

7

Interpretação dos Resultados

Este capítulo é voltado para a apresentação da interpretação dos resultados das caracterizações física, mineralógica e química e os ensaios de resistência ao cisalhamento.

Primeiramente, é apresentada uma análise conjunta dos resultados obtidos das caracterizações física, química e mineralógica, tentando correlacioná-los. Em seguida, são avaliados os aspectos de compressibilidade do material menos intemperizado, tanto para os ensaios em amostras submersas quanto para o solo em condição não saturada. Para tanto foi analisado o efeito da tensão normal vertical e da sucção mátrica no índice de vazios dos corpos de prova.

Quanto à resistência ao cisalhamento, inicialmente, apresenta-se o critério para a definição da ruptura adotado para a determinação das envoltórias de resistência. Posteriormente, são avaliados os parâmetros de resistência e como estes são influenciados pela sucção. São apresentadas, também, as equações que definem o comportamento de resistência em função das duas variáveis independentes de tensão consideradas nesse trabalho.

Em seguida, são comparadas as envoltórias de resistência obtidas com estimativas de resistência, usando equações simplificadas baseadas na curva característica de retenção de água. Os resultados obtidos para o solo estudado também são comparados com outros os de materiais encontrados na literatura.

7.1

Análise conjunta dos resultados da caracterização física, química e mineralógica

Da análise dos índices físicos do estado natural, verificou-se que os três solos caracterizados possuíam índices aproximadamente semelhantes, com exceção do teor de umidade natural, justificado pela diferença nas datas de amostragem. Mesmo possuindo um maior número de fraturas, os índices de vazios do SR3 foram os menores (entre 0,88 e 0,78).

O valor densidade relativa dos grãos depende da composição mineralógica do solo. A Tabela 7.1 mostra os valores de densidade relativa dos grãos de alguns minerais.

Tabela 7.1 – Densidade relativa dos grãos de alguns minerais (adaptado de Deer *et al.*, 1981, *apud* Brant, 2005)

Mineral	Gs
Quartzo	2,70
Muscovita	2,66-2,73
Caulinita	2,65-2,92
Ilita	2,80-2,83
Esmectita	2,45
Gibbsita	4,38
Goethita	5,30
Hematita	4,31-5,61
Magnetita	4,41-5,61

Dos valores da tabela, pode-se dizer que os solos SR1 e SR2 possuem densidade relativa dos grãos dentro da faixa de valores de Gs da caulinita e bem próximos da ilita. Já o SR3 possui densidade típica de solos quartzosos. Tais valores estão de acordo com os resultados das análises mineralógicas realizadas.

As curvas granulométricas obtidas são de forma semelhante, todas uniformes. Todos os solos apresentaram uma alta porcentagem de silte. O SR3 apresentou uma porcentagem de fração areia mais elevada que nos outros dois solos, enquanto o SR1, de fração argila.

Dos valores de limites de consistência determinados, pôde-se concluir que os solos SR1 e SR2 são mais plásticos que o SR3. Isso pode ser atribuído à maior quantidade da fração areia presente neste último combinado à sua composição mineralógica.

Dos dados de caracterização física, obteve-se a classificação dos solos segundo o SUCS, sendo o SR1 um silte inorgânico de alta plasticidade (MH) e o SR2 e o SR3, siltes inorgânicos de baixa plasticidade (ML).

A composição mineralógica das frações pedregulho e areia dos solos mostrou-se bem diferente. Destacam-se a presença de fragmentos da rocha matriz no solo SR1, basicamente mica (sericita) no SR2 e grãos de quartzo no SR3.

As frações finas do solo não apresentaram grandes diferenças mineralógicas. Todos os solos são constituídos basicamente de mica/ilita e caulinita. A amostra de solo SR3 apresentou também quartzo em sua constituição. A mineralogia dos preenchimentos das fraturas do SR3 apresentou-se idêntica à do solo. Na análise da rocha alterada também se notou os minerais citados anteriormente, além da presença de clorita.

Da análise química total, pode-se dizer que o solo SR1 apresentou maior grau de intemperismo devido à sua maior perda ao fogo. A porcentagem de sílica total é aproximadamente a mesma nas três amostras analisadas, assim como a alumina, indicando que possivelmente não ocorreu lixiviação destes compostos.

Através de análises químicas seletivas, obteve-se a capacidade de troca catiônica (CTC) das amostras. Os valores obtidos foram baixos, variando entre 1,8 (SR1) e 2,2 (SR3), e estão de acordo com a mineralogia da fração argila dos materiais.

Comparando esses valores de CTC e a atividade calculada pela equação de Skempton (equação 5.1), mostrada no capítulo 5, concluiu-se que para os solos SR1 e SR2 essa relação não é coerente. De acordo com os resultados das análises químicas, os solos não possuem atividade, uma vez que os valores de CTC determinados são muito baixos. Os valores calculados pela equação 5.1 indicaram que o SR1 possui atividade normal e SR2 é ativa. A atividade do material pode estar ligada à fração silte também, uma vez que a composição mineralógica tanto da fração silte, quanto da fração argila são basicamente a mesma.

A equação 5.1 usa o índice de plasticidade que é obtido utilizando com a fração de solo com grãos menores que 0,42 mm. Porém, nesta equação usa-se apenas a fração de argila. Visto que os limites de consistência foram obtidos usando essa fração também e a equação 5.1 considera apenas a porcentagem de argila. Propõe-se usar a porcentagem total de finos, isto é, a porcentagem de silte e argila, no cálculo do índice de atividade da fração fina (equação 7.1). Os valores de atividade passaram a ser mais coerentes com a aquela obtida das análises químicas (Tabela 7.2). Ressalta-se que se faz necessário mais análises para validar tal proposta, uma vez que análises químicas parciais foram realizadas com apenas uma série de ensaio, tornando pouco representativa para a amostra de solo.

$$I_a = \frac{IP}{\% < 0,06\text{mm}} \quad (7.1)$$

Tabela 7.2 – Valores do índice de atividade calculados pelas equações 5.1 e 7.1.

Solo	Skempton	Modificado
SR1	0,96	0,27
SR2	1,85	0,20
SR3	0,44	0,09

De acordo com os índices de Ki e Kr, o solo mais intemperizado é o SR1, que apresentou um menor valor desses índices. O material menos intemperizado é o solo SR3. Foram analisados apenas os solos a partir desses índices, uma

vez que o ataque sulfúrico atinge apenas os minerais secundários.

As porcentagens dos argilominerais foram calculadas a partir de uma proposta de Santos (1998) usando os resultados de análise química total. Obteve-se uma maior porcentagem de caulinita comparativamente com a porcentagem de mica/ilita em todas as amostras. A quantidade do primeiro é praticamente a mesma nos solos SR1 e SR3. O solo SR3 apresentou a menor quantidade de mica/ilita.

As curvas características dos solos SR1 e SR2 apresentaram dois pontos de inflexões, indicando que existe uma distribuição bi-modal dos poros. Observou-se que a perda de umidade no SR1 é gradual, indo até 2000 kPa, no trecho adjacentes, essa perda foi brusca. A curva característica do solo SR2 perde umidade no primeiro trecho (sucção entre 0 e 200 kPa) mais bruscamente, se comparada à do SR1.

O solo SR3 apresentou apenas um ponto de inflexão em sua curva característica, caracterizando uma distribuição uniforme de poros. A perda de umidade é gradual. O valor da pressão de entrada de ar é aproximadamente o mesmo que o mostrado pelo solo SR2.

7.2

Compressibilidade do material

7.2.1

Amostras submersas

Para analisar a compressibilidade do solo estudado, fez-se um gráfico da variação de índice de vazios, obtida após a fase de adensamento nos ensaios de cisalhamento direto convencional, em função da tensão normal vertical aplicada (Figura 7.1). Observou-se que a variação de índices de vazios foi muito pequena e aumenta com o acréscimo da tensão normal vertical.

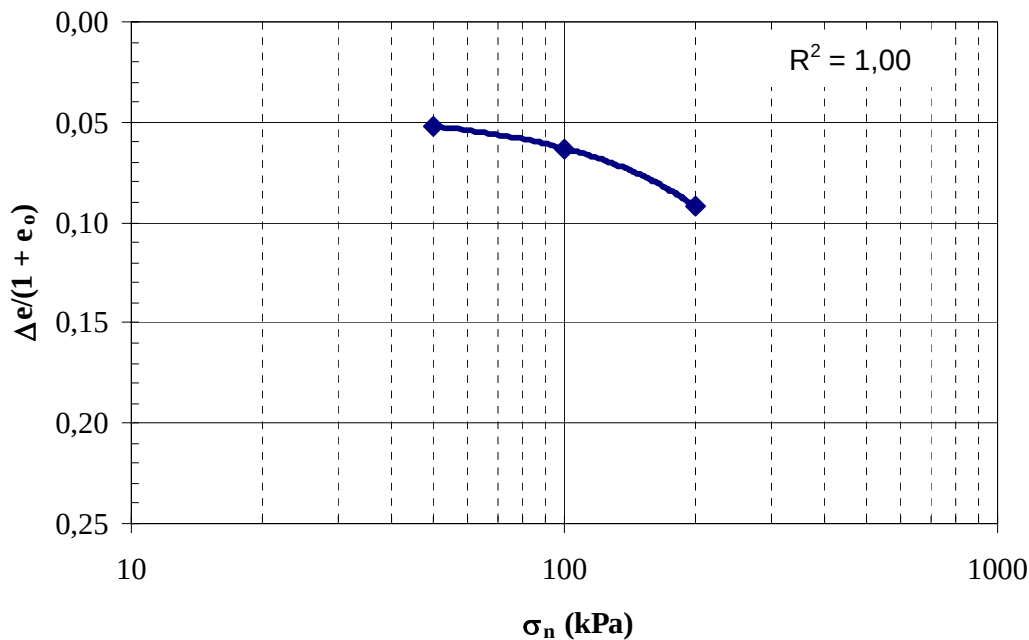


Figura 7.1 – Curva de compressibilidade para amostras submersas.

7.2.2

Amostras não saturadas

Para analisar a influência da sucção na compressibilidade do solo, plotou-se a variação de índice de vazios *versus* a sucção mátrica para cada uma das 3 séries de ensaios realizadas. Os valores dos índices de vazios foram determinados depois da primeira fase dos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada. Esse gráfico está apresentado na Figura 7.2.

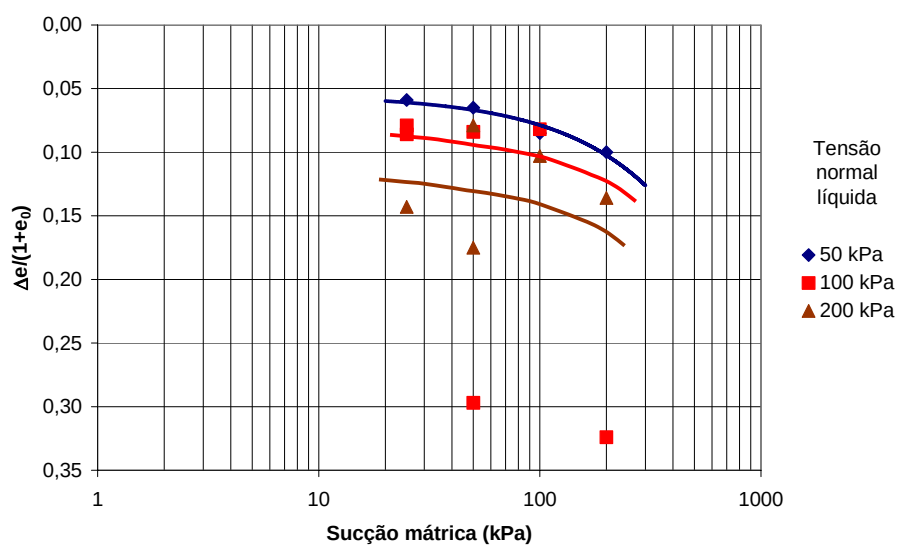


Figura 7.2 – Variação do índice de vazios com a sucção mátrica aplicada para cada série de ensaios com tensão normal líquida constante.

Analisando essa relação, percebeu-se uma grande dispersão dos dados para as tensões normais líquida aplicadas iguais a 100 e 200 kPa. Nesses casos, não se obtiveram uma boa correlação entre a compressibilidade e a sucção mátrica. As linhas traçadas em vermelho e marrom indicam a tendência que se acredita existir entre a variação dos índices de vazios e a sucção mátrica. Entretanto, para o nível de tensão normal líquida igual a 50 kPa, não percebeu-se esta dispersão, notando uma pequena variação dos índices de vazios, que aumentou com o acréscimo de sucção mátrica.

Apresenta-se também, na Figura 7.3, a variação do índice de vazios em função da variação da sucção mátrica normalizada, dividindo a sucção pela tensão normal líquida aplicada.

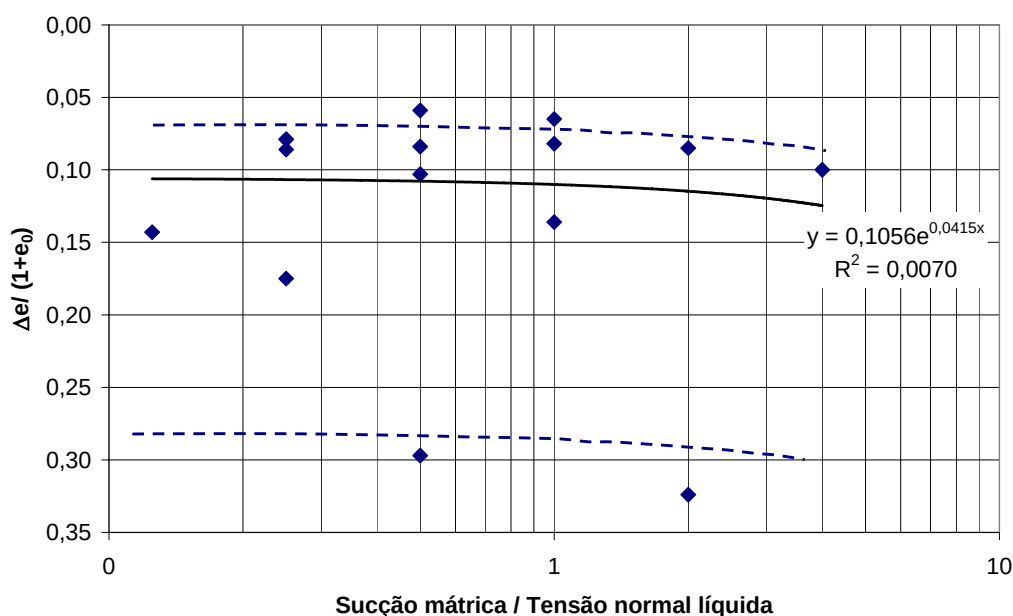


Figura 7.3 - Variação do índice de vazios com a sucção mátrica normalizada.

Novamente, observou-se uma grande dispersão dos resultados, não obtendo uma correlação entre a variação de índices de vazios e a sucção normalizada. Nesse caso, foi proposta uma faixa de variação de índices de vazios pelas linhas pontilhadas traçadas no gráfico. A tendência dessa faixa é que a variação do índice de vazios seja maior à medida que aumenta a relação entre sucção mátrica e tensão normal líquida. Na Figura 7.4, está apresentada a relação entre a compressibilidade e a tensão normal líquida.

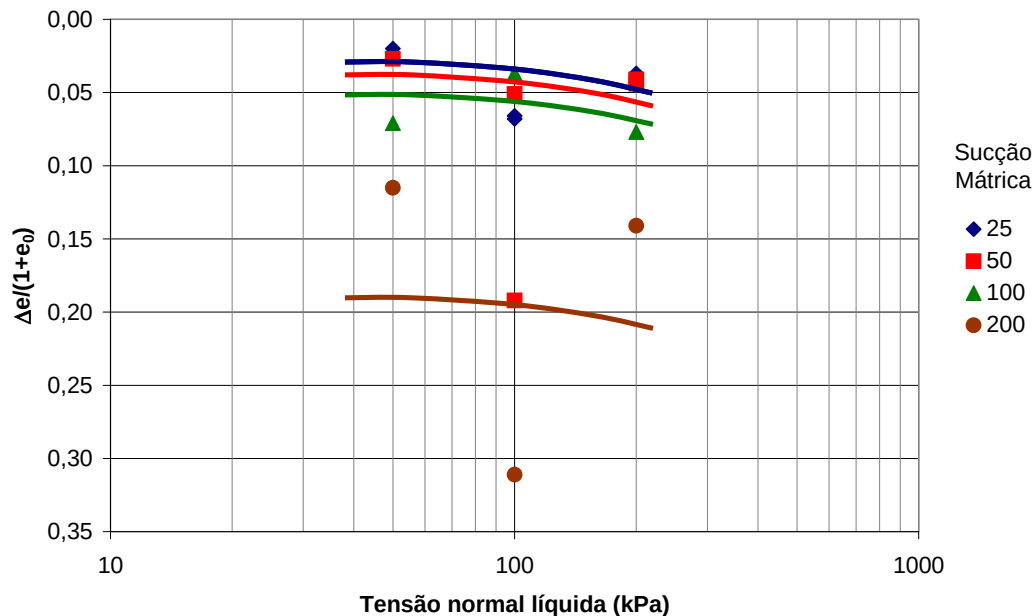


Figura 7.4 - Variação do índice de vazios com a tensão normal líquida.

Quando se analisa o efeito da tensão normal líquida na compressibilidade, novamente, percebeu-se uma grande dispersão dos resultados. Mesmo assim, nota-se a leve tendência de aumentar a variação de índices de vazios com o acréscimo de tensão normal líquida.

7.3 Resistência ao cisalhamento

7.3.1 Critério de definição de ruptura utilizado

Observando os resultados obtidos dos ensaios de cisalhamento convencional, notou-se que a resistência do solo aumentou com o deslocamento horizontal, apresentando uma definição de pico e, logo em seguida diminuindo até atingir um valor constante. Nos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada, as curvas τ versus δ_h não apresentaram esse pico, sendo que a resistência aumentou com o deslocamento horizontal.

Visando uma definição uniforme de resistência, usou-se o critério no qual era assumido que o solo havia rompido quando a curva tensão-deslocamento (τ vs. δ_h) atingisse pela primeira vez uma inclinação (α) constante. No caso dos ensaios de cisalhamento direto convencionais, essa inclinação era nula. A Figura 7.5 exemplifica a determinação dos pontos de ruptura através do critério utilizado.

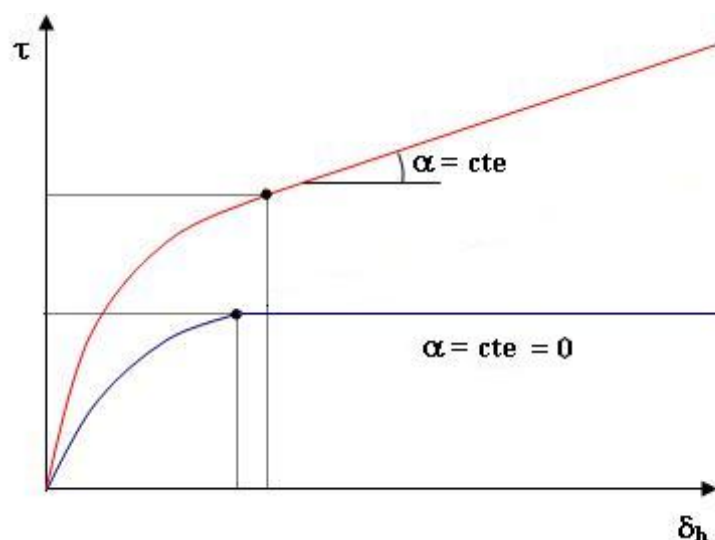


Figura 7.5 - Critério utilizado na determinação dos pontos de ruptura (de Campos e Delgado, 1995).

7.3.2

Resistência ao cisalhamento das amostras submersas

Estão apresentados na Tabela 7.3 os pares de tensões cisalhante e normal, no momento da ruptura, obtidos de acordo com o critério de ruptura descrito anteriormente, assim como o deslocamento horizontal correspondente a esses valores.

Tabela 7.3 – Tensão cisalhante, tensão normal e deslocamento horizontal na ruptura.

Ensaio	Tensão Normal (kPa)	τ_r (kPa)	σ_r (kPa)	τ_r/σ_r	δ_{hr} (mm)
CD01	50	36,50	56,45	0,65	11,43
CD02	100	63,65	108,40	0,59	7,75
CD03	200	86,16	225,66	0,38	11,37

Com esses dados, plotou-se o gráfico da Figura 7.6 e, a partir do ajuste linear desses valores, obteve-se a envoltória de resistência para as amostras submersas.

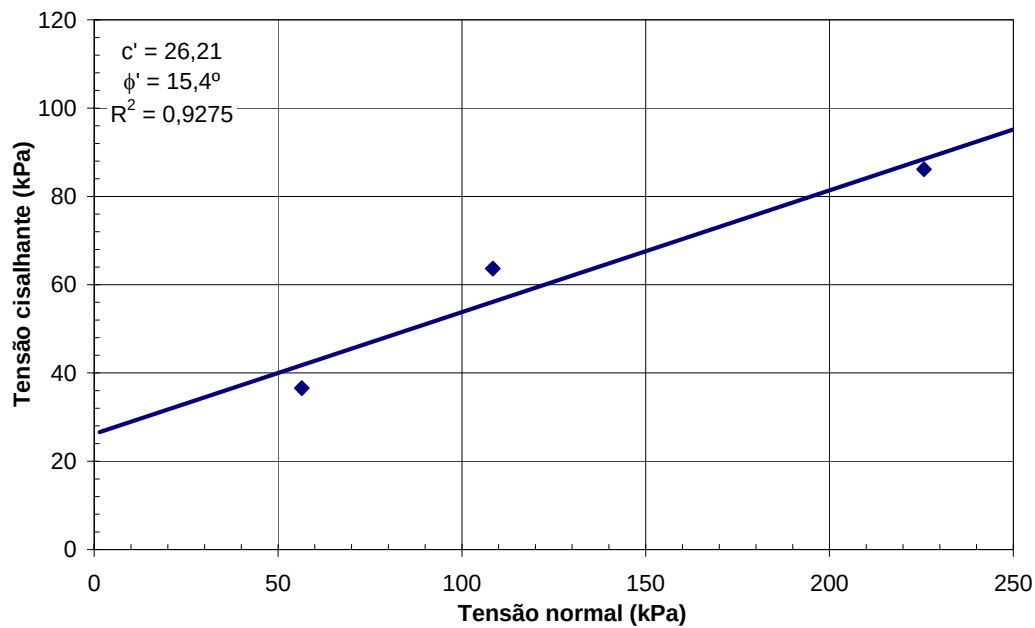


Figura 7.6 – Envoltória de resistência para amostras submersas.

Ajustando-se os pontos obtidos nos ensaios de cisalhamento direto convencional a uma curva hiperbólica, determinou-se a envoltória não linear mostrada na Figura 7.7. A equação 7.2 é a função de ajuste desta curva. Nesse caso, a coesão efetiva do solo foi nula. Para cada nível de tensão normal foi determinado o valor do ângulo de atrito efetivo (ϕ') a partir da derivada da equação 7.2, como pode ser visto na Tabela 7.4.

$$\tau = \frac{\sigma}{1,0537 + 0,0068 \cdot \sigma} \quad (7.2)$$

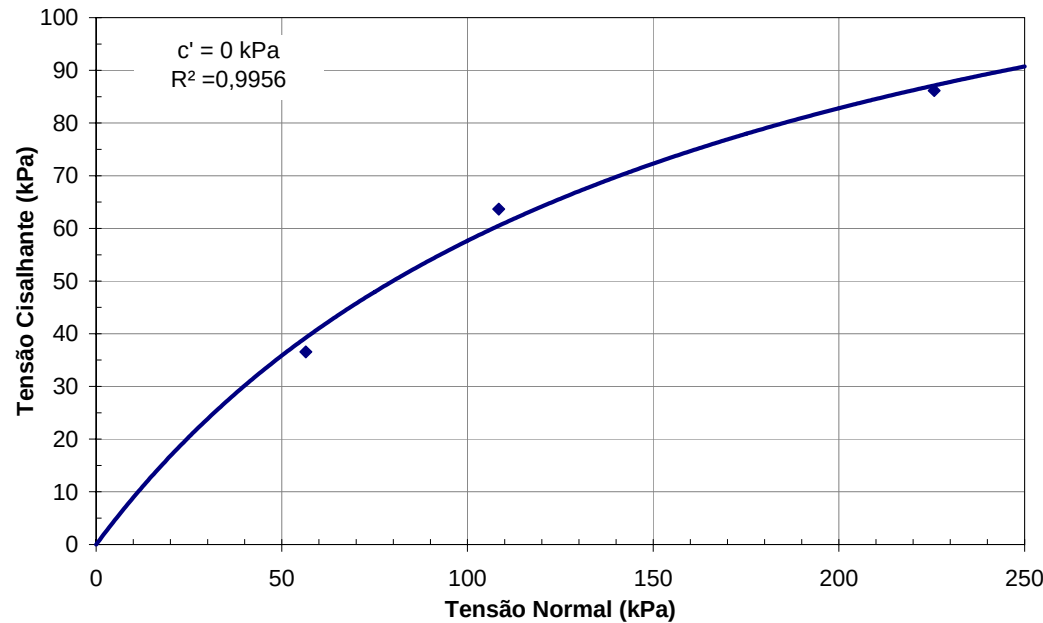


Figura 7.7 – Envoltória não linear de resistência ao cisalhamento para as amostras submersas.

Tabela 7.4 – Variação do ϕ' em função de σ .

$\sigma \text{ (kPa)}$	$\phi' \text{ (}^\circ\text{)}$
0	81,49
50	34,74
100	20,98
200	10,49

Na Figura 7.8, é mostrada uma relação entre o índice de vazios após o adensamento e a tensão cisalhante na ruptura.

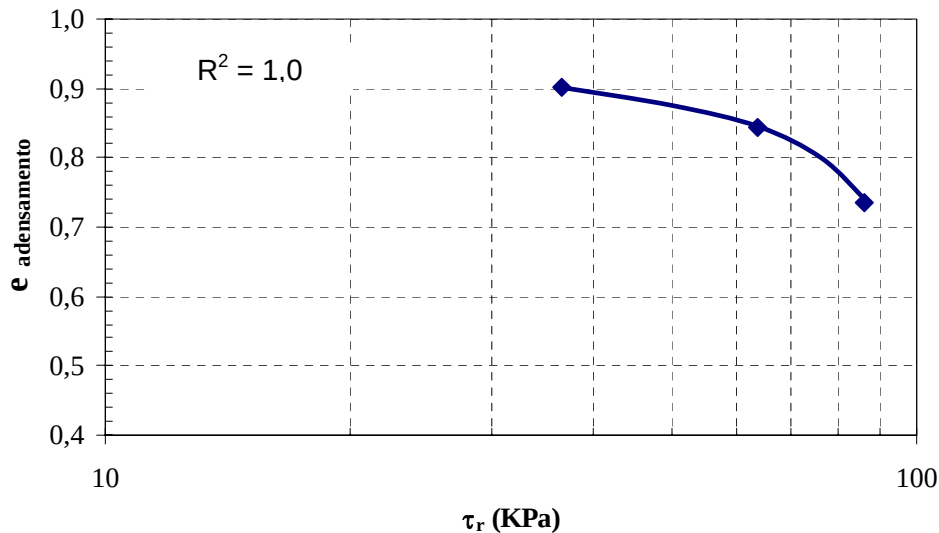


Figura 7.8 – Relação entre o índice de vazios após o adensamento e a tensão cisalhante de ruptura.

Notou-se que a resistência ao cisalhamento foi maior para valores de índices de vazios menores. De acordo com esse gráfico, é possível concluir que há uma relação direta entre a tensão cisalhante na ruptura e o índice de vazios após o adensamento. No entanto, seria necessário um número maior de ensaios para se estabelecer tal relação corretamente.

7.3.3

Resistência ao cisalhamento na condição não saturada

De acordo com o critério assumido, foram obtidas as tensões cisalhantes de ruptura para cada ensaio de resistência não saturada, apresentadas na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Tensão cisalhante, tensão normal líquida e deslocamento horizontal na ruptura.

Série	Ensaio	Tensão normal líquida (kPa)	Sucção Mátrica (kPa)	τ_r (kPa)	$(\sigma - u_a)_r$ (kPa)	$\tau_r / (\sigma - u_a)_r$	δ_{hr} (mm)
I	CDSC01	50	25	169,281	49,788	3,40	3,11
	CDSC02	50	50	198,015	52,810	3,75	3,24
	CDSC03	50	100	203,782	48,915	4,17	3,20
	CDSC04	50	200	244,403	50,872	4,80	4,00
II	CDSC05(1)	100	25	146,363	102,951	1,42	5,00
	CDSC05(2)	100	25	48,301	99,617	0,48	5,32
	CDSC06(1)	100	50	64,470	102,568	0,63	4,00
	CDSC06(2)	100	50	182,310	100,092	1,82	6,01
	CDSC07	100	100	249,827	101,234	2,47	4,03
	CDSC08	100	200	339,301	96,889	3,50	5,62
III	CDSC09	200	25	212,798	202,918	1,05	3,61
	CDSC10(1)	200	50	241,183	207,185	1,16	2,81
	CDSC10(2)	200	50	273,446	207,083	1,32	3,61
	CDSC11	200	100	274,685	199,156	1,38	4,80
	CDSC12	200	200	363,849	225,652	1,61	4,00

() número do ensaio

Na análise dos resultados obtidos, nota-se um comportamento não linear nas envoltórias com respeito à sucção, como mostrado na Figura 7.9. Percebe-se que, para baixos valores de sucção, houve um rápido crescimento de ϕ^b , que é representado pela inclinação da curva τ vs. $(u_a - u_w)$, tendendo a uma inclinação constante à medida que a sucção matricial aumenta. Esse comportamento não linear é bem representado por uma função hiperbólica, mostrada em sua forma geral na equação 7.3. Na Tabela 7.6, estão apresentadas as funções hiperbólicas obtidas para cada uma das séries de ensaios com tensão normal

líquida constante. Ressalta-se que para a obtenção das envoltórias em função da sucção mátrica e da tensão normal líquida, foram desconsiderados os pontos correspondentes aos ensaios CDSC05(2) e CDSC06(1), com $(\sigma - u_a) = 100$ kPa e $(u_a - u_w) = 50$ kPa e 100 kPa, respectivamente, visto que ambos possuem valores de resistência muito baixa, provavelmente, devido às existência de diversas fraturas nos corpos de prova.

$$\tau = \tau_o + \frac{(u_a - u_w)}{[a + b(u_a - u_w)]}$$

(7.3)

Onde τ_o é o valor da resistência do solo quando saturado. Os parâmetros da função hiperbólica, a e b, foram determinados pelo método dos mínimos quadrados.

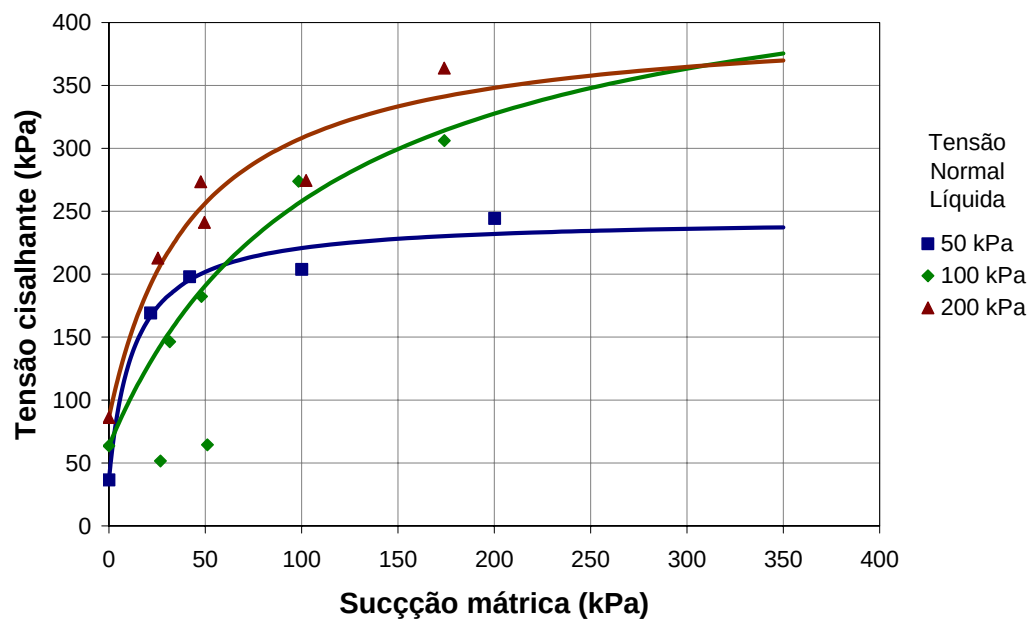


Figura 7.9 – Envoltórias de resistência em função da $(u_a - u_w)$.

Tabela 7.6 – Funções Hiperbólicas de Resistência.

Tensão normal líquida (kPa)	Função Hiperbólica	R²
50	$\tau = 36,56 + (u_a - u_w) / [0,0623 + 0,0048 \cdot (u_a - u_w)]$	0,9820
100	$\tau = 63,65 + (u_a - u_w) / [0,2712 + 0,0024 \cdot (u_a - u_w)]$	0,9881
200	$\tau = 86,16 + (u_a - u_w) / [0,1370 + 0,0031 \cdot (u_a - u_w)]$	0,9409

A Figura 7.10 mostra as envoltórias de resistência com respeito à tensão normal líquida, para mesmos valores de sucção mátrica. É importante ressaltar

que, para a obtenção da envoltória estendida, foi considerada a envoltória linear para a condição submersa.

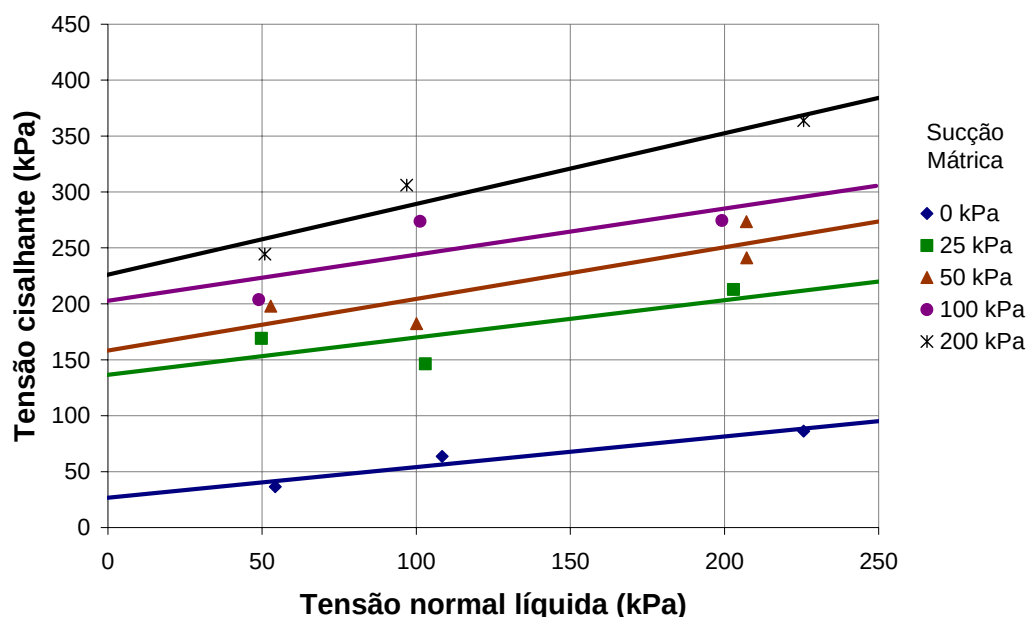


Figura 7.10 - Envoltórias de resistência em função da $(\sigma - u_a)$.

Pode ser observado um acréscimo acentuado de resistência da condição saturada para sucção de 25 kPa. Isto pode ser atribuído ao comportamento da curva característica, onde se percebe que a pressão de entrada de ar é entre 20 kPa e 30 kPa e que ocorreu uma desaturação brusca. Na Tabela 7.7, apresenta-se os parâmetros de resistência obtidos a partir dessas envoltórias.

Tabela 7.7 – Parâmetros de resistência em função $(\sigma - u_a)$.

$(u_a - u_w)$ (kPa)	c_{aparente} (kPa)	ϕ' (°)	R^2
0	26,64	15,32	0,9323
25	136,53	18,46	0,5913
50	158,26	24,79	0,7529
100	202,79	22,38	0,5964
200	226,06	32,31	0,9203

Pela Figura 7.10, também se percebe que a resistência ao cisalhamento do material aumentou tanto com o acréscimo de sucção quanto com o acréscimo de tensão normal líquida, representado pelo aumento do intercepto de coesão. Foi também observado que este acréscimo do valor da coesão aparente em relação ao aumento de sucção matricial pode ser ajustado com uma função hiperbólica, com um aumento brusco no início da curva, seguido de um

crescimento aproximadamente linear. Esse comportamento pode ser observado na Figura 7.11. A equação 7.4 representa esta função hiperbólica.

$$c_{aparente} = 26,64 + \frac{(u_a - u_w)}{0,1426 + 0,0045(u_a - u_w)} \quad (7.4)$$

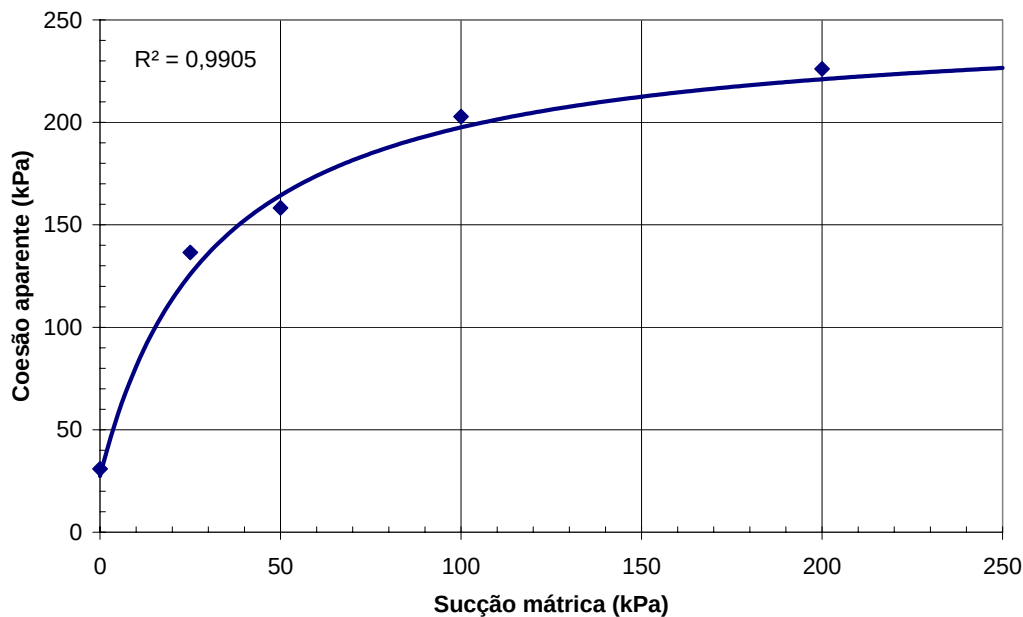


Figura 7.11 – Variação da Coesão aparente com a $(u_a - u_w)$.

Ressalta-se que, para sucções entre 0 e 25 kPa, o valor de ϕ^b encontrado nestes ensaios é maior que ϕ' (veja a Tabela 7.7). Alguns autores, como Escario e Sáez (1986) e Fredlund *et al.* (1987), afirmam que, para uma faixa de sucção baixa, ϕ^b tenderia a um valor próximo de ϕ' . Porém, estudos realizados por Abramento (1988), Rohm (1992), Rohm e Vilar (1995), Teixeira e Vilar (1997), Soares (2005) e Soares e de Campos (2005) mostraram valores de ϕ^b muito maiores que ϕ' para baixos valores de sucção. A Figura 7.12 mostra a variação do valor de ϕ^b e do valor do ϕ' com a sucção mátrica.

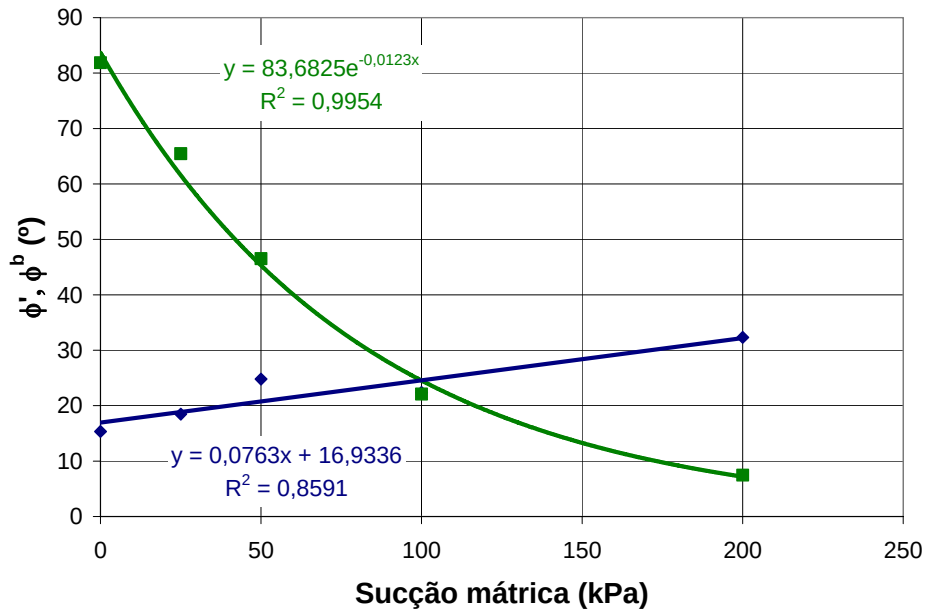


Figura 7.12 – Variação de ϕ^b e ϕ' com a $(u_a - u_w)$.

A envoltória de resistência do solo quando se relaciona as tensões cisalhante e normal com a sucção matricial é uma superfície que pode ser representada pela equação 7.5. A partir desta equação, representa-se graficamente esta superfície, que seria a envoltória tridimensional de resistência ao cisalhamento não saturado do solo residual jovem de filito, mostrada na Figura 7.13.

$$\tau = 26,64 + (\sigma - u_a) \cdot \operatorname{tg}(22,67^\circ) + \frac{(u_a - u_w)}{0,1426 + 0,0045 \cdot (u_a - u_w)} \quad (7.5)$$

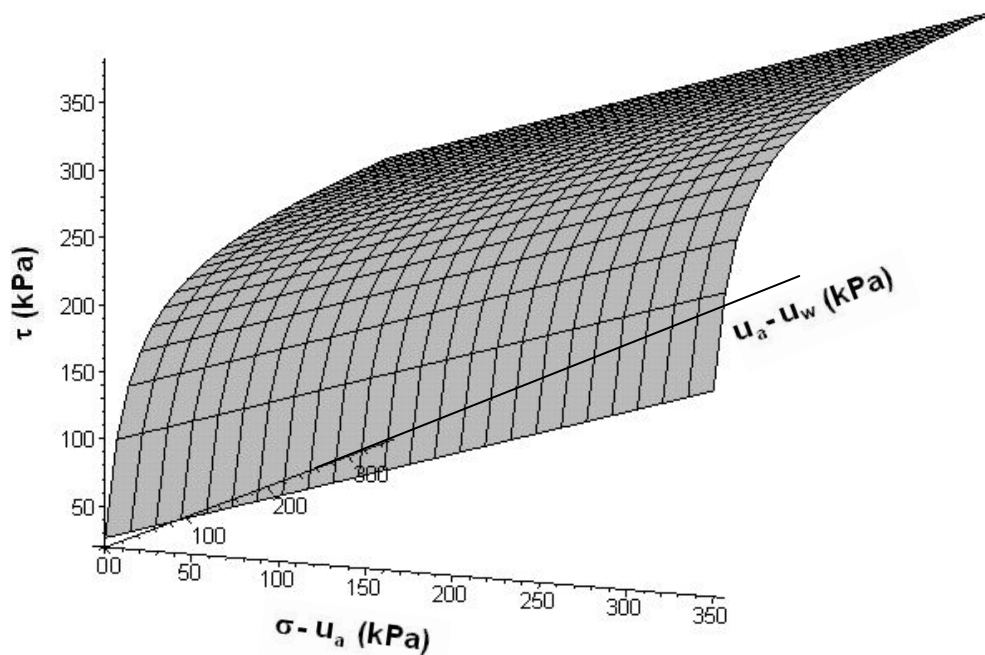


Figura 7.13 – Envoltória de Resistência Tridimensional.

7.4

Comparação dos resultados obtidos com estimativas indiretas da resistência ao cisalhamento através de formulações simplificadas

Alguns autores usam formulações simplificadas como uma alternativa para a avaliação indireta da resistência ao cisalhamento do solo na condição não saturada, visto que a determinação dos parâmetros de resistência nesta condição requer o uso de equipamentos e técnicas especiais de laboratório. A seguir estão apresentadas as quatro principais formulações simplificadas, empregadas na avaliação da resistência do solo não saturado.

A partir de conceitos da termodinâmica, Lytton (1995) sugeriu o uso do teor de umidade volumétrico para obter a resistência ao cisalhamento de um solo na condição não saturada através da equação a seguir.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) [\theta \tan \phi'] \quad (7.6)$$

Fredlund e al. (1996) sugerem o emprego do teor de umidade volumétrico normalizado em sua formulação. Assim a equação usada na estimativa da resistência ao cisalhamento é a seguinte:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w) [\Theta^k \operatorname{tg} \phi'] \quad (7.7)$$

onde k = parâmetro de ajuste; e Θ = teor de umidade volumétrico normalizado, $\Theta = \theta / \theta_s$.

Uma relação entre o parâmetro de ajuste κ e o índice de plasticidade obtida de resultados encontrados na literatura é apresentada na Figura 7.14. Esta relação foi proposta por Garven e Vanapalli em 2006. O valor do índice de plasticidade do solo estudado ($IP = 18,5$) está representado por uma linha vertical.

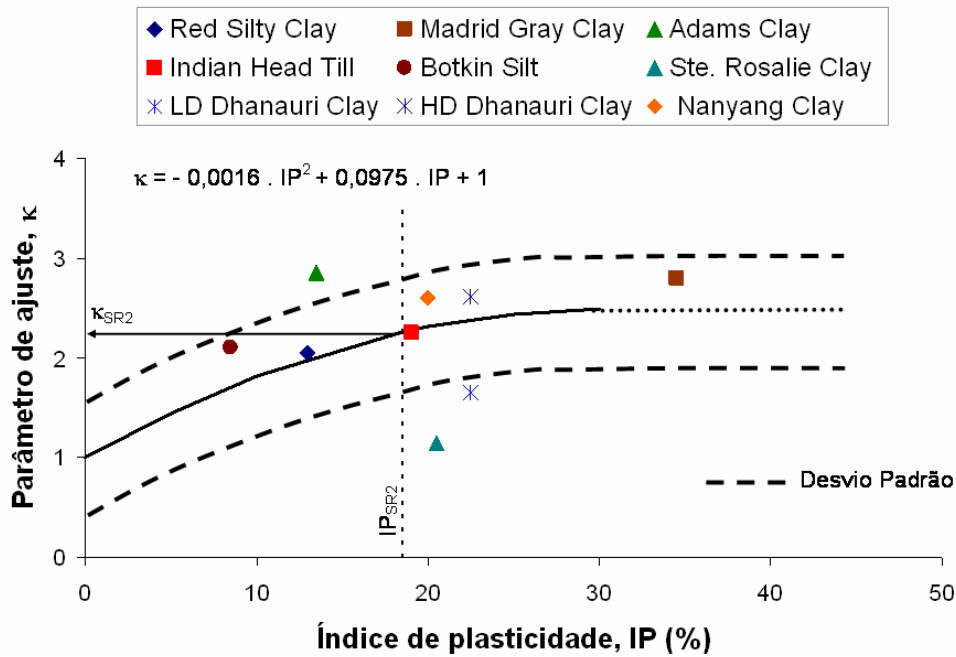


Figura 7.14: Relação entre o parâmetro de ajuste (κ) e o índice de plasticidade (IP) (adaptado de Garven e Vanapalli, 2006).

Baseados em conceitos procedentes da curva característica, Vanapalli *et al.* (1996) propõem a seguinte formulação simplificada (equação 7.8).

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w) \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \operatorname{tg} \phi' \right] \quad (7.8)$$

onde θ_s é o teor de umidade volumétrico do solo saturado; e θ_r = teor de umidade volumétrico do solo correspondente a condição de saturação residual.

A equação 7.9 representa a proposta de Öberg e Sallfors (1997) na tentativa de estimar a resistência ao cisalhamento de solos não argilosos.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) [S \tan \phi'] \quad (7.9)$$

Para os resultados obtidos na análise da resistência ao cisalhamento, foram obtidas curvas de acordo com as formulações anteriormente descritas. Foram utilizados os dados experimentais dos ensaios com tensão normal líquida igual a 50 kPa. Essas curvas estão mostradas na Figura 7.15. Usando a formulação de Fredlund *et al.* (1996), considerou-se o valor de $\kappa = 2,3$ de acordo com a relação apresentada na figura anterior.

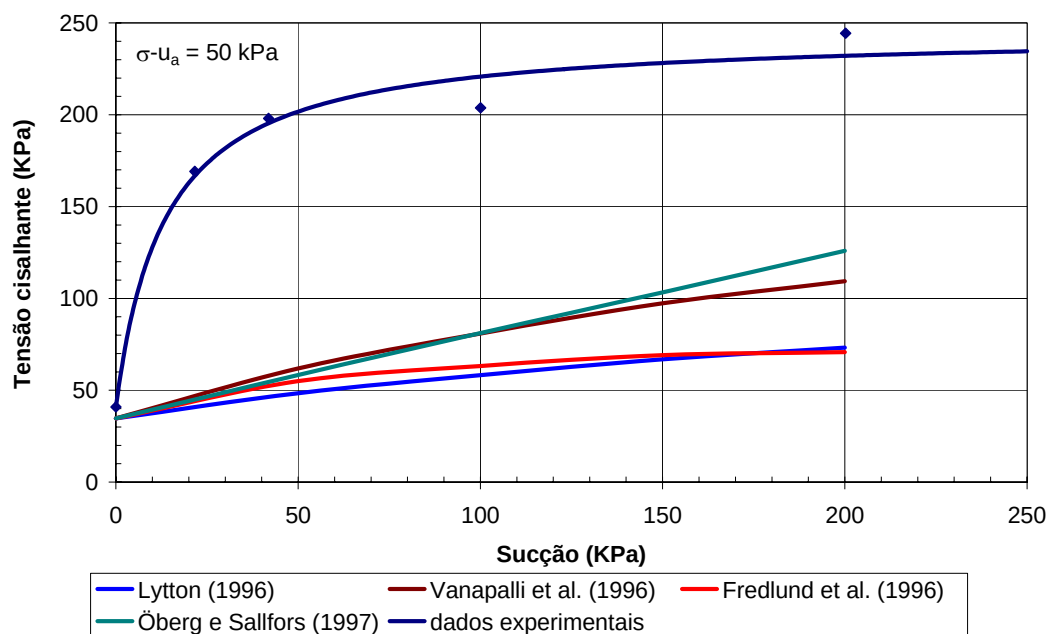


Figura 7.15 - Comparação da envoltória de resistência ao cisalhamento não saturada obtida experimentalmente e estimada.

Analisando as curvas, nota-se que nenhuma formulação conseguiu prever adequadamente o comportamento do solo estudado, obtendo-se estimativas muito conservadoras. Isso já era esperado, pois, elas se baseiam na idéia do parâmetro ϕ^b ser sempre menor ou no máximo igual a ϕ' , para o caso de sucções

abaixo do valor de entrada de ar, o que não se aplica no caso estudado (ver a Figura 7.12).

7.5

Comparação dos resultados obtidos com outros materiais encontrados na literatura

Neste tópico, buscou-se uma comparação dos resultados obtidos do solo residual com outros materiais, com características físicas, químicas e mineralógicas semelhantes, encontrados na literatura técnica. Contudo, resultados de ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada em solos residuais em seu estado indeformado são, ainda, muito escassos, principalmente, em materiais com as mesmas características do solo estudado.

Para esta comparação usou-se os dados dos estudos em solos residuais na condição indeformada de Fonseca, 1991 (Chapéu d'Uvas 1 e Chapéu d'Uvas 2), Delgado, 1993 (Vermelho e Típico), utilizando ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada. A diferença entre os solos de Chapéu d'Uvas 1 e 2 é a posição das xistosidades ao serem submetidas ao cisalhamento, enquanto o solo residual típico e vermelho da Vista Chinesa é a profundidade de amostragem.

Também foram utilizados os dados de Rahardjo *et al.* (1995) e Futai (2002) obtidos de um programa experimental de ensaios triaxiais. Ressalta-se que no caso dos ensaios triaxiais a tensão normal líquida é a de confinamento, enquanto no cisalhamento direto, esta é a tensão normal líquida vertical, no entanto, se chamará ambas de tensão normal líquida. Na Tabela 7.8, está apresentada uma breve caracterização física dos solos comparados. A rocha matriz e as características mineralógicas estão mostradas na Tabela 7.9.

Tabela 7.8 – Resumo das características físicas dos solos comparados.

Solo		Ped. (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL (%)	LP (%)	Gs
Residual de Belo Horizonte	Neste trabalho	0,40	8,00	81,00	10,60	49,10	30,60	2,80
Residual de Chapéu d'Uvas (Fonseca, 1991)	Chapéu d'Uvas 1	0,00	52,00	42,00	6,00	31,00	21,00	2,67
	Chapéu d'Uvas 2	0,00	52,00	42,00	6,00	31,00	21,00	2,67
Residual da Vista Chinesa (Delgado, 1993)	Vermelho*	9,22	60,01	6,46	24,42	50,65	32,21	2,79
	Típico*	8,38	71,76	12,17	7,69	30,27	NP	2,79
Residual de Singapura (Rahardjo <i>et al.</i> , 1995)	Singapura *	NC	NC	57,0 a 74,5		45	22,5	2,68
Residual de Ouro Preto (Futai, 2002)	Ouro Preto	0	44	9	46	57	28	2,64

* Valores médios; NC = Não Consta na referência.

Tabela 7.9 – Rocha matriz e composição mineralógica dos solos comparados.

Solo	Designação	Rocha Matriz	Mineralogia
Residual de Belo Horizonte	Neste trabalho	Filito	Quartzo, caulinita, mica/ilita
Residual de Chapéu d'Uvas (Fonseca, 1991)	Chapéu d'Uvas 1	Gnaiss Kinzigítico	NC
	Chapéu d'Uvas 2		
Residual da Vista Chinesa (Delgado, 1993)	Vermelho	Biotita-Gnaiss	caulinita, goetita e gibsita.
	Típico		
Residual de Singapura (Rahardjo <i>et al.</i> , 1995)	Ouro Preto	Gnaiss	quartzo, caulinita e mica/ilita.
Residual de Ouro Preto (Futai, 2002)	Singapura	Rocha da Formação Jurong	feldspato plagioclásio, quartzo, mica e caulinita.

NC = Não Consta na referência.

A Figura 7.15 apresenta as sete envoltórias de resistência com respeito à sucção mátrica para o nível de tensão normal líquida de aproximadamente 50 kPa. Notou-se que a resistência aumenta gradualmente com a sucção, com exceção do solo do presente trabalho.

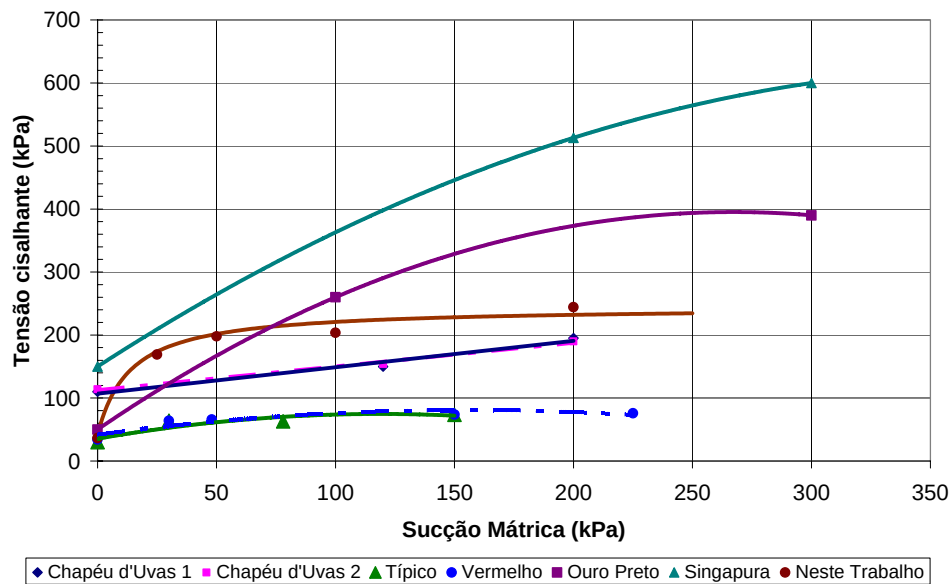


Figura 7.16 – Envoltória de resistência em função da sucção mátrica com $(\sigma - u_a) = 50$ kPa para 6 solos residuais.

Na Figura 7.17, está apresentada a variação de ϕ^b e na Figura 7.18, a variação da razão ϕ^b/ϕ' com a sucção mátrica. Na maioria dos solos, foi observado que os valores de ϕ^b diminuem com o aumento da sucção. Esses valores obtidos para o solo residual de filito foram bem maiores que os demais. Analisando a razão ϕ^b/ϕ' , notou-se que, no solo do presente trabalho, os valores de ϕ^b para valores de sucções entre 0 e 50 kPa foram muito maiores que ϕ' (aproximadamente 5 vezes maior), enquanto nos outros solos, essa razão aproximava-se de 1, indicando que para esses casos o valor de ϕ^b e ϕ' se aproximam.

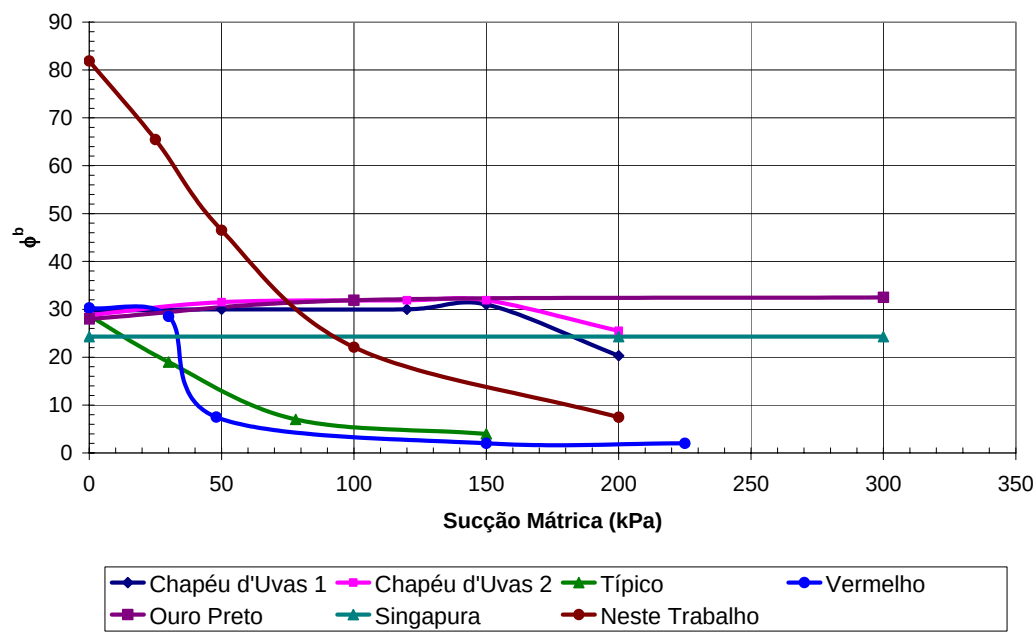


Figura 7.17 – Variação de ϕ^b com a sucção mátrica.

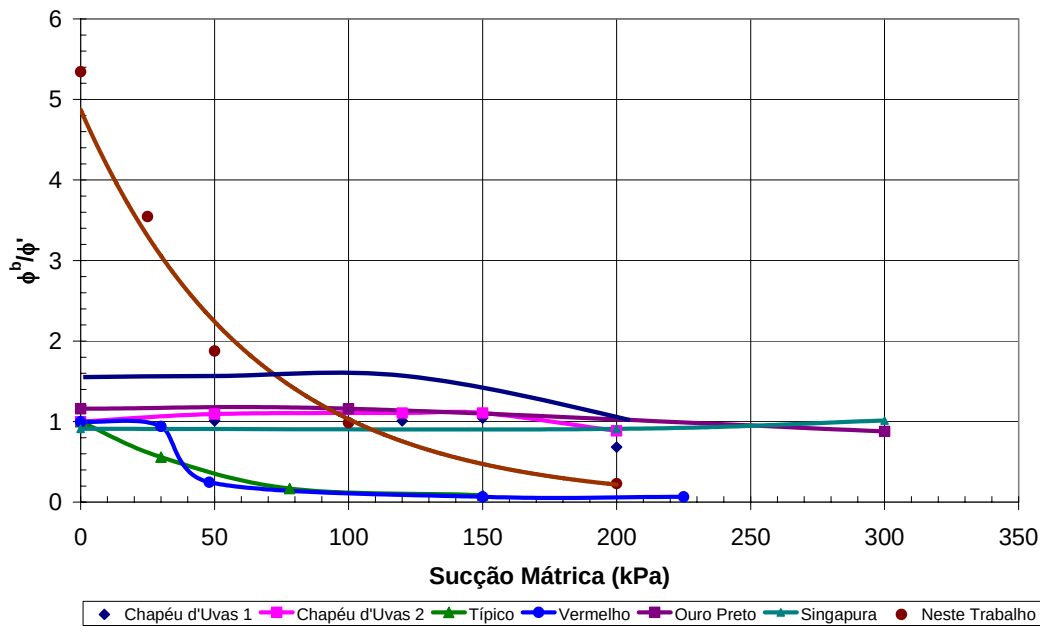


Figura 7.18 – Variação de ϕ^b/ϕ' com a sucção mátrica.

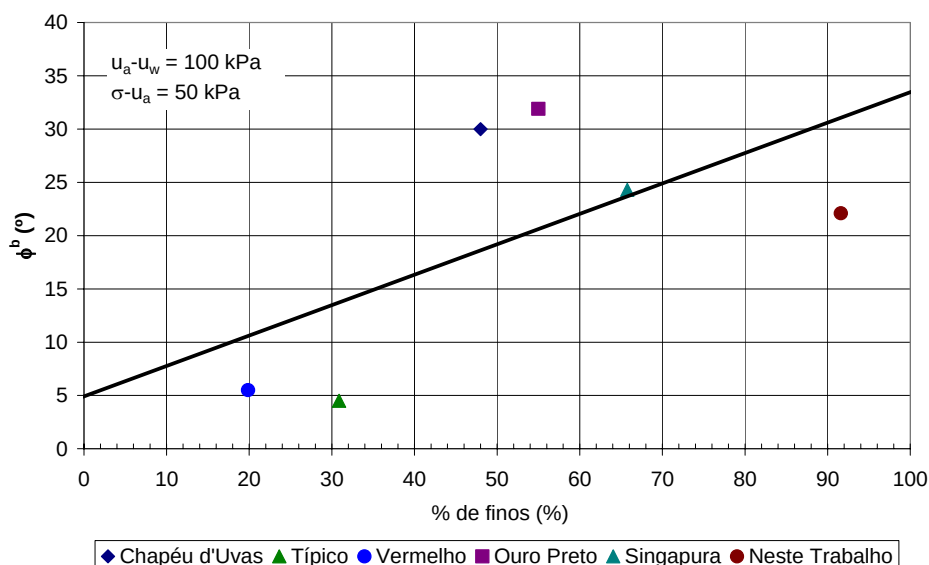


Figura 7.19 – Relação entre o valor de ϕ^b para a sucção de 100 kPa e a porcentagem de finos.

Notou-se que os dados estavam muito dispersos não obtendo uma relação satisfatória em nenhuma das tentativas. Optou-se então em relacionar o índice de plasticidade dos solos e o ângulo de atrito (Figura 7.20).

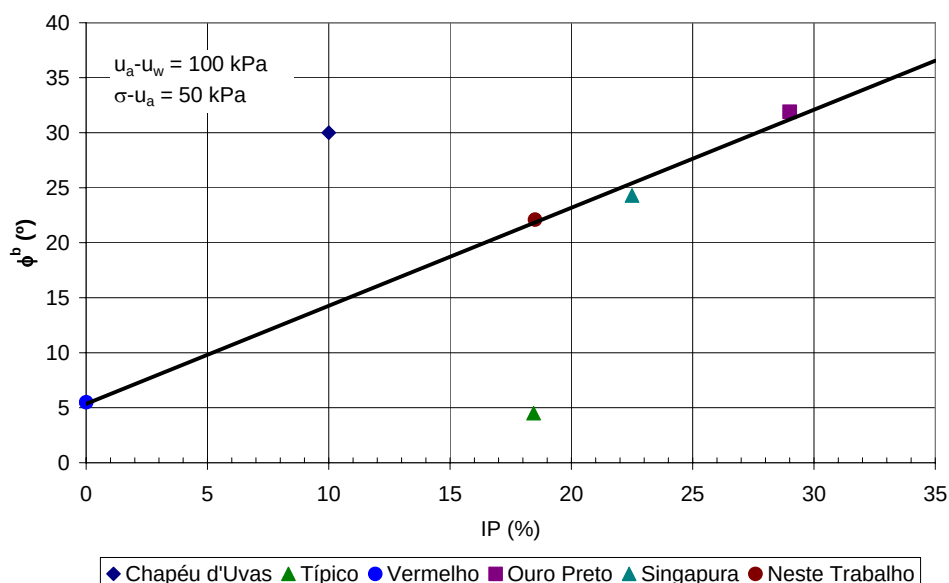


Figura 7.20 – Relação entre o valor de ϕ^b para a sucção de 100 kPa e índice de plasticidade (IP).

Neste caso, salvo os valores dos solos Chapéu d'Uvas e Residual Típico da Vista Chinesa, os outros pontos comparados encontram-se próximos de uma reta, como a sugerida na figura. Isso indica que, para as condições descritas anteriormente, o valor de ϕ^b aumenta linearmente com o valor de IP.