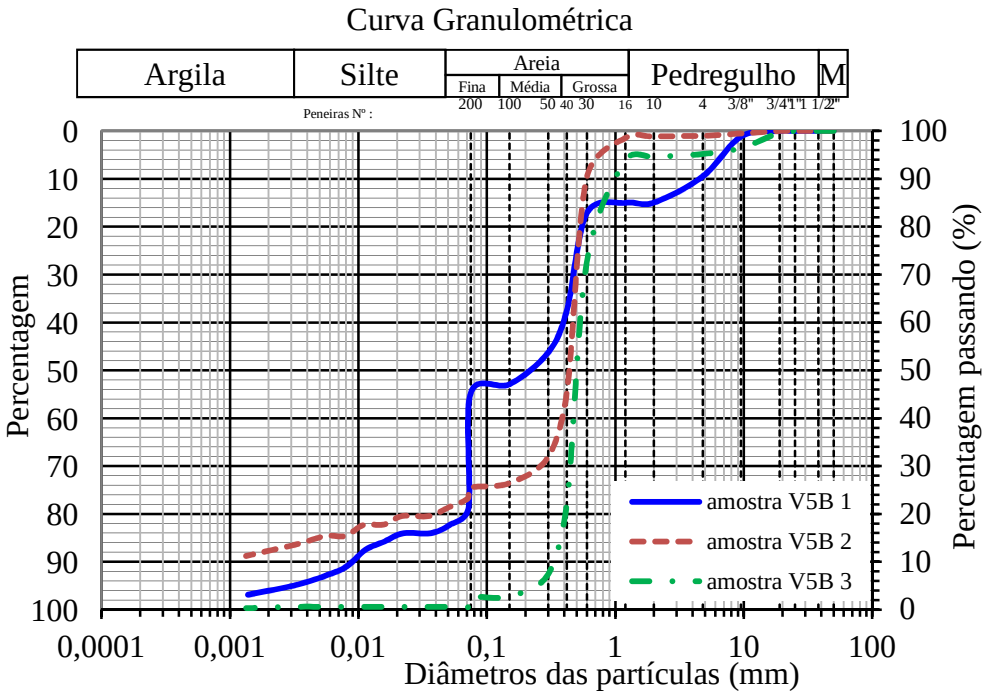

Figura 49 - Curvas granulométricas das amostras da vertical V5B.

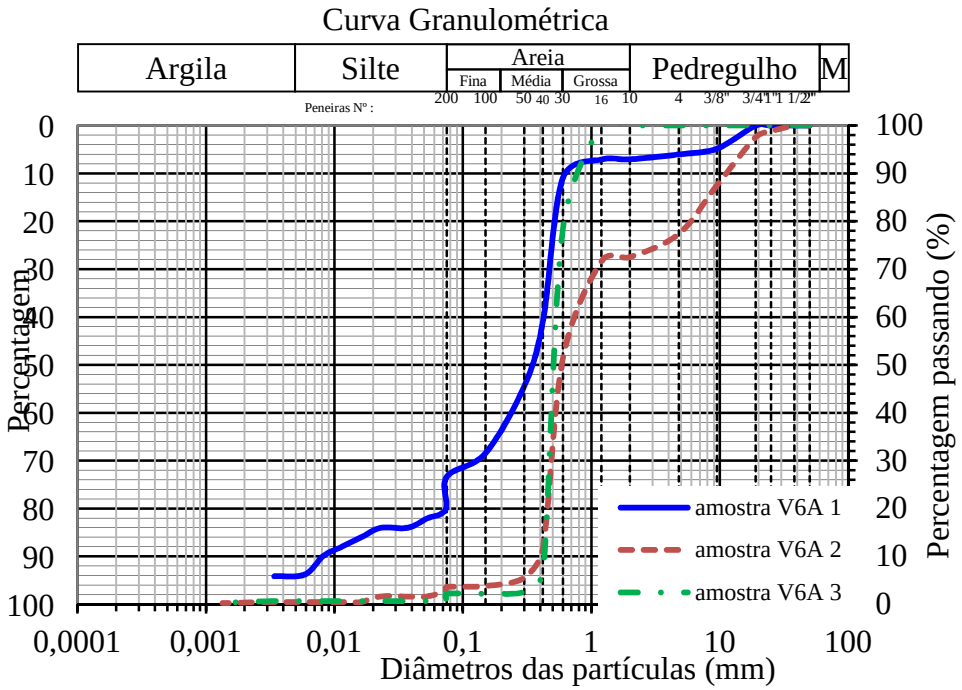

Figura 50 - Curvas granulométricas das amostras da vertical V6A.

A análise granulométrica revelou um material constituído da ordem de 68% de areia, 24% de silte e apenas 8% de argila, nos Shelbies V5B 1, V5B 2 e V6A 1. As demais amostras coletadas apresentaram solo predominantemente arenoso, como o observado no shelby V5B 3, mostrado na Figura 51.

(a) Areia.

(b) Mariscos.

Figura 51 – Areia e mariscos encontrados no shelby V5B 3.

(a) Shelby V6A 1. (b) Shelby V5B 1.

Figura 52 – Ensaios de caracterização dos shelbies V6A 1 e V5B 2.

Importante ressaltar que a curva apresenta um salto brusco na vizinhança da peneira #40. Vitor (2012) também observou em análises de ensaios realizados em depósitos argilosos próximos ao local, um padrão semelhante em vários corpos de prova, e ressaltou que embora o aspecto do solo observado sugira um solo de natureza argilosa, a curva granulométrica indica a predominância de areia. Este “salto” ocorrido na curva granulométrica foi inicialmente atribuído por Vitor (2012) à falha na calibração do densímetro. O ensaio foi então refeito, após recalibração do densímetro, porém as curvas mantiveram-se com o mesmo padrão de comportamento.

Destaca-se que embora este material (mariscos) apresente pouca representatividade em termos de peso, quando em grande quantidade, como mostra a Figura 53, pode contribuir para mascarar o aspecto da curva granulométrica.

(a) Shelby V5B 3. (b) Shelby V6A 2.

Figura 53 – Mariscos encontrados nos shelbies V5B 3 e V6A 2.

Os índices de consistência, limite de liquidez e de plasticidade, bem como a umidade do solo natural, peso específico, densidade dos grãos e índice de vazios inicial encontram-se resumidos na Tabela 13.

Na Tabela 13 estão apresentados valores médios para as verticais da fase de projeto, sendo que foram descartadas as informações referentes a profundidade de 2,58m na vertical V6 por mostrarem resultados muito distintos, que podem estar associados a existência de veio de areia. Embora a comparação entre as duas campanhas de ensaios esteja detalhada no Capítulo 4, pode-se ressaltar observando também a Tabela 8, uma redução acentuada da umidade natural, limite de liquidez, limite de plasticidade e de índice de vazios do solo desta segunda campanha. O peso específico apresentou aumento menos expressivo.

Tabela 13 – Ensaios de caracterização das amostras das verticais V5B e V6A, e valores médios na fase de projeto.

AMOSTRA	PROF. (m)	γ_{nat} (kN/m3)	G	e_0	w_{nat} (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
V5B 1	2,87	13,80	2,56	2,54	90,38	218,79	65,78	153,00
V5B2	3,80	13,20	2,60	3,52	130,15	45,00	16,41	28,59
V5 - Projeto	Media	11,12	2,12	12,02	417,70	594,67	154,33	440,33
V6A 1	2,29	12,80	2,53	3,68	136,74	102,80	34,20	68,60
V6 - Projeto	Media	11,08	2,19	10,25	386,53	626,33	133,33	493,00

3.4 Resultados dos Ensaios Convencionais (SIC)

Foram realizados 02 ensaios convencionais na vertical V5B (SIC02 e SIC03) e 01 ensaio na vertical V6 (SIC01) (Tabela 12).

O ensaio SIC03 foi feito em amostra amolgada. Na abertura do tubo Shelby V5B 2, como o material encontrado apresentou-se líquido e inconsistente, escorrendo do Shelby em sua abertura, este foi considerado amolgado. O terceiro ensaio SIC deste estudo foi feito com este solo, visando observar o comportamento do solo neste estado e comparar os resultados obtidos na amostra indeformada.

A Figura 54 mostra as curvas de índice de vazios normalizado (e/e_0) em função da tensão vertical efetiva dos ensaios SIC nas amostras indeformadas, em conjunto com a curva relativa ao corpo de prova amolgado. A tensão efetiva de pré-adensamento encontra-se resumida na Tabela 14, incluindo outros índices necessários para a classificação quanto à qualidade dos corpos de prova As amostras apresentaram valores de $\Delta e/e_0$ variando de 0,17 a 0,41, muito superiores a 0,14, que representa o valor limite, a partir do qual Lunne *et al* (1997), Coutinho (1998, 2007), Oliveira (2002) e Andrade (2009) as classificam como “muito ruins”.

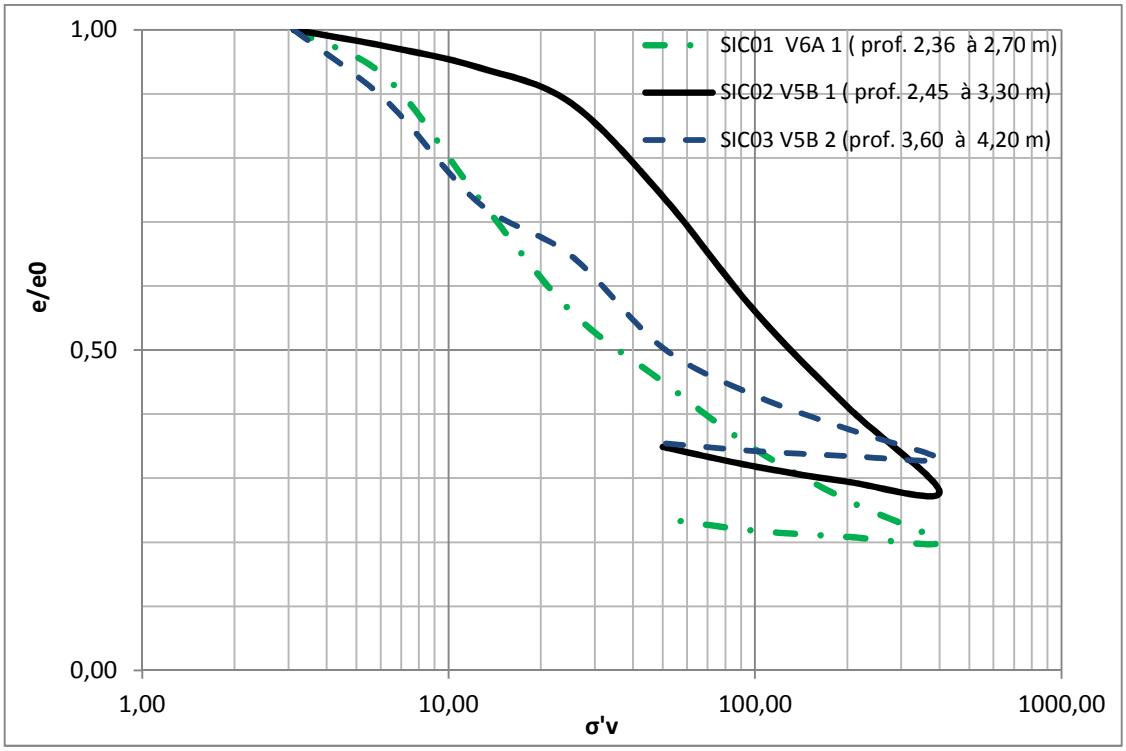

Figura 54 – Curvas de compressibilidade obtidas nos ensaios convencionais.

Tabela 14– Qualidade dos corpos de prova dos ensaios SIC.

Corpo de prova	σ'_{vo} (kPa)	σ'_{vm} (kPa)	OCR	e_0	$e(\sigma'_{vo})$	Δe/e0	Lunne et al (1997)	Coutinho (1998)	Andrade (2009)
SIC01	21,9	5,6	0,3	3,59	2,12	0,41	Muito Ruim	Muito Ruim	Muito Ruim
SIC02	29,9	29,0	1,0	2,47	2,05	0,17	Muito Ruim	Muito Ruim	Muito Ruim
SIC03	31,7	4,8	0,2	3,43	2,01	0,41	Muito Ruim	Muito Ruim	Muito Ruim

Apesar do ensaio SIC02-V5B indicar qualidade muito ruim, a forma da curva mostra-se semelhante ao que se espera de um corpo de prova de boa qualidade.

A Tabela 15 mostra os índices de compressibilidade calculados em todos os ensaios, além da tensão efetiva de calculada pelo método de Pacheco Silva. Observa-se que, independentemente da qualidade das amostras, os índices de compressibilidade, normalizados, forneceram valores relativamente próximos; isto é, pode-se recomendar para uso prático $C_r(1+e_0)$ e $C_c(1+e_0)$ da ordem de 0,04 e 0,42, respectivamente.

Tabela 15– Parâmetros obtidos dos ensaios SIC

Parâmetros	SIC01	SIC02	SIC03
σ'_{vm} (Pacheco Silva)	5,6 kPa	29 kPa	4,8 kPa
C_r	0,16	0,22	0,08
C_c	2,32	1,47	1,47
$C_r(1+e_0)$	0,03	0,06	0,02
$C_c(1+e_0)$	0,51	0,42	0,33

A Figura 55 e Figura 56 mostram a variação dos coeficientes compressibilidade com a tensão efetiva para os três ensaios SIC. Os resultados indicam, como esperado, ligeira a redução do coeficiente de variação volumétrica com o aumento da tensão efetiva, sendo a média da ordem de $3x10^{-3}$ 1/kPa. No caso do coeficiente de adensamento também há redução com o aumento da tensão efetiva, tendendo a um valor constante da ordem de $1,4x10^{-8}m^2/s$, para o caso do ensaio SIC02-V5B, enquanto que os demais, com claros indícios de amolgamento, mostram um valor aproximadamente constante.

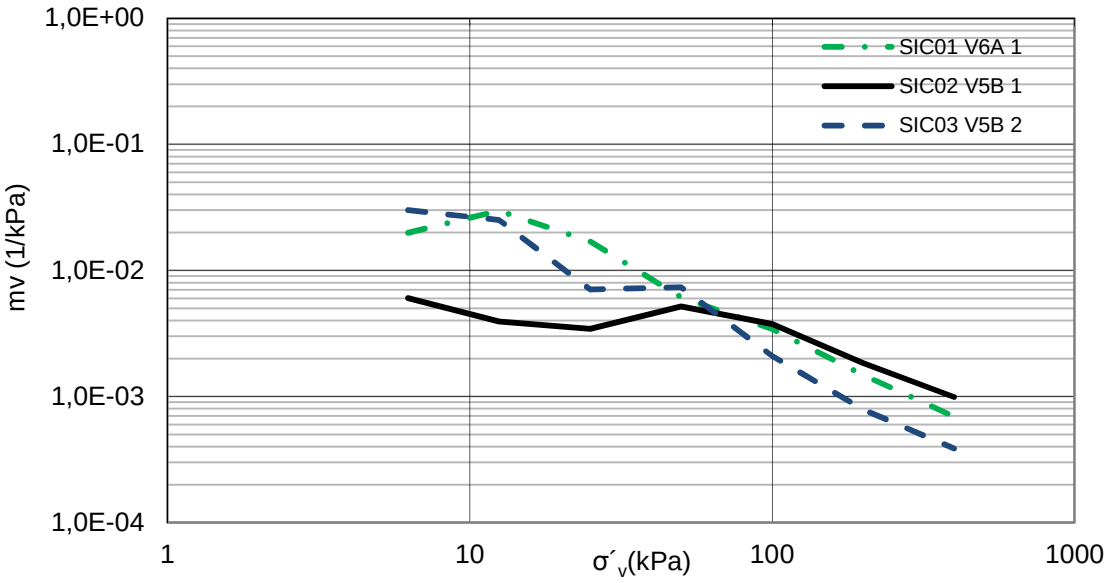

Figura 55 –. Curvas de coeficiente de variação volumétrica em função da tensão efetiva.

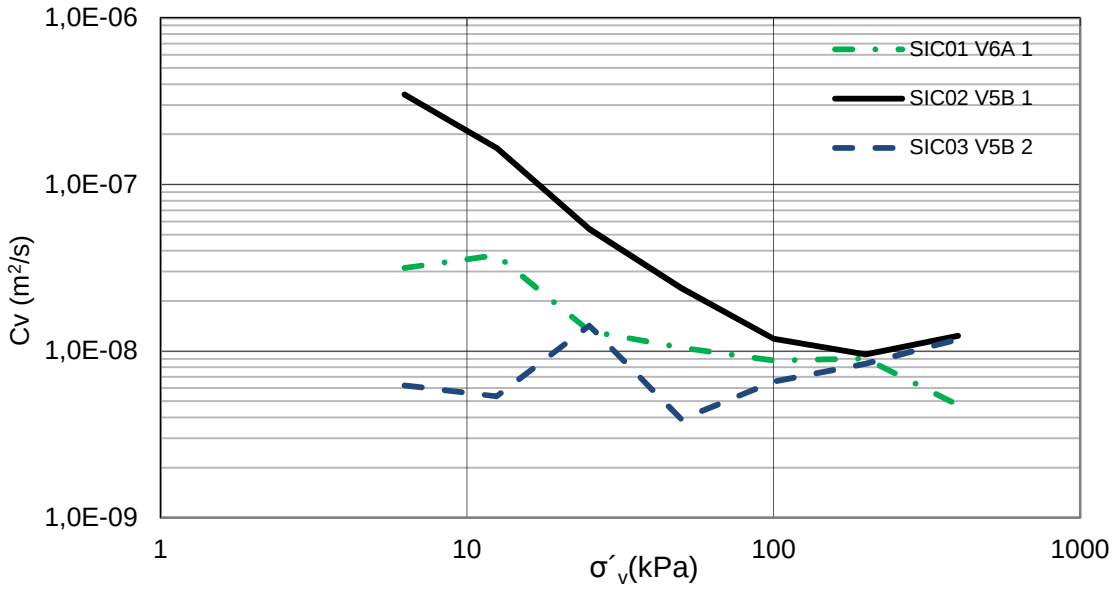

Figura 56 - Valores do coeficiente de adensamento c_v obtidos nos ensaios SIC.

3.5 Ensaios CRS

O equipamento utilizado nesta pesquisa foi o GeoStar modelo S5211, adquirido da empresa Hogentogler, com verba FAPERJ, já empregado na dissertação de Vitor (2012). O ensaio é automático, sendo controlado pelo programa também designado por GeoStar, fornecido pelo fabricante.

Após a inicialização do aplicativo GeoStar, uma série de dados devem ser inseridos no programa, tais como: unidades desejadas, dados da célula, tipo de ensaio, deformação máxima esperada, tensão efetiva vertical inicial e final, velocidade de deformação no carregamento e descarregamento e intervalo para registro de dados (por exemplo, a cada minuto). A Figura 57 mostra a célula posicionada na prensa. A instrumentação necessária para realização do ensaio inclui um transdutor de pressão, posicionado na base da célula, e uma célula de carga posicionada acima da peça de topo. Maiores detalhes sobre o equipamento podem ser encontrados em Vitor (2012).

Figura 57 – Equipamento para ensaio CRS, Laboratório de Mecânica dos Solos da UERJ.

3.5.1 Definição da velocidade de deformação

A velocidade de deformação foi definida com base na proposta de Carvalho et al. (1993), descrita no ítem 1.6.2.1. Empregando-se o método de Taylor, para cada estágio do ensaio convencional, foi calculada a velocidade correspondente à t_{90}, visando estimar uma velocidade equivalente para realização dos ensaios CRS. A fim de comparação, foram também calculadas as velocidades a partir do valor máximo de u_b/σ_v, substituindo-se u_o na Equação (34) pelo incremento de tensão total. As duas alternativas forneceram valores bastante semelhantes. Com isso chegou-se a velocidade próxima a 1,80%/h, tendo sido adotado o valor de 2%/h.

3.5.2 Problemas nos ensaios

Alguns ensaios foram descartados por diversos motivos:

i) Perda do registro dos resultados devido a problemas no armazenamento de dados na CPU do computador.

ii) Falta de energia.

iii) Ocorrência de valores negativos de u_b.

A ocorrência de valores negativos de u_b talvez tenha sido o problema mais delicado observado nesta campanha de ensaios. Várias hipóteses foram aventadas para explicar esta dificuldade:

i) Problemas no transdutor.

ii) Problemas no programa Geostar.

iii) Problemas na saturação do sistema.

Quanto ao transdutor, testes foram realizados acoplando o transdutor a uma célula triaxial, totalmente preenchida de água, mantendo-se o controle da leitura no programa Geostar (Figura 58). Aplicou-se de uma pressão confinante e constatou-se que as leituras eram compatíveis com as pressões aplicadas. Após esse teste, as 2 primeiras hipóteses foram descartadas.

Figura 58 – Célula triaxial acoplada ao equipamento CRS.

Uma vez ratificada a acurácia do transdutor de poropressão, os cuidados para saturação foram redobrados, incluindo garantir que não houvesse bolhas de ar no corpo do transdutor (com o uso de uma seringa) e que não houvesse vazamentos nas conexões do equipamento, como mostra Figura 59.

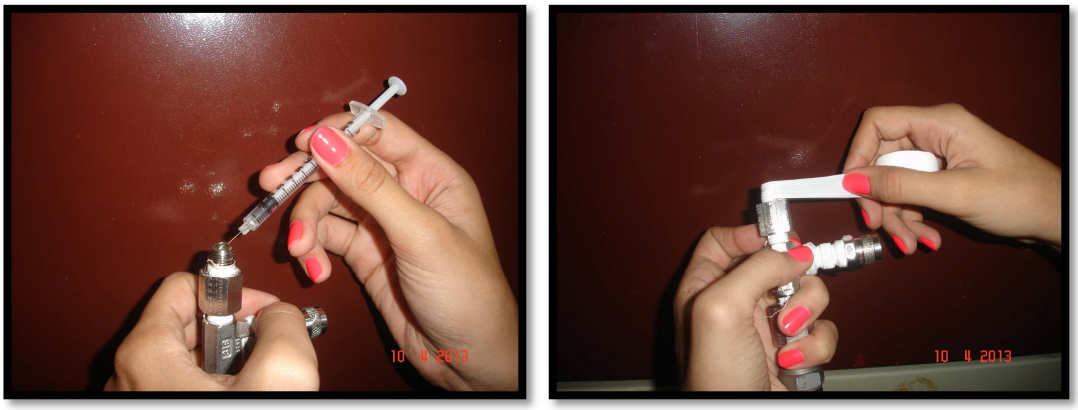

Figura 59 – Saturação do transdutor de poropressão e vedação das roscas do equipamento.

3.5.3 Resultados dos ensaios CRS

Os ensaios foram realizados utilizando-se a velocidade de 2%/h, calculada pelo critério de Carvalho et al (1993), e, considerando uma velocidade de ligeiramente superior (5%/h), adotada por Vitor (2012) para um solo também da Baixada de Jacarepaguá. Posteriormente foram realizados ensaios CRS com velocidades mais elevadas de 10%/h e 20%/h, visando comparação dos resultados.

A Tabela 16 resume os ensaios realizados, separando aqueles em que o corpo de prova foi moldado em amostras indeformadas daqueles preparados a partir de amostras amolgadas. As amostras consideradas amolgadas foram as provenientes do Shelby V5B 2, do qual o material escorreu na abertura do tubo por excesso de água. Os corpos de prova das amostras provenientes deste tubo foram moldados sem os cuidados específicos para o preparo das amostras, conforme detalhado no item 3.2.

Tabela 16 – Velocidades de deformação utilizadas nos ensaios CRS

AMOSTRA	Ensaios CRS	Velocidade de deformação (%/h)
Indeformada	V6A 1 - CRS01	5
	V5B 1 - CRS02	5
	V5B 1 - CRS03	5
	V5B 1 - CRS04	2
	V5B 1 - CRS13	2
	V5B 1 - CRS14	10
Amolgada	V5B 2 - CRS05	10
	V5B 2 - CRS06	2
	V5B 2 - CRS07	10
	V5B 2 - CRS08	10
	V5B 2 - CRS09	2
	V5B 2 - CRS10	20
	V5B 2 - CRS11	10
	V5B 2 - CRS12	2

Os ensaios CRS01, CRS02, CRS06, CRS07, CRS09 e CRS10 foram descartados devido aos problemas ocorridos e detalhados no item 3.5.2.

3.5.3.1 Ensaios em amostras indeformadas

A influência da velocidade de deformação nos ensaios CRS foi estudada, inicialmente, a partir da variação da razão de poropressão (u_b/σ_v) gerada nos corpos de prova. Na Figura 60 são apresentadas as curvas da razão de poropressão em função da tensão efetiva, para os ensaios indicados na Tabela 17

Tabela 17 – Velocidades de deformação – amostras indeformadas

AMOSTRA	**Ensaios CRS**	**Velocidade de deformação (%/h)**
Indeformada	V5B 1 - CRS03	5
	V5B 1 - CRS04	2
	V5B 1 - CRS13	2
	V5B 1 - CRS14	10

Considerando os valores limites recomendados nos gráficos u_b/σ_v x σ'_v, para análise das amostras indeformadas, observa-se que os ensaios CRS03 e CRS13 apresentam valores negativos em boa parte dos ensaios, portanto, apresentam resultados questionáveis. Os ensaios CRS04 e CRS14 mostram desenvolvimento semelhante de poropressão e estão dentro da faixa de Carvalho (1993) e ultrapassam os demais critérios.

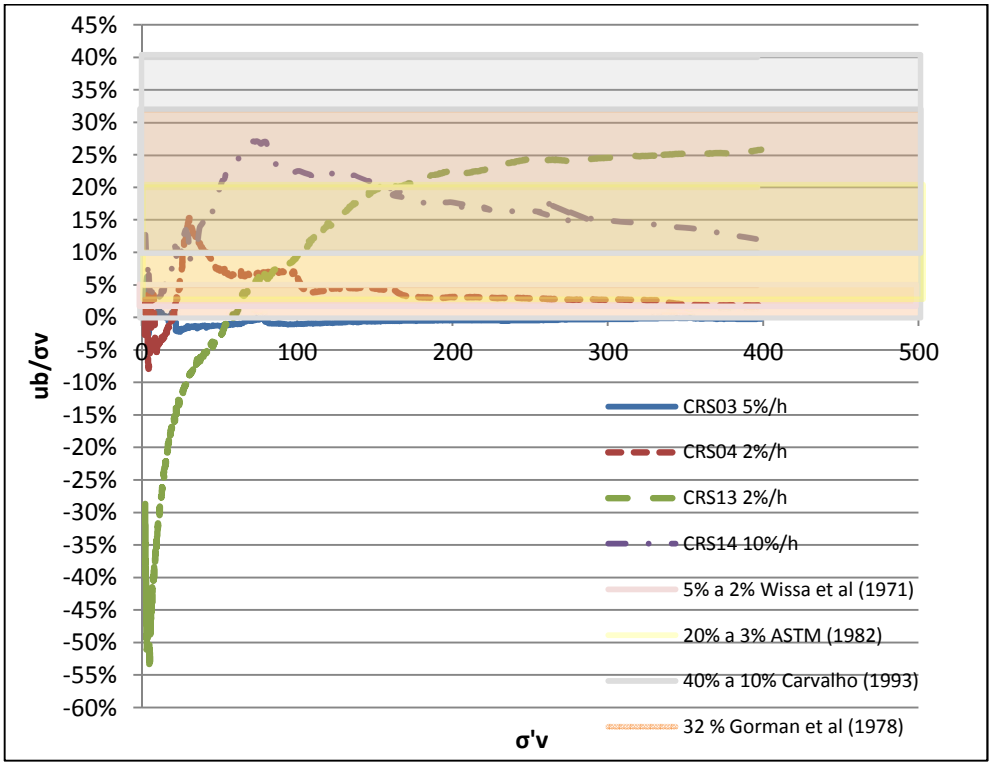

Figura 60 - Gráfico de u_b/σ_v variando com a tensão efetiva dos ensaios realizados com solo indeformado.

A Figura 61 ilustra o gráfico da poropressão variando com a tensão total vertical, indicando valores negativos no inicio dos ensaios CRS03 e CRS13.

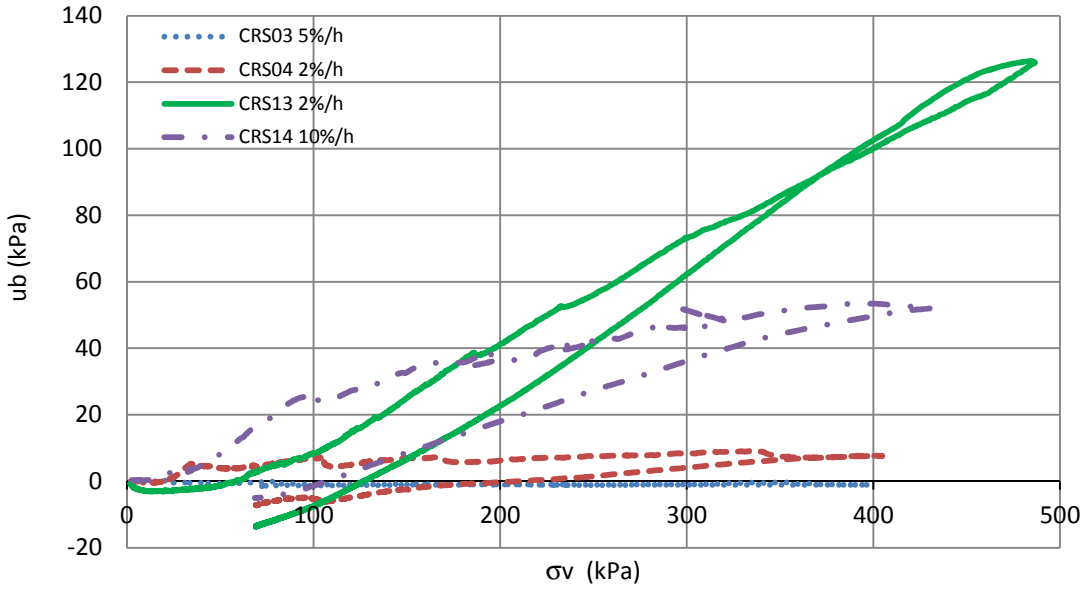

Figura 61 - Gráfico u_b versus tensão vertical total das amostras indeformadas.

A Figura 62 apresenta as curvas de índice de vazios (e) em função da tensão vertical efetiva de todos os ensaios CRS. Na curva apresentada no ensaio CRS04, a oscilação do índice de vazios no inicio do ensaio pode estar relacionada à presença de pequenos mariscos observados no solo argiloso do Shelby V5B 1.

A verificação da qualidade dos corpos de prova segundo os segundo os critérios de Lunne et al. (1997), Coutinho (2007) e Andrade (2009) está apresentada na Tabela 18. Nesta tabela estão incluídos os valores de σ'_{vo} e σ'_{vm}, sendo este último estimado pelo método Pacheco Silva. A Tabela 18 apresenta a avaliação para os corpos de prova dos ensaios CRS. Segundo os critérios mostrados neste trabalho, as amostras CRS 03 e CRS14 são classificadas como regulares, e CRS 04 e CRS13 como ruins.

Este resultado foi inesperado, por duas razões principais: os ensaios na ocasião do projeto (primeira campanha) foram realizados em São Paulo e as amostras submetidas ao transporte muito mais demorado, em condições provavelmente mais desfavoráveis. O transporte da campanha atual foi curto, até as instalações do laboratório da UERJ, logo após a extração das amostras dos furos. Esta segunda campanha foi acompanhada pela equipe da pesquisa, além de padrão técnico igual ou superior ao da campanha inicial. Não se tem notícia dos cuidados

praticados no manuseio das amostras e preparo dos corpos de prova da primeira campanha, enquanto os atuais foram realizados com o devido cuidado. Atribui-se a baixa qualidade dos corpos de prova ao fato da camada de argila ter sido submetida aos efeitos construtivos, com vestígios de pedra, pedaços de madeira, bidim, o que dificultou a moldagem dos corpos de prova, com amolgamento inerente ao seu estado atual.

Apesar da qualidade da amostra CRS 03 ser adequada, a geração de u_b foi sempre negativa, descartando a influência do processo de montagem do corpo de prova. É possível que tenha havido problema de saturação da linha que leva ao transdutor ou de vedação do equipamento.

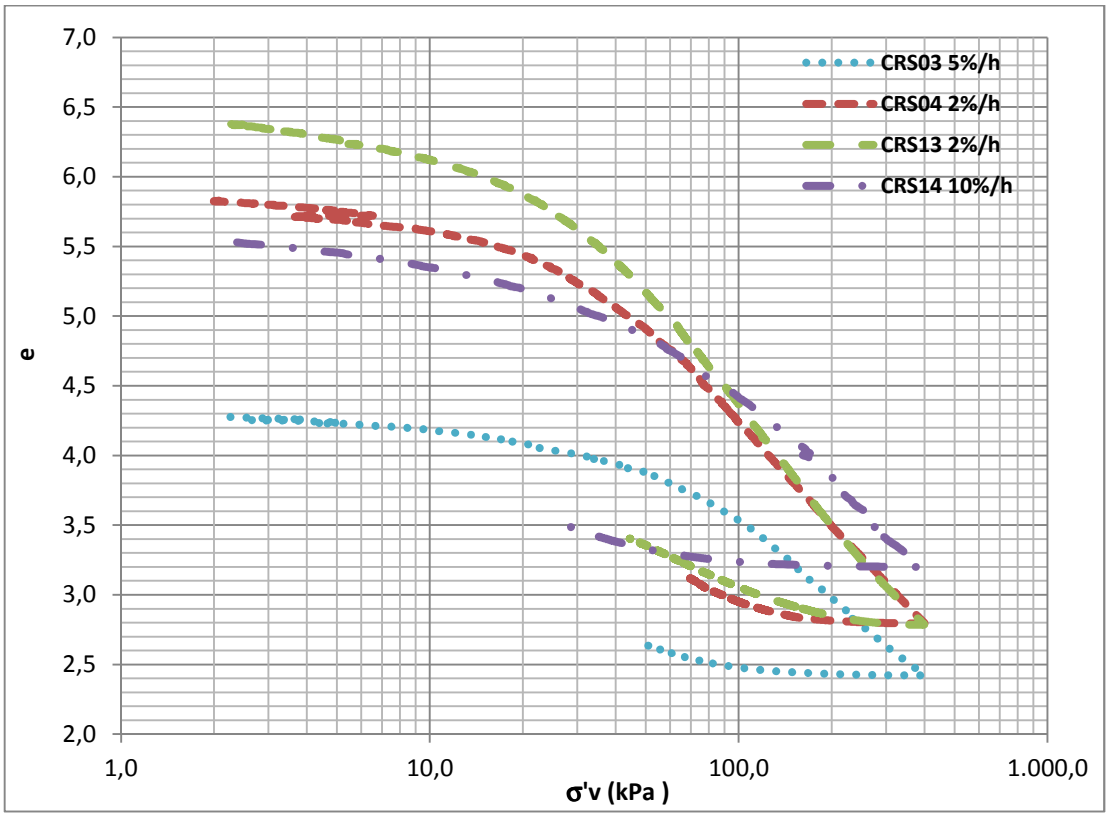

Figura 62 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva em amostras indeformadas.

Tabela 18– Qualidade dos corpos de prova dos ensaios CRS.

Corpo de prova	$\sigma`_{vo}$ (kPa)	$\sigma`_{vm}$ (kPa)	OCR	e_0	$e(\sigma`_{vo})$	Δe/e0	Lunne et al (1997)	Coutinho (1998)	Andrade (2009)
CRS03	29,50	58,00	2,0	4,28	4,02	0,06	Boa a Aceitável	Regular	Boa a Regular
CRS04	29,30	30,00	1,0	5,83	5,28	0,09	Ruim	Regular a Ruim	Ruim
CRS13	29,20	28,00	1,0	6,38	5,64	0,12	Ruim	Ruim	Ruim
CRS14	29,01	45,00	1,6	5,54	5,08	0,08	Ruim	Regular a Ruim	Boa a Regular

Independentemente da velocidade adotada ou da qualidade da amostra observa-se um comportamento similar no trecho normalmente adensado. Apesar dos valores negativos de u_b, a forma da curva do ensaio CRS 03 é semelhante aos demais, porém iniciando em um índice de vazios mais baixos e mostrando um trecho mais rígido de recompressão . O ensaio CRS13, classificado como um corpo de prova de qualidade ruim e que parte do ensaio teve valores negativos de u_b, gerou uma curva de compressibilidade semelhante às demais.

Os ensaios com maiores velocidades de deformação se localizaram, em geral, acima dos demais, nas curvas apresentadas, o que já seria esperado, uma vez que tenderiam a apresentar um valor mais alto de geração de pororessão e, com isso, maior índice de vazios para uma mesma tensão efetiva.

A Tabela 19 mostra os índices de compressibilidade calculados em todos os ensaios, além da tensão efetiva de calculada pelo método de Pacheco Silva. É curioso observar que, independentemente da qualidade da amostra e da geração de poropressão não compatível com os limites propostos por diversos autores, os índices de compressibilidade, normalizados, fornecem valores relativamente próximos; isto é, pode-se recomendar para uso prático $C_r(1+e_0)$ e $C_c(1+e_0)$ da ordem de 0,04 e 0,35, respectivamente.

Tabela 19 - Parâmetros obtidos dos ensaios CRS de amostras indeformadas.

Parâmetros	CRS03 5%/h	CRS04 2%/h	CRS13 2%/h	CRS14 10%/h
σ'_{vm} (Pacheco Silva)	58 kPa	30 kPa	28 kPa	45 kPa
C_r	0,15	0,4	0,38	0,5
C_c	1,85	2,44	2,69	2,01
$C_r(1+e_0)$	0,03	0,06	0,05	0,07
$C_c(1+e_0)$	0,35	0,36	0,36	0,31

A Figura 63 e Figura 64 mostram as curvas de coeficiente de variação volumétrica e de adensamento com a tensão efetiva para os dois ensaios CRS, considerados adequados quanto aos critérios de classificação das amostras. O coeficiente de adensamento foi calculado considerando-se o comportamento do solo como não linear (Wissa et al, 1971), visto que outros autores (Spannenberg ,2003 e Vitor ,2012) já verificaram que não há diferença significativa entre os comportamentos linear e não linear no cálculo de c_v.

Os resultados indicam redução suave do coeficiente de variação volumétrica com o aumento da tensão efetiva, podendo ser arbitrado um valor médio da ordem de $2x10^{-3}$1/kPa. No caso do coeficiente de adensamento também se observa a redução com o aumento da tensão efetiva, tendendo a um valor constante da ordem de $1,5x10^{-7}m^2/s$

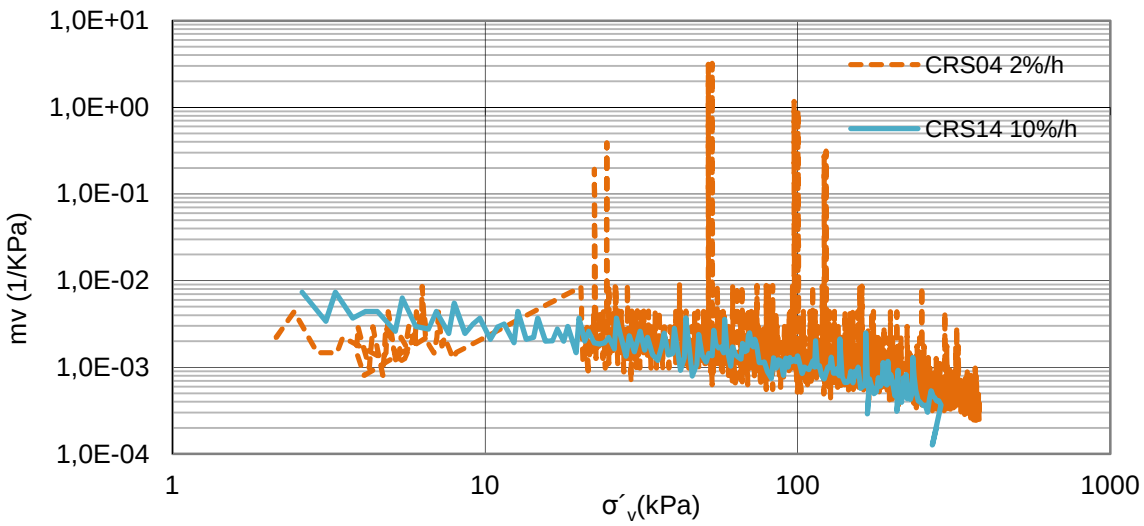

Figura 63 –. Coeficiente de variação volumétrica em função da tensão efetiva - CRS.

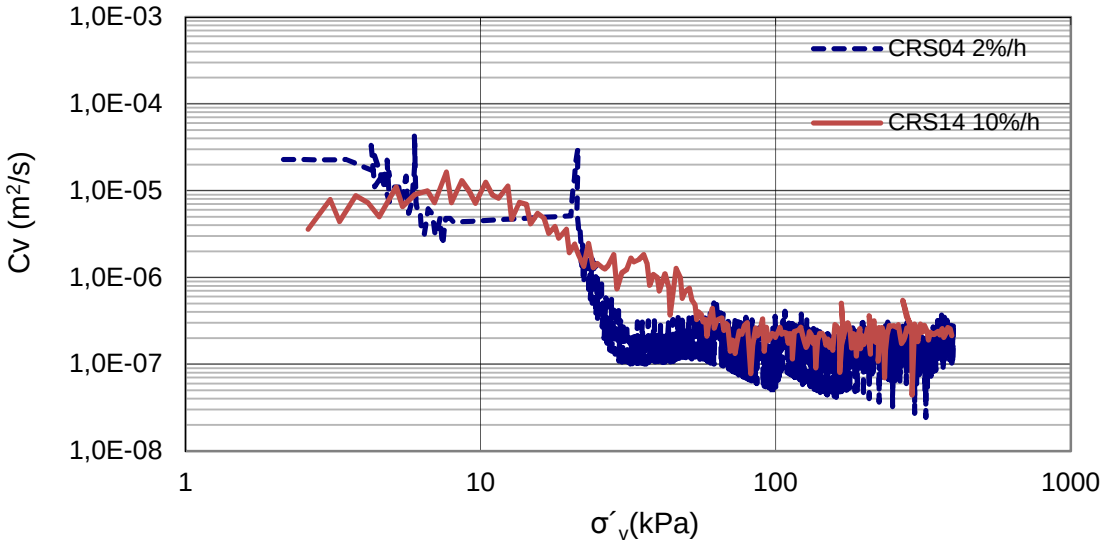

Figura 64 – Coeficiente de adensamento variando com a tensão efetiva - CRS.

3.5.3.2 Amostras Amolgadas

Os corpos de prova provenientes do Shelby V5B 2, em que o material escorreu quando da abertura do tubo por excesso de umidade, foram moldados sem cuidados específicos, sendo designados como originários de amostras amolgadas. Esse material inicialmente seria utilizado para avaliação da influência da velocidade de deformação. Entretanto, face aos problemas de montagem e saturação das linhas, somente 04 ensaios (Tabela 20) foram considerados adequados para análise. Os ensaios CRS 05, CRS 08 e CRS 11 foram realizados para 10%/h, para avaliação da repetibilidade.

Tabela 20 – Velocidades de deformação - amostras amolgadas.

AMOSTRA	Ensaios CRS	Velocidade de deformação (%/h)
Amolgada	V5B 2 - CRS05	10
	V5B 2 - CRS08	10
	V5B 2 - CRS11	10
	V5B 2 - CRS12	2

A Figura 65 ilustra a variação da razão de poropressão (u_b/σ_v) com a tensão efetiva dos diversos ensaios CRS, realizados em amostras amolgadas. Foram

mostradas também as faixas recomendadas por Wissa et al. (1971), ASTM (1982) e Carvalho (1993). Os resultados mostram que no trecho inicial os valores de u_b/σ_v superam, em muito, os limites superiores previstos pelos autores. Entretanto as curvas tendem para valores de u_b/σ_v aceitáveis. Diferentemente do que seria esperado, o ensaio mais lento gerou maior excesso de poropressão, o que indica as limitações do ensaio em amostras amolgadas.

Há que ressaltar que comportamento semelhante foi observado por Spannenberg (2003) em amostras amolgadas da Baixada Fluminense.

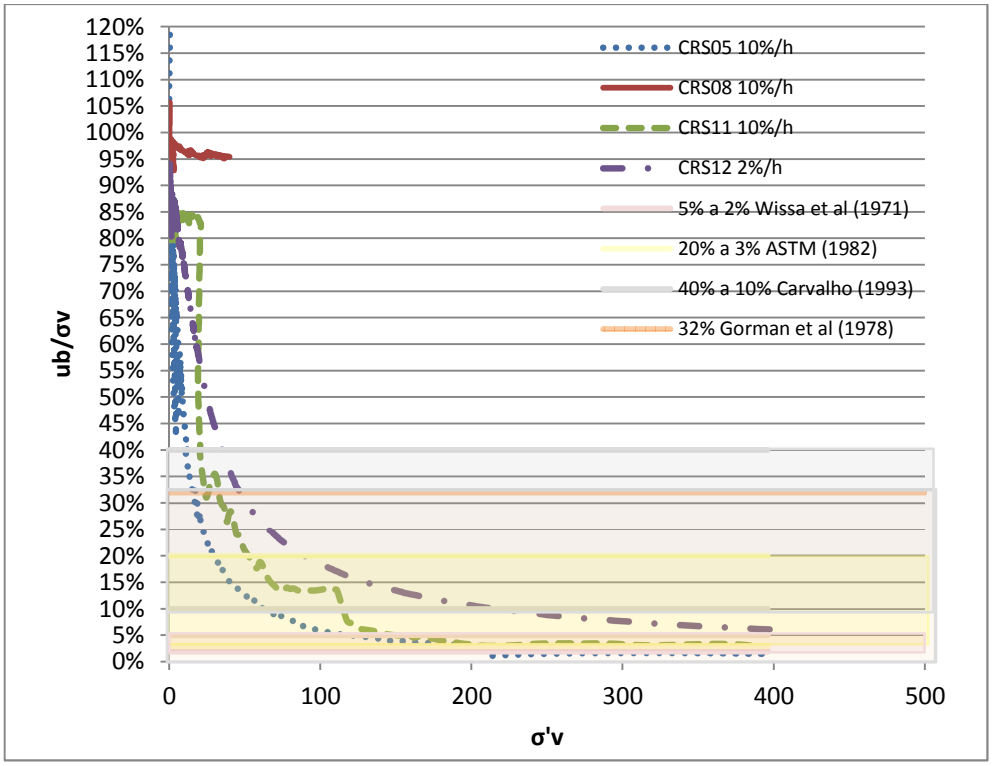

Figura 65 – Gráfico de u_b/σ_v variando com a tensão efetiva dos ensaios realizados com solo amolgado.

A Figura 66 mostra o gráfico do índice de vazios versus tensão efetiva dos ensaios, onde verificam-se índices de vazios mais baixos do que os das amostras indeformadas, além das características comuns a solos amolgados: i) achatamento das curvas; ii) dificuldade de definição da tensão efetiva de pré-adensamento, etc. Não houve repetibilidade nos resultados dos ensaios na mesma velocidade de deformação, talvez pela impossibilidade de garantir o mesmo grau de amolgamento em todos os corpos de prova. Além disso, pôde-se constatar nos ensaios CRS05 e

CRS08, a mesma oscilação apresentada no inicio do ensaio CRS04, atribuída possivelmente à presença de mariscos.

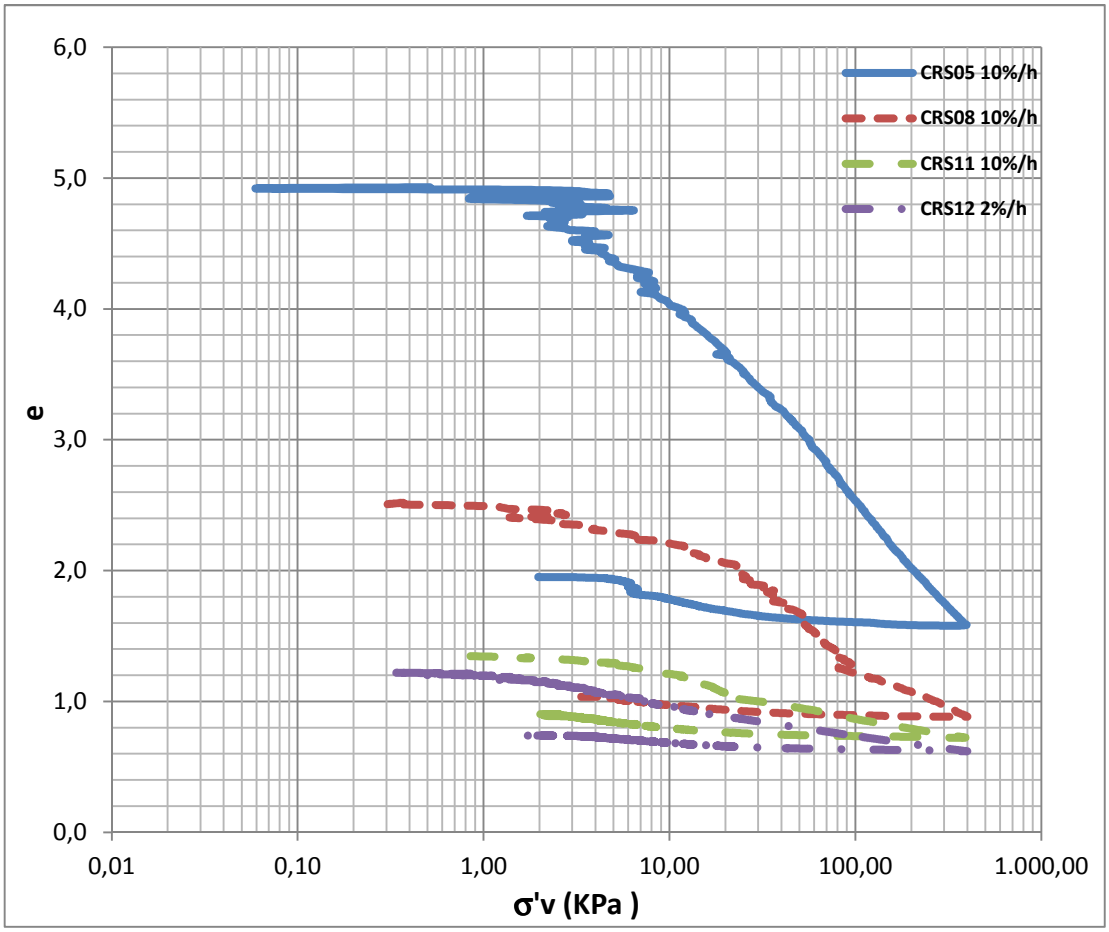

Figura 66 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva em amostras amolgadas

3.6 SIC X CRS – Vertical 05

Na Figura 67 estão representados os resultados obtidos no ensaio SIC-02 e nos 04 ensaios CRS ao longo das respectivas profundidades. Apesar dos ensaios CRS03 e CRS13 não atenderem aos critérios de ub/σv x σv' (profundidades 2,91 m e 2,73 m), os resultados apresentam valores compatíveis com os demais.

Observa-se uma distinção entre os resultados entre o SIC e os CRSs. Entretanto, pela pequena amostragem de ensaios SIC, optou-se por não tirar qualquer conclusão a esse respeito. Observa-se, no entanto, uma tendência de

crescimento do peso específico com a profundidade e redução dos demais parâmetros geotécnicos.

Quanto aos valores referentes à tensão de pré-adensamento, OCR e índices de compressibilidade C_c e C_r, os resultados (Figura 68) indicam uma certa dispesão sem tendência de aumento ou redução com a profundidade

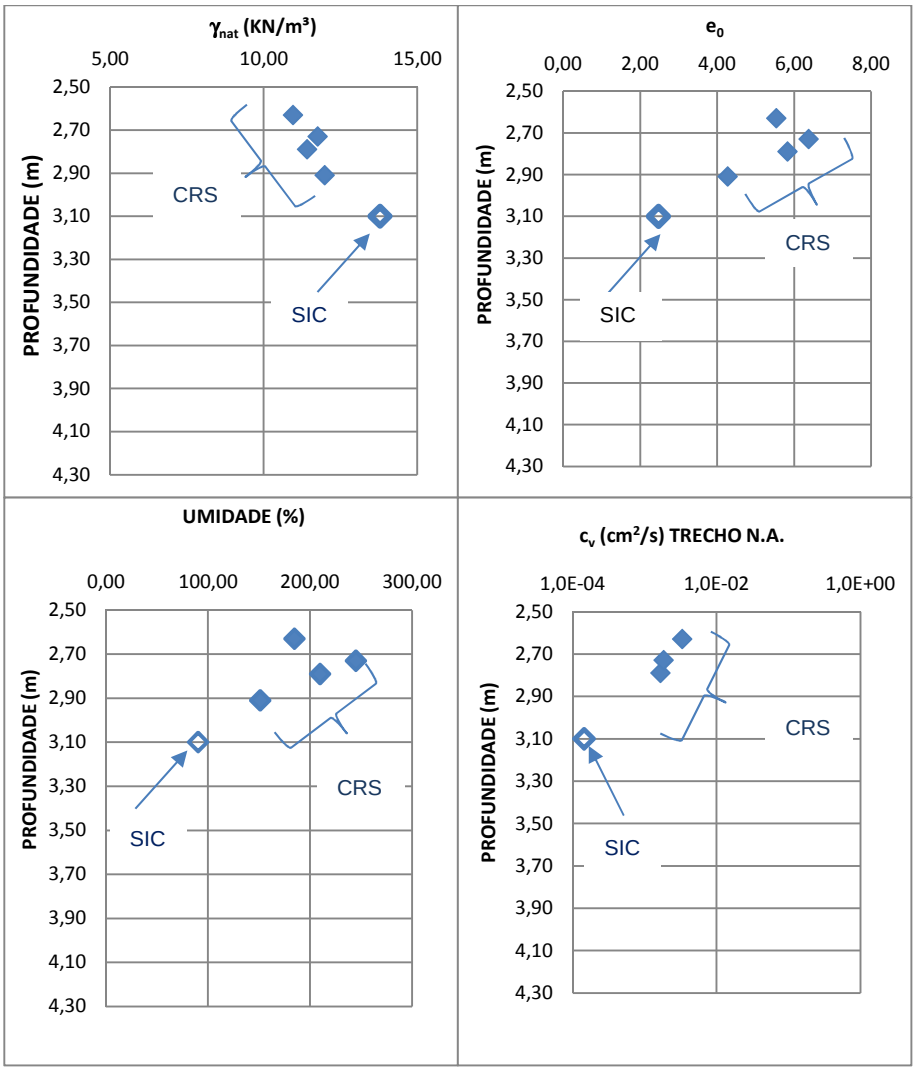

Figura 67 – Peso específico, índice de vazios, umidade e coeficiente de adensamento versus profundidade, obtidos nos ensaios da vertical V5B.

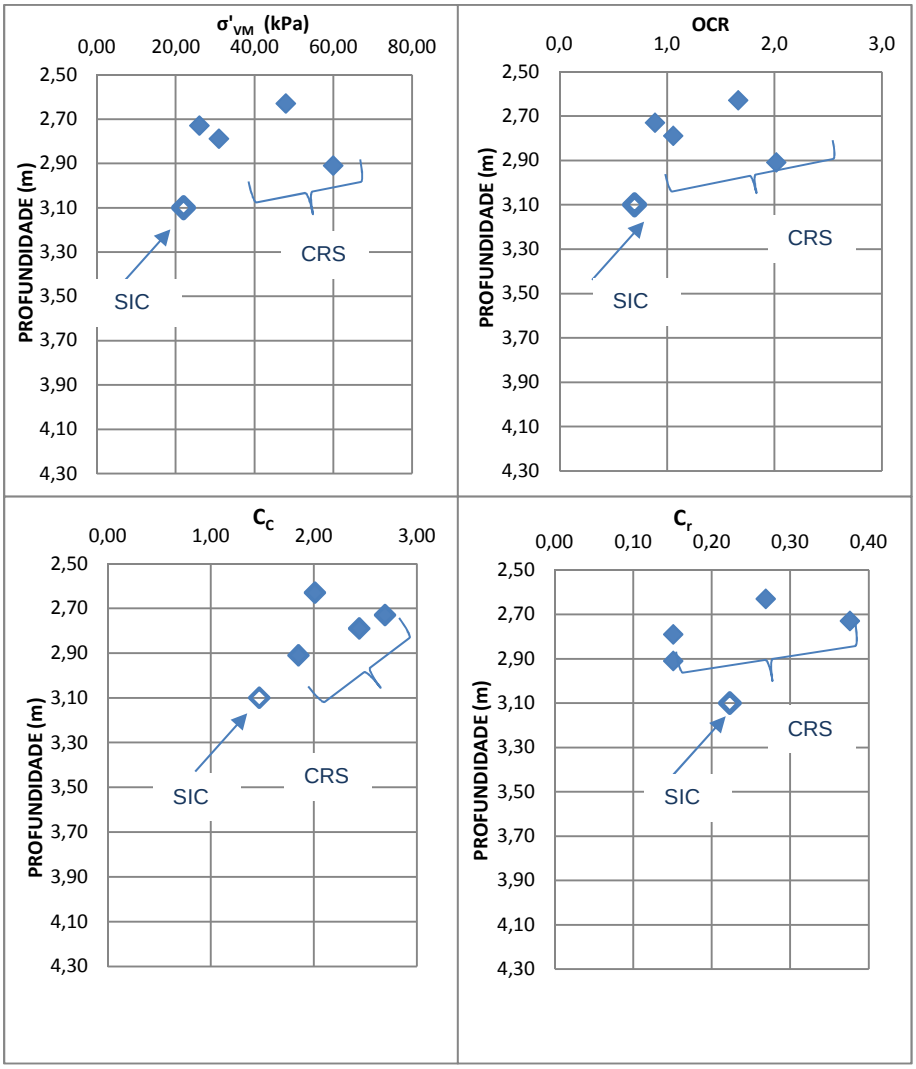

Figura 68 – Valores de tensão de pré-adensamento, OCR e índices de compressibilidade C_r, C_s e C_c obtidos nos ensaios da vertical V5B.

Os resultados para os índices de compressibilidade C_c e C_r obtidos nos ensaios atuais do empreendimento apresentam valores próximos aos encontrados por Spannenberg (2003) na campanha experimental Rio –Polímeros II. Em ensaios SIC e CRS realizados em amostras de boa qualidade e amolgadas, Spannenberg (2003) encontrou valores de C_c de 0,86 à 2,41, e C_r de 0,16 à 0,28. No presente caso na campanha experimental atual, os valores variam de 0,22 à 2,89 para C_c, e de 0,04 à 0,38 para C_r.