

7

Interpretação de Resultados

Neste capítulo primeiramente é apresentado o critério que foi adotado para a definição do ponto de ruptura, na análise dos resultados apresentados no capítulo anterior.

Em seguida são avaliados os resultados obtidos a partir da fase de adensamento, com o objetivo de determinar uma possível influência da sucção na compressibilidade dos materiais estudados.

Posteriormente, é analisada a resistência considerando a influência da sucção através dos resultados obtidos nas séries de ensaios de cisalhamento com sucção controlada, apresentando-se as envoltórias de resistência. Além disso, são determinados os parâmetros associados a estas envoltórias e como estes são influenciados pela sucção mátrica. São apresentadas, também, as equações que descrevem o comportamento não saturado de ambos os solos.

Finalmente as envoltórias obtidas são comparadas com aquelas obtidas depois dos ciclos de umedecimento e secagem, visando verificação da sua influência na resistência dos solos estudados.

7.1.

Critério de definição de ruptura utilizado

Devido a um acréscimo da resistência com o incremento do deslocamento horizontal, como foi confirmado nos resultados obtidos dos ensaios, de Campos e Carrillo (1995) estabeleceram como ponto de ruptura, o ponto em que a curva tensão – deslocamento atinge uma inclinação constante. Definidos os pontos em cada curva para a condição saturada e não saturada, traçaram-se as envoltórias de resistência. Como é mostrado na figura 7.1.

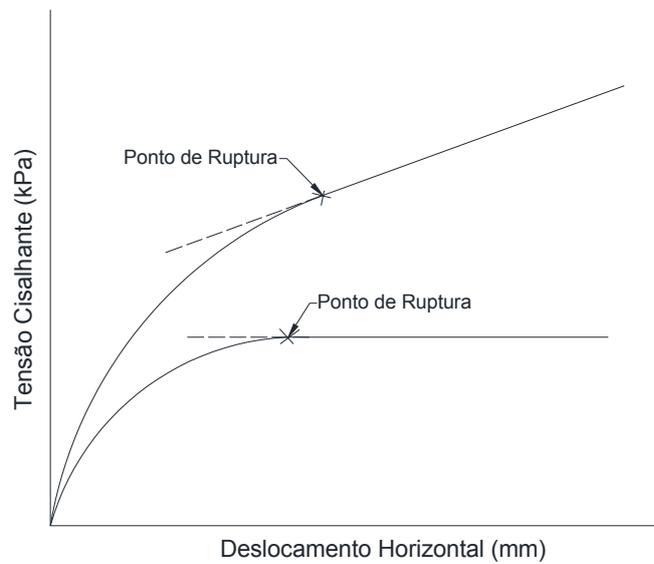


Figura 7.1 – Critério de definição dos pontos de ruptura.

7.2. Compressibilidade dos Materiais

7.2.1. Amostras Submersas

Visando representar a compressibilidade do material, na condição submersa, foi plotada a variação do índice de vazios dos corpos de prova que foram obtidos no final da fase de adensamento versus a tensão normal aplicada.

Como são mostrados nas figuras 7.2 e 7.3, ambos os solos apresentam um acréscimo da variação dos índices de vazios conforme aumenta a tensão normal líquida.

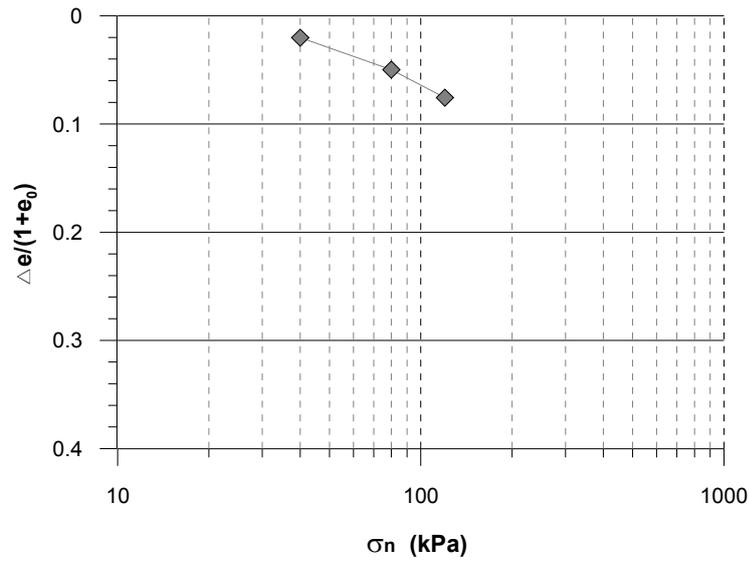


Figura 7.2 – Curva de compressibilidade em função da tensão normal na condição submersa, para o solo Residual jovem.

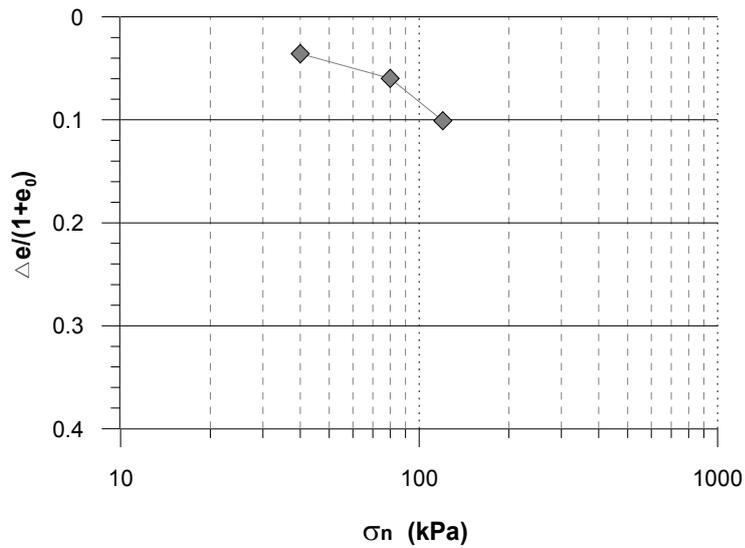


Figura 7.3 – Curva de compressibilidade em função da tensão normal na condição submersa, para o Colúvio.

7.2.2. Amostras Não-Saturadas

No caso das amostras na condição não saturada, avaliou-se uma possível influência da sucção na compressibilidade dos materiais estudados. Para isso foi plotado a variação dos índices de vazios versus a tensão normal líquida, para cada uma das séries executadas, nos dois solos, como se apresenta nas figuras 7.4 e 7.5.

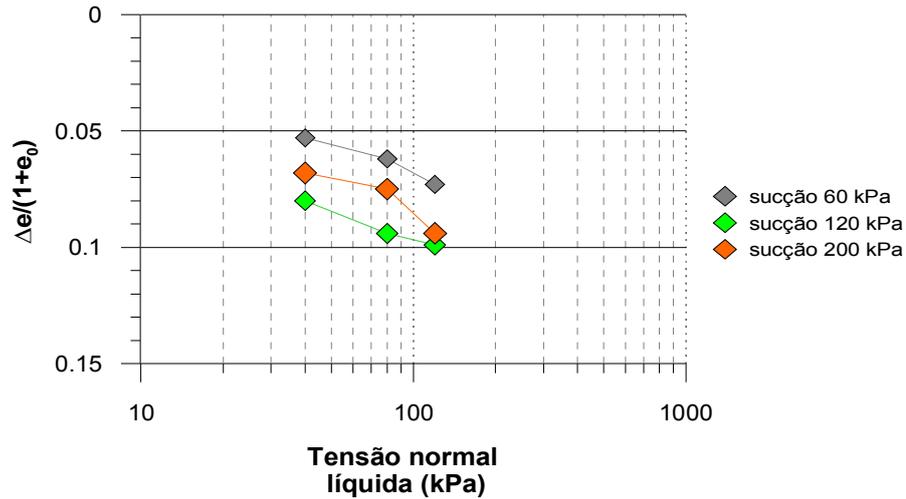


Figura 7.4 – Variação do índice de vazios com a tensão normal líquida para o solo Residual Jovem.

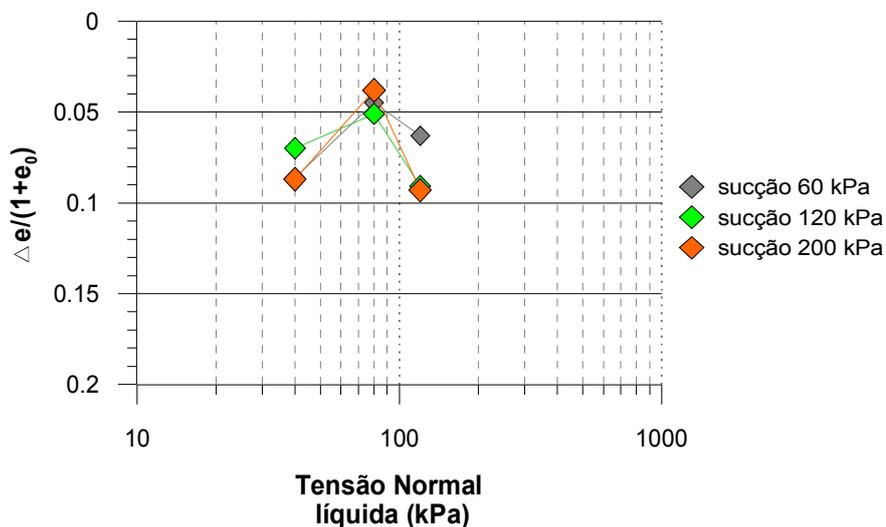


Figura 7.5 – Variação do índice de vazios com a tensão normal líquida para o Colúvio.

A partir dos gráficos, percebe-se que o Residual Jovem apresenta uma clara influência da tensão líquida na sua compressibilidade, notando um ligeiro acréscimo na variação dos índices de vazios com um aumento da tensão normal.

Porém, para o Colúvio, este comportamento não é bem definido, mostrando assim uma diminuição e posterior acréscimo na variação dos índices de vazios com um aumento da tensão normal.

7.3. Resistência ao Cisalhamento

7.3.1. Resistência ao Cisalhamento na Condição Submersa

Baseado no critério de ruptura descrito anteriormente é apresentado nas tabelas 7.1 e 7.2 os pares de tensões obtidos no momento da ruptura.

Série	Ensaio	T_r (kPa)	$(\sigma)_r$ (kPa)	δ_{hr} (mm)
I	CD1	18,54	42,78	6,50
	CD2	59,75	87,69	8,77
	CD3	79,36	128,77	6,82

Tabela 7.1 – Tensão cisalhante, tensão normal e deslocamento horizontal na ruptura para o solo Residual jovem.

Série	Ensaio	T_r (kPa)	$(\sigma)_r$ (kPa)	δ_{hr} (mm)
I	CD 1	27,62	42,37	5,60
	CD 2	42,22	87,10	7,00
	CD 3	79,16	128,57	6,67

Tabela 7.2 – Tensão cisalhante, tensão normal e deslocamento horizontal na ruptura para o Colúvio.

Com os pontos encontrados foram traçadas as envoltórias de resistência e, a partir de um ajuste linear foram obtidos os parâmetros de resistência. Como é apresentado nas figuras 7.6 e 7.7 para ambos os solos.

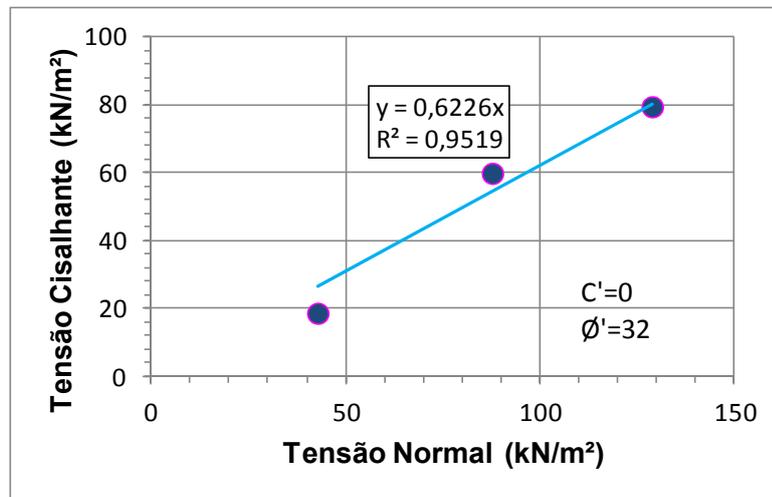


Figura 7.6 – Envoltória de resistência de amostras submersas do solo Residual Jovem.

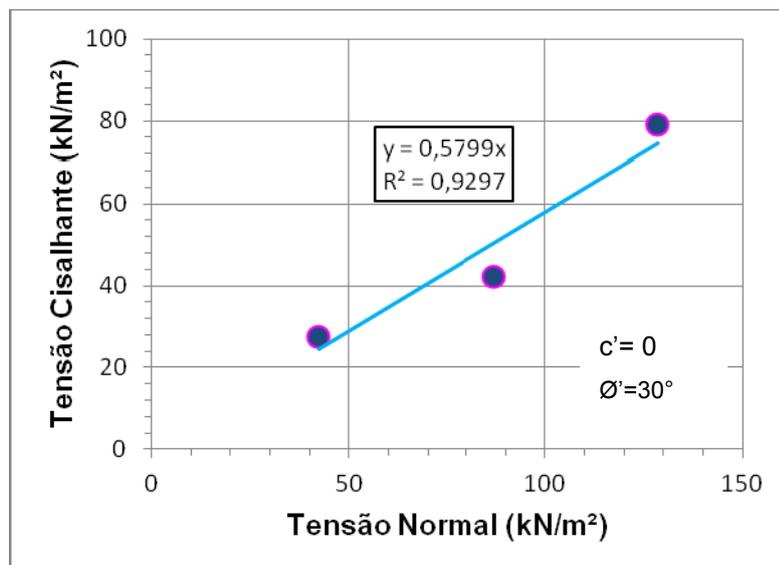


Figura 7.7 – Envoltória de resistência de amostras submersas do Colúvio.

Analisando as envoltórias obtidas, pode-se observar que o solo Residual Jovem e o Colúvio apresentam o mesmo intercepto coesivo c' , mas com diferentes ângulos de atrito ϕ' , sendo que o solo Residual Jovem tem o maior ângulo de atrito $\phi' = 32^\circ$. Tal aspecto é compatível com o fato deste material apresentar menor teor de finos.

Portanto, é o solo Residual Jovem que apresenta a maior resistência na condição submersa.

7.3.2.

Resistencia ao Cisalhamento na Condição Não saturada

As tabelas 7.3 e 7.4 apresentam os pares de tensão cisalhante (T_r) e tensão normal líquida ($(\sigma_r - u_a)_r$), obtidos nos pontos de ruptura no solo Residual Jovem e Colúvio respectivamente, para os ensaios na condição não saturada.

Série	Ensaio	Tensão Normal líquida (kPa)	Sucção Mátrica (kPa)	T_r (kPa)	$(\sigma - u_a)_r$ (kPa)	δ_{hr} (mm)
I	CDSC 1	40	60	91,27	41,79	4,28
	CDSC 2	40	120	106,65	82,22	4,72
	CDSC 3	40	200	123,51	127,05	5,70
II	CDSC 4	80	60	151,86	41,98	2,72
	CDSC 5	80	120	169,73	82,47	3,00
	CDSC 6	80	200	190,51	125,76	4,47
III	CDSC 7	120	60	181,16	42,25	6,70
	CDSC 8	120	120	212,50	83,21	4,58
	CDSC 9	120	200	238,83	127,70	5,71

Tabela 7.3 – Tensão cisalhante, tensão normal líquida, sucção mátrica e deslocamento horizontal na ruptura para o solo Residual Jovem.

Série	Ensaio	Tensão Normal líquida (kPa)	Sucção Mátrica (kPa)	T_r (kPa)	$(\sigma - u_a)_r$ (kPa)	δ_{hr} (mm)
I	CDSC 1	40	60	100,90	41,32	3,20
	CDSC 2	40	120	153,89	41,50	3,61
	CDSC 3	40	200	186,93	41,94	5,24
II	CDSC 4	80	60	119,20	84,45	5,28
	CDSC 5	80	120	185,05	84,43	5,25
	CDSC 6	80	200	229,31	85,13	5,70
III	CDSC 7	120	60	152,84	125,47	4,89
	CDSC 8	120	120	229,10	126,23	4,94
	CDSC 9	120	200	247,17	125,57	4,43

Tabela 7.4 – Tensão cisalhante, tensão normal líquida, sucção mátrica e deslocamento horizontal na ruptura para o solo Colúvio.

Com os pontos obtidos plotaram-se as envoltórias de resistência com relação à sucção ($u_a - u_w$) de cada série descrita, para o solo Residual Jovem e o Colúvio respectivamente as quais são apresentadas nas figuras 7.8 e 7.9.

Analisando as envoltórias foi possível observar que em todos os solos a relação entre a resistência ao cisalhamento na condição não saturada e a sucção mátrica é não linear. Para descrever melhor este comportamento, os pontos experimentais foram ajustados a uma função hiperbólica expressa na equação 7.1. Inicialmente proposta por Orenco Monje.

As tabelas 7.5 e 7.6 apresentam as equações utilizadas para o ajuste hiperbólico.

Tabela 7.5 – Equações de ajuste Hiperbólico para o solo Residual Jovem.

Tensão Normal Líquida (kPa)	Função Hiperbólica	R ²
60	$\tau=18,54+(u_a-u_w)/((0,577+0,0031(u_a-u_w))$	0,994
120	$\tau=59,75+(u_a-u_w)/((1,011+0,0014(u_a-u_w))$	0,990
200	$\tau=79,36+(u_a-u_w)/((1,077+0,0008(u_a-u_w))$	0,989

Tabela 7.6 – Equações de ajuste Hiperbólico para o Colúvio.

Tensão Normal Líquida (kPa)	Função Hiperbólica	R ²
60	$\tau=27,62+(u_a-u_w)/((0,591+0,0033(u_a-u_w))$	0,998
120	$\tau=42,22+(u_a-u_w)/((0,599+0,00229(u_a-u_w))$	0,997
200	$\tau=79,16+(u_a-u_w)/((0,519+0,0031(u_a-u_w))$	0,977

Cabe ressaltar que no caso do solo Residual jovem notou-se uma perda da não linearidade com o aumento da tensão normal líquida, ou seja, as envoltórias foram se tornando mais lineares conforme a tensão normal líquida incrementava.

$$\tau = \tau_o + \frac{(u_a - u_w)}{[a + b(u_a - u_w)]} \quad (7.1)$$

Onde:

$(\mu_a - \mu_w)$ = sucção mátrica

T = tensão cisalhante para um determinado valor de sucção

T_o = tensão cisalhante na condição submersa.

a, b = parâmetros da função hiperbólica (obtidos por mínimos quadrados)

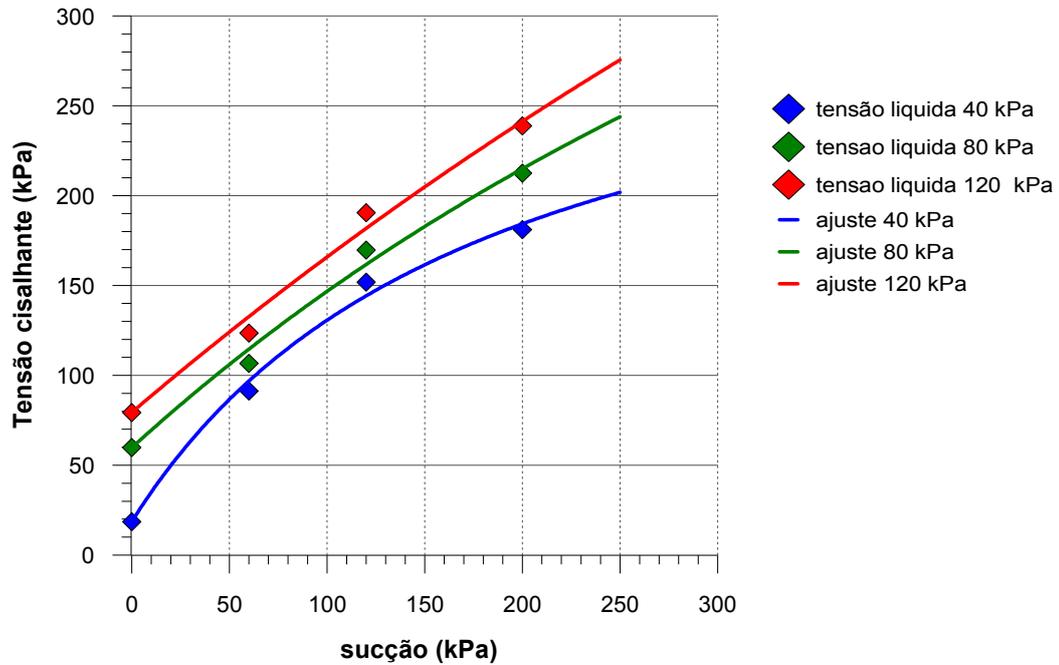


Figura 7.8 – Envoltória de resistência não saturada no plano Tensão Cisalhante vs. sucção mátrica do solo Residual jovem.

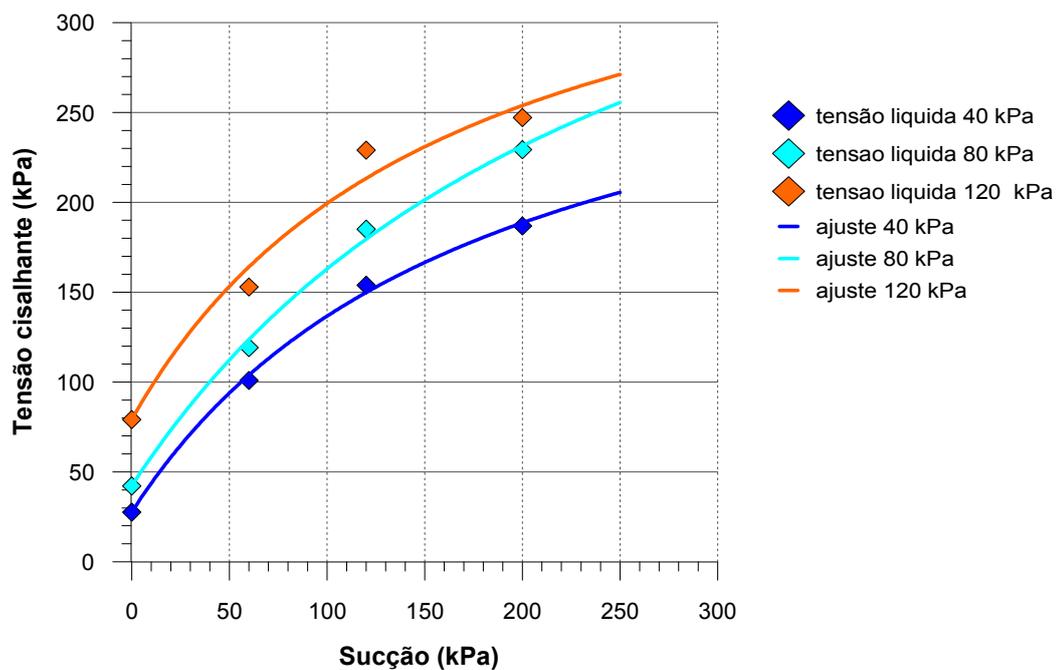


Figura 7.9 – Envoltória de resistência não saturada no plano Tensão Cisalhante vs. sucção mátrica do Colúvio.

Além de apresentar um claro acréscimo de resistência ao cisalhamento com o aumento da sucção em todos os solos, percebeu-se que o ângulo ϕ^b apresenta valores maiores que ϕ' para sucções abaixo de 200 kPa, o que difere da literatura e observações feitas por Escario & Sáez (1986) e Fredlund et al. (1987), os quais propõem que para sucções baixas o valor de ϕ^b deve ser próximo a ϕ' . Valores de ϕ^b maiores foram observados em trabalhos realizados por Teixeira & Vilar (1997), Soares (2005) e Lopes (2006).

São apresentadas nas figuras 7.10 e 7.11 as envoltórias de resistência em função da tensão líquida ($\sigma - u_a$).

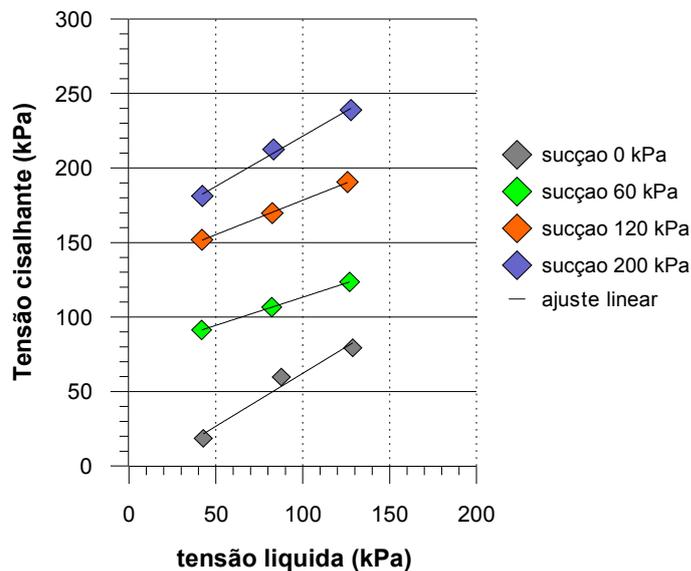


Figura 7.10 – Envoltória de resistência não saturada no plano Tensão Cisalhante vs. Tensão Normal Líquida do solo Residual jovem.

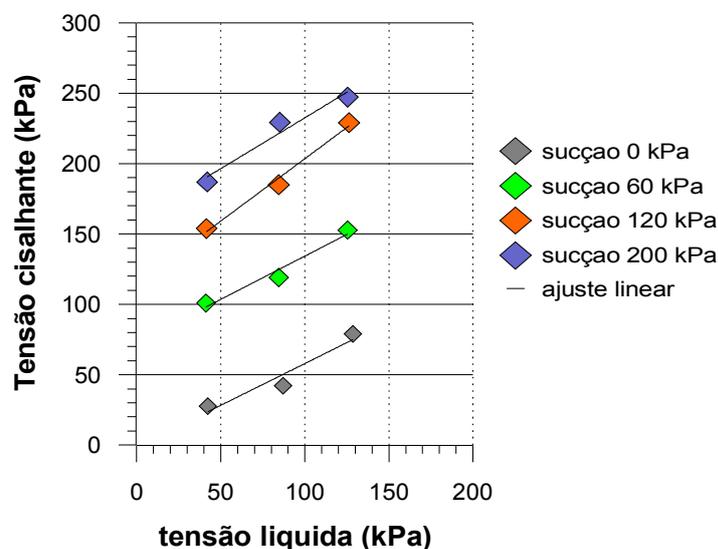


Figura 7.11 – Envoltória de resistência não saturada no plano Tensão Cisalhante vs. Tensão Normal Líquida do solo Colúvio.

Das envoltórias mostradas, verifica-se que a resistência ao cisalhamento na condição não saturada aumenta tanto com o acréscimo de sucção quanto com o acréscimo da tensão normal líquida.

As tabelas 7.7 e 7.8 apresentam os parâmetros da envoltória obtidos no plano da tensão cisalhante versus tensão normal líquida.

Tabela 7.7 – Parâmetros de resistência no plano da Tensão normal líquida para o solo Residual Jovem.

$(u_a - u_w)$ (kPa)	C_{aparente} (kPa)	$\phi'(^{\circ})$	R^2
0	0,0	32,0	0,952
60	75,5	20,7	1,000
120	132,2	24,8	0,999
200	154,0	34,0	0,994

Tabela 7.8 – Parâmetros de resistência no plano da Tensão normal líquida para o Colúvio.

$(\mu_a - \mu_w)$ (kPa)	C_{aparente} (kPa)	$\phi'(^{\circ})$	R^2
0	0,0	30,0	0,9297
60	72,8	31,6	0,966
120	114,8	41,5	0,988
200	160,2	35,9	0,930

O ganho de resistência na envoltória tensão cisalhante vs. tensão normal líquida para diferentes níveis de sucção pode ser representado pelo incremento da coesão aparente. As figuras 7.12 e 7.13 apresentam este incremento com relação à sucção mátrica, e seu ajuste a uma função hiperbólica é descrito pelas equações 7.2 e 7.3 para os dois materiais estudados.

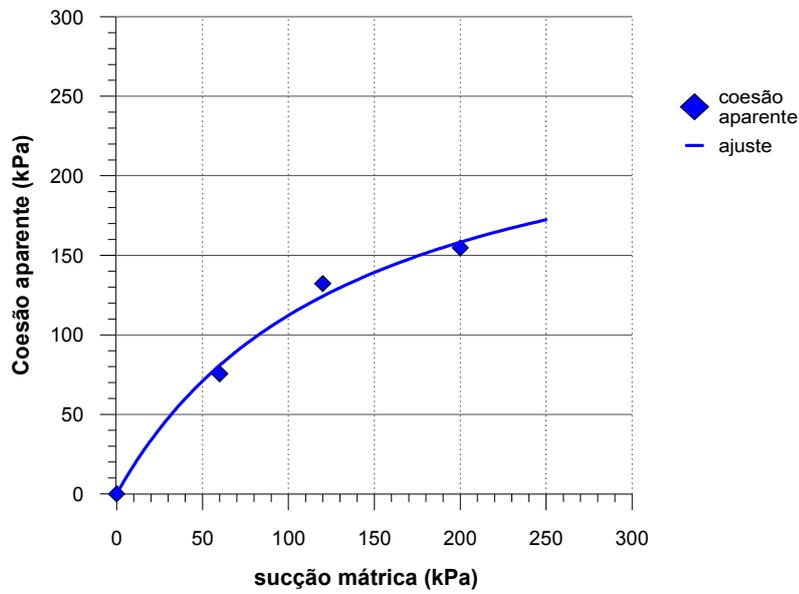


Figura 7.12 – Variação da coesão aparente com relação à sucção mátrica para o solo Residual jovem.

$$C_{\text{aparente}} = \frac{(u_a - u_w)}{0,694 + 0,0027(u_a - u_w)} \quad (7.2)$$

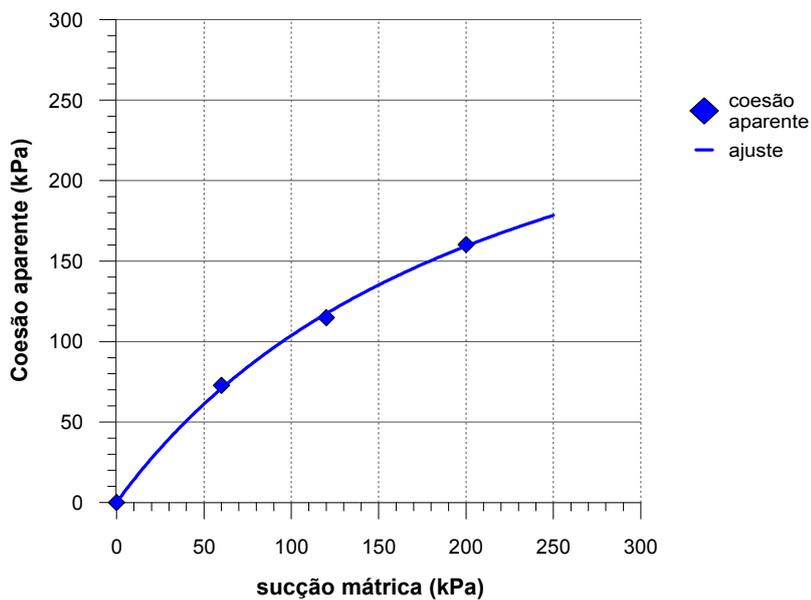


Figura 7.13 – Variação da coesão aparente com relação à sucção mátrica para o solo Colúvio.

$$C_{\text{aparente}} = \frac{(u_a - u_w)}{0,672 + 0,0029(u_a - u_w)} \quad (7.3)$$

As figuras 7.14 e 7.15 mostram a influência da sucção mátrica no ângulo de atrito ϕ' e o ângulo ϕ^b . Analisando estas figuras, percebe-se que a influência da sucção mátrica no ângulo de atrito não é bem definida pelo fato que os pontos obtidos encontram-se dispersos. Por outro lado no caso do ângulo ϕ^b , ambos os solos mostram claramente uma diminuição deste com o aumento da sucção mátrica. Porém cabe ressaltar que esta diminuição no solo residual é mais pronunciada que no Colúvio. Este mesmo comportamento foi encontrado nos materiais avaliados por Carrillo (1993), Soares (2004) e Lopes (2006).

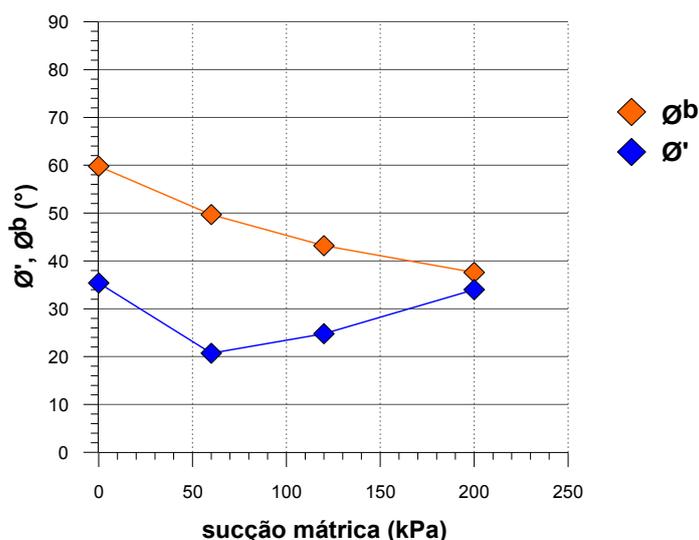


Figura 7.14 – Variação de ϕ' e ϕ^b com relação à sucção mátrica para o solo Residual Jovem.

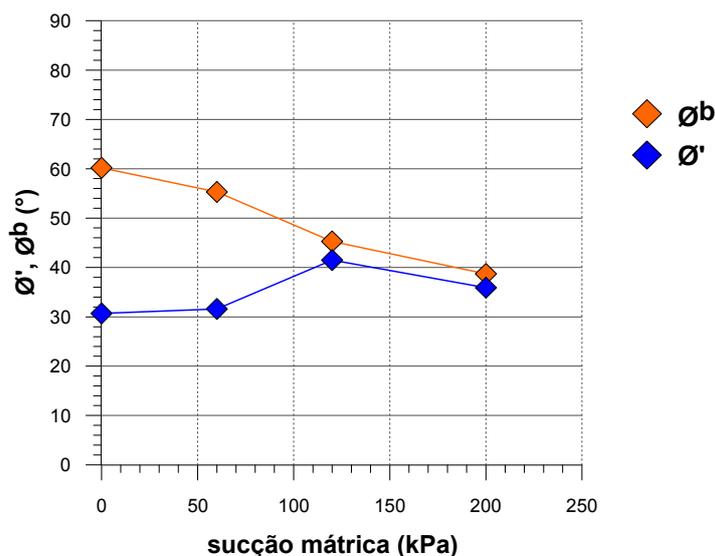


Figura 7.15 – Variação de ϕ' e ϕ^b com relação à sucção mátrica para o Colúvio.

Finalmente as equações 7.4 e 7.5 definem a envoltória de resistência em função das duas variáveis de estado, sucção mátrica ($u_a - u_w$) e tensão normal líquida ($\sigma - u_a$). Considerando um ângulo de atrito médio de $27,9^\circ$ e $34,8^\circ$ na equação para o solo Residual jovem e Colúvio, respectivamente; plotaram-se as envoltórias tridimensionais apresentada nas figuras 7.16 e 7.17.

$$T = (\sigma - u_a) \operatorname{tg}(27,9^\circ) + \frac{(u_a - u_w)}{0,694 + 0,0027(u_a - u_w)} \quad (7.4)$$

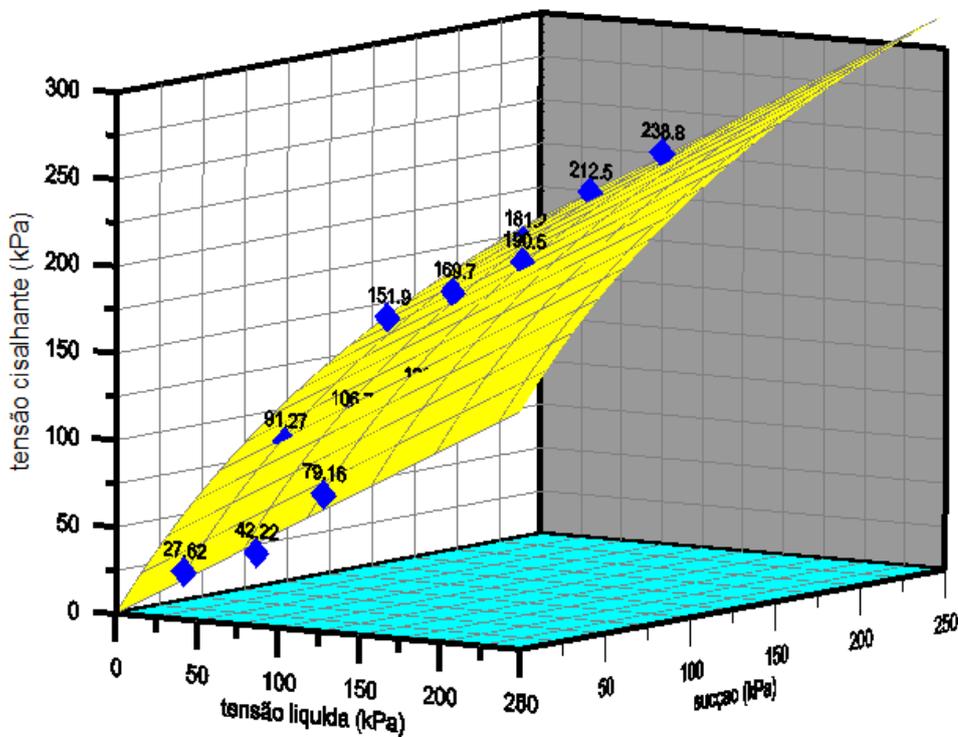


Figura 7.16 – Envoltória Tridimensional de Resistência para o solo Residual jovem.

$$T = (\sigma - u_a) \operatorname{tg}(34,8^\circ) + \frac{(u_a - u_w)}{0,672 + 0,0029(u_a - u_w)} \quad (7.5)$$

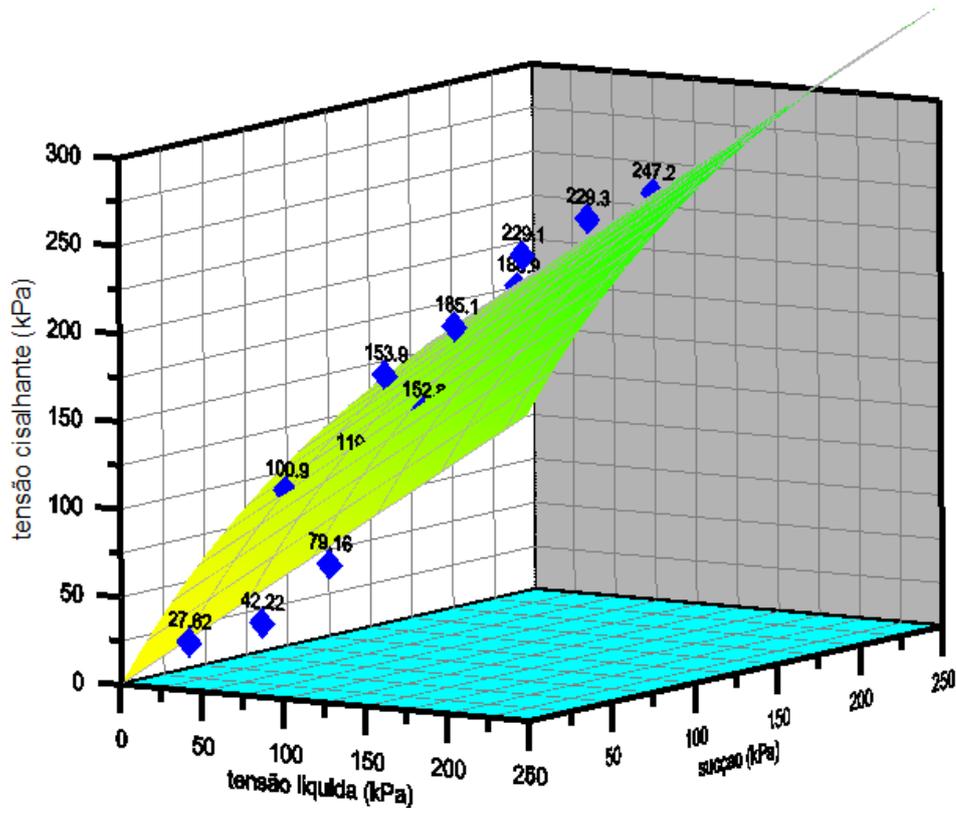


Figura 7.17 – Envoltória Tridimensional de Resistência para o Colúvio.

7.3.3.

Comparação dos Resultados Obtidos com Estimativas Indiretas da Resistência ao Cisalhamento Através de Formulações Simplificadas

As figuras 7.18 e 7.19 mostram a comparação entre a envoltória obtida experimentalmente neste trabalho e as envoltórias obtidas através das quatro formulações descritas no capítulo 2 para os dois solos estudados.

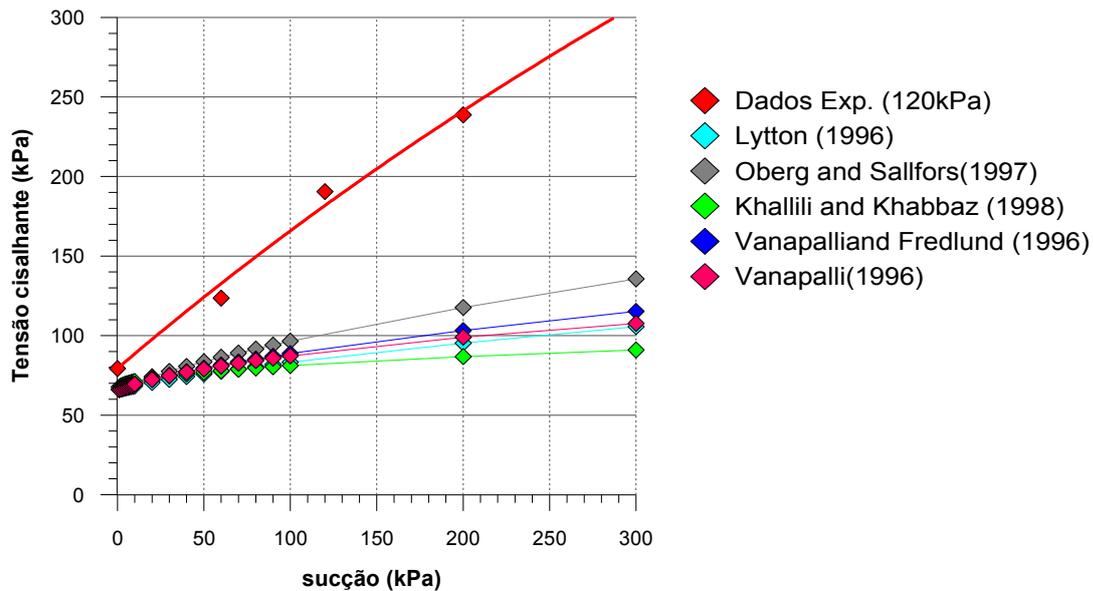


Figura 7.18 – Comparação das envoltórias obtidas com as formulações propostas pelos autores com a envoltória obtida experimentalmente para o solo Residual jovem.

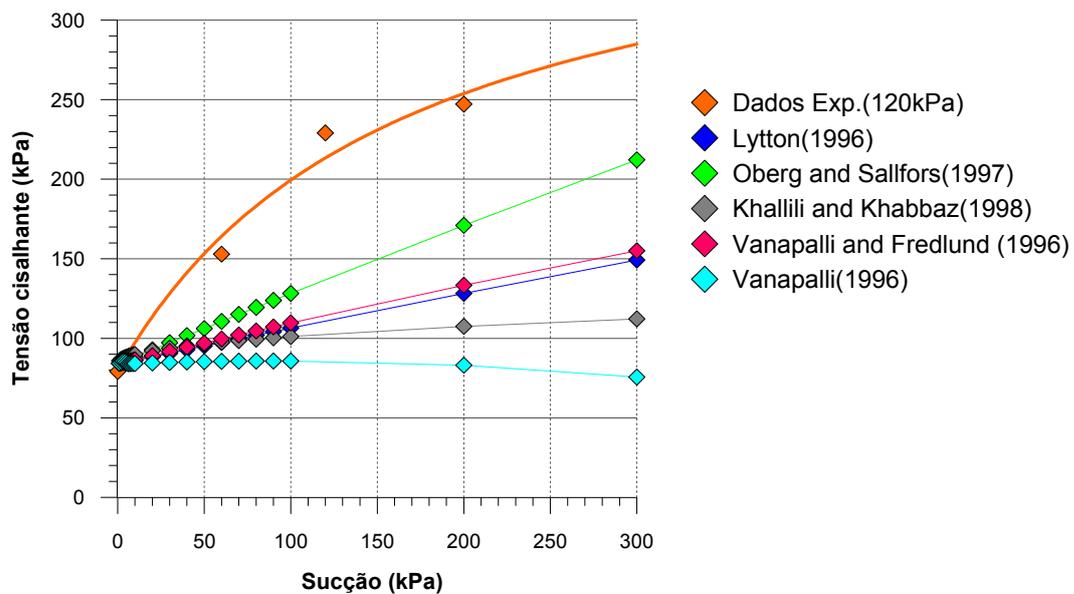


Figura 7.19 – Comparação das envoltórias obtidas com as formulações propostas pelos autores com a envoltória obtida experimentalmente para o Colúvio.

Analisando as curvas, percebe-se claramente que as cinco formulações forneceram estimativas de resistência ao cisalhamento muito mais baixas que as obtidas experimentalmente, sendo as respostas muito conservadoras.

Isto era de se esperar já que todas as formulações têm como consideração que o parâmetro ϕ^b é sempre menor ou no máximo igual a ϕ' .

O mesmo resultado foi verificado por Soares (2005) e Lopes (2006).

7.3.4.

Comparação dos Resultados Obtidos com outros materiais encontrados na literatura

Como forma de avaliar os resultados obtidos, foi realizada uma comparação com resultados obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada realizados em materiais de características similares em amostras indeformadas.

Para fins de comparação, foi utilizado resultados de publicações anteriores, com ensaios realizados em solos Residuais e Colúvios.

Esses dados foram retirados dos trabalhos de Delgado (1993), Soares (2005) e Lopes (2006). As tabelas 7.9 e 7.10 apresentam de forma resumida as características físicas dos materiais escolhidos para a comparação.

Solo	Areia (%)			Silte (%)	Argila (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	G_s	e
	Grossa	Media	Fina							
Colúvio PUC (Soares, 2005)	9,2	16,3	14,6	5,5	53,5	54,0	27,8	26,2	2,73	0,90-0,96
Colúvio Amarelo V.Chinesa (Carrillo, 1993)	13,7	19,4	17,1	4,7	43,9	47,2	21,3	25,9	2,77	1,14-1,26
Colúvio Vermelho V.Chinesa (Carrillo, 1993)	16,5	12,8	15,1	6,0	42,8	62,0	43,4	18,6	2,75	1,02-1,10
Colúvio Tinguá	24,6	14,2	7,7	10,1	40,5	64,5	35,9	28,6	2,66	0,97-1,19

Tabela 7.9 – Resumo das características físicas dos 4 Colúvios considerados.

Dos quatro Colúvios, todos de forma geral apresentam características similares, exceto o Colúvio Vermelho da Vista Chinesa que apresenta um baixo índice de plasticidade com relação aos outros, mas se espera que essa diferença não seja significativa.

Solo	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	G _s
Residual Belo Horizonte (Bernadete, 2006).	8,0	81,0	10,60	49,10	30,60	18,5	2,80
Residual da vista Chinesa Vermelho (Carrillo, 1993).	60,0	6,46	24,42	50,65	32,21	18,44	2,79
Residual de Tinguá, RJ.	63,5	29,8	6,6	--	--	--	2,76

Tabela 7.10 – Resumo das características físicas dos 3 Solos Residuais considerados.

Dos três solos residuais escolhidos, o solo Residual de Belo Horizonte apresenta a menor fração de areia na granulometria, e o Residual da vista chinesa possui um maior conteúdo da fração argila com relação aos outros materiais.

Nas figuras 7.20 e 7.21 são apresentadas as envoltórias de resistência com relação à sucção para os quatro solos residuais e quatro solos Colúvio escolhidos, respectivamente. Todas as envoltórias foram obtidas considerando uma tensão normal líquida ($\sigma - u_a$), em torno de 50 kPa.

Analisando as figuras 7.20 e 7.21, para a tensão normal líquida escolhida, todos os materiais apresentam um comportamento não linear e um acréscimo do ângulo ϕ^b significativo na faixa de sucções de 0 a 150 kPa.

Das figuras 7.22 e 7.23 observou-se que para todos os materiais, o ângulo ϕ^b diminui com o aumento da sucção.

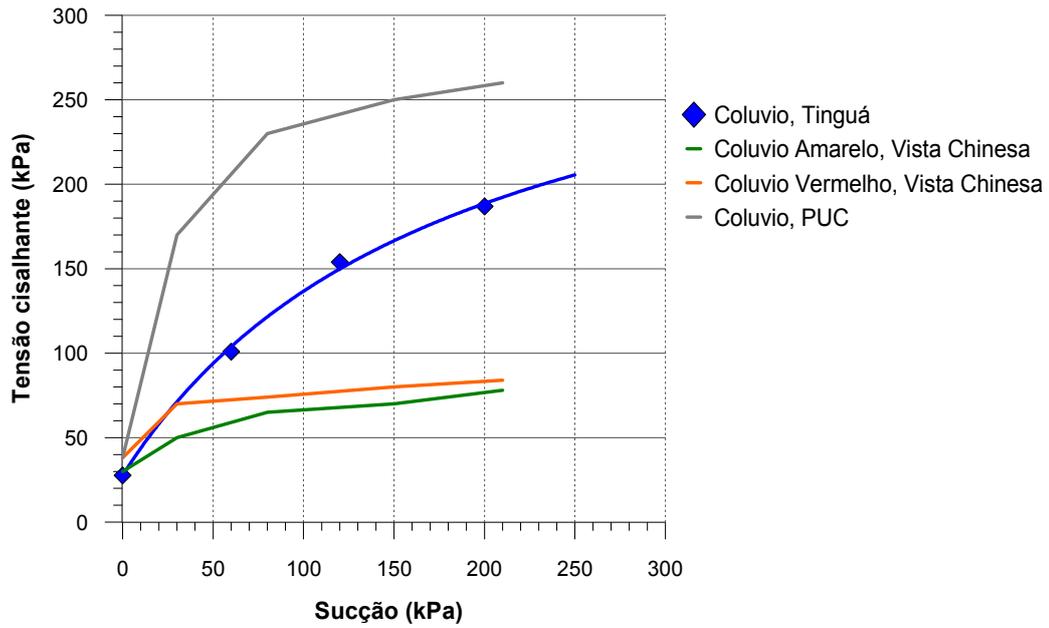


Figura 7.20 – Comparação das envoltórias de resistência para todos os solos Coluvionares.

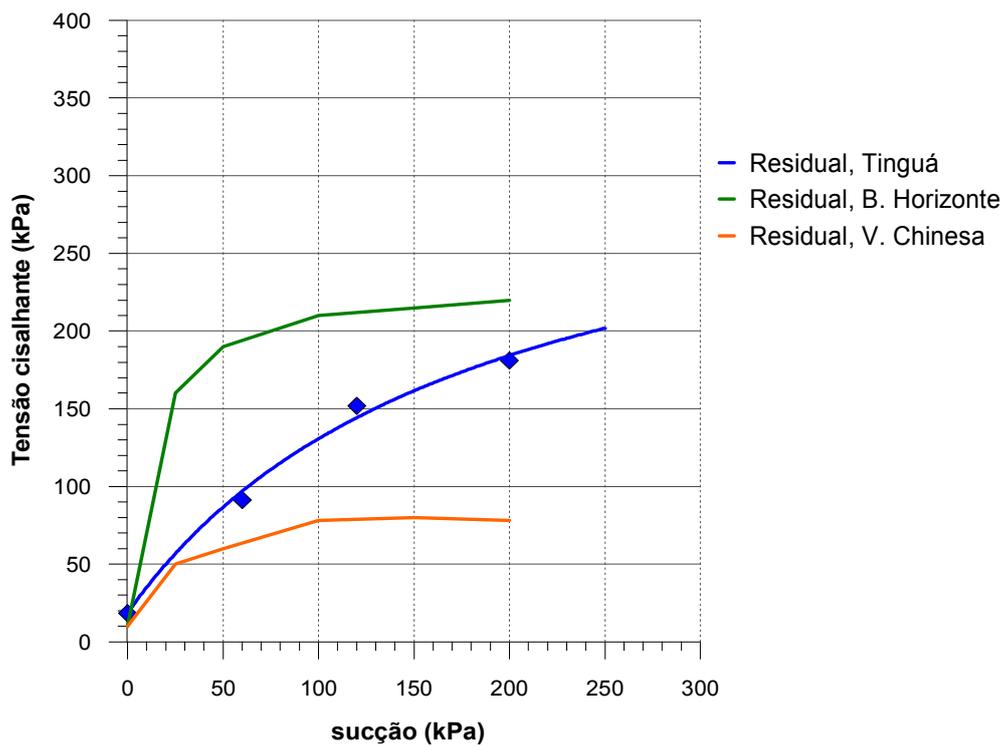


Figura 7.21 – Comparação das envoltórias de resistência para todos os solos residuais.

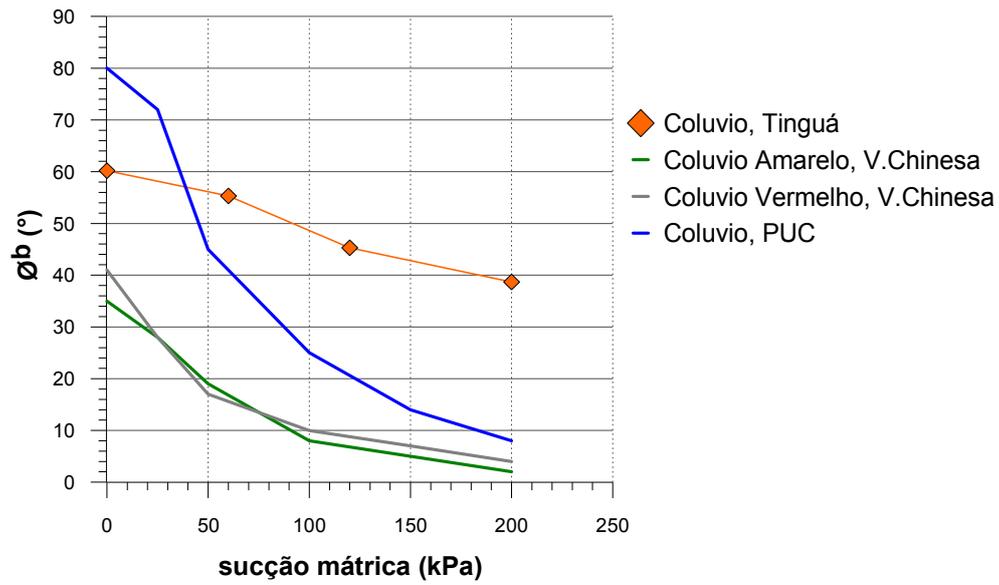


Figura 7.22 – Comparação das Variações de ϕ^b com a sucção para todos os solos Coluvionares.

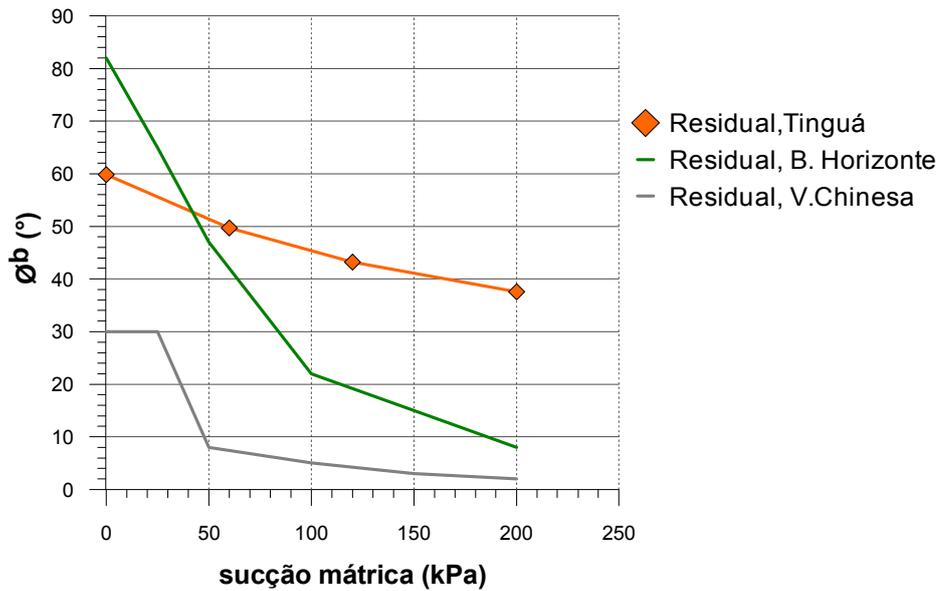


Figura 7.23 – Comparação das Variações de ϕ^b com a sucção para todos os solos Residuais.

7.3.5. Influência dos Ciclos de Umedecimento e Secagem na Resistência ao Cisalhamento.

Baseados nos resultados apresentados no capítulo anterior apresenta-se neste item uma discussão da influência ou não dos processos de umedecimento e secagem na resistência dos solos estudados.

7.3.6. Secagem após a Saturação

Os ensaios do ciclo I tentaram simular o efeito da secagem após a saturação na resistência ao cisalhamento, em ambos os solos.

Aplicando o critério de resistência já definido anteriormente, foram retiradas das curvas tensão vs. deslocamento horizontal, correspondentes ao ciclo II, o par de tensões na ruptura. Posteriormente, plotaram-se estes pontos na envoltória de resistência e foram comparados com aqueles obtidos sem ciclagem, para uma tensão normal líquida de 120 kPa, como é mostrado nas figuras 7.24 e 7.25.

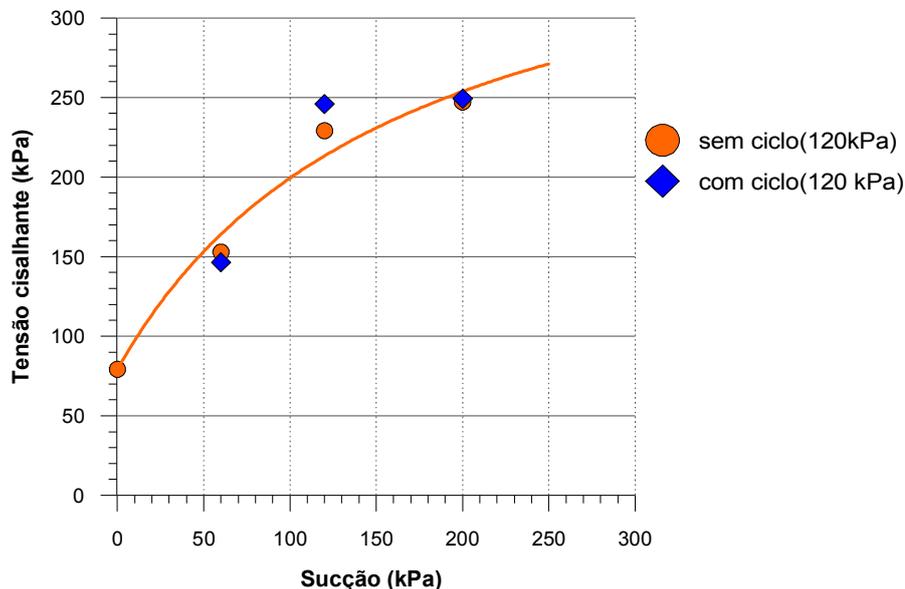


Figura 7.24 – Superposição dos pares de tensões do ciclo I na envoltória de resistência, para uma tensão normal líquida de 120 kPa – Colúvio.

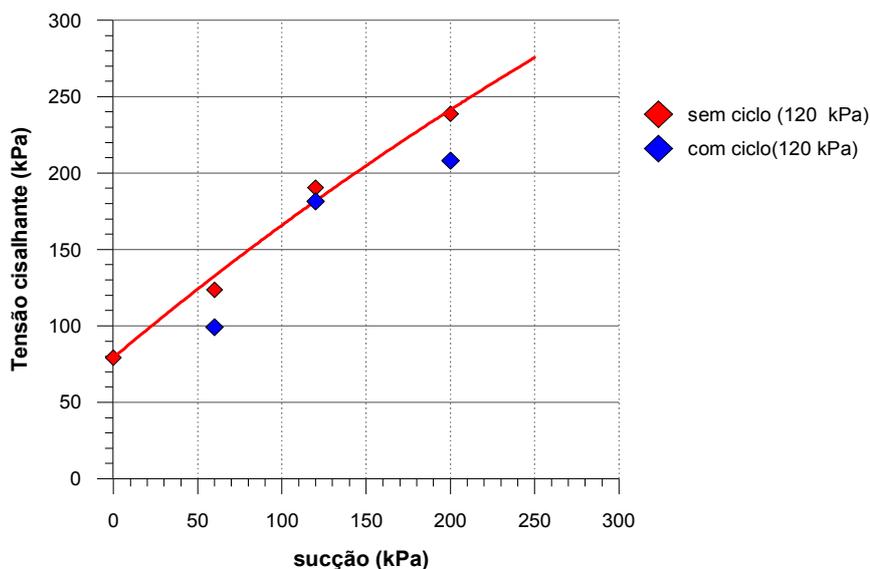


Figura 7.25 – Superposição dos pares de tensões da série I na envoltória de resistência, para uma tensão líquida de 120 kPa – solo Residual jovem.

Da figura 7.24 percebe-se que, para os níveis de sucção 120 e 200 kPa a influência é positiva sendo que os valores de resistência submetidos aos ciclos de umedecimento e secagem estão acima dos obtidos sem ciclos. Exceto no nível de sucção de 60 kPa, a influência torna-se negativa já que que o valor de resistência com ciclo é ligeiramente abaixo dos obtidos sem ciclos.

No caso do solo Residual jovem (figura 7.25) notou-se que, para todos os níveis de sucção a influência é negativa sendo que os valores de resistência submetidos aos ciclos de umedecimento e secagem são menores que os obtidos sem ciclos.

Portanto, para o Colúvio, a secagem após da saturação não apresenta uma clara influência na resistência ao cisalhamento devido à dispersão de dados; enquanto que no solo Residual jovem a influência é negativa gerando uma queda na resistência ao cisalhamento, mesmo que para o nível de sucção de 120 kPa essa influência seja pouco significativa.

7.3.7. Saturação após a secagem

Os ensaios do ciclo II representam a saturação que sofre o solo após a secagem.

Nesse sentido, o objetivo desta série de ensaios foi avaliar a influência do processo de saturação após a secagem e também a influência do nível de sucção que foi atingido durante o processo de secagem, na resistência ao cisalhamento. Como primeira análise plotaram-se as tensões cisalhantes obtidas dos ensaios com ciclos versus o nível de sucção atingido antes da saturação. Além disso, plotou-se no mesmo gráfico a tensão cisalhante corresponde à sucção zero (sem ciclos) do ensaio na condição submersa, (ver figura 7.26 e 7.27).

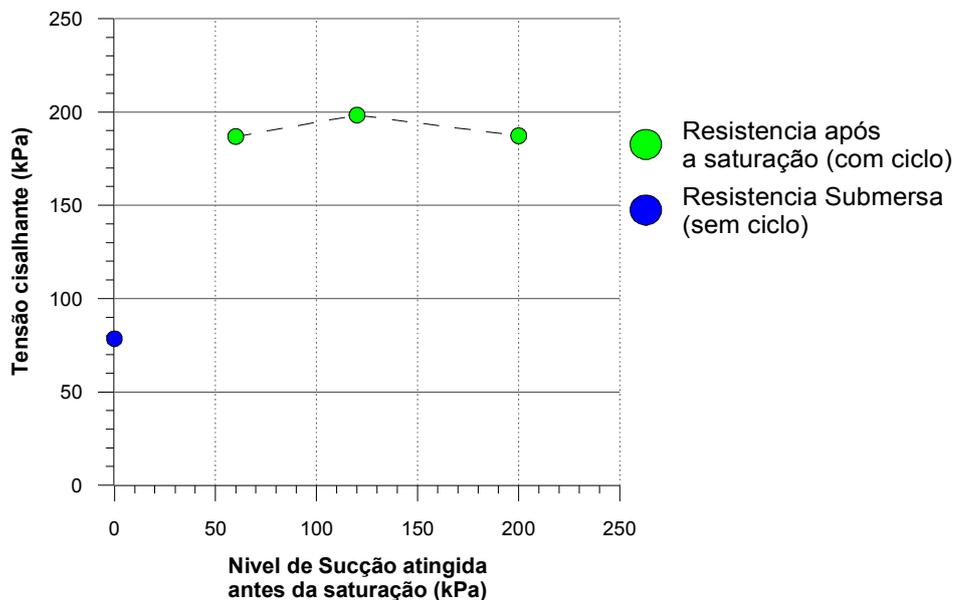


Figura 7.26 – Resistência ao cisalhamento após a saturação versus o nível de sucção atingido antes da saturação, para uma tensão líquida de 120 kPa – Colúvio.

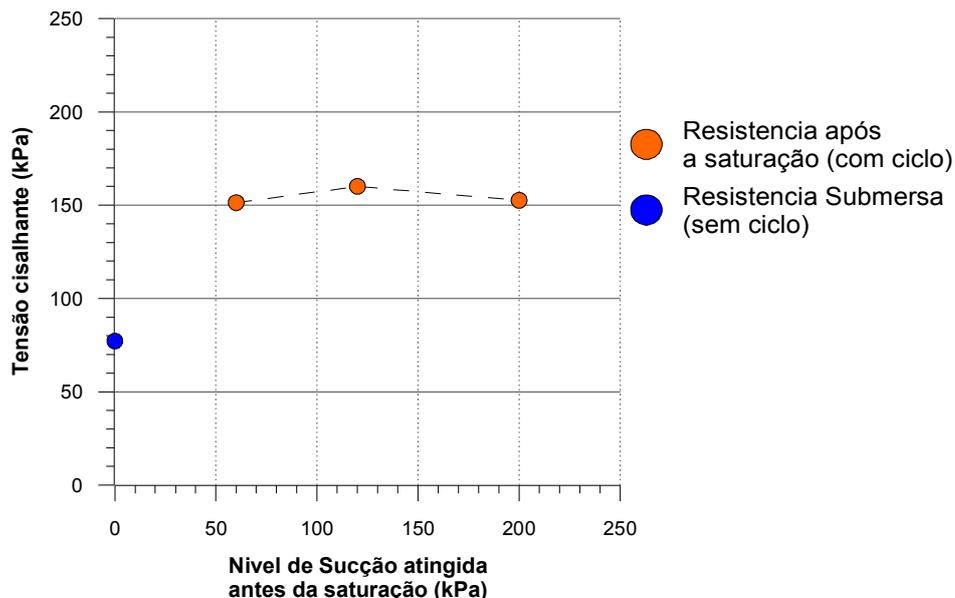


Figura 7.27 – Resistência ao cisalhamento após da saturação versus o nível de sucção atingido antes da saturação, para uma tensão líquida de 120 kPa – solo Residual Jovem.

A análise da figura 7.26 mostra que, os valores da resistência com ciclos de umedecimento e secagem são mais elevados que a resistência obtida na condição submersa, mesmo que teoricamente a resistência foi obtida no mesmo nível de sucção ($\mu_a - \mu_w = 0$), para ambos os casos. Uma resposta a este fato pode ser que a saturação por meio da técnica de translação de eixos não esteja sendo atingida. Consequentemente, o corpo de prova estaria a uma sucção diferente de zero ($u_a - u_w \neq 0$).

Com relação à influência do nível de sucção atingido antes da saturação, o valor da resistência correspondente ao nível de sucção de 120 kPa é ligeiramente maior comparado aos outros.

Da mesma forma que no caso do Colúvio, apresenta-se no solo Residual jovem (figura 7.27), ou seja, os valores de resistência com ciclagem são maiores que os obtidos na condição submersa. O fato pode ser explicado da mesma forma que no caso do solo Colúvio.

A influência do nível de sucção atingido antes da saturação no solo Residual jovem foi similar ao obtido no solo Colúvio onde o valor da resistência correspondente ao nível de sucção de 120 kPa é ligeiramente maior comparado aos outros. Em ambos os casos, o Colúvio e o residual jovem não apresentaram variações volumétricas.