

4

Curva de retenção

4.1.

Introdução

São apresentados neste capítulo uma revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão da determinação da curva de retenção utilizando-se a técnica de papel de filtro para resíduo da indústria de papel (RIP), estudado na presente dissertação. Na parte de resultados e discussões são apresentadas a verificação da curva de calibração do papel filtro, observações durante os ensaios, resultados de curvas de retenção, estimativa das curvas de retenção pelos modelos de van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994), a relação da sucção, teor de umidade e índice de vazios e a comparação da curva de retenção com o RIP de Parent (2006). No decorrer deste capítulo e do restante da dissertação, a sucção matricial é chamada simplesmente como sucção.

4.2.

Revisão bibliográfica

Na Tabela 4.1 apresenta-se um resumo das experiências na determinação da curva de retenção segundo a literatura revisada. São informadas métodos, teor de umidade volumétrica saturada (θ_{sat}), valor de entrada de ar (VEA) e o valor da sucção máxima medida.

Na determinação da curva de retenção de RIP, Teixeira (2002) observou a aparição de microorganismos e fungos na execução dos ensaios, por isso, resolveu utilizar um tratamento com fungicida para suas amostras. Pesquisas de Cabral et al. (2004) e Parent (2006) mostraram que para materiais compressíveis como os RIPs existe uma notória diferença na curva de retenção quando se considera a variação volumétrica. Parent (2006) apresentou curvas de retenção de RIP mostrando uma relação inversa entre o índice de vazios e o VEA, isso é, amostras compactadas com menor índice de vazios mostraram maiores VEAs.

Tabela 4.1 - Determinação da curva de retenção do RIP segundo diferentes autores.

Autor	Método	θ_{sat}	VEA (kPa)	Sucção máxima medida (kPa)
Cabral et al. (1997)	Placa de pressão e papel de filtro	0,7 – 0,8	25 - 35	300
Cabral et al. (1999)	Placa de pressão	0,7	25 - 30	200
Teixeira (2002)	Placa de sucção e placa de pressão	0,85 - 0,90	-	400
Cabral et al. (2004)	Placa de pressão	0,75	15 - 25	40
Parent (2006)	Placa de pressão	0,72 – 0,75	20 - 90	500

O método de papel filtro foi pouco empregado na determinação da curva de retenção de RIPs segundo a bibliografia revisada, embora que, com esta técnica consegue-se monitorar a livre variação volumétrica. A curva de calibração do papel de filtro é obtida usando diferentes métodos segundo o nível de sucção, com o que se consegue ampliar as faixas de medição da sucção (Marinho e Oliveira 2006). Marinho (1994 b), Marinho e Oliveira (2006), mencionam como aspectos relevantes da técnica do papel de filtro o tempo de equalização da sucção, a superfície de contato solo-papel e a curva de calibração. Marinho (1994 b) assinala algumas recomendações como não secar o papel filtro antes de usar-se, pois, poderia afetar as características de absorção do papel.

4.3.

Materiais e métodos

Para a determinação da curva de retenção pelo método de papel de filtro foram utilizados os materiais seguintes, papel filtro Whatman N° 42, balança analítica de 0,0001 de precisão, anel de alumínio de diâmetro 4,75 cm e altura 2 cm, pinças, tesoura, estufa a uma temperatura de 110°C, filme do PUC transparente e papel metálico para a selagem, e água destilada. A temperatura da sala de armazenagem foi de 25°C.

Para uma determinada umidade, a preparação das amostras realizou-se na parte interna do anel, usando uma peça metálica compactou-se em três camadas de forma estática e no mesmo anel, até atingir densidades similares ao Proctor Normal. Usando uma planilha de Excel calcula-se as umidades requeridas para plotar a curva de retenção, e, segundo for o caso, se adiciona ou retira umidade.

Uma vez que os corpos de prova têm a umidade requerida, são selados com o filme da PUC transparente e armazenados em uma caixa de isopor a temperatura constante por um prazo de dois dias. Passado o prazo, medem-se as dimensões da amostra, e o papel filtro foi colocado em contato com a face superior e inferior da amostra, novamente foi selado com o filme da PUC transparente e papel metálico, e armazenado por um tempo de 15 dias (Figura 4.1).

Para o cálculo da sucção foram utilizadas as curvas de calibração obtidas por Chandlet et al. (1992) para o papel filtro Whatman N° 42, as quais são apresentadas a seguir:

$$\text{Para umidades do papel de filtro } > 47\% \text{ Sucção (kPa)} = 10^{(6.05-2.48 \log w)} \quad (1)$$

$$\text{Para umidades do papel de filtro } \leq 47\% \text{ Sucção (kPa)} = 10^{(4.84-0.0622 w)} \quad (2)$$



Figura 4.1 - Armazenagem das amostras de RIP na técnica de papel de filtro.

Os modelos usados para a estimativa da curva de retenção foram os de Fredlund e Xing (1994) e de van Genuchten (1980). O modelo de van Genuchten foi empregado usando o programa RECT; já o modelo de Fredlund e Xing empregou-se usando primeiro o programa ESTADISTICA 7.0 na determinação dos parâmetros e o programa MATLAB 7 para a plotagem da curva.

4.4. Resultados e discussão

4.4.1. Verificação da curva de calibração

Uma forma de calibrar o papel de filtro é utilizar o dessecador, com isso se consegue estimar faixas de sucção de 0,5 até 30MPa, segundo Marinho (1994 b). Nessa metodologia, recomendada por Marinho e Oliveira (2006), o papel filtro é colocado em um dessecador em uma solução de NaCl com 0,2 molar, separado 1cm da superfície livre da solução. Para uma determinada concentração de NaCl, pode-se estimar a sucção correspondente, na equação proposta por Marinho (1994 a) ou na tabela de Bulut et al. (2001).

Os pontos de sucção pelo teor de umidade gerados como resultados de três espécimes de papel de filtro Whatman N°42 resultaram muito próximos à curva de calibração de Chardler et al. (1992), o que indica a aplicabilidade da proposta de Chardler et al. ao lote de papel de filtro testado e utilizado na presente série de ensaios (Figura 4.2).

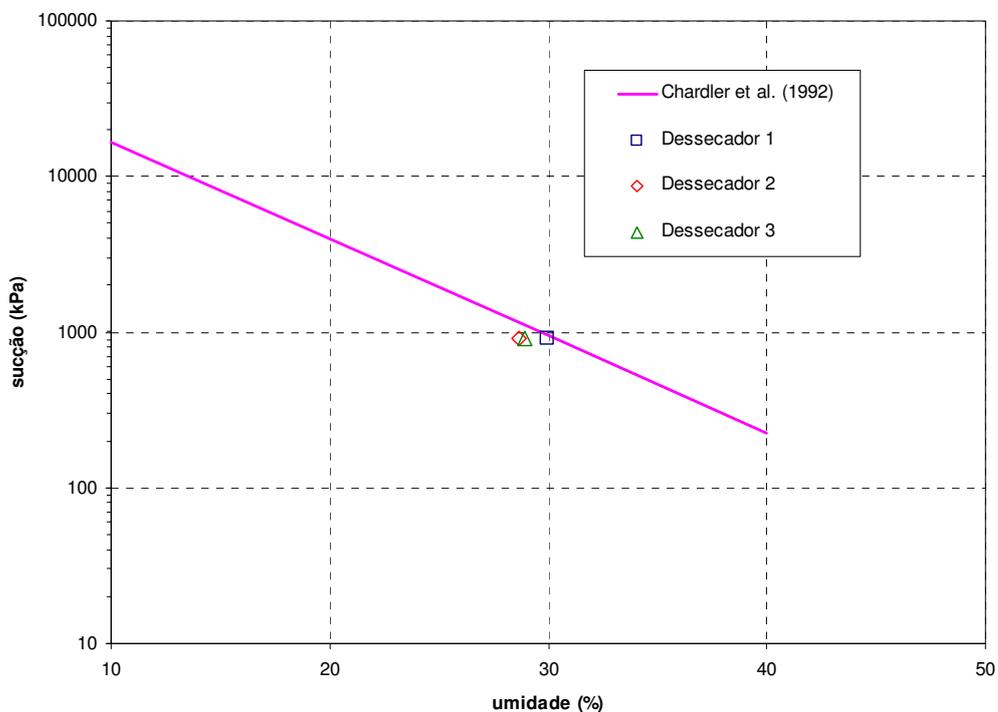


Figura 4.2 - Sucção do papel de filtro estimada pela umidade do papel no dessecador

4.4.2. Observações durante o ensaio

A contração do RIP ocasionou uma redução da área com relação ao molde de alumínio como se aprecia na Figura 4.3a, com isso, o corpo de prova ficava separado do molde conforme suas dimensões se reduziam, e os tamanhos do papel de filtro que cobriam os corpos de prova tinham que ser cada vez menores (Figura 4.3b).

Um acentuado arqueamento nas faces superior e inferior da amostra compactada a 162% de umidade foi observado, a forma do corpo de prova apresenta-se na Figura 4.4, com dimensões finais medidas com paquímetro de 40,6 mm de diâmetro, 18 mm de altura e 2,5 mm de flecha do arco formado. A colocação de um papel filtro com um diâmetro similar à amostra (maneira A da Figura 4.4) poderia diminuir o contato papel-amostra, no entanto, a redução do diâmetro do papel resultou uma forma mais adequada para assegurar o contato papel-amostra devido que a parte central do corpo de prova é uma zona menos arqueada (maneira B da Figura 4.4). Após 15 dias de equalização da sucção, quando adotada esta metodologia observou-se um bom contato, devido à flexibilidade do papel de filtro.



Figura 4.3 - Redução da área de contato do papel de filtro devido à contração do resíduo.

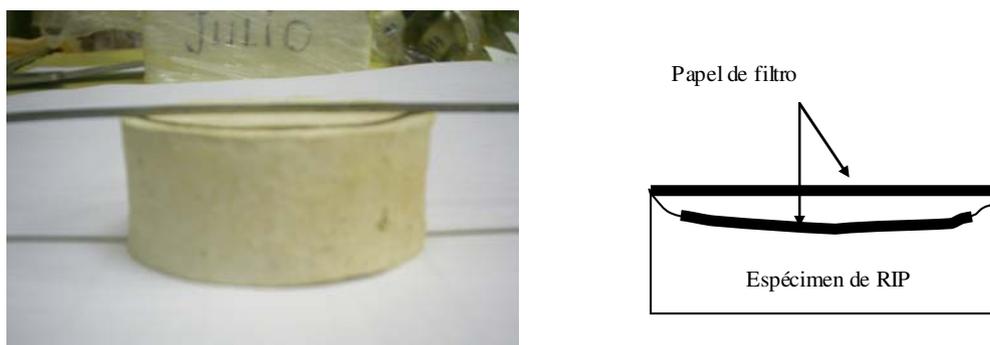


Figura 4.4 - Arqueamento da superfície pela contração e o contato do papel de filtro.

Uma amostra preparada com uma umidade próxima a 200%, após secagem na estufa, apresentou um comportamento peculiar. Parte do contorno da mesma ficou aderido à parte superior do anel de alumínio como se mostra na Figura 4.5a. Ao analisar a forma da amostra pode-se perceber uma distorção lateral em uma direção e uma ruptura no centro da espessura (Figura 4.5b). A causa da ruptura pode estar relacionada com a adesão do material seco nas bordas, aquele material proveniente do processo de arrasamento. As tensões nas bordas aumentam em resposta a aumento das forças de contração até ocasionar a ruptura da parte central, pois é a zona de maior umidade por sua dessaturação lenta. Com isto se conclui que o processo de arrasamento pode induzir a geração deste tipo de ruptura, devendo-se ter atenção nesse procedimento para evitar sua influência nos resultados.



Figura 4.5 - Ruptura do espécime pelas forças de tração geradas nas bordas RIP/molde.

Oito corpos de prova preparados com 130% de umidade gravimétrica inicial, formaram parte do ensaio da curva de retenção pelo método de papel de filtro, pelo que foram selados a diferentes teores de umidade volumétricos por quatro dias.

Após desse tempo, os corpos de prova foram abertos e observou-se a aparição de colônias de fungos gerados em condições anaeróbias. Os espécimes de maior saturação mostraram a maior presença de fungos. Os fungos mostraram ter cor verde, branco, e amarelo como se mostra na Figura 4.6.

Os posteriores ensaios com corpos de prova preparados com umidade gravimétrica inicial de 162, 130 e 76% também apresentaram fungos. O corpo de prova de 76% de umidade foi preparado em uma condição na saturada pelo que teve adição de água para os pontos de umidade volumétrica pertos na saturação. Em resumo observou-se:

- Amostra de 300%, não apresentou fungos.
- Amostra de 162%, pouca quantidade de fungos (em saturações > 85%).
- Amostra de 130%, maior quantidade de fungos (em saturações > 85%).
- Amostra de 76%, regular quantidade (em saturações > 90%).



Figura 4.6 - Fungos após selagem por quatro dias da amostra compactada a 125% de umidade.

No processo de homogeneização efetuado com as mãos conforme o material vai diminuindo sua umidade até a umidade de preparação do corpo de prova desejada. Quanto maior é a manipulação previa da compactação, os corpos de prova ficam mais oxigenados, assim, os corpos de prova de maior umidade são as menos manipuladas. Observou-se que:

- Corpo de prova de 300%, leve manipulação, não apresentou fungos.
- Corpo de prova de 162%, pouca manipulação, pouca quantidade de fungos.

- Corpo de prova de 130%, regular manipulação, maior quantidade de fungos.
- Corpo de prova de 76%, maior manipulação, regular quantidade.

Para os três primeiros casos (300%, 162% e 130%) percebeu-se que a maior manipulação propiciou uma maior presença de fungos. No entanto o corpo de prova de 76%, inicialmente no estado não saturado, teve uma maior manipulação, mas apresentou uma menor presença de fungos que do corpo de prova de 130%, isso provavelmente esteja vinculado à adição de água destilada no preparo nos corpos de prova próximos na saturação. As observações anteriores induzem a pensar que para os corpos de prova preparados sem adição de água, a manipulação e a aparição de fungos poderiam ter uma relação direta.

Na etapa de equalização de umidade entre o papel filtro e a amostra, de quinze dias, os microorganismos passam a formar colônias no papel filtro em condições anaeróbias. Algumas vezes o papel ficou preenchido pelos mesmos. Nestes casos tomou-se a parte livre (não preenchida) para a determinação da umidade (Figura 4.7).



Figura 4.7 - Após a secagem na estufa, apresentam-se alguns rasgos da colônia de fungos no papel filtro.

4.4.3.

Resultados da curva de retenção usando a técnica de papel de filtro

Na Figura 4.8 são apresentados resultados da curva de retenção com umidades de 125 e 130 %. Os pontos de sucção por teor de umidade volumétrica são os seguintes:

- Oito pontos, com 4 dias de equalização de umidade, presença regular de fungos, e 130% de umidade inicial.
- Dez pontos, com 2 dias de equalização de umidade, presença pouca de fungos, e 125% de umidade inicial
- Um ponto, com 4 dias de equalização de umidade, presença regular de fungos, e 125% de umidade inicial

Como se pode apreciar na Figura 4.8, os pontos da curva de retenção com fungos seguem uma mesma tendência, pelo que a presença de fungos não afetou de forma importante os resultados.

A preparação de corpos de prova de RIP obtidas por amostragem no molde de Proctor Normal foi complicada pelo aumento de rigidez dos grumos, por isso, a metodologia empregada (ver item 4.3) resultou sendo mais aplicável.

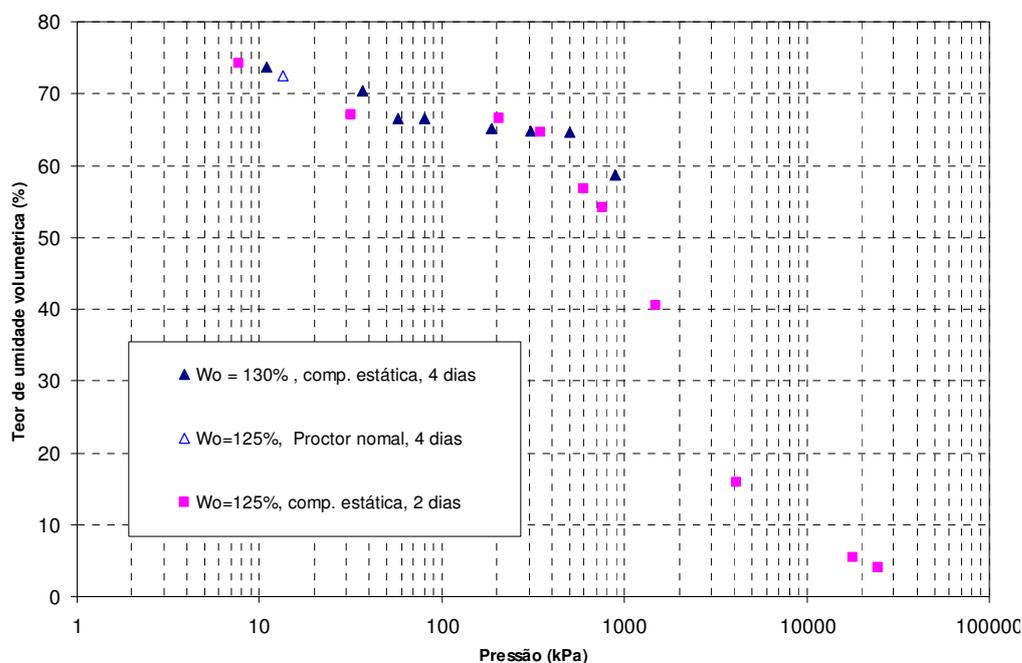


Figura 4.8 - Curva de retenção dos primeiros espécimes de 125% e 130% de umidade.

Na Figura 4.9 apresenta-se de maneira resumida as diversas curvas de retenção, tanto de secagem como de umedecimento, para espécimes compactados com umidade de 162%, 130% e 76%. As curvas de secagem seguem uma mesma tendência apesar da diferença de umidade de compactação inicial e índice de vazios. O mesmo acontece com as curvas de umedecimento. A maioria de pontos da curva de secagem se localizam abaixo a curva de umedecimento, formado assim uma zona de histerese.

4.4.4. Modelagem da curva de retenção

Estimou-se o conjunto de pontos sucção-umidade de secagem e umedecimento, com os modelos de Fredlund e Xing (1994) e van Genuchten (1980), e se observou curva de similar tendência (Figura 4.10 e 4.11). Os conjuntos de pontos procedem dos ensaios de papel de filtro, o mesmo que considera o monitori da variação volumétrica medida para cada teor de umidade.

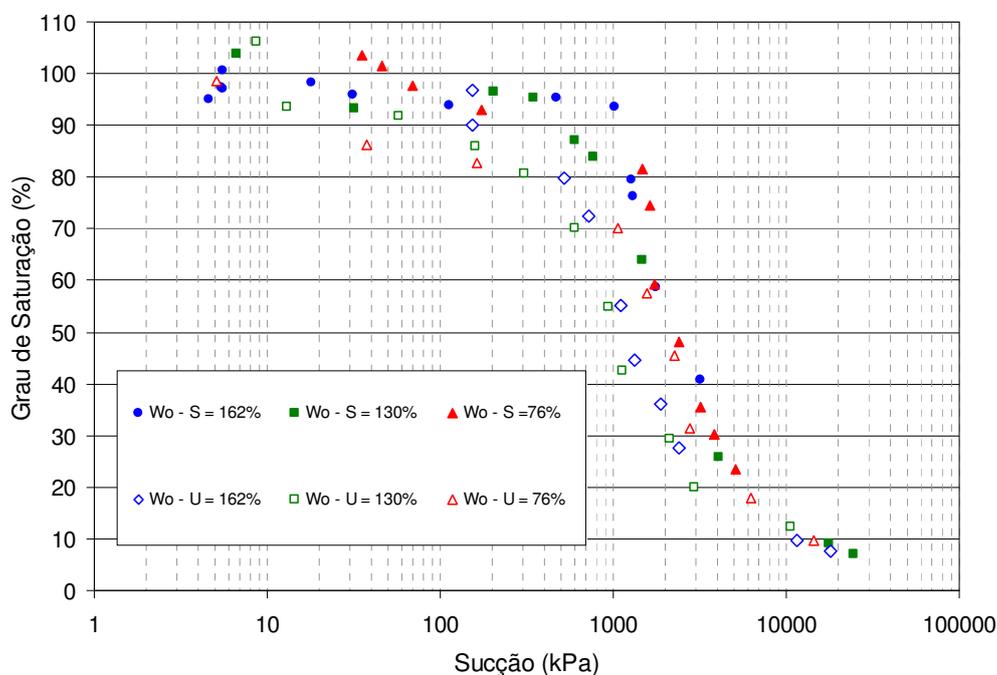


Figura 4.9 - Curvas de retenção de secagem (S) e umedecimento (U).

Uma leve variação entre os modelos de van Genuchten (VG) e Fredlund e Xing (FX) ocorreu na saturação residual; para o modelo de FX é de 4% e, com VG, de 2%. O VEA foi de 800kPa para os dois modelos.

Na Figura 4.12 se apresenta a curva de umedecimento estimada pelo método de FX, para corpos de prova compactados com diferentes umidades e índices de vazios iniciais, resultando uma leve variação especialmente na parte da curva próxima aos 1000 kPa.

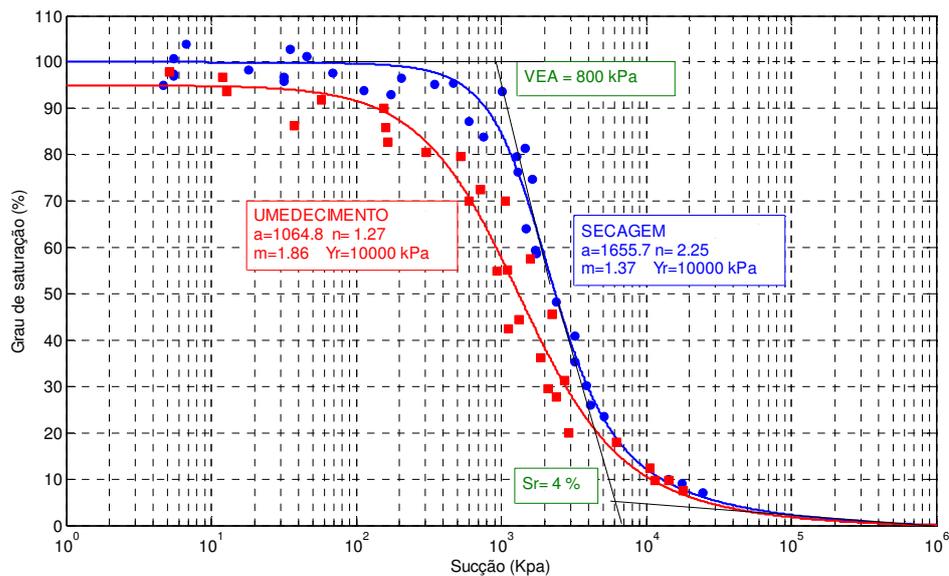


Figura 4.10 - Estimativa da curva de retenção pelo modelo de Fredlund e Xing (1994).

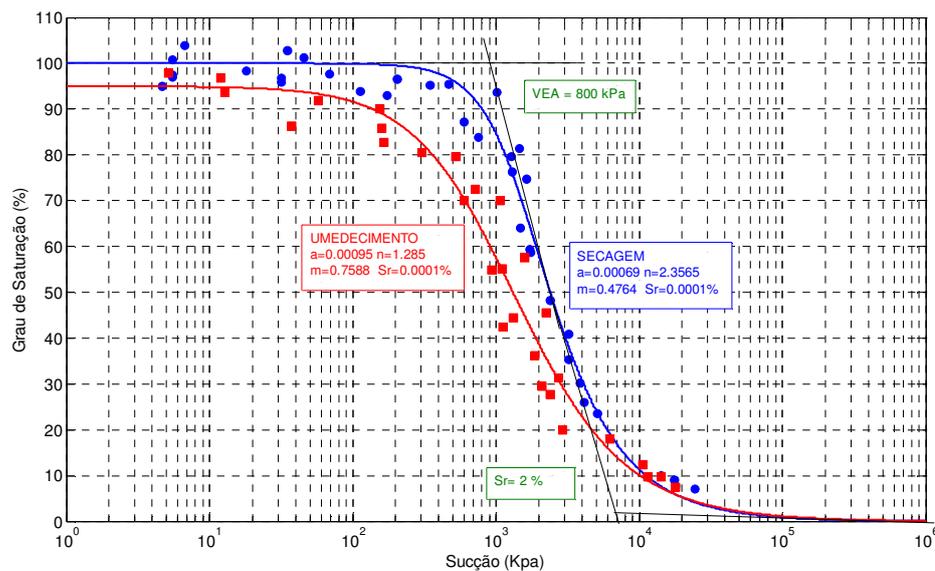


Figura 4.11 - Estimativa da curva de retenção pelo modelo de van Genuchten (1980).

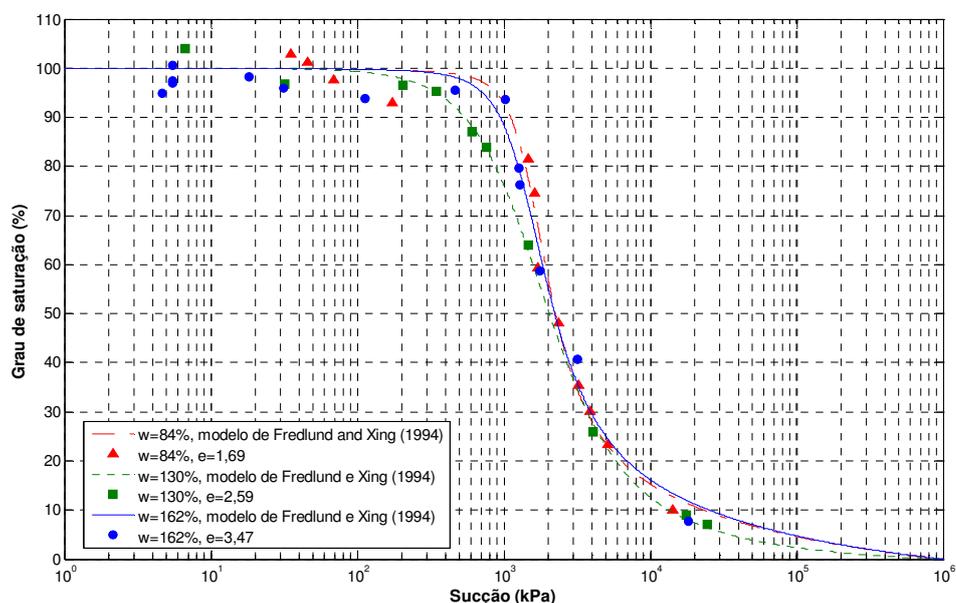


Figura 4.12 - Estimativa de curvas de retenção para diferentes umidades e índices de vazios iniciais

4.4.5. Sucção, teor de umidade e índice de vazios

Outra representação da curva de retenção é mostrada na Figura 4.13, na forma de sucção por teor de umidade gravimétrica. Segundo as estimativas feitas no anterior item (4.4.4), o VEA estima-se em 800kPa. As umidades correspondentes a esse valor estão apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Teor de umidade para 800 kPa de sucção.

Amostra	Umidade (%)
76%	70%
125%	72%
162%	90%

Desses dados se conclui que o teor de umidade para a sucção de 800kPa (VEA) varia de 70% até 90%.

Na Figura 4.14 são apresentados os resultados da curva de secagem obtidos com as amostras de diâmetros de 4,75 cm utilizadas nos ensaios de retenção de umidade apresentados acima. São incluídos nesta figura os resultados obtidos de amostras com diâmetros de 7,15 cm que foram utilizadas para avaliar o

ressecamento do material, já apresentados no capítulo 3. Todas as seis curvas, obtidas para diferentes umidades de compactação, apresentam uma mesma tendência. A umidade de entrada de ar se estima próxima a 80%, que é uma quantidade próxima à faixa de umidades correspondentes ao VEA (70 – 90 %).

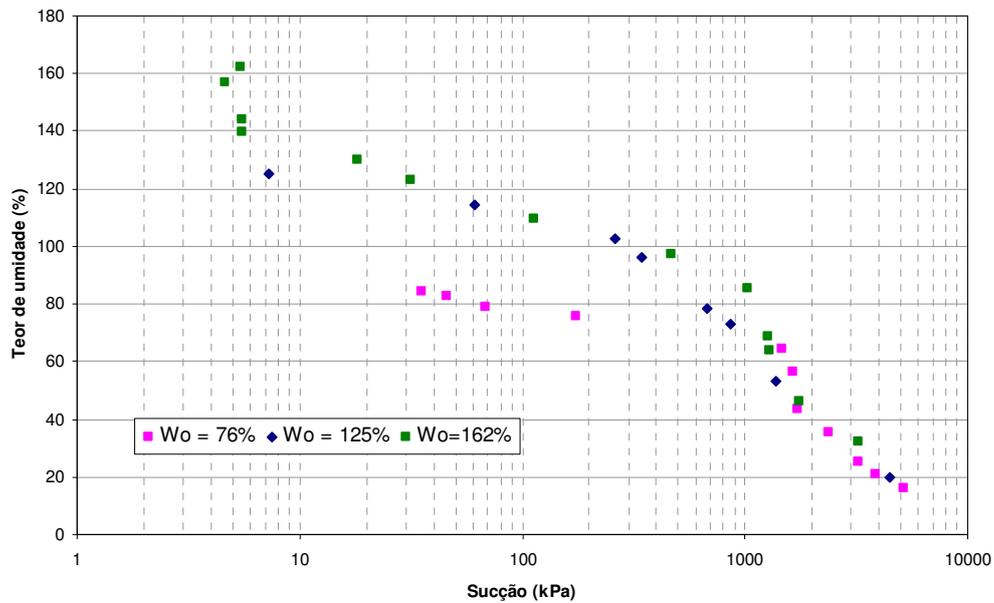


Figura 4.13 - Curvas de retenção de secagem, sucção por teor de umidade.

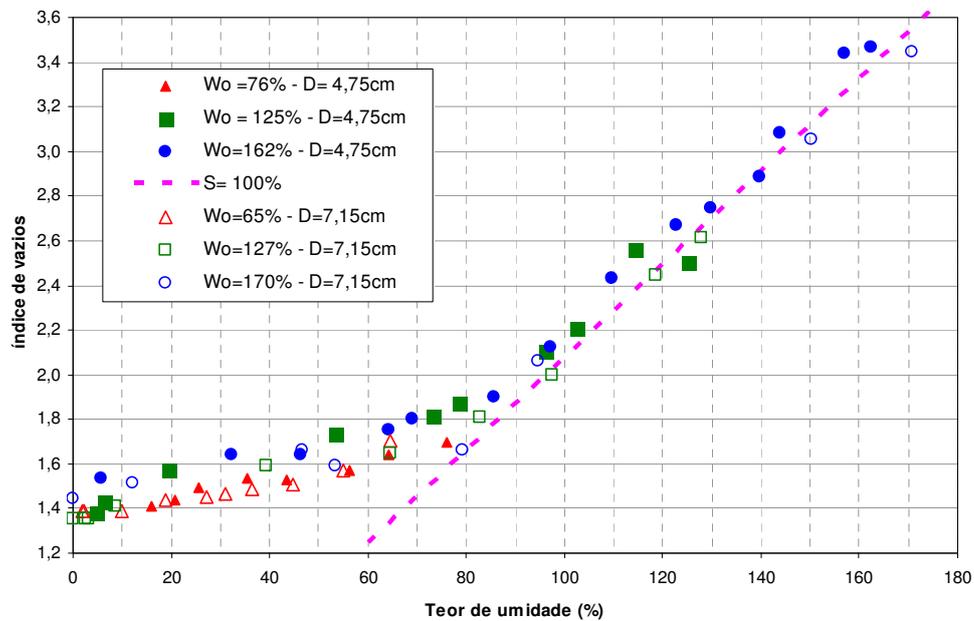


Figura 4.14 - Curva de secagem, teor de umidade por índice de vazios.

4.4.6.

Comparação da curva de retenção com o RIP de Parent (2006)

A principal diferença com o material de Parent é que o RIP estudado tem um VEA dez vezes maior. Um aspecto que pode estar associado a este comportamento é a composição mineralógica. Na Tabela 3, notamos que os calcários do RIP deste trabalho são um pouco mais do dobro daqueles no estudo do Parent (2006). Além disso, a quantidade de materiais voláteis (geralmente orgânicos) da composição do RIP deste trabalho é quase o dobro que os estudados por Parent (2006).

Tabela 4.3 - Comparação de VEA com a variação dos índices de vazios.

Autor	e_o	VEA (kPa)	Calcários (%)	Material volátil (%)
Parent (2006)	3,67	15	29,2	60,3
	2,71	50		
Neste trabalho	3,47	800	64,3	30
	2,59	700		

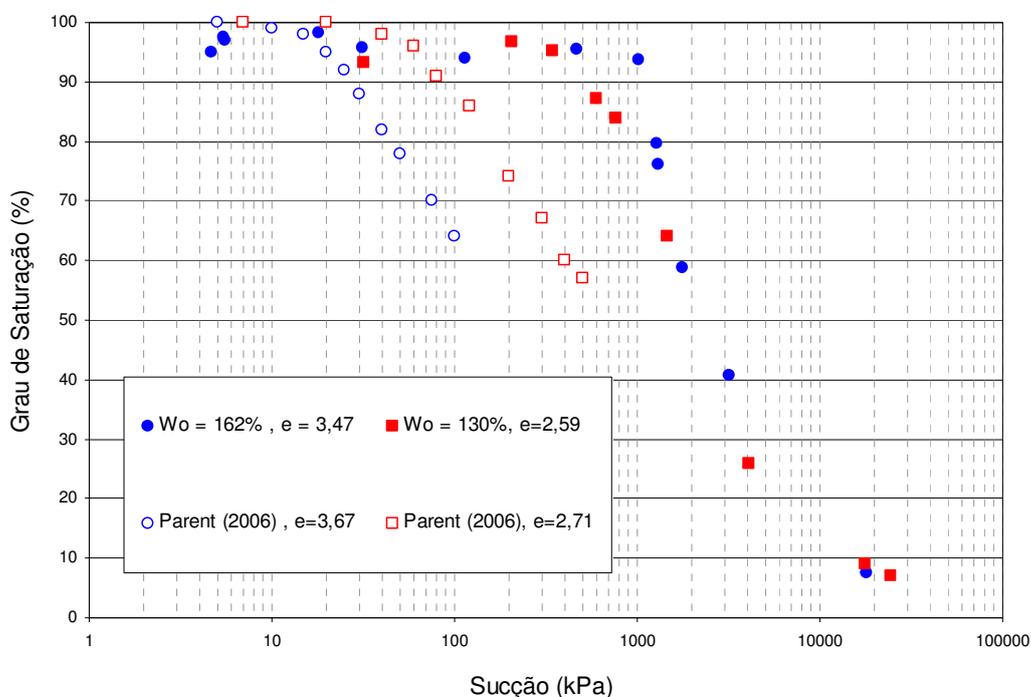


Figura 4.15 - Comparação da curva de retenção com a obtida por Parent (2006).