

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na campanha experimental, que foi descrita anteriormente. Para a realização deste programa experimental foi utilizada uma argila proveniente da cidade do Rio de Janeiro, da região da Barra da Tijuca, cuja caracterização geotécnica é descrita a seguir.

4.1. Ensaios de Caracterização Geotécnica

4.1.1. Análise Granulométrica

Seguem dispostos na Figura 4.1, os resultados da análise granulométrica para o solo mole estudado, realizada no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. A Tabela 4.1 mostra a composição granulométrica, assim como os demais índices físicos obtidos no ensaio de caracterização.

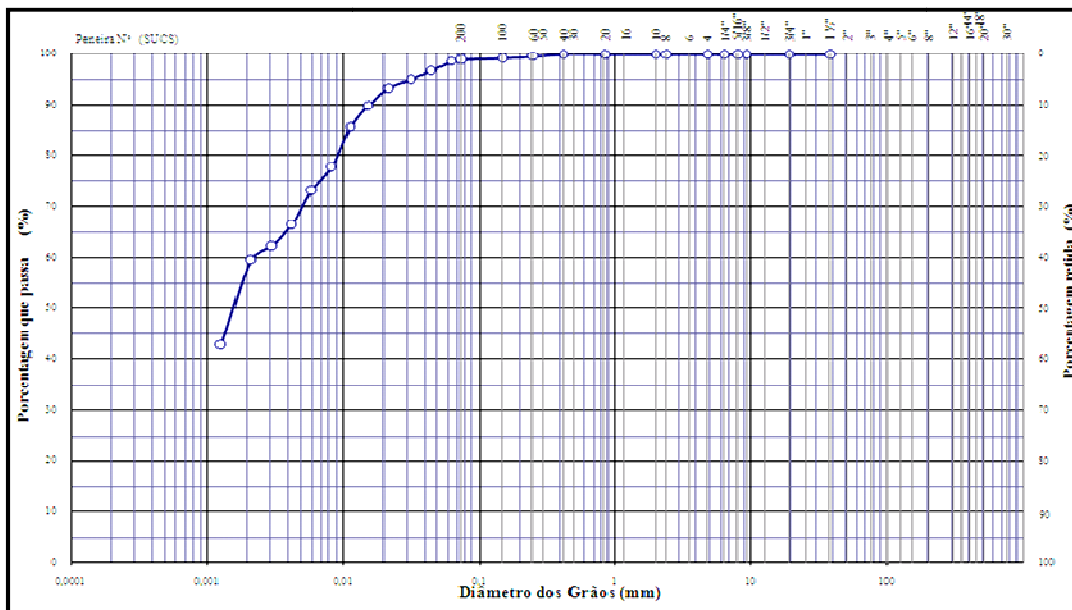


Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo mole

Tabela 4.1 – Resumo do ensaio de caracterização

Índice Físico	Valor Médio
Granulometria (%)	
Pedregulho	0
Areia	1,7
Silte	41,0
Argila	57,3
Densidade dos Grãos (g/cm ³)	2,678
Índices de Consistência (%)	
Limite de Liquidez	122,9
Limite de Plasticidade	47,3
Índice de Plasticidade	75,6

A porcentagem de argila do solo estudado encontra-se dentro dos valores correntes na literatura de solos moles e muito moles do Estado do Rio de Janeiro. Almeida (1996) reporta valores na faixa de 28 – 80%; Almeida e Marques (2002) obtiveram valores da ordem de 70% e Santos (2004), para a argila mole da região de Santa Cruz, obteve valores entre 52 a 62%.

A Tabela 4.2 especifica os resultados dos três conjuntos de ensaios de matéria orgânica, realizados conforme descrito no item 3.1.4.

Tabela 4.2 – Teor de matéria orgânica

Teor de Matéria Orgânica (%)	Umidade Média (%)
11,81	142,01
17,47	161,12
16,74	186,46

A Figura 4.2 mostra a correlação apresentada por Sandroni (2012), entre a umidade e valores de PPI, de resultados de solos moles da costa Brasileira. Os valores de PPI (perda de peso por ignição entre 105°C e 440°C, dividida pelo peso de 105°C), se correlacionam com o teor de matéria orgânica do solo.

Os resultados encontrados estão destacados em vermelho na Figura 4.2, onde os mesmos indicam valores equivalentes aos apresentados para outros solos moles da região.

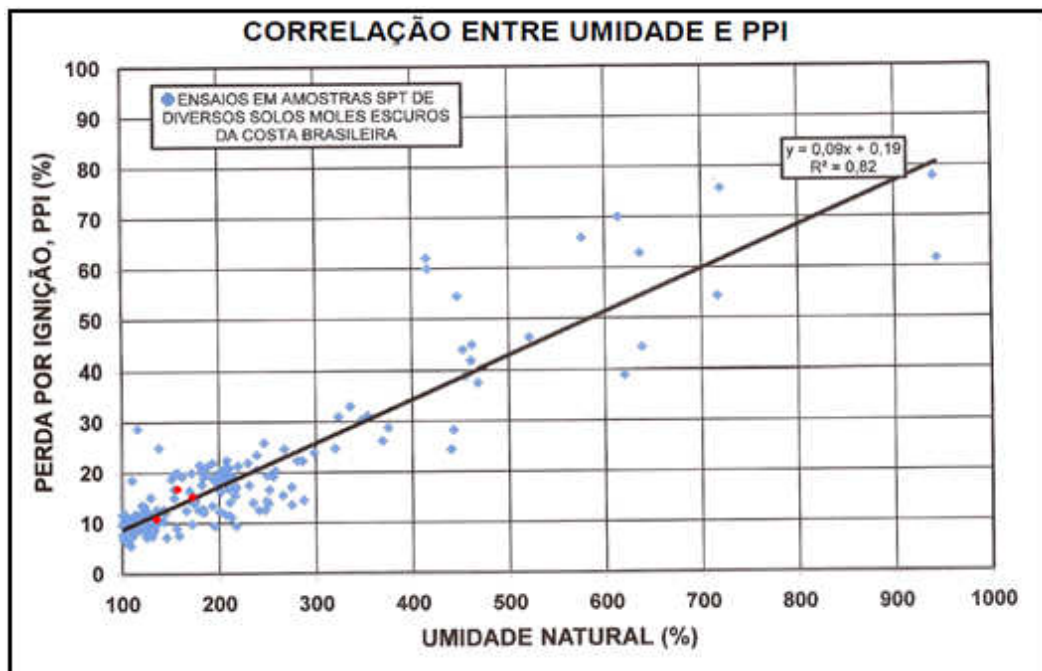


Figura 4.2 – Correlação entre umidade e PPI (Fonte: Sandroni, 2012)

Tendo em vista os resultados apresentados e a partir do exame tátil-visual o solo em estudo nesta pesquisa pode ser considerado como uma argila com elevado teor de matéria orgânica, de cor escura e cheiro característico. Os resultados dos índices físicos, tais como, peso específico natural (γ_{nat}), o índice de vazios inicial (e) e o grau de saturação (S) serão apresentados no decorrer do presente capítulo.

4.2. Ensaio de Adensamento Unidimensional

Os resultados dos estágios, bem como o resumo dos parâmetros obtidos nos dois ensaios realizados, AU-01, ensaio com todos os estágios convencionais são

apresentados na Tabela 4.3 (a) e (b); e o ensaio AU-02, com o estágio sete com ação da pressão de vácuo, é apresentado na Tabela 4.4 (a) e (b).

Tabela 4.3 – (a) Parâmetros iniciais e (b) Resumo dos resultados do ensaio do adensamento unidimensional AU-01

a) Parâmetros Iniciais - AU-01											
Umidade Inicial											134,18%
Peso Especifico Total dos grãos - γ_n (g/cm ³)											1,362
Peso Especifico Aparente Seco - γ_d (g/cm ³)											0,581
Peso Especifico Total - Gs (g/cm ³)											2,678
Saturação Inicial - So											99,65%
Índice de Vazios Inicial - eo											3,61
Limite de Liquidez - LL											122,90
Limite de Plasticidade - LP											47,30

b) Resultados dos Estágios : AU - 01											
Estágio	Pressão (kPa)	Recalque (cm)	Deformação (%)	AV (m ² /kN)	Mv (m ² /kN)	K (cm/s) Casagrande	K (cm/s) Taylor	K (cm/s) Ajuste	Cv (cm ² /s) Casagrande	Cv (cm ² /s) Taylor	Cv (cm ² /s) Ajuste
1	2,52	0,092	4,64%	8,48E-02	1,84E-02	2,14E-07	3,68E-07	3,50E-07	1,16E-04	2,00E-04	1,90E-04
2	10,07	0,081	8,75%	2,51E-02	5,96E-03	3,67E-07	3,33E-07	3,97E-07	6,16E-04	5,59E-04	6,66E-04
3	20,14	0,119	14,76%	2,75E-02	7,00E-03	7,36E-08	1,38E-07	1,43E-07	1,05E-04	1,97E-04	2,05E-04
4	40,29	0,145	22,06%	1,67E-02	4,65E-03	7,38E-08	1,02E-07	9,94E-08	1,59E-04	2,20E-04	2,14E-04
5	80,58	0,155	29,91%	8,98E-03	2,78E-03	2,93E-08	3,28E-08	3,77E-08	1,05E-04	1,18E-04	1,36E-04
6	158,64	0,154	37,69%	4,59E-03	1,60E-03	1,94E-08	1,89E-08	2,14E-08	1,22E-04	1,18E-04	1,34E-04
7	239,22	0,066	41,03%	1,91E-03	7,03E-04	-	9,98E-09	1,03E-08	-	1,42E-04	1,46E-04
8	158,64	-0,008	40,61%	2,40E-04	8,76E-05	1,59E-09	1,59E-09	7,18E-10	1,82E-04	1,82E-04	8,19E-05
9	239,22	0,011	41,18%	3,26E-04	1,20E-04	-	8,94E-09	1,10E-08	-	7,42E-04	9,13E-04
10	478,45	0,153	48,90%	1,49E-03	6,31E-04	3,82E-09	3,06E-09	3,82E-09	6,06E-05	4,85E-05	6,06E-05

Tabela 4.4 - (a) Parâmetros iniciais e (b) Resumo dos resultados do ensaio do adensamento unidimensional AU-02

a) Parâmetros Iniciais - AU-02											
		Umidade Inicial		135,68%							
		Peso Especifico Total dos grãos - γ_n (g/cm ³)		1,359							
		Peso Especifico Aparente Seco - γ_d (g/cm ³)		0,576							
		Densidade Relativa dos Graos - Gs (g/cm ³)		2,678							
		Saturação Inicial - So		99,68%							
		Índice de Vazios Inicial - eo		3,65							
		Limite de Liquidez - LL		122,90							
		Limite de Plasticidade - LP		47,30							

b) Resultados dos Estágios : AU - 02											
E s t á g i o	Pressão (kPa)	Recalque (cm)	Deformação (%)	AV (m ² /kN)	Mv (m ² /kN)	K (cm/s) Casagrande	K (cm/s) Taylor	K (cm/s) Ajuste	Cv (cm ² /s) Casagrande	Cv (cm ² /s) Taylor	Cv (cm ² /s) Ajuste
2	10,04	0,093	9,04%	2,89E-02	6,85E-03	-	5,64E-07	6,49E-07	-	8,24E-04	9,48E-04
3	20,08	0,115	14,85%	2,69E-02	6,79E-03	8,82E-08	1,17E-07	1,17E-07	1,30E-04	1,72E-04	1,72E-04
4	40,16	0,151	22,51%	1,77E-02	4,92E-03	6,86E-08	7,38E-08	8,11E-08	1,39E-04	1,50E-04	1,65E-04
5	80,32	0,157	30,45%	9,18E-03	2,84E-03	3,00E-08	3,67E-08	4,04E-08	1,06E-04	1,29E-04	1,42E-04
6	158,13	0,173	39,22%	5,24E-03	1,85E-03	2,02E-08	2,05E-08	2,52E-08	1,09E-04	1,11E-04	1,36E-04
7	238,45 (APLICAÇÃO DE VÁCUO)	0,075	43,01%	2,19E-03	8,28E-04	4,19E-08	3,32E-08	4,61E-08	5,07E-04	4,01E-04	5,57E-04
8	158,13	-0,014	42,28%	4,22E-04	1,57E-04	9,76E-09	1,00E-08	1,66E-08	6,20E-04	6,37E-04	1,05E-03
9	238,45	0,019	43,22%	5,48E-04	2,08E-04	1,80E-08	5,20E-08	5,73E-08	8,67E-04	2,51E-03	2,76E-03
10	476,89	0,200	53,35%	1,97E-03	9,10E-04	2,43E-08	2,18E-08	3,05E-08	2,67E-04	2,39E-04	3,35E-04

As curvas de índice de vazios *versus* a tensão efetiva, para ambos os ensaios, AU-01 e AU-02 são apresentadas na Figura 4.3. Observa-se que os resultados dos ensaios de adensamento unidimensional apresentaram uma mesma tendência de comportamento da curva tensão deformação.

Nota-se na Figura 4.3, que a partir do sexto estágio, o ensaio AU-02 apresentou um menor índice de vazios, para uma mesma tensão efetiva, quando comparado ao ensaio AU-01. Esta diferença é mais notória no sétimo estágio, onde há aplicação da pressão de vácuo, no ensaio AU-02.

As curvas apresentaram uma mesma tendência de comportamento, porém estas se encontram deslocadas praticamente paralelamente uma da outra, a partir do estágio de comparação, estágio sete. A partir das curvas, conclui-se que a aplicação de vácuo funciona de forma equivalente ao incremento de carga convencional, como no ensaio AU-01, e o desligamento do vácuo funciona como um efeito praticamente idêntico a retirada de uma carga, ou seja, um descarregamento.

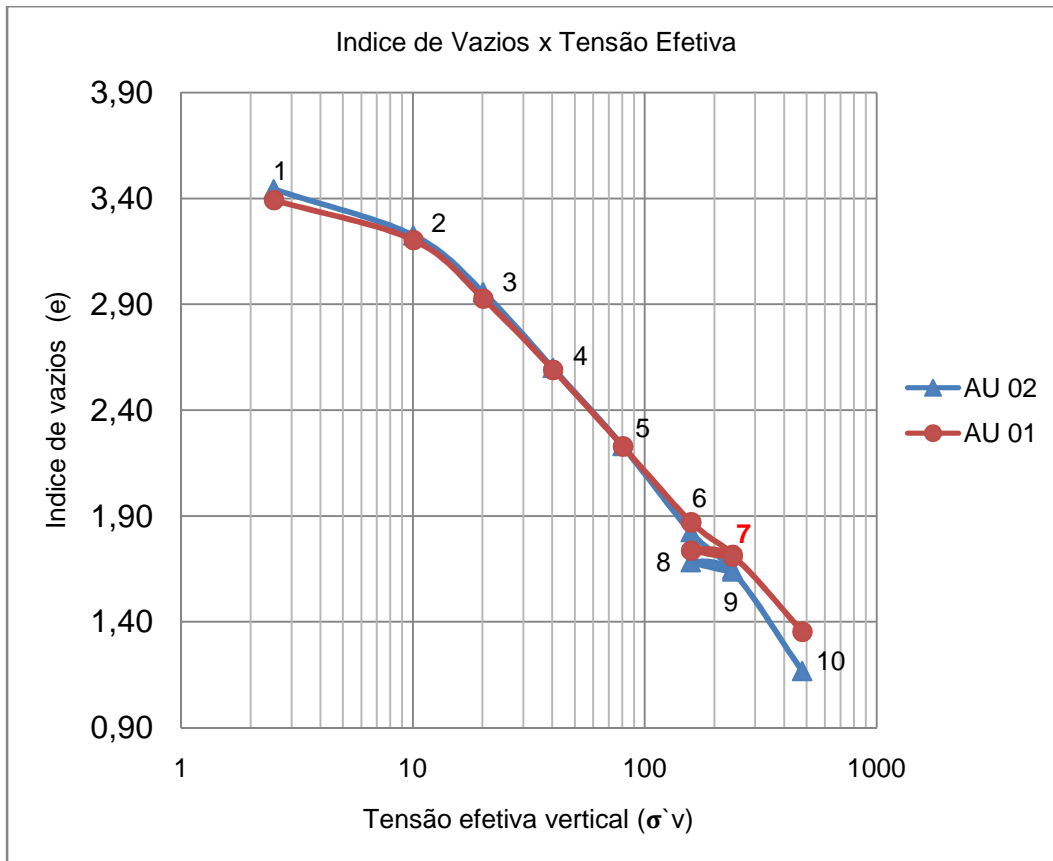


Figura 4.3 – Comparação das curvas índice de vazios x tensão vertical efetiva

A partir da Figura 4.3 obteve-se a tensão de pré-adensamento do solo na profundidade de 0,60 a 1,50 metros, pelo Método de Pacheco Silva, cujo valor é de 9,31 e 10,56 kPa, para o ensaio AU-01 e AU-02, respectivamente.

A Figura 4.4 ilustra as curvas de deformação do estágio sete, comparando a natureza da pressão, incremento de carga ou vácuo, em ambos os ensaios, AU-01 e AU-02, respectivamente. Ao comparar a ação do incremento de carga (AU-01) com o carregamento através da ação da pressão de vácuo (AU-02), observa-se que as curvas de deslocamento vertical variam paralelamente, de maneira similar e a aplicação de vácuo induz a um maior valor de deformação.

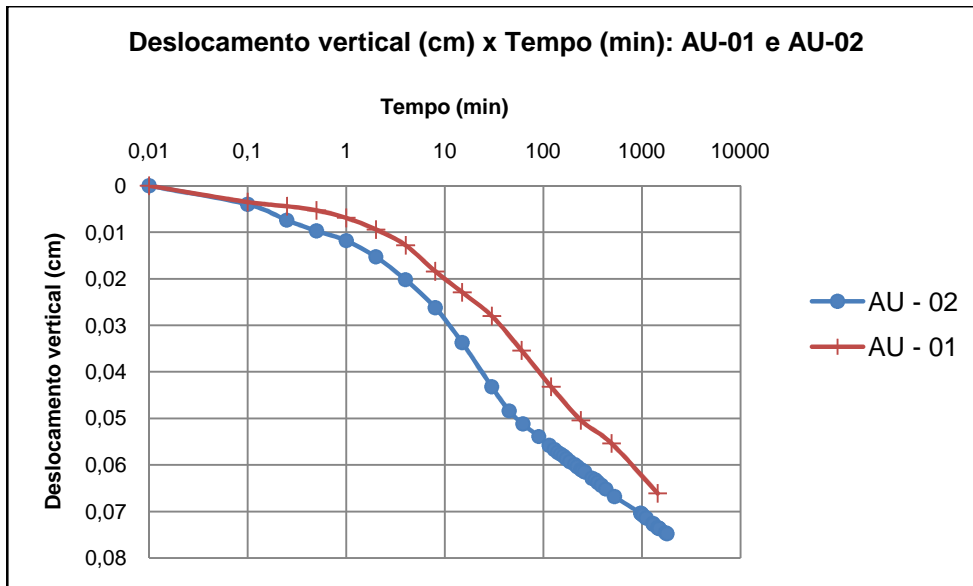


Figura 4.4 – Comparação das curvas do sétimo estágio de carregamento

As Figura 4.7 e Figura 4.8 apresentam os valores de c_v em função da tensão vertical, para os ensaios AU-01 e AU-02, respectivamente. Os valores de c_v foram obtidos pelo método de Taylor, pelo método de Casagrande e pelo ajuste das curvas do ensaio a curva teórica, descrita a seguir.

A partir dos resultados do recalque em um instante t e do recalque ao final do adensamento, em cada estágio, foram obtidos os valores da porcentagem média de adensamento, de acordo com a equação 2.13. Foram também determinadas as porcentagens de adensamento através das relações empíricas de Taylor (1948), equações 2.14 e 2.15.

As curvas, U Recalque e U Taylor, foram ajustadas a curva teórica da teoria do adensamento unidimensional, Tabela 2.1, e a curva teórica proposta por Bishop e Henkel (1952), Tabela 2.2. Os valores do fator tempo, T_v , para as curvas U Recalque e U Taylor, foram determinados variando os valores de c_v , obtidos a partir dos métodos de Taylor e Casagrande.

A Figura 4.6 ilustra as curvas da porcentagem média de adensamento *versus* o fator tempo, do ensaio AU-01, durante o estágio sete e a Figura 4.6 ilustra as curvas da porcentagem média de adensamento *versus* o fator tempo, do ensaio AU-02, durante o estágio com vácuo, sete. O valor do c_v foi determinado para o melhor ajuste das curvas a um fator tempo com valor na ordem de 0,5.

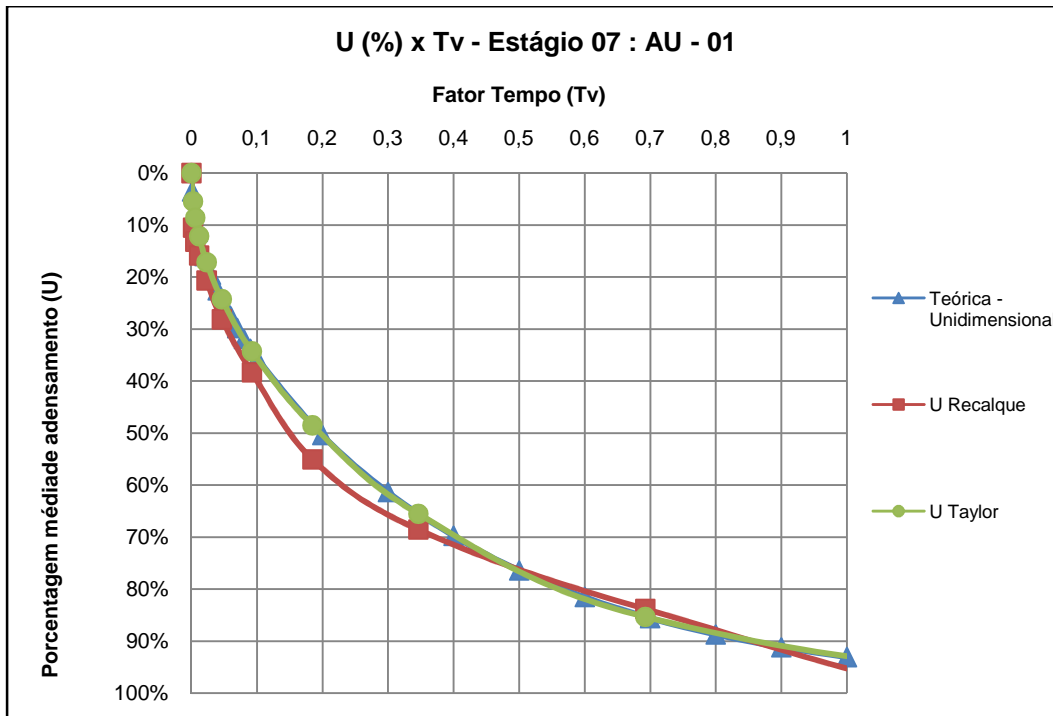


Figura 4.5 – Porcentagem média de adensamento *versus* fator tempo: AU-01

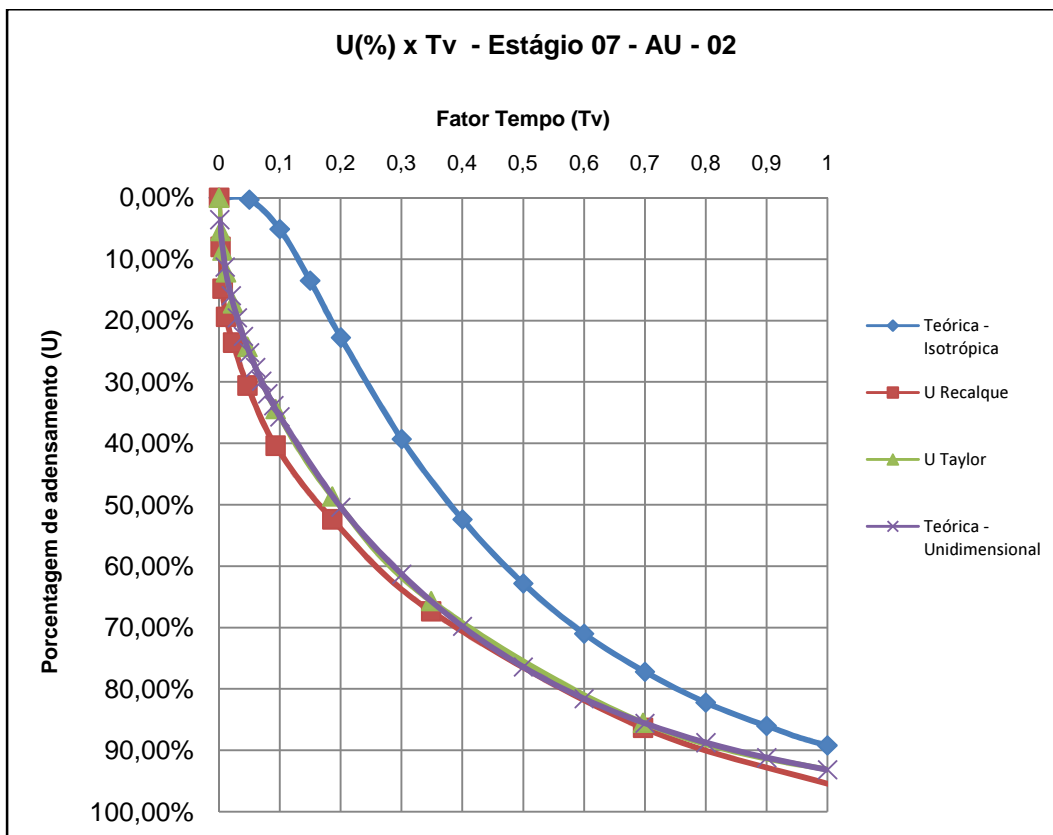


Figura 4.6 - Porcentagem média de adensamento *versus* fator tempo: AU-02

Observa-se na Figura 4.6 que o comportamento da aplicação do vácuo, no ensaio edométrico, foi de forma similar a curva teórica de adensamento unidimensional, de maneira idêntica ao comportamento com incremento de carga do ensaio AU-01, conforme ilustra a Figura 4.5. O grau de adensamento médio ocorre de maneira mais rápida no início, a velocidade do adensamento diminui e U se aproxima assintoticamente a 1, conforme a curva teórica.

A partir das figuras 4.7 e 4.8, nota-se que as curvas se iniciam com valores mais elevados de c_v e decrescem rapidamente até ficarem relativamente constantes. A partir dos resultados encontrados de c_v , conclui-se que a ação do carregamento com incremento de carga, bem como a ação do vácuo, resulta em valores de coeficiente de adensamento similares, da mesma ordem de grandeza.

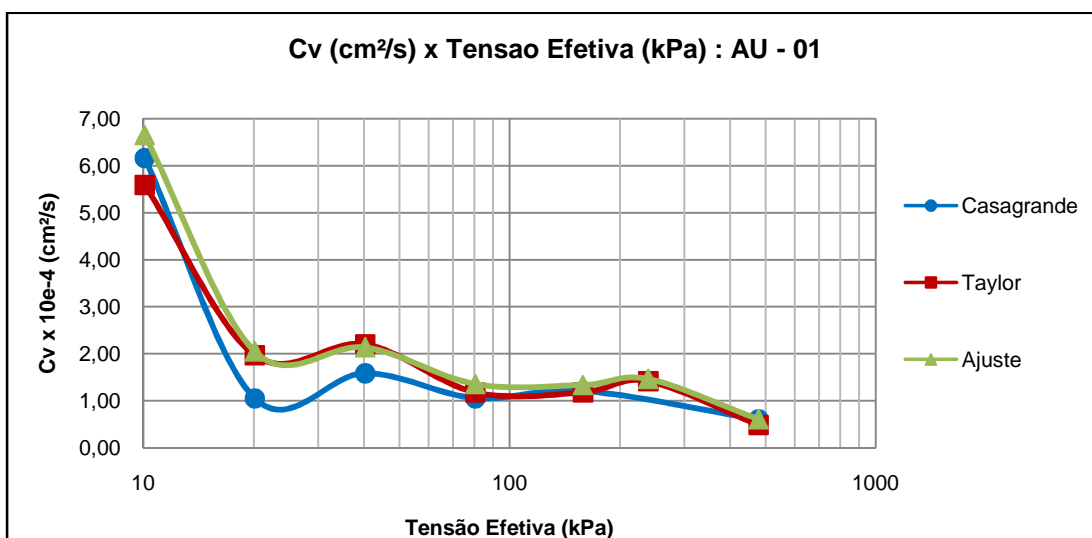


Figura 4.7 - Coeficiente de adensamento *versus* tensão vertical efetiva para ensaio AU-01

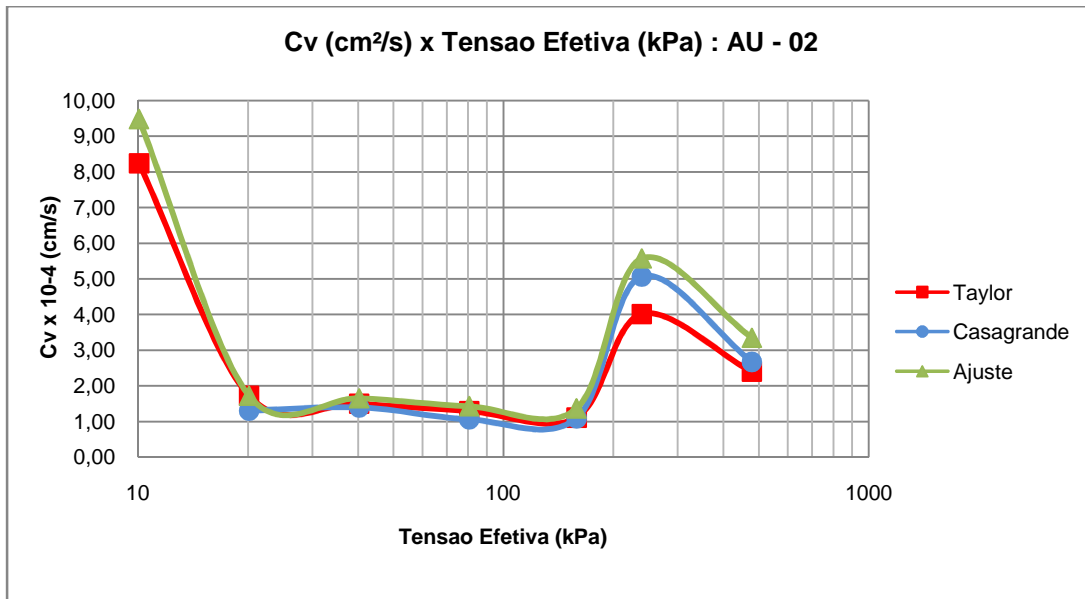


Figura 4.8 - Coeficiente de adensamento *versus* tensão vertical efetiva para ensaio AU-02

O coeficiente de permeabilidade, k_v , do solo foi estimado a partir dos resultados dos ensaios de adensamento unidimensional por cálculo indireto, de acordo com a teoria de Terzaghi, utilizando a seguinte expressão:

$$k_v = m_v \cdot c_v \cdot \gamma_w \quad \text{Equação 4.1}$$

Em cada ensaio de adensamento unidimensional realizado, foram utilizados os três diferentes valores de c_v obtidos (pelo método de Taylor, Casagrande e pelo ajuste da curva do ensaio a curva teórica) para determinar os valores do coeficiente de permeabilidade, apresentados na Figura 4.9 e Figura 4.10.

Na Figura 4.9, observa-se uma leve dispersão para as tensões de 20 e 40 kPa, na determinação do k_v , ao utilizar os valores de c_v determinados pelo método de Casagrande. Observa-se na Figura 4.10 que os valores de permeabilidade encontram-se na mesma ordem de grandeza, para os diferentes valores de k_v determinados.

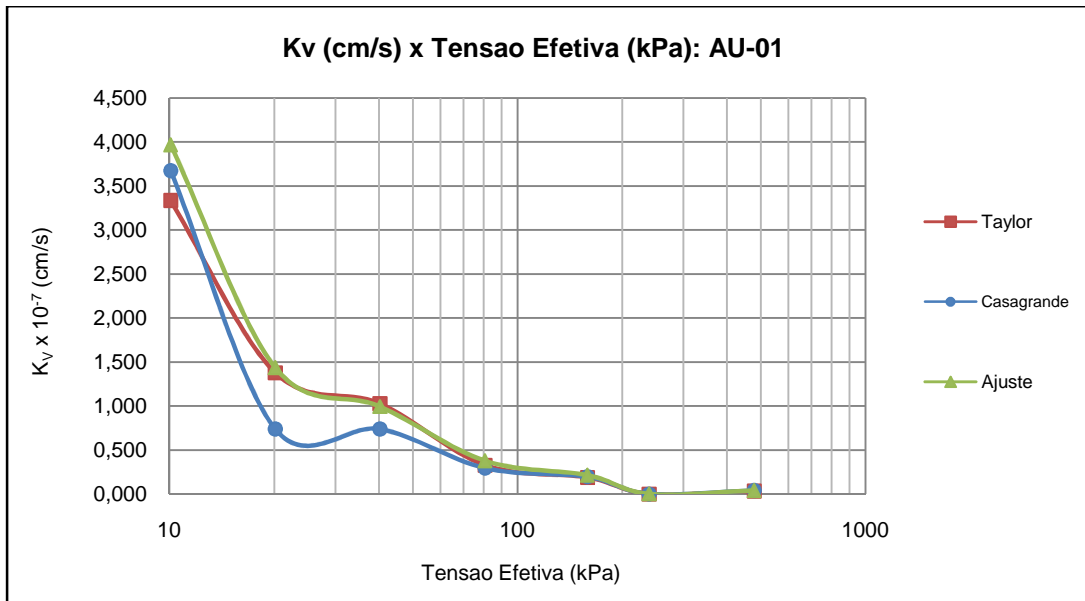


Figura 4.9 – Permeabilidade *versus* tensão vertical efetiva para ensaio AU-01

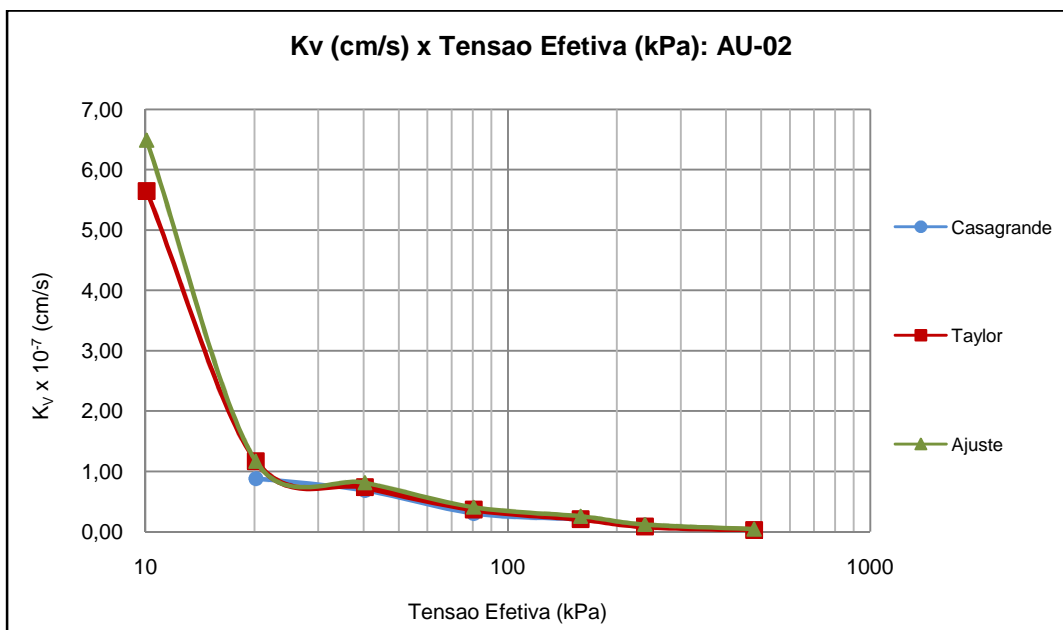


Figura 4.10 – Permeabilidade *versus* tensão vertical efetiva para ensaio AU-02

De uma forma geral, nota-se uma tendência de diminuição da permeabilidade com o aumento do nível de tensões, sendo que, a partir da tensão efetiva de 20 kPa, os valores de k_v apresentaram uma coerência na ordem de grandeza, para ambos os ensaios, AU-01 e AU-02 (Figura 4.11).

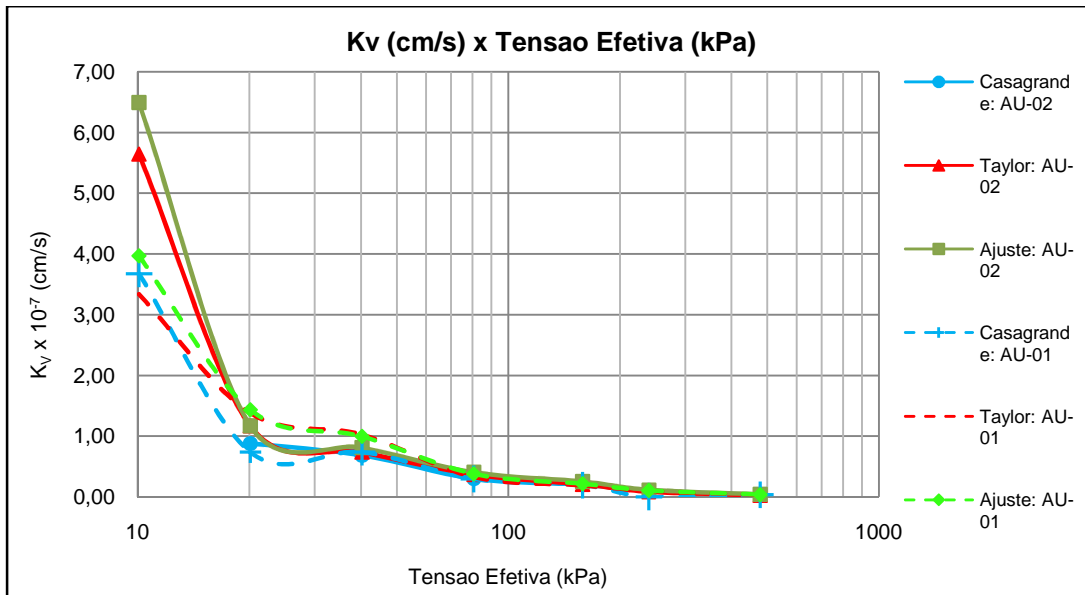


Figura 4.11 – Coeficiente de Permeabilidade *versus* tensão vertical efetiva

Na tabela 4,5 são mostrados os valores do índice de compressão virgem (C_c) e do índice recompressão (C_r), obtidos a partir das curvas dos ensaios de adensamento unidimensional, realizados no presente trabalho.

Tabela 4.5 – Valores dos parâmetros de compressibilidade

	Ensaio	
	AU-01	AU-02
w (%)	134,18	135,68
e_0	3,61	3,63
C_c'	1,12	1,18
C_c''	1,2	1,22
C_c'''	1,22	1,39
C_c''''	0,86	0,99
C_c	1,10	1,20
C_r	0,11	0,19
C_r/C_c	10,00%	15,90%
$C_c/(1+e_0)$	0,239	0,258

O índice de compressão, C_c , é um dos parâmetros mais importantes na caracterização da compressibilidade dos solos, pois comanda o adensamento do solo na região normalmente adensada, ou seja, na linha de compressão virgem.

Os valores de C_c' ; C_c'' ; C_c''' e C_c'''' foram obtidos no trecho da reta virgem, onde:

C_c' – obtido no trecho entre os estágios 3 ao 4;

C_c'' – obtido no trecho entre os estágios 4 ao 5;

C_c''' – obtido no trecho entre os estágios 5 ao 6;

C_c'''' – obtido no trecho entre os estágios 6 ao 7.

Os valores de C_c'''' , obtidos a partir dos estágios de comparação da natureza de pressão, carga ou vácuo, apresentaram valores de 0,86 e 0,99, respectivamente, indicando uma coerência nos resultados.

Os valores de C_c , 1,10 e 1,20 foram obtidos a partir dos valores representativos da reta de compressão virgem, isto é, o valor médio da reta de compressão virgem de cada ensaio, AU-01 (carga) e AU-02 (vácuo), respectivamente.

Quanto aos valores de C_r , 0,11 e 0,19, foram adotados os valores médios do trecho de recompressão e expansão de cada ensaio, AU-01 e AU-02.

Para fins de comparação, na Tabela 4.6, são mostrados alguns valores de índices de compressão típicos de alguns solos argilosos moles do Rio de Janeiro, indicando coerência nos resultados. Os valores obtidos são relativos a faixa dos resultados obtidos segundo os respectivos autores.

Tabela 4.6 – Índices de compressibilidade para solos moles do Estado do Rio de Janeiro

Referência	Escavação Experimental Sarapui	Baixada de Jacarepaguá	Barra da Tijuca	Rio Polímeros	Santa Cruz	Santa Cruz	Rio de Janeiro (Mangues e SFL)	Presente Estudo
	Sayao (1980)	Garcés (1995)	Almeida (1996)	Spannenberg (2003)	Santos (2004)	De Campos (2006)	Massad (2009)	
C_c	1,41 a 2,56	0,25 a 0,75	-	0,86 a 2,41	-	1,12 a 1,96	-	1,18 a 1,26
C_r	0,25 a 0,55	0,065 a 0,34	-	0,16 a 0,28	-	0,13 a 0,27	-	0,11 a 0,19
$\frac{C_c}{1 + e_0}$	-	-	0,52	-	0,23 a 0,26	0,19 a 0,45	0,3 a 0,5 (0,41)	0,26 a 0,27
C_r/C_c (%)	-	-	10	-	-	10 a 23	7 a 15	9 a 15

4.3. Ensaio de Adensamento Isotrópico

Nos ensaios de adensamento isotrópico, foi gerado um excesso de poropressão positivo, através da aplicação de uma tensão confinante de aproximadamente 200 kPa, e realizado o adensamento do corpo de prova através da ação da pressão de vácuo ou da pressão atmosférica (sem vácuo). A duração do ensaio foi determinada em função da equalização da poropressão no topo do corpo de prova.

Os resultados dos ensaios serão apresentados na forma de gráfico, contendo as curvas de variação da poropressão *versus* o tempo, a porcentagem média de adensamento *versus* o fator tempo e a porcentagem de deformação volumétrica *versus* o tempo.

A Tabela 4.7 apresenta o resumo das características iniciais dos corpos de prova ensaiados: altura, coeficiente de adensamento, c_v , índices físicos e a poropressão final e inicial de cada ensaio.

A altura do corpo de prova foi determinada antes do início de cada ensaio, através de um paquímetro digital. A determinação dos valores dos coeficientes de adensamento, c_v , será descrito no decorrer do capítulo.

A umidade, w , da amostra foi medida em estufa de 110°C com o resto do material da talhagem de cada corpo de prova. A densidade relativa dos grãos, G_s , foi admitida 2,678g/cm³, a partir do ensaio de caracterização. A partir das relações de índices físicos da Mecânica dos Solos, foi obtido o peso específico seco, γ_d , o índice de vazios, e , e por fim, o grau de saturação inicial, S , de cada amostra.

A poropressão, inicial e final, foi determinada através do sistema de aquisição de dados central do LGMA – PUC-Rio.

Serão apresentados os resultados da variação volumétrica, obtidos a partir das diferenças de peso, geometria, umidade e variação do medidor de volume.

Tabela 4.7 – Resumo dos ensaios realizados

		SEM VACUO			COM VACUO		
Altura (cm)		2,418	3,675	5,513	2,47	3,773	5,484
Diâmetro (cm)		3,699	3,81	3,8	3,79	3,773	3,672
Cv (cm ² /s)		1,12E-04	1,28E-04	1,33E-04	1,35E-04	1,12E-04	1,70E-04
Índices Físicos	S (%)	98,7	90,83	90,31	91,78	94,73	94,58
	w _o (%)	129,2	148,24	136,28	129,2	142,24	114,76
	e _o	3,51	4,37	4,04	3,76	4,02	3,24
U (kPa)	U _o	197,7	199,2	199,1	199,3	196,4	198,6
	U100	1,6	4,2	6,1	-43,4	-21,7	-18,0

4.3.1. Ensaio com vácuo

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de adensamento isotrópico executados com ação da pressão de vácuo, cujo valor médio aplicado foi de -80,5 kPa.

4.3.1.1. Comportamento da Poropressão

Em cada corpo de prova foi medido o valor do parâmetro B, conforme descrito no item 3.3.2.4, a fim de garantir a saturação da amostra. Finalizada a saturação do corpo de prova, iniciava-se a fase de adensamento que é a elevação da tensão confinante até a obtenção da tensão efetiva de ensaio, 200 kPa. A válvula de aplicação da pressão de vácuo no sistema foi liberada, e foi medido o comportamento da poropressão durante o ensaio, através do transdutor de pressão acoplado ao sistema.

A Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14 apresentam os gráficos dos resultados da poropressão *versus* o tempo, para os ensaios cujas alturas foram aproximadamente de 5,5; 3,5 e 2,5 cm, respectivamente.

Mohamedelhassan e Shang (2002), apresentaram resultados onde o processo de adensamento começa com um excesso de poropressão equivalente a pressão aplicada e terminam com uma poropressão negativa equivalente a pressão de vácuo aplicada.

O valor médio da pressão de vácuo aplicada foi de $- 80,5$ kPa, e os resultados da poropressão ao final de cada ensaio, isto é, quando a poropressão permanecesse praticamente constante, ou com uma variação de $0,5$ kPa/hora, são:

- Ensaio de $5,5$ cm: Poropressão inicial $198,6$ kPa e poropressão final de $- 17,9$ kPa.
- Ensaio de $3,8$ cm: Poropressão inicial $196,4$ kPa e poropressão final de $- 21,7$ kPa.
- Ensaio de $2,5$ cm: Poropressão inicial $199,3$ kPa e poropressão final de $- 43,4$ kPa.

Apesar do transdutor de pressão disponível para utilização nessa pesquisa, ter uma capacidade mínima de $- 50$ kPa, ou seja, não poder alcançar o valor da pressão de vácuo aplicada, os resultados da poropressão final apresentaram uma variação de $- 43,3$ a $- 17,9$ kPa entre os ensaios, para umidades com intervalo entre $114,7$ a $142,2$ %. Isto pode ser explicado devido a presença de bolhas de ar na água do solo (solução do solo), além disso, a pedra porosa disponível para utilização no ensaio não ser de alto valor de entrada de ar.

A pedra porosa tem um limite de diferença de poropressão de ar e água, que resiste até que comece a permitir o fluxo de ar pela pedra. Este limite é definido pela dimensão dos poros da pedra, quanto menor a dimensão dos poros, maior a diferença de poropressão possível de ser aplicada. Uma pedra porosa de alto valor de entrada permite a passagem de água e evita a passagem de ar. Isto acontece devido às pequenas dimensões e à uniformidade dos poros da pedra. Na pedra porosa de baixo valor de entrada, ultrapassado o valor de entrada de ar, ocorrerá fluxo de ar através da pedra para o sistema de medição.

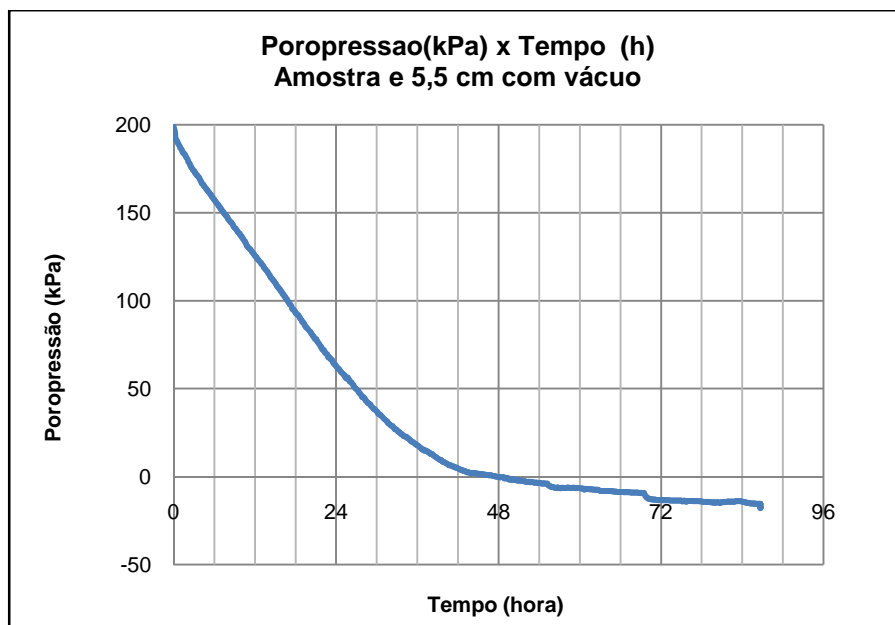


Figura 4.12 - Poropressão *versus* tempo, amostra 5,5 cm com vácuo

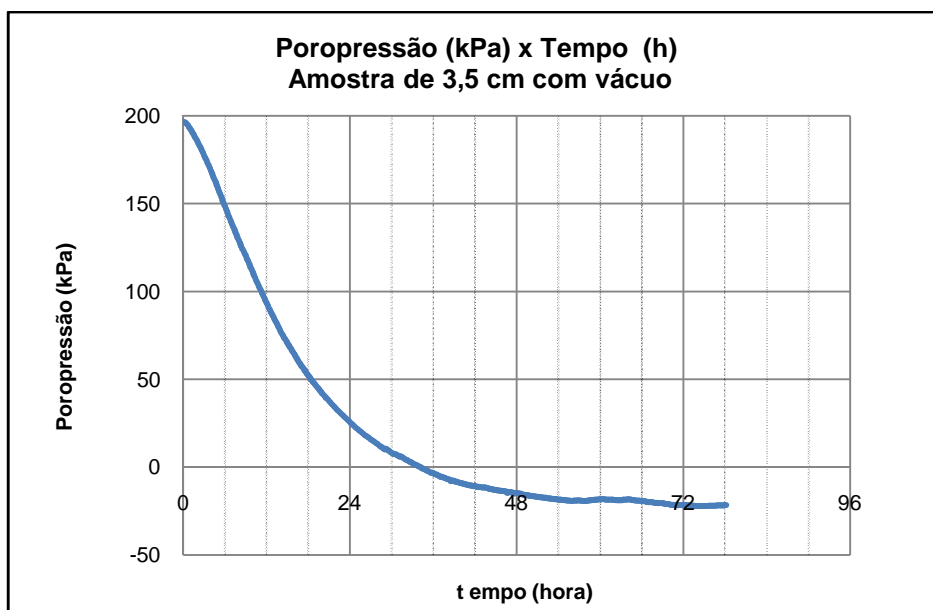


Figura 4.13 - Poropressão *versus* tempo, amostra 3,8 cm com vácuo

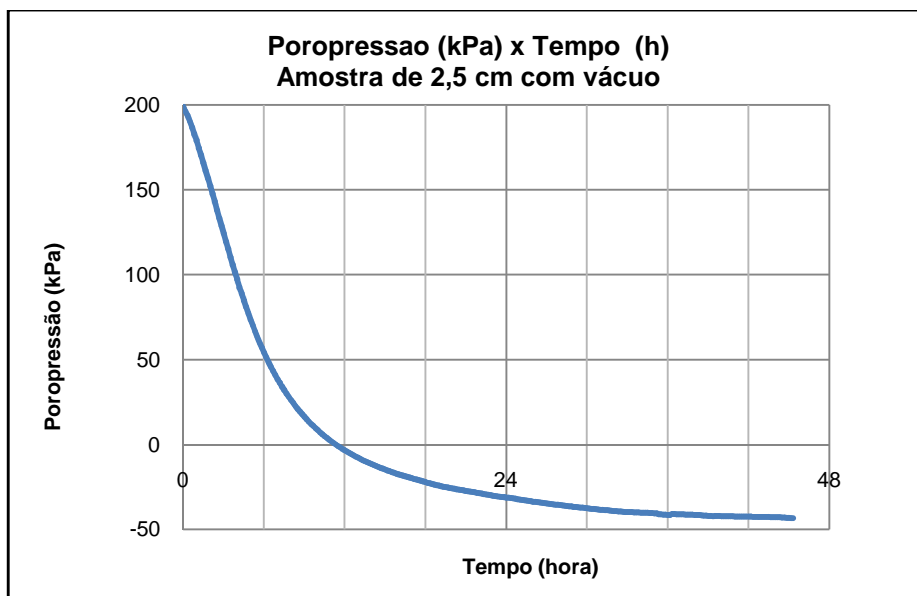


Figura 4.14 - Poropressão *versus* tempo, amostra 2,5 cm com vácuo

Em suma, a partir do comportamento apresentado através dos gráficos, a variação da poropressão inicia-se relativamente com alta velocidade, mas com o tempo, a variação decresce substancialmente, conforme no processo de adensamento. Como o objetivo do ensaio foi observar o comportamento da poropressão, os corpos de prova não foram levados a ruptura.

4.3.1.2.

Determinação do Coeficiente de Adensamento, c_v

A Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17 apresentam os resultados das curvas de porcentagem média de adensamento *versus* o fator tempo, para os ensaios cujas alturas foram aproximadamente de 5,5; 3,8 e 2,5 cm, respectivamente.

A partir dos resultados da variação da poropressão, em um instante t e da variação final da poropressão, foi determinado o grau de adensamento médio de cada ensaio (Curva U Ensaio). Foram também determinadas as porcentagens de adensamento através das relações empíricas de Taylor (1948), equações 2.14 e 2.15 (Curva U Taylor).

As curvas dos ensaios, U Ensaio e U Taylor, foram ajustadas a curva teórica de Bishop e Henkel (1962), cujos valores foram determinados na Tabela 2.2. O valor de T_v foi obtido de forma similar ao ensaio de adensamento unidimensional, onde os valores do fator tempo, para as curvas U Ensaio e U Taylor, foram

determinados variando o valor de c_v . Os valores de c_v adotados inicialmente foram estimados variando os resultados de c_v do ensaio de adensamento unidimensional, no edométrico.

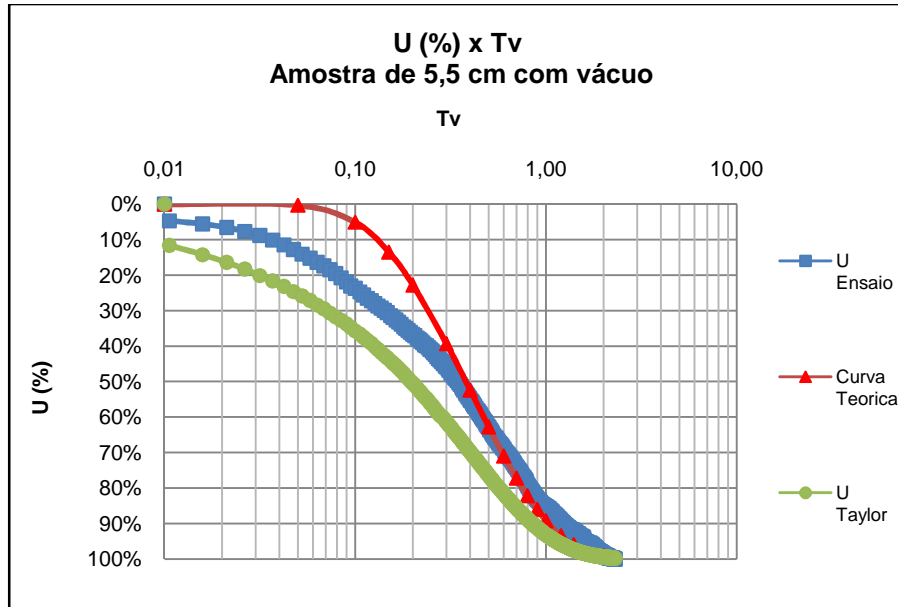


Figura 4.15 – Grau de adensamento *versus* Fator Tempo, amostra 5,5 cm com vácuo

Para a amostra de altura aproximada de 5,5 cm, ensaiada com ação da pressão de vácuo, o valor de c_v estimado foi de $1,70 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$.

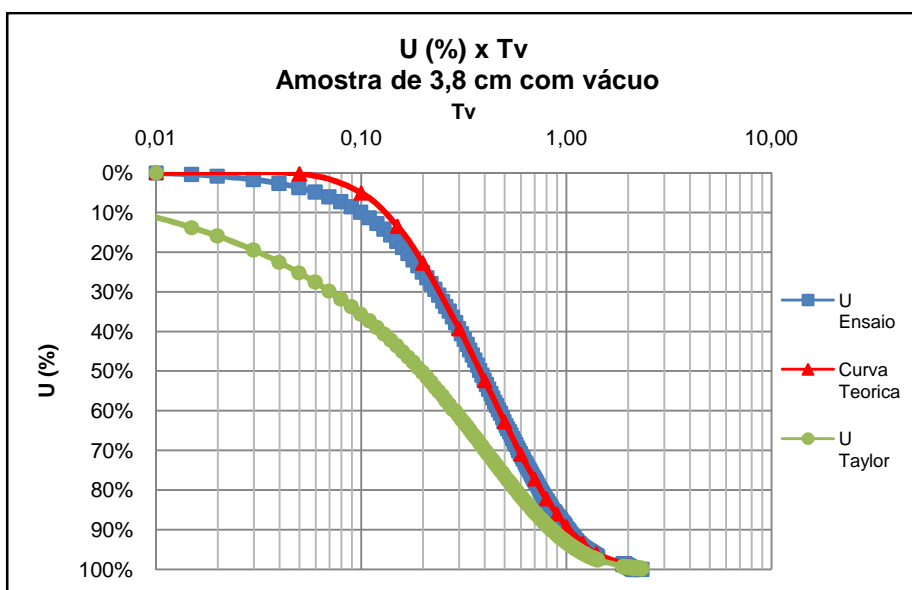


Figura 4.16 - Grau de adensamento *versus* Fator Tempo, amostra 3,8 cm com vácuo

Para a amostra de altura aproximada de 3,8 cm, ensaiada com ação de vácuo, o valor de c_v estimado foi de $1,12 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$.

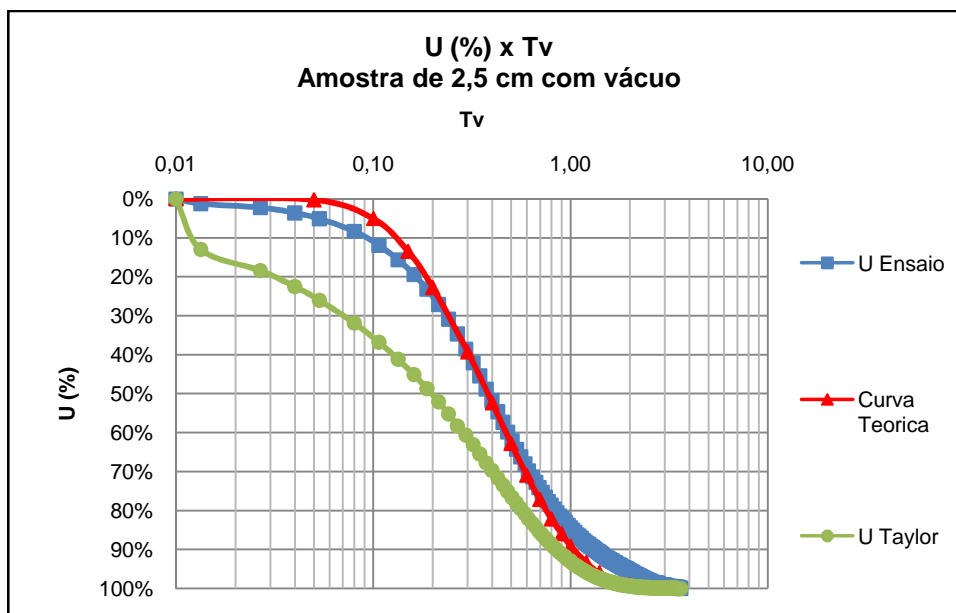


Figura 4.17 – Grau de Adensamento *versus* Fator Tempo, amostra 2,5 cm com vácuo

Para a amostra de altura aproximada de 2,5 cm, ensaiada com uma pressão de adensamento de vácuo, o valor de c_v estimado foi de $1,35 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$.

De um modo geral, a forma das curvas do ensaio, observadas nos três ensaios, não se afasta de forma significativa da relação teórica. Nota-se que a curva do ensaio segue praticamente a mesma no trecho central, da curva teórica, entre valores do fator tempo entre 0,4 a 0,6, aproximadamente. Para valores inferiores a 0,4 e superiores a 0,6 há um leve distanciamento da curva teórica, sugerindo uma variação no valor do coeficiente de adensamento.

4.3.2. Ensaio sem vácuo

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de adensamento isotrópico, com ação da pressão atmosférica.

4.3.2.1. Comportamento da Poropressão

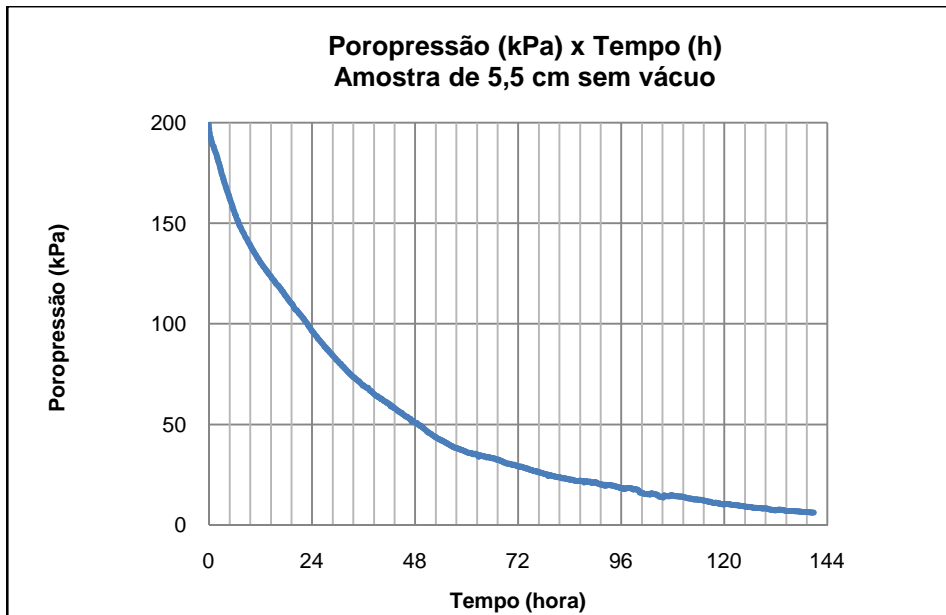
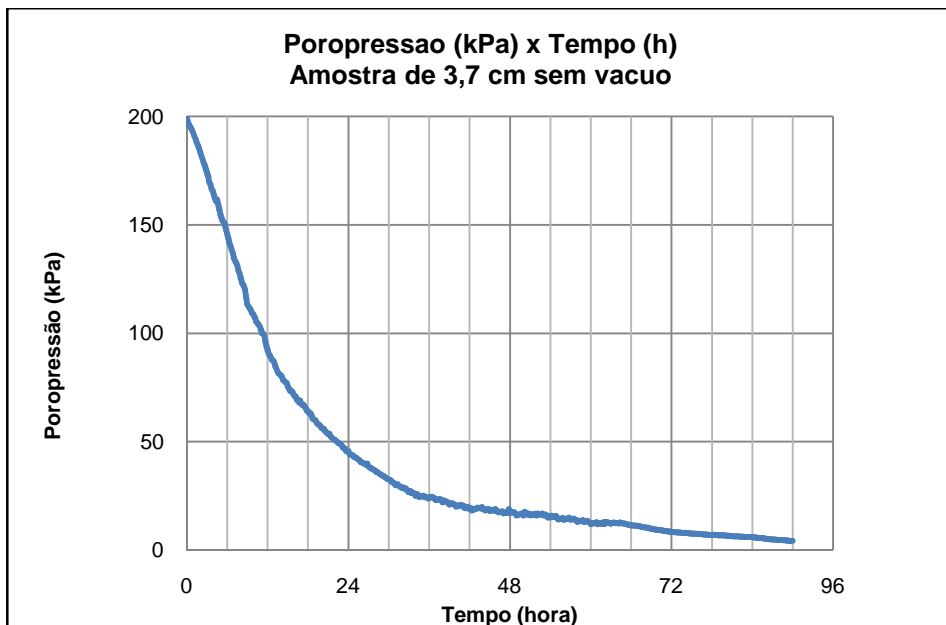
Da mesma forma como descrito no ensaio com vácuo, foi medido o valor do parâmetro B, conforme o item 3.3.2.4, a fim de garantir a saturação da amostra. Finalizada a saturação do corpo de prova, iniciava-se a fase de adensamento, elevando a tensão confinante até obter-se a tensão efetiva de ensaio, 200 kPa, como para os ensaios executados com ação do vácuo. A válvula do sistema e os dois engates do tanque, com a interface ar/água, foram liberados para a pressão atmosférica, medindo assim, o comportamento da poropressão durante o ensaio.

A Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20 apresentam os gráficos dos resultados da poropressão *versus* o tempo, para os ensaios cujas alturas foram aproximadamente de 5,5; 3,5 e 2,5 cm, respectivamente.

Os resultados da poropressão ao final de cada ensaio, ou seja, quando a mesma foi estabilizada, são:

- Ensaio de 5,5 cm: Poropressão inicial 197,7 kPa e poropressão final de - 6,1 kPa.
- Ensaio de 3,7 cm: Poropressão inicial 199,2 kPa e poropressão final de - 4,2 kPa.
- Ensaio de 2,5 cm: Poropressão inicial 199,0 kPa e poropressão final de 1,6 kPa.

Há uma leve variação nos valores da poropressão final, isto pode ser devido a presença de ar no solo.

Figura 4.18 - Poropressão *versus* tempo, amostra 5,5 cm sem vácuoFigura 4.19 - Poropressão *versus* tempo, amostra 3,7 cm sem vácuo

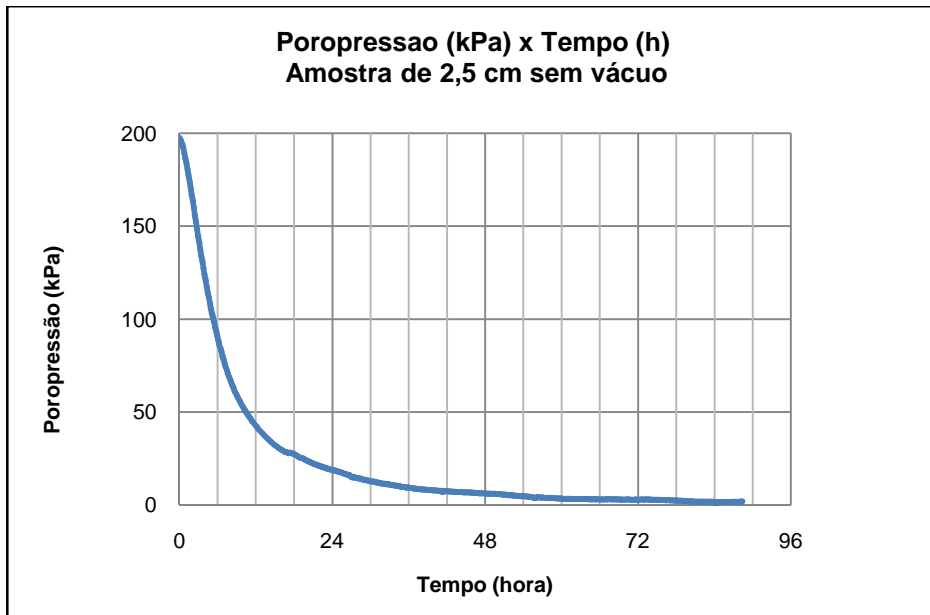


Figura 4.20 - Poropressão *versus* tempo, amostra 2,5 cm sem vácuo

As variações da poropressão apresentaram um comportamento similar ao processo de adensamento dos ensaios com ação da pressão de vácuo. Uma rápida variação no início do adensamento, e conforme o processo de adensamento vai sendo concluído, há uma diminuição na velocidade do adensamento.

4.3.2.2.

Determinação do Coeficiente de Adensamento, c_v

A Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23 apresentam os resultados das curvas de porcentagem média de adensamento *versus* o fator tempo, para os ensaios com ação da pressão atmosférica, cujas alturas foram aproximadamente de 5,5; 3,5 e 2,5 cm, respectivamente.

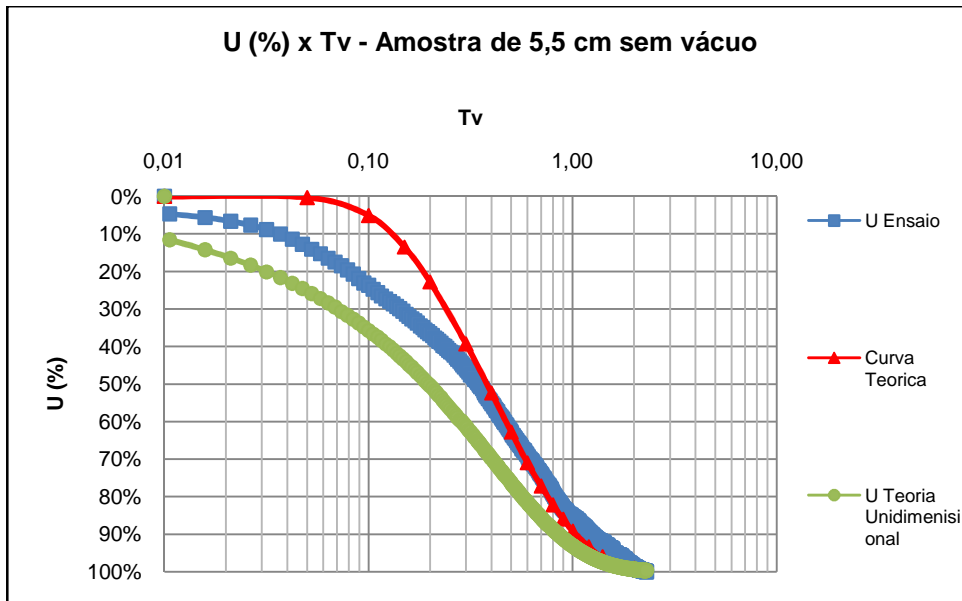


Figura 4.21 - Grau de Adensamento *versus* Fator Tempo, amostra 5,5 cm sem vácuo

Para a amostra de altura de 5,5 cm, ensaiada com ação da pressão atmosférica, o valor de c_v estimado foi de $1,33 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$.

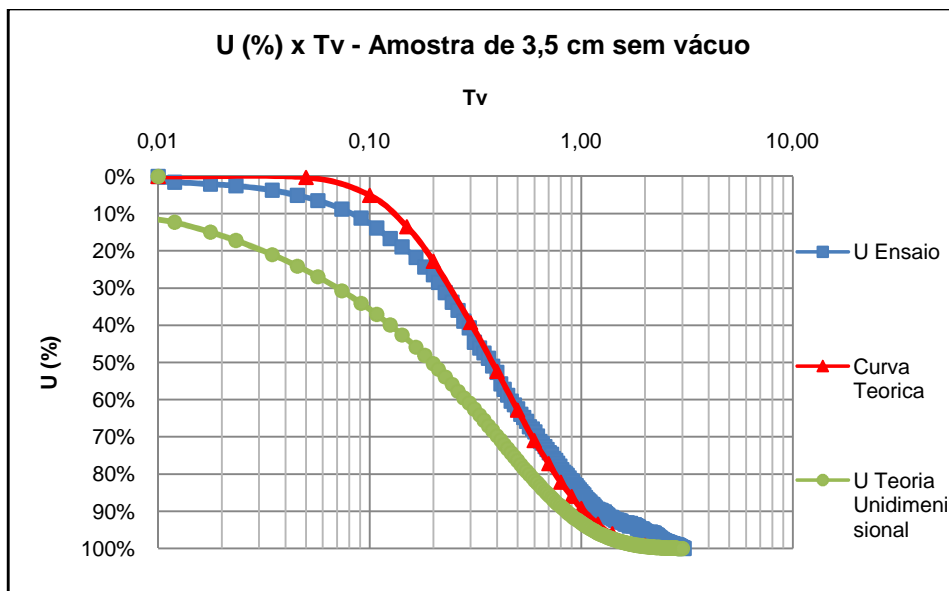


Figura 4.22 - Grau de Adensamento *versus* Fator Tempo, amostra 3,5 cm sem vácuo

Para a amostra de altura de 3,5 cm, ensaiada com ação da pressão de atmosférica, o valor de c_v estimado foi de $1,28 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$.

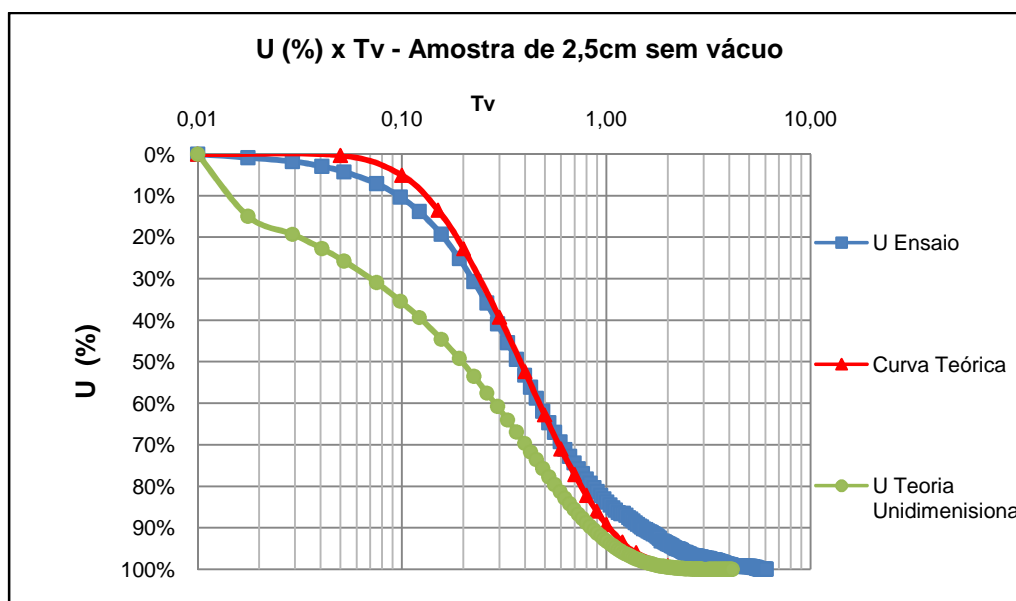


Figura 4.23 - Grau de Adensamento *versus* Fator Tempo, amostra 2,5 cm sem vácuo

Para a amostra de altura aproximada de 2,5 cm, ensaiada com uma pressão de adensamento com vácuo, o valor de c_v estimado foi de $1,12 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Observa-se o mesmo comportamento de c_v , conforme nos ensaios com ação da pressão de vácuo, onde há um distanciamento da curva U Ensaio da curva U Teórica, isto é, uma variação do valor de c_v no trecho inicial, no central e no final.

Considerando um valor médio de c_v , de $1,39 \times 10^{-4}$ e $1,24 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$, obtidos a partir da média de todos os ensaios com ação da pressão de vácuo e pressão atmosférica, respectivamente. Os valores apresentam bem similares, indicando que a natureza da pressão de adensamento, vácuo ou atmosférica, não tem efeito no comportamento de compressibilidade do solo, conforme relatado em pesquisa realizada por Mohamedelhassan & Shang (2002).

4.3.3. Comportamento da variação volumétrica

Após a finalização de cada ensaio, o corpo de prova foi cortado em pedaços, por meio de uma corda de violão, onde as alturas dos mesmos eram similares.

Foram imediatamente pesados e levados para a câmara úmida e através de um paquímetro digital, foi determinado a geometria, altura e diâmetro médio, para cada pedaço.

A Tabela 4.8 apresenta as variações do volume de cada ensaio, calculados a partir:

- da diferença do peso inicial e do peso final;
- da diferença do volume geométrico inicial e final;
- da diferença das umidades, inicial e final;
- da variação do medido de variação volumétrica (MVV).

Tabela 4.8 – Variação de volume dos corpos de prova

	Altura (cm)	ΔV (mL)			
		Peso	Volume	Umidade	MVV
SEM VÁCUO	2,418	9,00	8,10	7,53	9,35
	3,675	17,11	16,54	15,93	19,96
	5,513	19,11	18,48	17,79	21,44
COM VÁCUO	2,47	9,60	6,91	9,46	10,43
	3,773	13,81	13,81	14,15	14,60
	5,484	18,56	17,71	17,18	18,45

Os resultados das variações do volume determinados a partir do peso, volume, umidade e MVV apresentaram resultados coerentes entre si.

A seguir é apresentada a comparação da porcentagem de deformação volumétrica, calculados a partir da razão entre a variação do volume da câmara triaxial, para um instante t , e o volume inicial da amostra, determinado a partir da geometria da amostra.

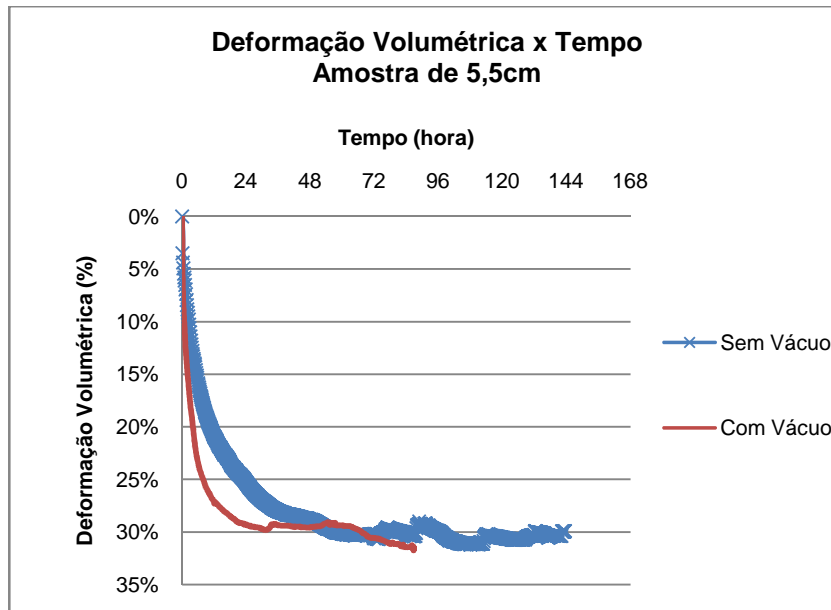


Figura 4.24 – Porcentagem de deformação volumétrica *versus* tempo, amostra de 5,5 cm

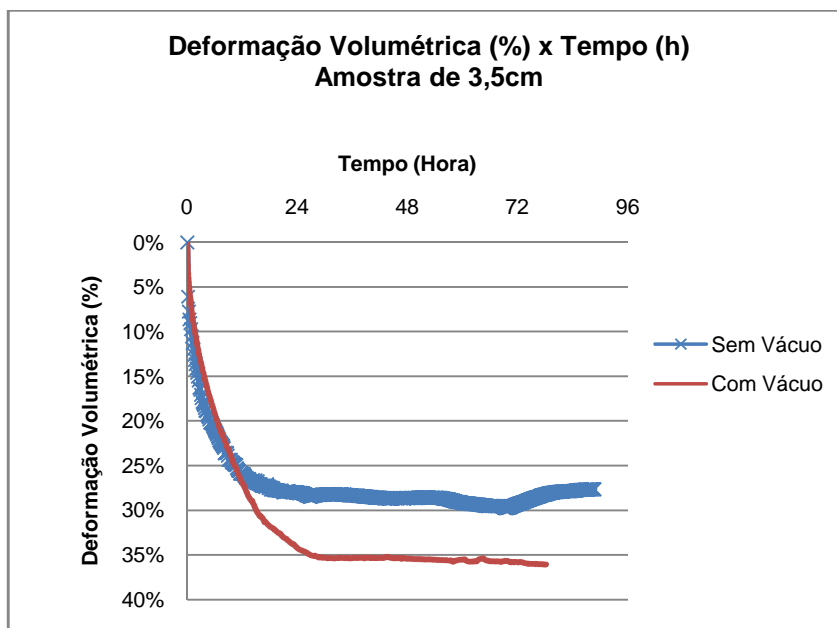


Figura 4.25 - Porcentagem de deformação volumétrica *versus* tempo, amostra de 3,5 cm

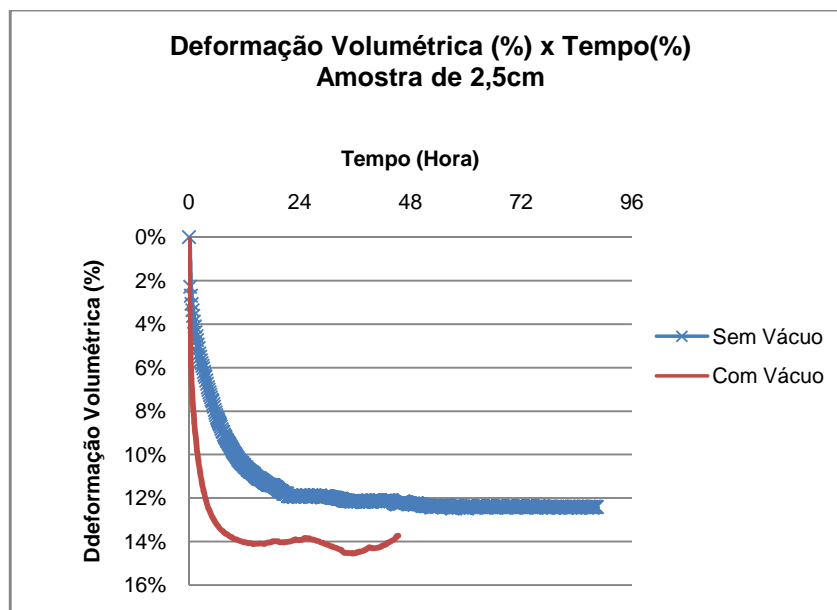


Figura 4.26 - Porcentagem de deformação volumétrica *versus* tempo, amostra de 5,5 cm

Observa-se que a porcentagem de deformação volumétrica dos ensaios com ação da pressão de vácuo apresentou um maior valor quando comparado aos ensaios realizados com ação da pressão atmosférica, isto é, sem vácuo. Os ensaios de altura de 5,5 cm, aproximadamente, apresentaram valores finais de deformação similares.

Porém, nos três casos, a velocidade de deformação com ação da pressão de vácuo foi mais rápida do que sem ação do mesmo, isto sugere a eficiência do método de adensamento a vácuo.

4.3.4. Comparação da poropressão

As Figura 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam a comparação da variação da poropressão *versus* o tempo, dos ensaios com a ação do vácuo, ou sem vácuo (ação da pressão atmosférica), para as amostras de altura média de 2,5; 3,5 e 5,5 cm, respectivamente.

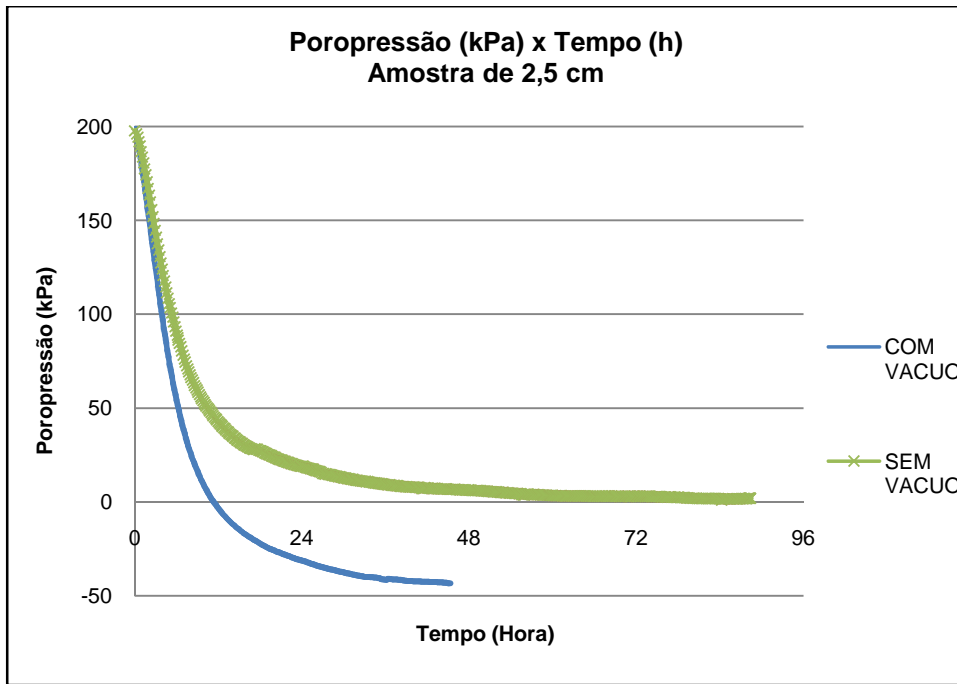


Figura 4.27 – Variação da poropressão *versus* o tempo para amostra de 2,5 cm.

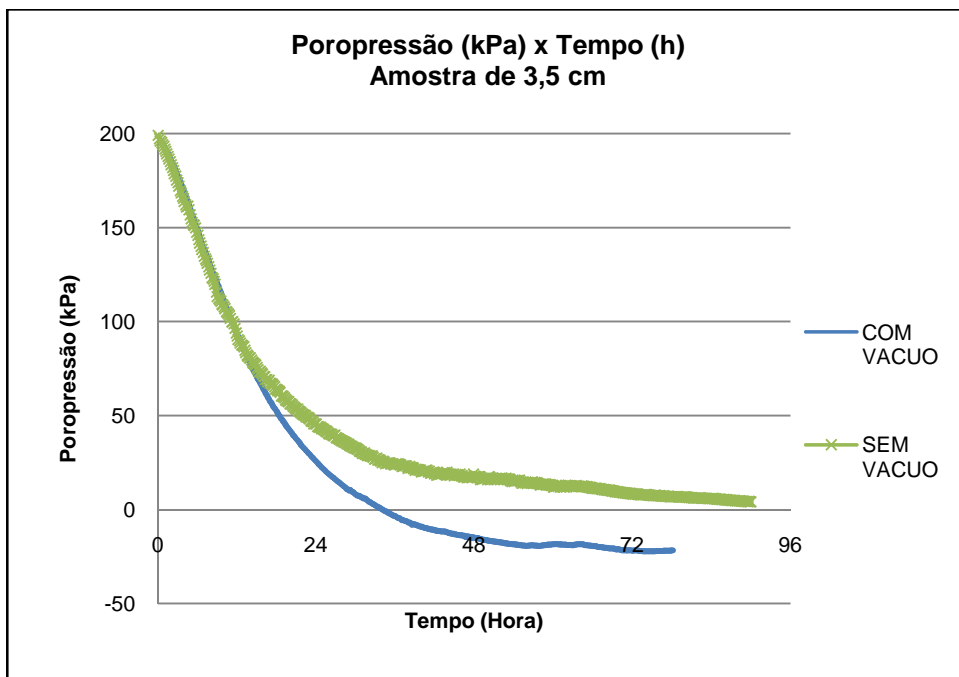


Figura 4.28 - Variação da poropressão *versus* o tempo para amostra de 3,5 cm.

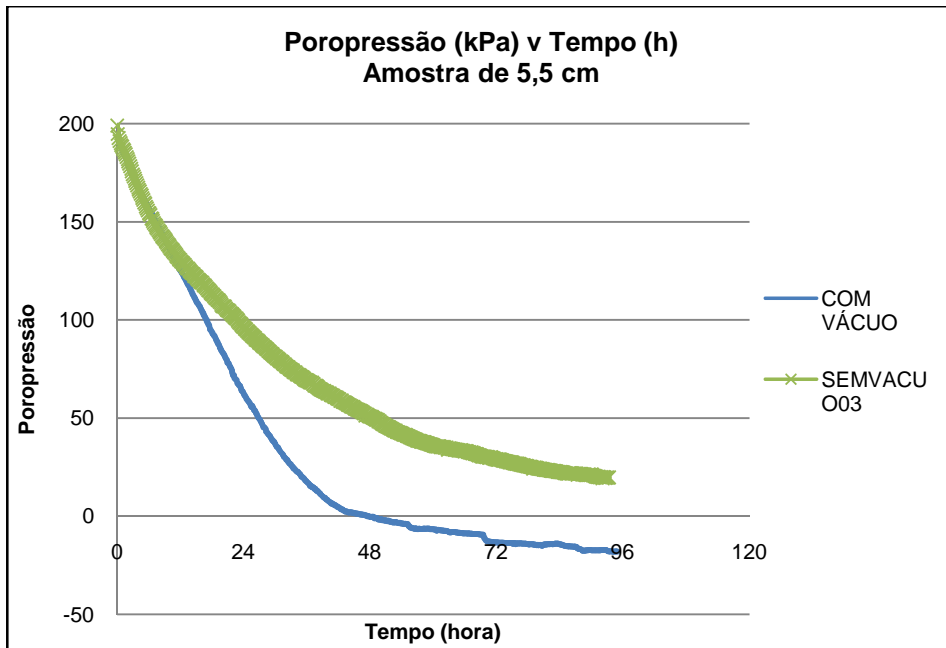


Figura 4.29 - Variação da poropressão *versus* o tempo para amostra de 5,5 cm.

Observa-se nos três casos, que a ação do vácuo acelera a dissipação da poropressão do solo mole, como mostra a comparação entre as curvas, com vácuo e sem vácuo, ou seja, o tempo diminui consideravelmente.