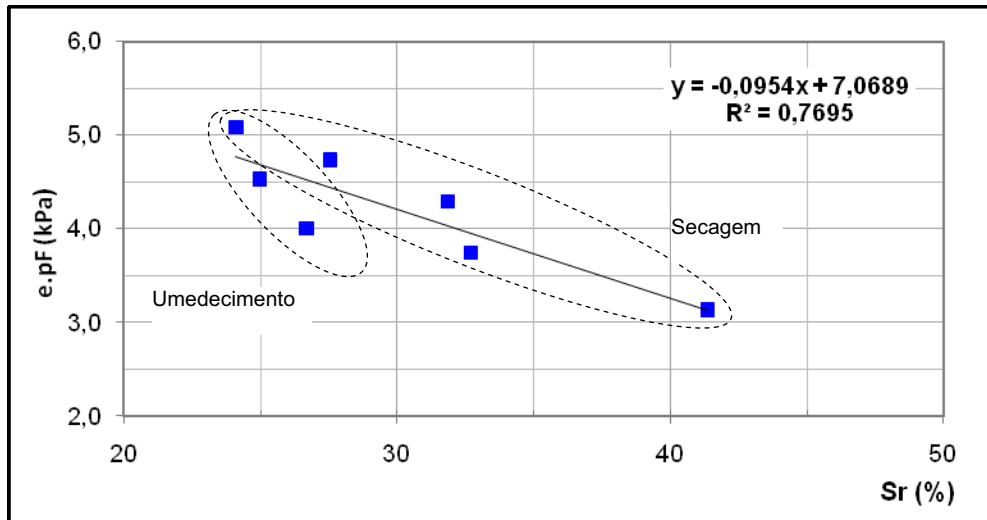
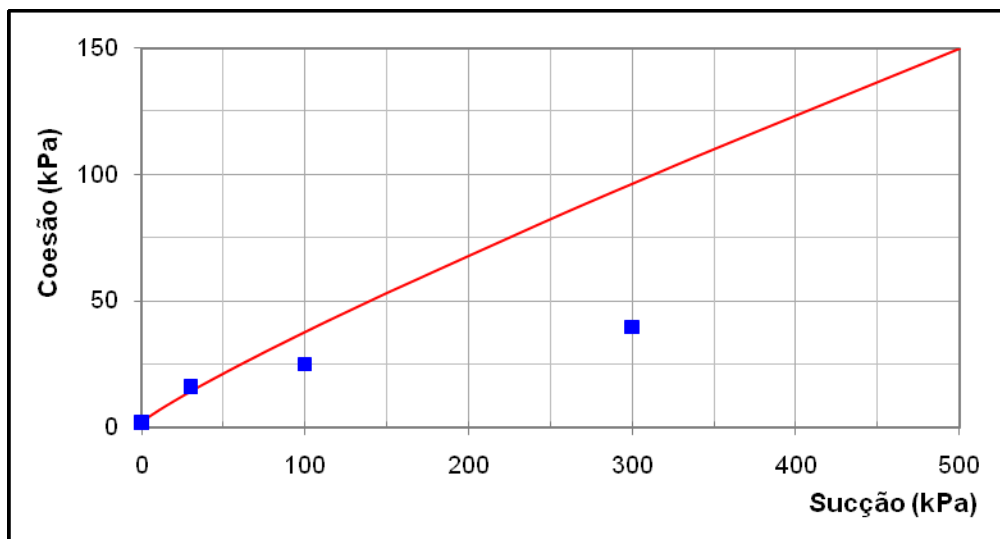


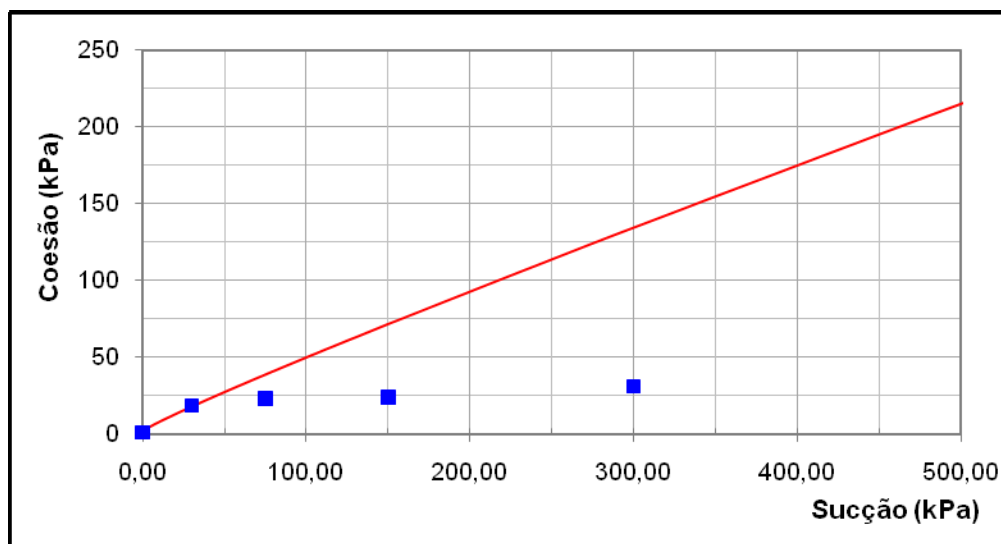
Figura E.10 – Transformação da Curva Característica – Lagoa

APÊNDICE F – RESULTADOS DA MODELAGEM DA CONTRIBUIÇÃO DA SUCÇÃO NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

F.1 Öberg e Sällfors (1995, 1997)



(a) ALGB



(b) ALGC

Figura F.1 – Proposta de Öberg e Sällfors (1995,1997) – Alvorada

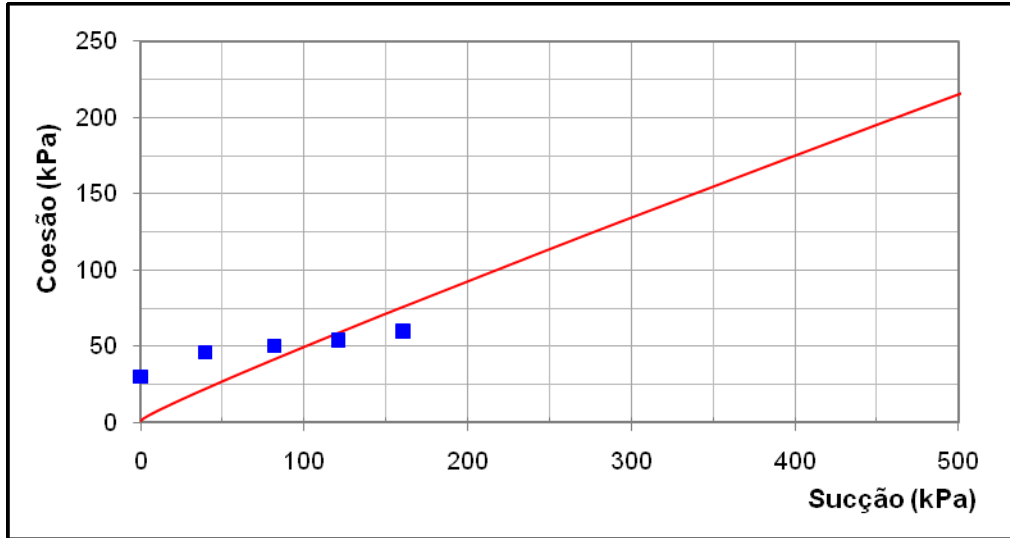
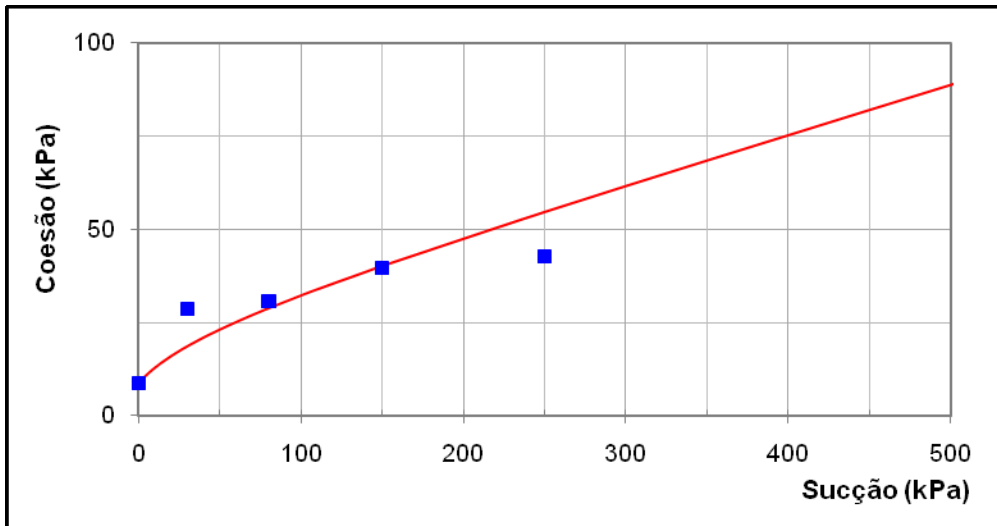
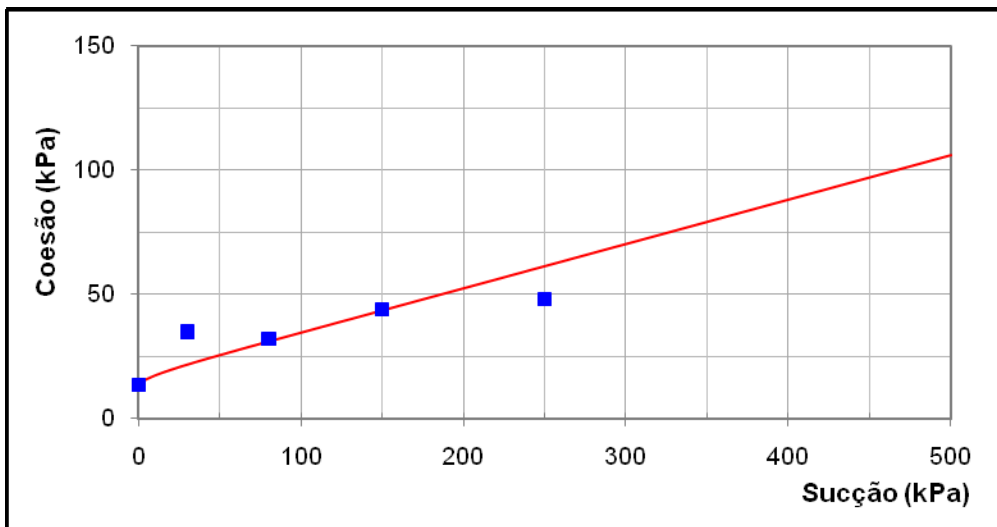


Figura F.2 – Proposta de Öberg e Sällfors (1995,1997) – USP (Machado e Vilar, 1998)



(a) Residual Vermelho



(b) Residual Típico

Figura F.3 – Proposta de Öberg e Sällfors (1995,1997) – Vista Chinesa

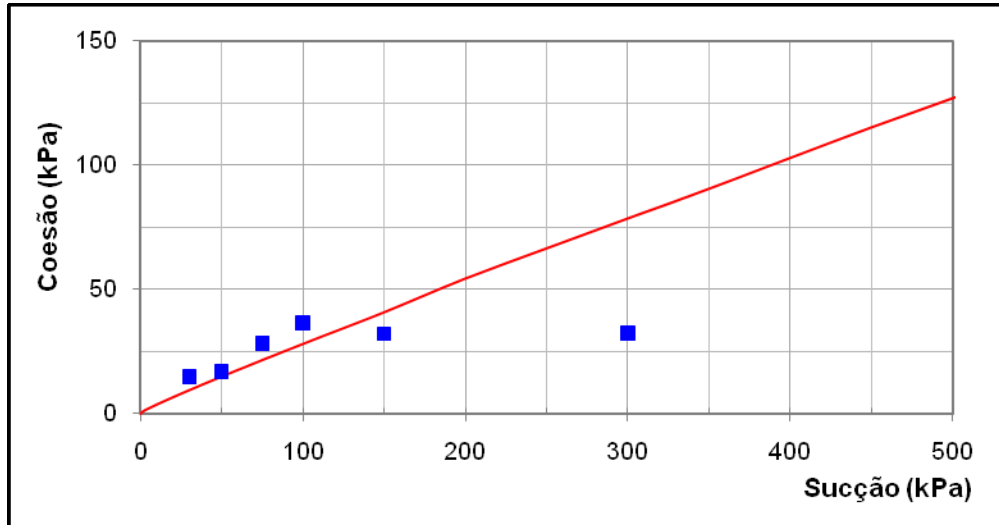


Figura F.4 – Proposta de Öberg e Sällfors (1995,1997) – AI1

F.2 Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996)

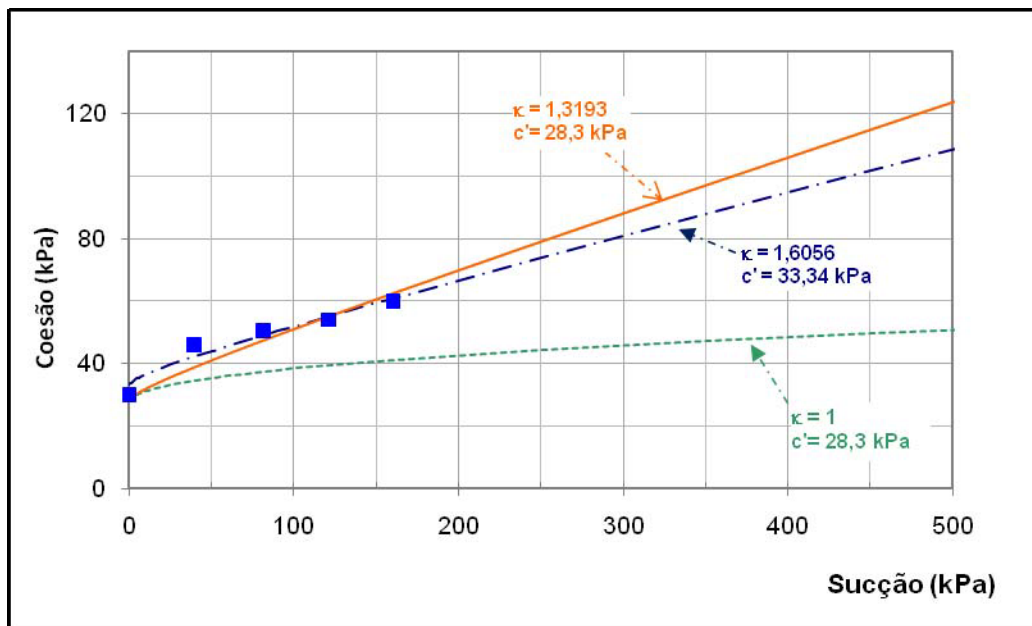
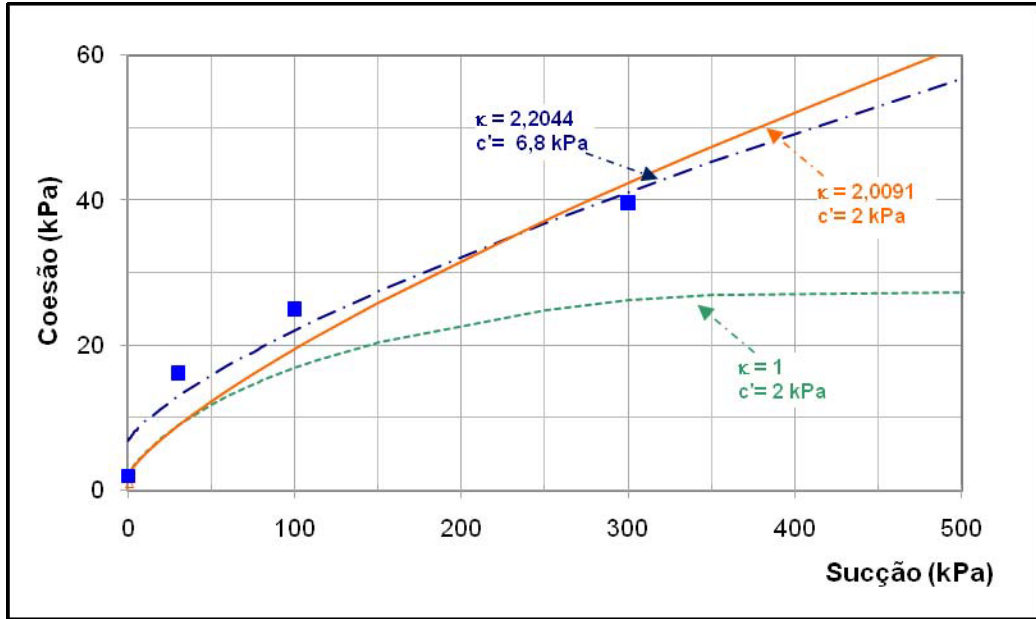
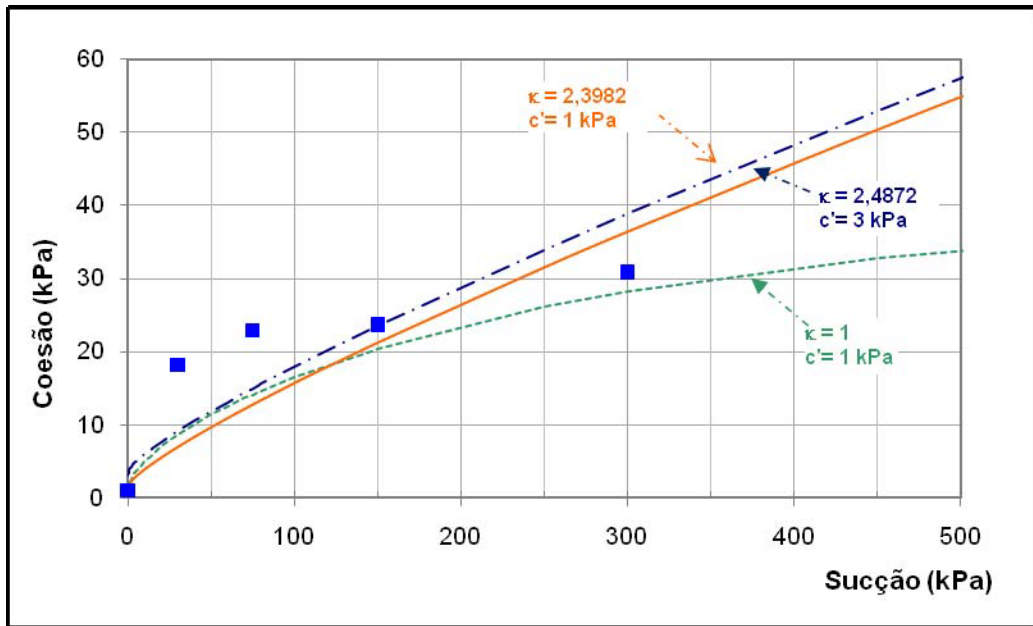


Figura F.5 – Proposta de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996) – USP

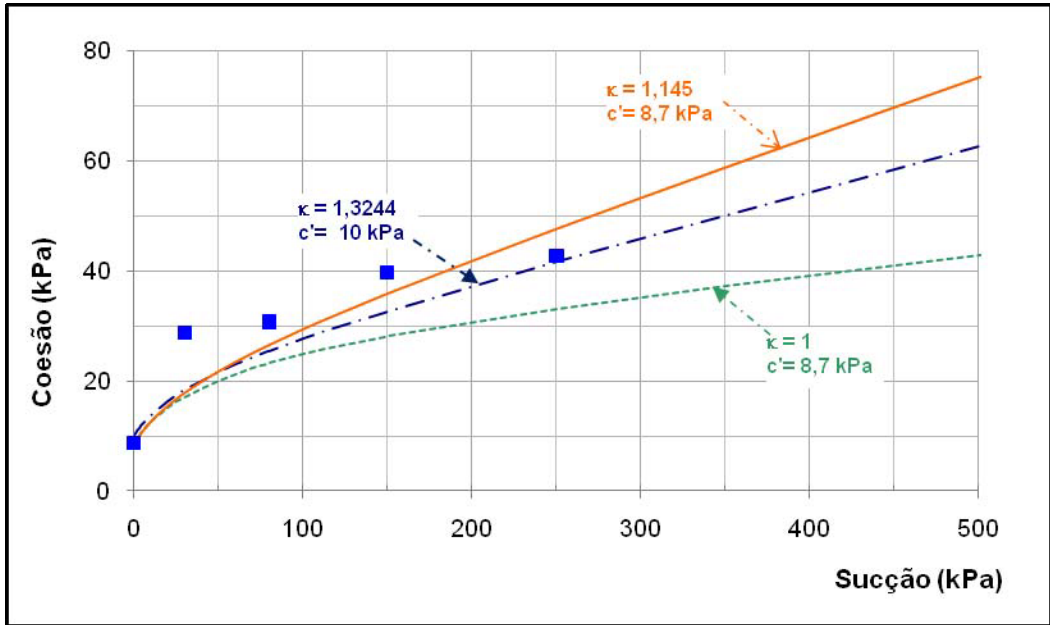


(a) ALGB

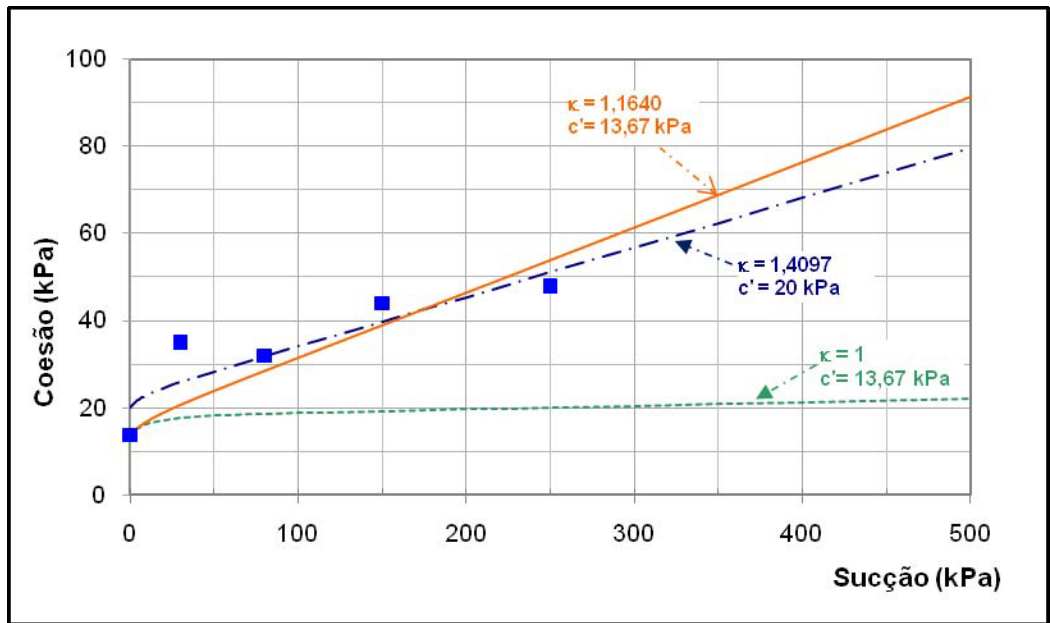


(b) ALGC

Figura F.6 – Proposta de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996) – Alvorada



(a) Residual Vermelho



(b) Residual Típico

Figura F.7 – Proposta de Vanapalli et al (1996) – Vista China

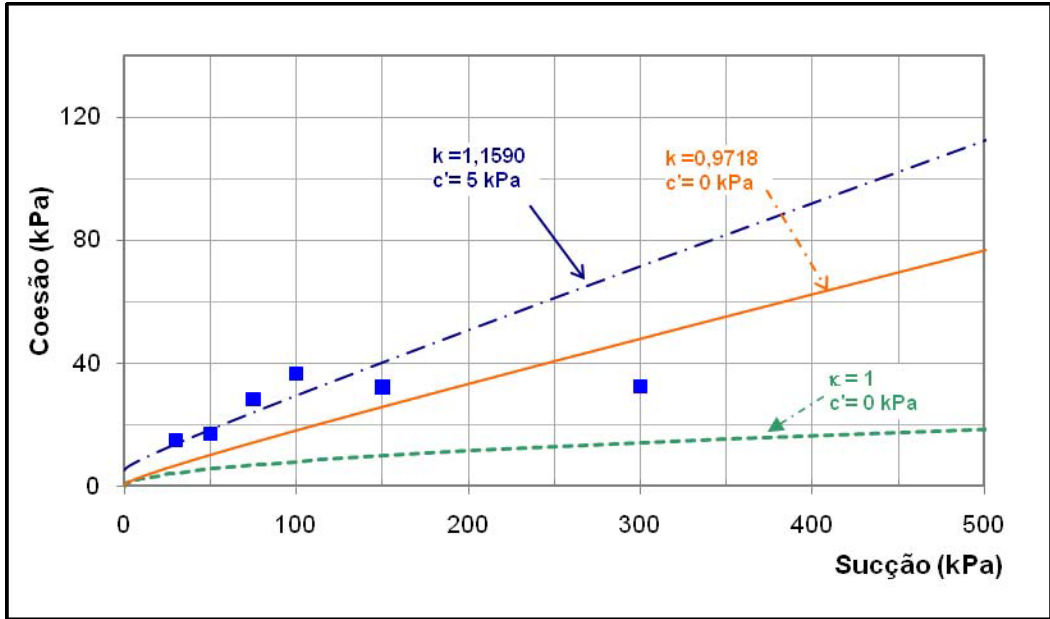


Figura F.8 – Proposta de Fredlund et al (1996) e Vanapalli et al (1996)– AI1

F.3 Futai e Colaboradores

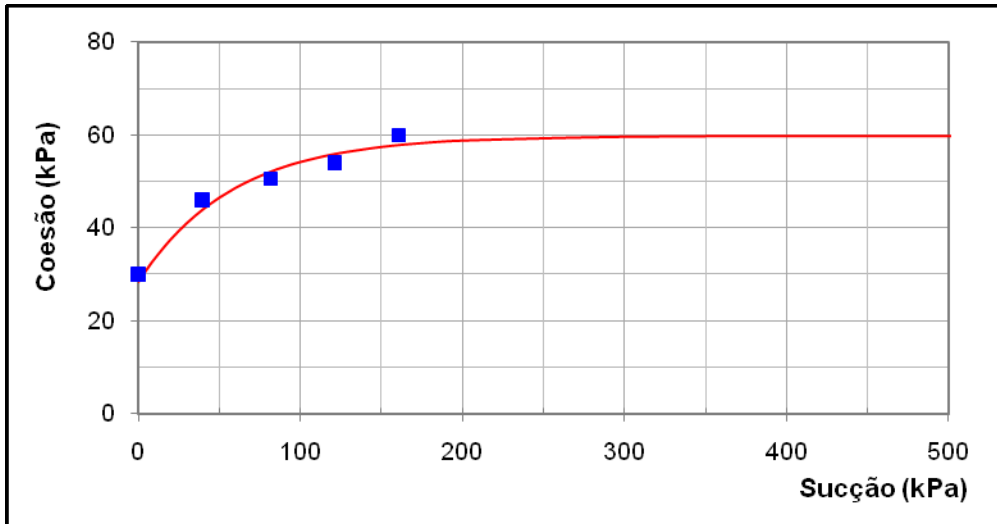
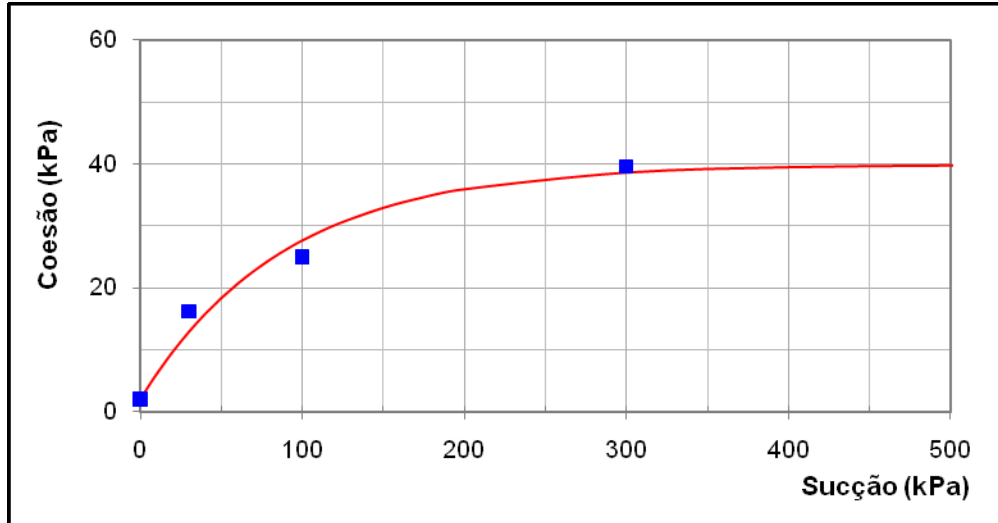
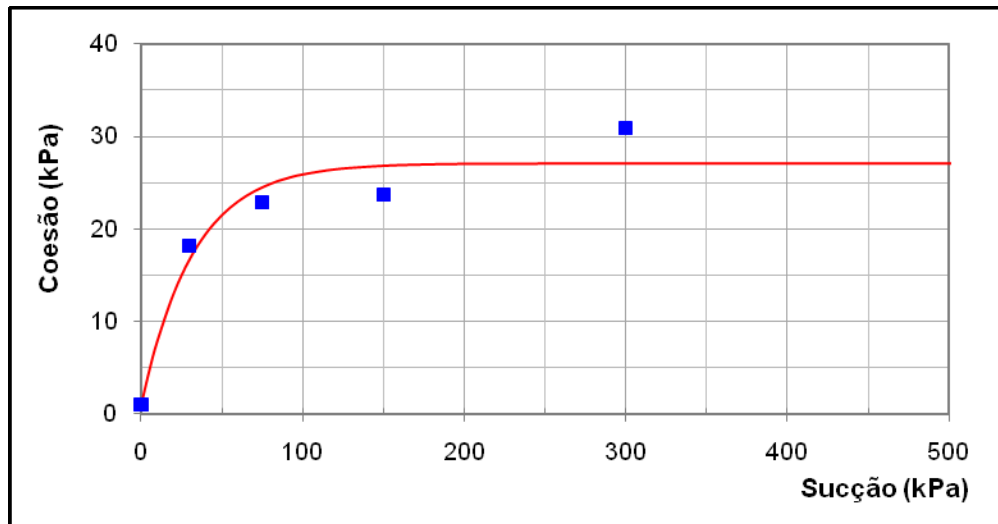


Figura F.9 – Proposta de Futai e Colaboradores – USP



(a) ALGB



(b) ALGC

Figura F.10 – Proposta de Futai e Colaboradores – Alvorada

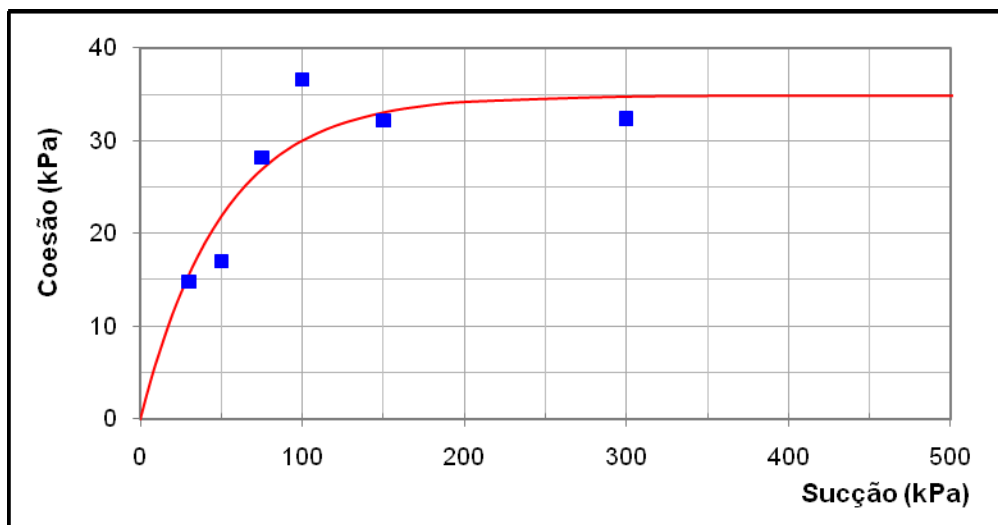
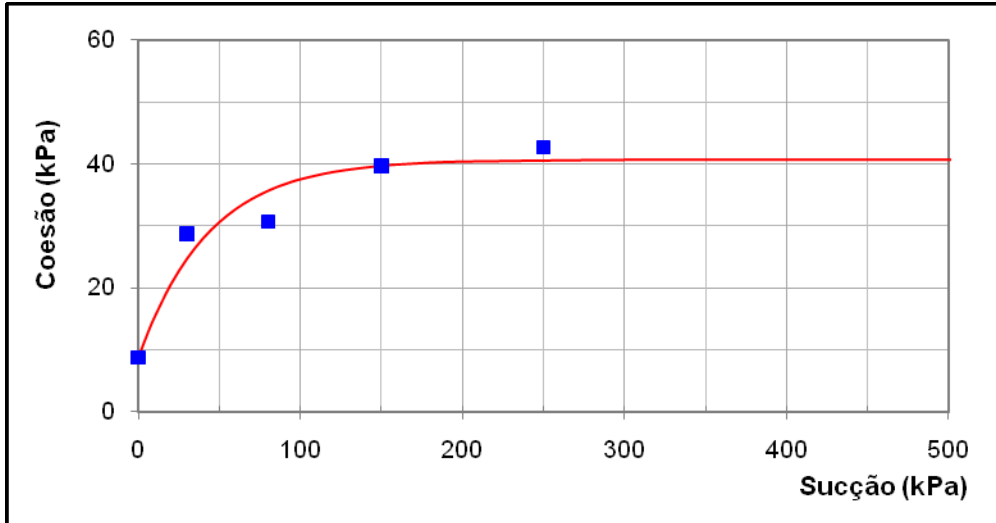
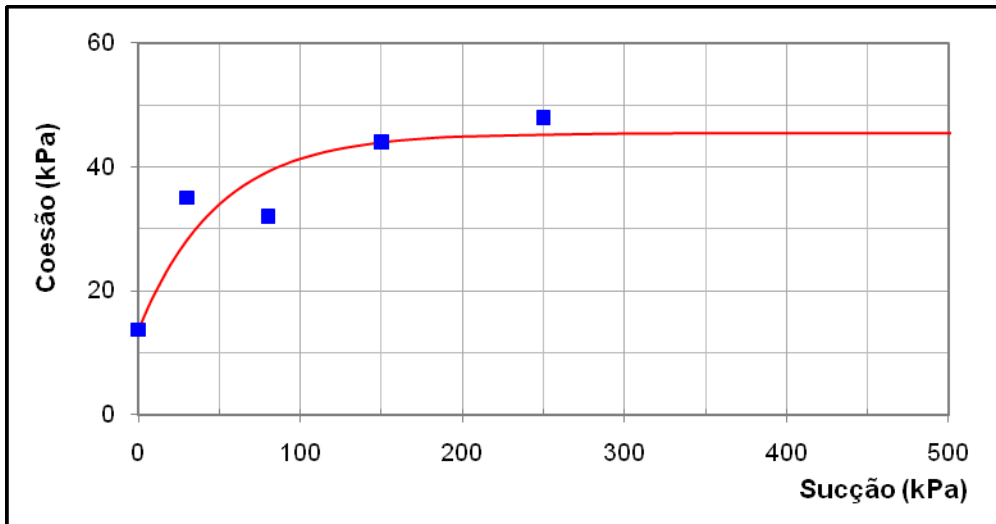


Figura F.11 – Proposta de Futai e Colaboradores – Al1



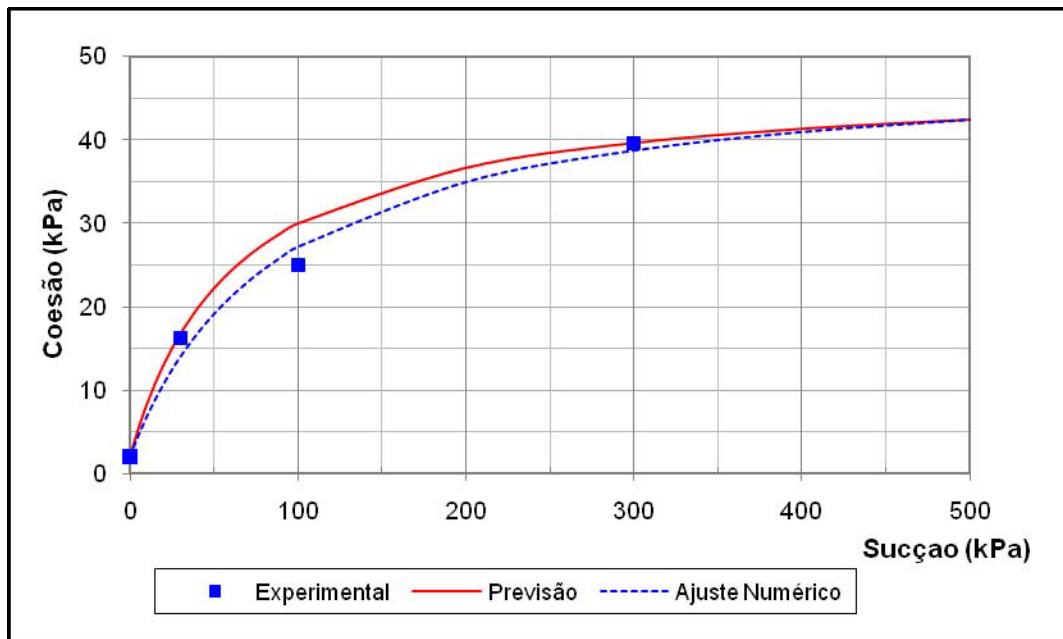
(a) Residual Vermelho



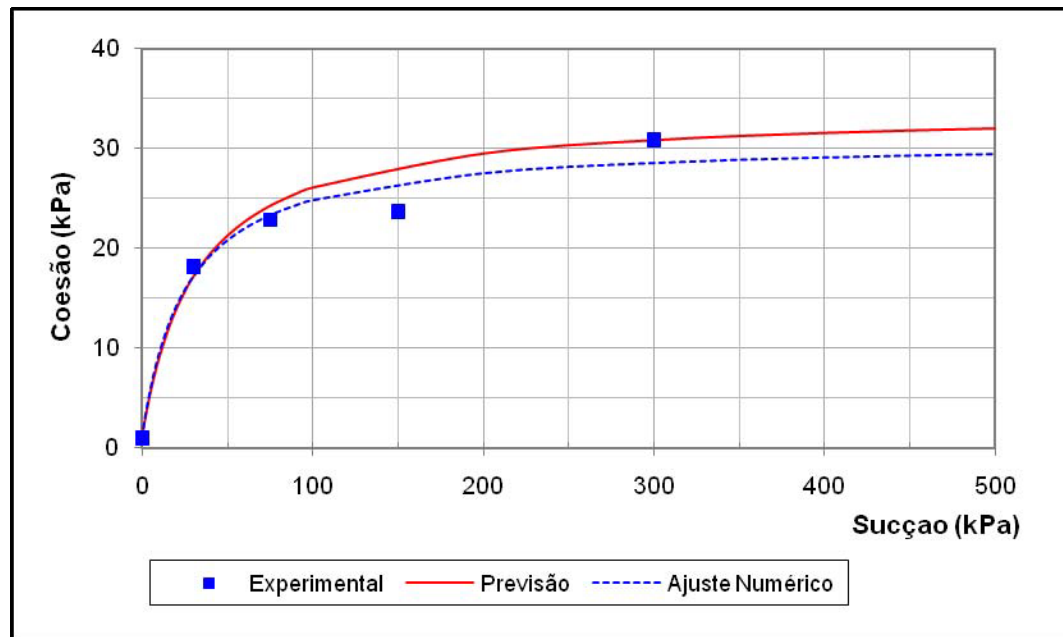
(b) Residual Típico

Figura F.12 – Proposta de Futai e Colaboradores – Vista Chinesa

F.4 Vilar e Colaboradores



(a) ALGB



(b) ALGC

Figura F.13 – Proposta de Vilar e Colaboradores – Alvorada

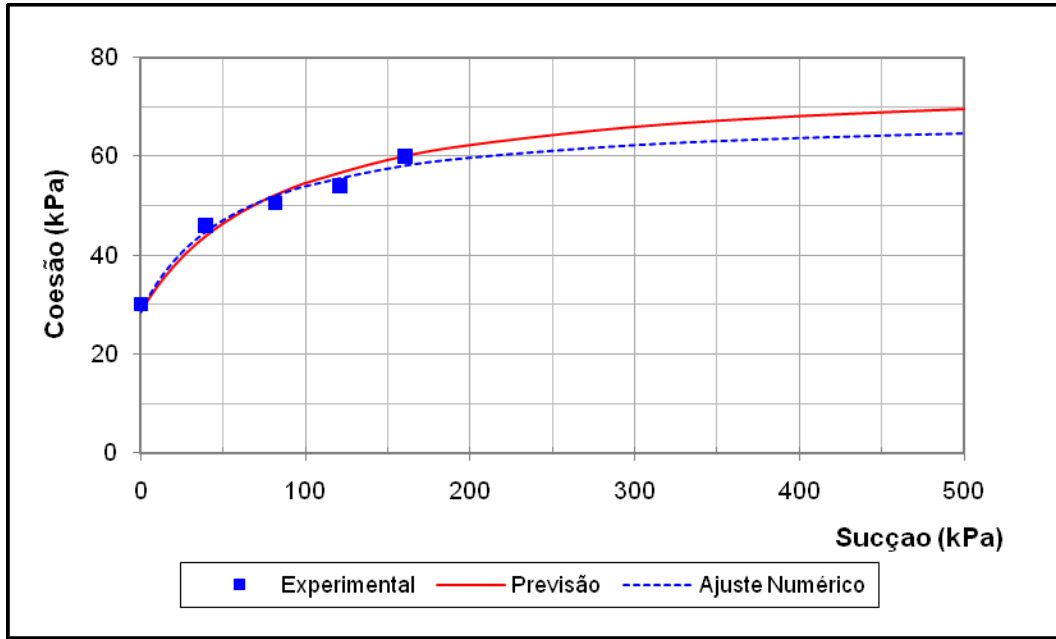


Figura F.14 – Proposta de Vilar e Colaboradores – USP

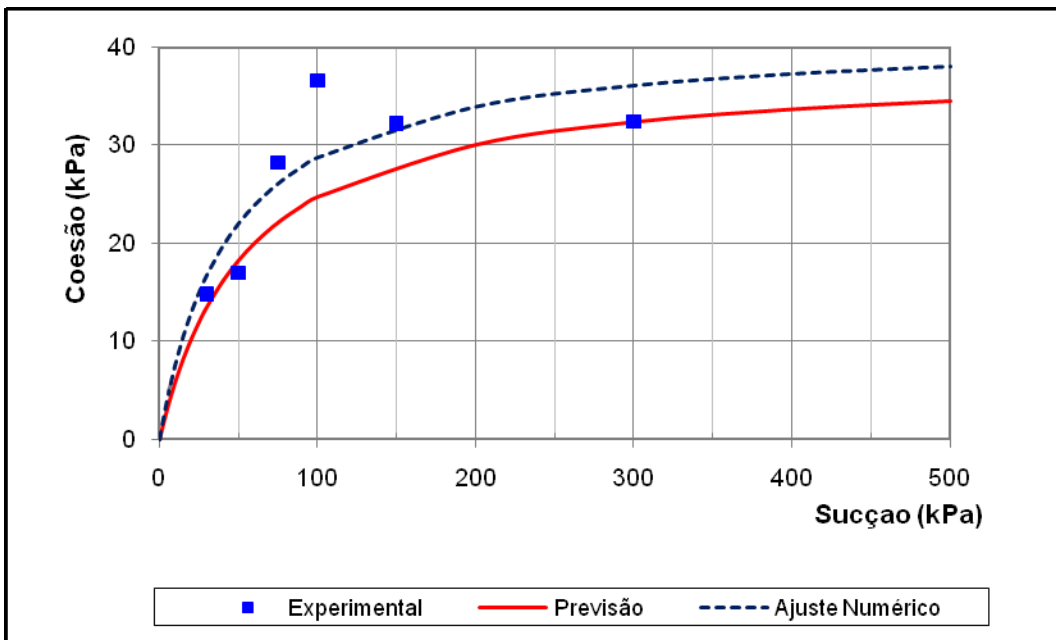
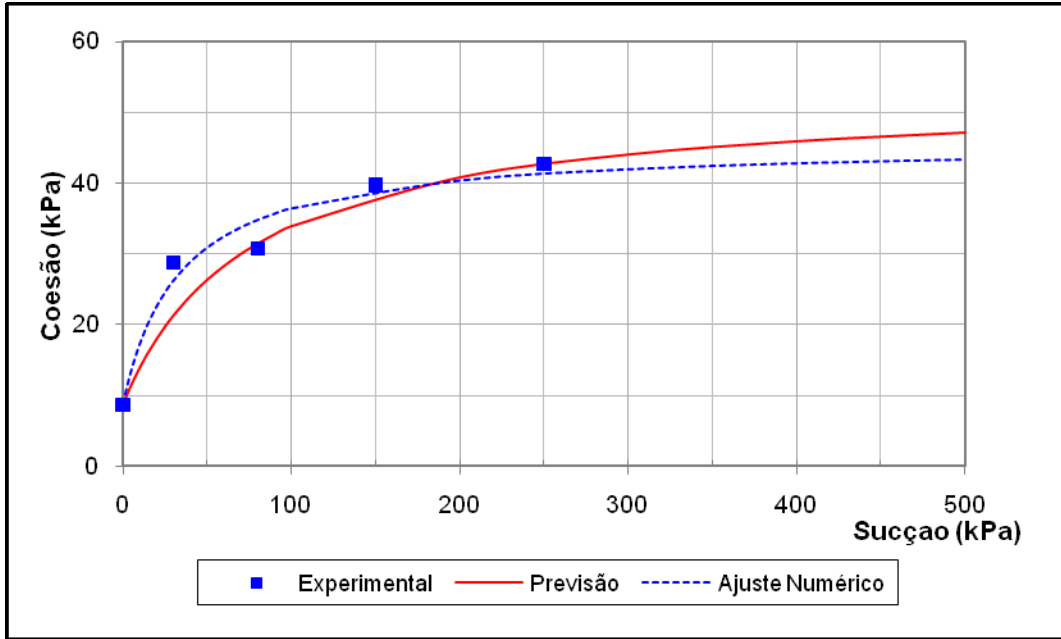
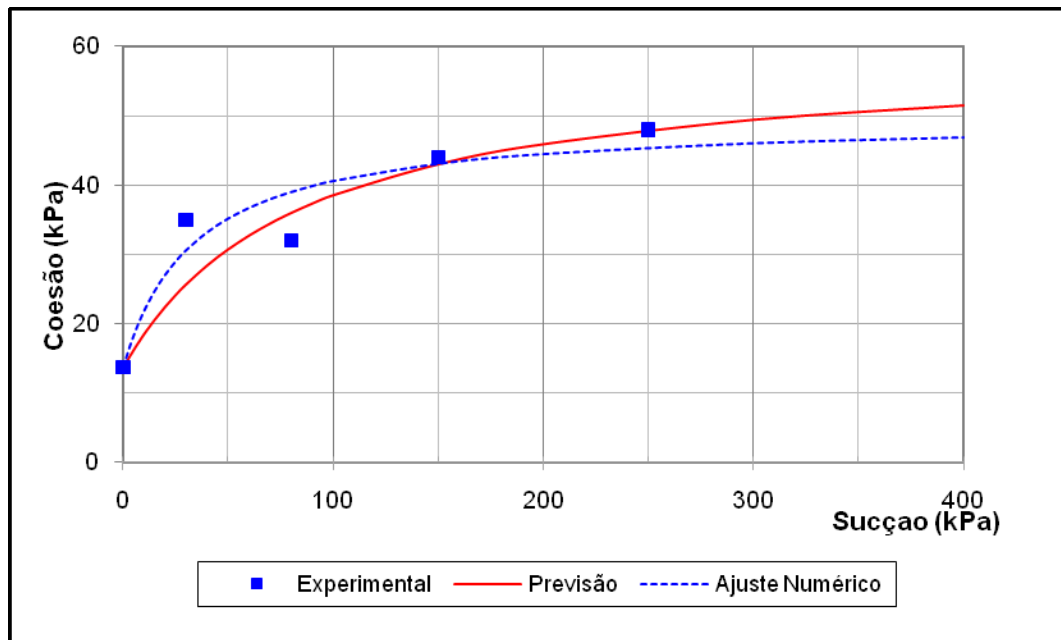


Figura F.15 – Proposta de Vilar e Colaboradores – AI1



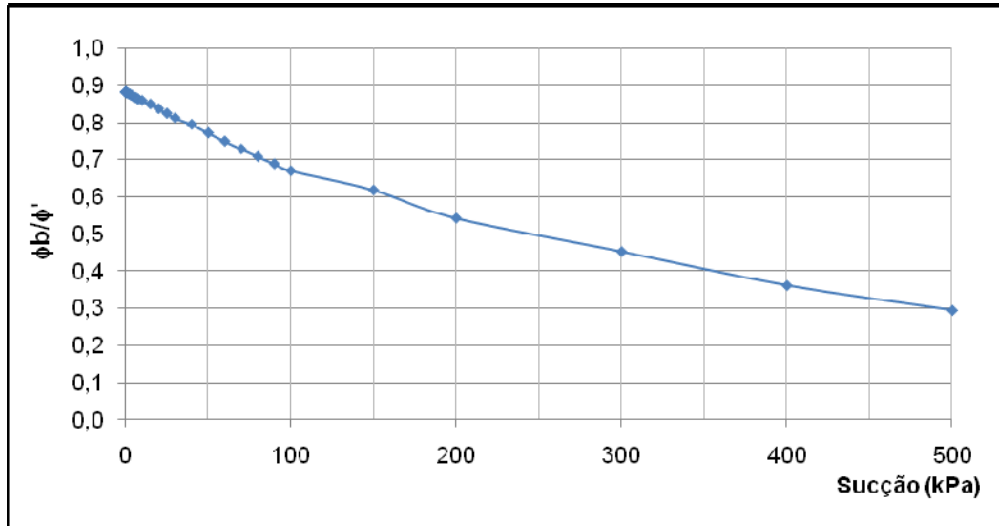
(a) Residual Vermelho



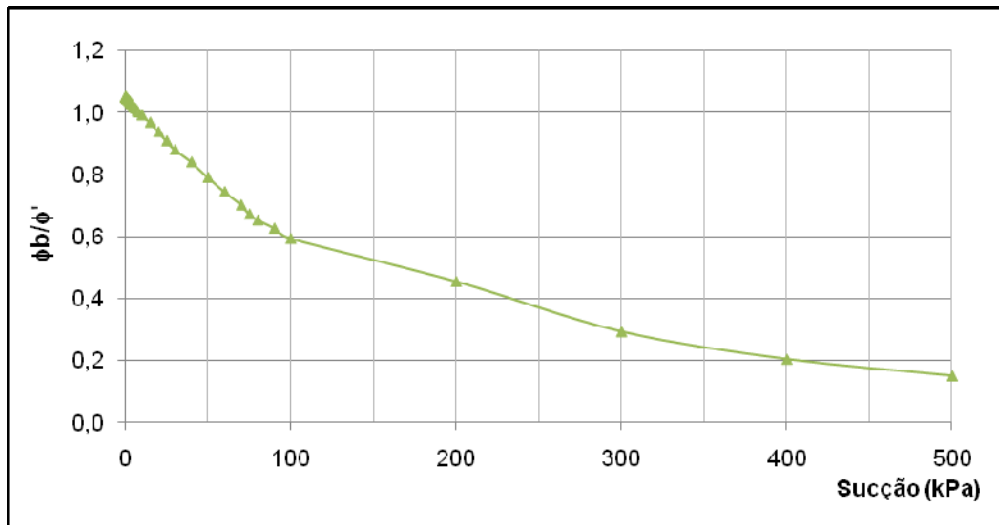
(b) Residual Típico

Figura F.16 – Proposta de Vilar e Colaboradores – Vista Chinesa

APÊNDICE G – RESULTADOS DA RELAÇÃO ϕ^b/ϕ'

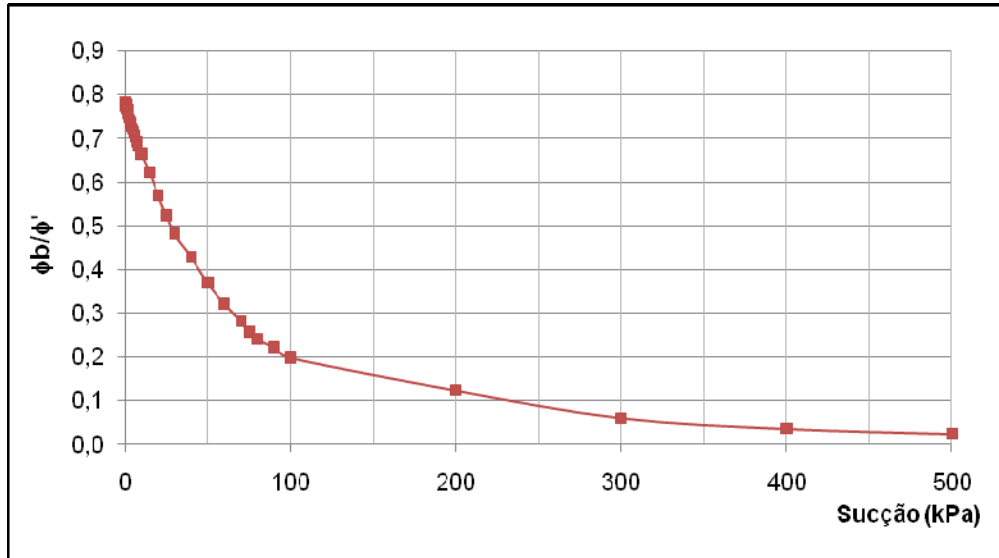


(a) Residual Maduro

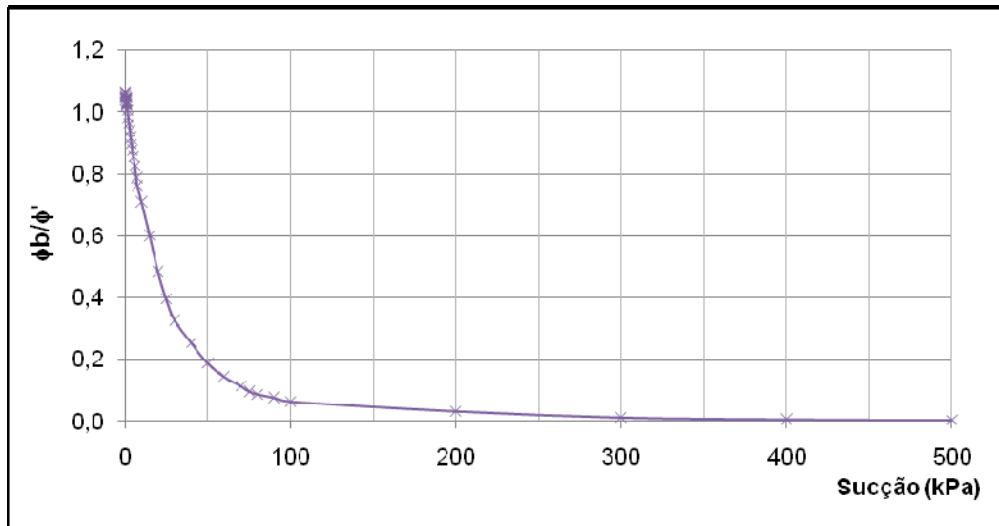


(b) Residual Jovem

Figura G.1 – Relação ϕ^b/ϕ' – Viçosa



(a) ALGB



(b) ALGC

Figura G.2 – Relação ϕ^b/ϕ' – Alvorada

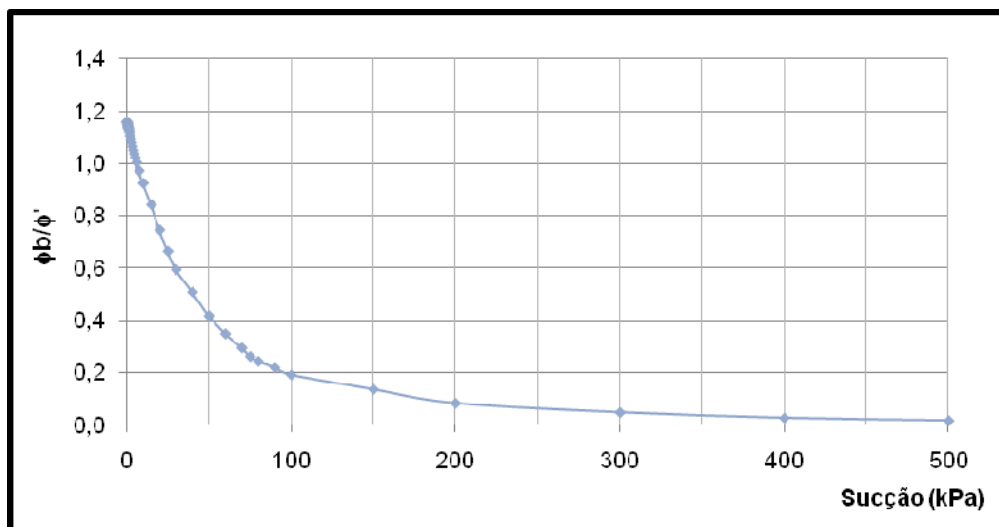
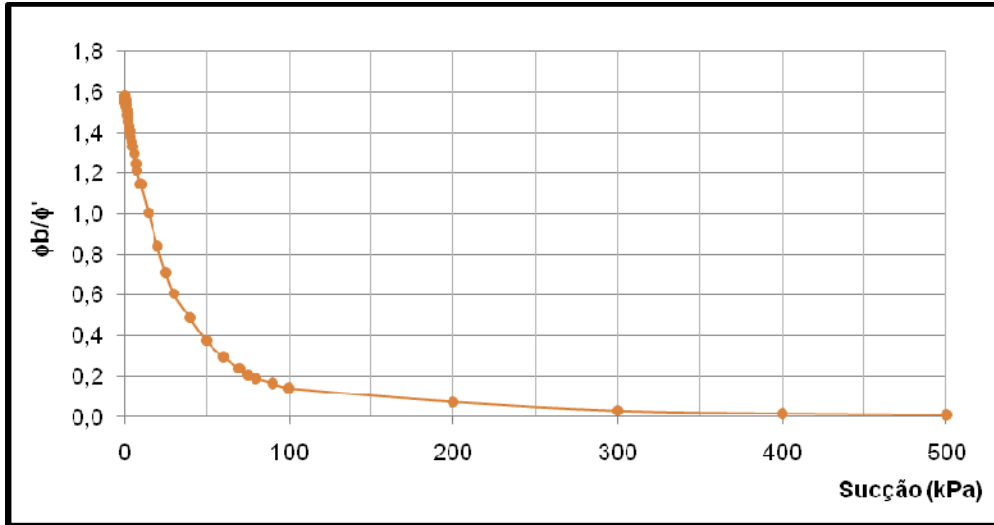
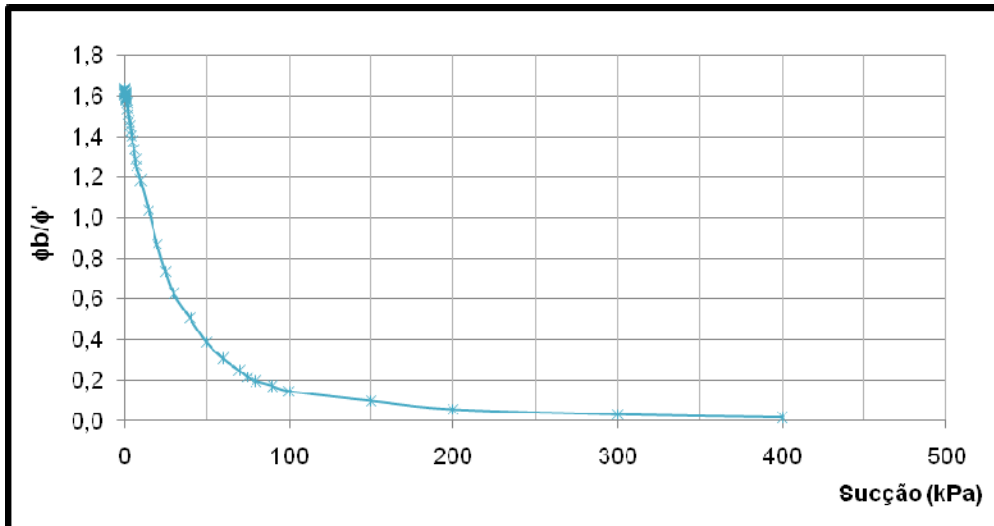


Figura G.3 – Relação ϕ^b/ϕ' – USP (Machado e Vilar, 1998)



(a) Residual Vermelho



(b) Residual Típico

Figura G.4 – Relação ϕ^b/ϕ' – Vista Chinesa

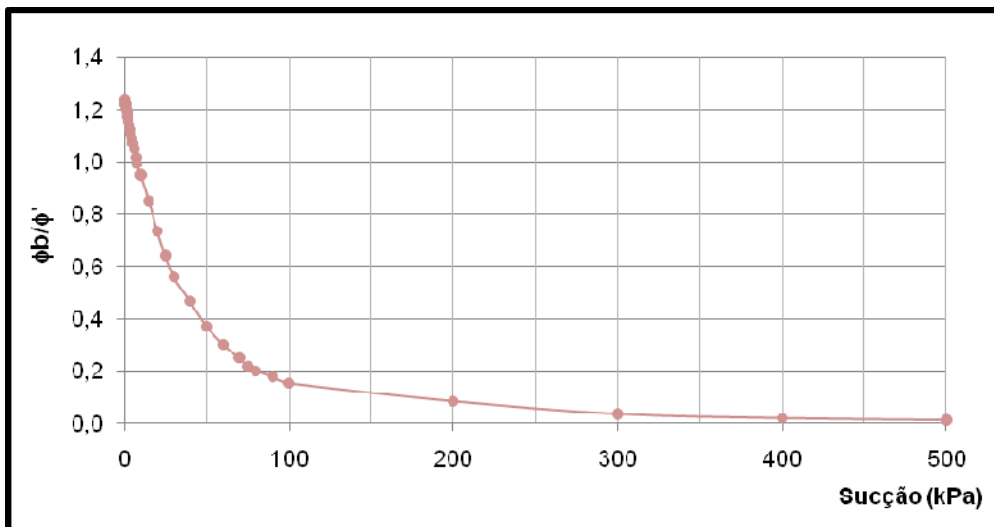


Figura G.5 – Relação ϕ^b/ϕ' – AI1

ANEXO A – FUNÇÃO LSQNONLIN

```

function [x,Resnorm,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT,LAMBDA,JACOBI] = lsqnonlin(FUN,
x, LB, UB, options,varargin)
    defaultopt = struct('Display','final','LargeScale','on', ...
        'TolX',1e-6,'TolFun',1e-6,'DerivativeCheck','off',...
        'Diagnostics','off','FunValCheck','off',...
        'Jacobian','off','JacobMult',[],... % JacobMult set to [] by default
        'JacobPattern','sparse(ones(Jrows,Jcols))',...
        'MaxFunEvals','100*numberOfVariables',...
        'DiffMaxChange',1e-1,'DiffMinChange',1e-8,...
        'PrecondBandWidth',Inf,'TypicalX',ones(numberOfVariables,1)',...
        'MaxPCGIter','max(1,floor(numberOfVariables/2))', ...
        'TolPCG',0.1,'MaxIter',400,...
        'LineSearchType','quadcubic','LevenbergMarquardt','on', ...
        'OutputFcn',[],'PlotFcns',[]);

    if nargin==1 && narginout <= 1 && isequal(FUN,'defaults')
        x = defaultopt;
        return
    end

    if nargin < 3, LB=[]; end
    if nargin < 4, UB=[]; end
    if nargin < 5, options=[]; end

    if nargin == 1
        if isa(FUN,'struct')
            [FUN,x,LB,UB,options] = separateOptimStruct(FUN);
        else % Single input and non-structure.
            error('optim:lsqnonlin:InputArg','The input to LSQNONLIN should be either a
structure with valid fields or consist of at least two arguments.');
```

```
if nargout > 5
    computeLambda = 1;
else
    computeLambda = 0;
end

caller = 'lsqnonlin'; XDATA = []; YDATA = [];
[x,Resnorm,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT,LAMBDA,JACOB] = ...
    lsqnoncommon(FUN,x,XDATA,YDATA,LB,UB,options,defaultopt,caller,...
        computeLambda,varargin{:});
```


Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)