

4 Caracterização Geotécnica dos Sedimentos

Martincic *et al.*, (1990) estudou a acumulação de metais pesados em sedimentos com diferentes tamanhos de grãos, e observou que a acumulação é evidenciada em sedimentos com uma fração fina expressiva e com altos teores de matéria orgânica (MO).

Este Capítulo apresenta a segunda etapa da caracterização geoambiental dos sedimentos da Lagoa de Jacarepaguá. Além de obter informações sobre a granulometria e o teor de matéria orgânica (MO), visando analisar a adsorção de possíveis contaminantes metálicos, propõe gerar informações adicionais a fim de encontrar utilizações para o possível sedimento a ser dragado.

4.1. Metodologias

4.1.1. Amostragem

Para a realização da caracterização geotécnica coletou-se um total de 21 amostras de sedimentos superficiais na Lagoa de Jacarepaguá, distribuídas da seguinte forma: 7 na Área 1, 3 na Área 2, 5 na Área 3 e 6 na Área 4 (divisão de áreas apresentada na Figura 3.13).

A determinação destes pontos de amostragem foi realizada a partir da análise dos resultados obtidos na modelagem batimétrica efetuada e apresentada no Capítulo 3. Esta análise levou em consideração as cavidades encontradas, assim como a área interna com média de 2 metros de profundidade da Lagoa, identificando, assim, pontos relevantes, com grande variação de profundidade, para a obtenção de um panorama geral dos tipos de sedimento predominantes nesta Lagoa.

Na Tabela 4.1 podem ser observados os dados específicos da amostragem: as profundidades da coluna d'água nos pontos de coleta do sedimento superficial e as coordenadas destes pontos em GMS e UTM ambos com *datum* SAD69. A Figura 4.1 indica em uma imagem de localização os pontos de amostragem.

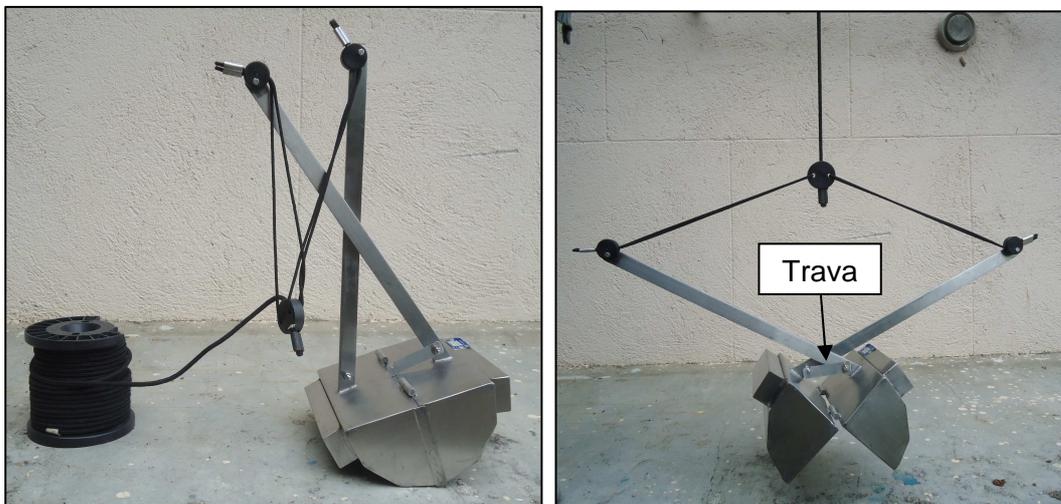
Tabela 4.1 – Dados específicos dos pontos de amostragem do sedimento.

Área	Ponto	Profundidade da coluna de água (m)	Coordenadas			
			GMS - SAD69		UTM - SAD69	
			Longitude	Latitude	Longitude	Latitude
ÁREA 1	A1-P2	1,10	43W 24' 34"	22S 59' 14"	663029	7456992
	A1-P3	1,00	43W 24' 29"	22S 59' 09"	663187	7457147
	A1-P3A	6,30	43W 24' 32"	22S 59' 04"	663085	7457312
	A1-P4	0,75	43W 24' 28"	22S 59' 25"	663196	7456648
	A1-P5	3,50	43W 24' 18"	22S 58' 58"	663502	7457461
	A1-P6	0,65	43W 24' 25"	22S 59' 15"	663281	7456971
	A1-P7	1,10	43W 24' 07"	22S 59' 15"	663812	7456955
ÁREA 2	A2-P1	8,70	43W 24' 10"	22S 58' 46"	663734	7457869
	A2-P2	3,80	43W 23' 44"	22S 58' 58"	664457	7457480
	A2-P3	1,30	43W 23' 46"	22S 59' 12"	664396	7457064
ÁREA 3	A3-P1	11,8	43W 23' 24"	22S 59' 14"	665021	7456967
	A3-P2	9,90	43W 23' 21"	22S 59' 14"	665111	7456987
	A3-P3	0,80	43W 23' 15"	22S 59' 24"	665276	7456656
	A3-P4	6,00	43W 23' 09"	22S 59' 21"	665449	7456764
	A3-P5	1,20	43W 23' 21"	22S 58' 51"	665131	7457691
ÁREA 4	A4-P1	5,40	43W 22' 54"	22S 58' 41"	665886	7457972
	A4-P2	7,50	43W 22' 46"	22S 58' 39"	666133	7458046
	A4-P3	2,70	43W 23' 01"	22S 58' 31"	665691	7458297
	A4-P4	2,30	43W 21' 54"	22S 58' 32"	666212	7458554
	A4-P5	0,90	43W 22' 23"	22S 58' 40"	666772	7458010
	A4-P6	2,40	43W 22' 43"	22S 58' 22"	667591	7458234



Figura 4.1 – Imagem do *Google Earth* da Lagoa de Jacarepaguá com os pontos de amostragem de sedimentos para a caracterização geotécnica.

As amostras foram coletadas com uma draga modelo Van Veen (Figuras 4.2 (a) e (b)) com a utilização do veículo anfíbio. Em seguida, foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas ao Laboratório para a realização dos ensaios de caracterização.



(a) fechada.

(b) aberta.

Figura 4.2 – Draga Van Veen, (a) fechada e (b) aberta.

Esta draga possui uma trava que a mantém aberta, como indicado na Figura 4.2(b). Ela é solta na água dessa forma e afunda com seu peso próprio. Ao atingir o fundo, no caso da Lagoa, essa trava se solta e a draga se fecha, coletando assim a amostra superficial. Após esse processo, puxa-se a draga pela corda na qual ela é presa.

O procedimento para coleta pode ser observado nas fotos da Figuras 4.3.



(a) lançamento da draga.



(b) transferência da amostra para o saco plástico.



(c) amostra de sedimento coletada acondicionada no saco plástico.

Figura 4.3 – Procedimento para a coleta das amostras de sedimento: (a) lançamento da draga, (b) transferência da amostra para o saco plástico e (c) amostra de sedimento coletado acondicionada no saco plástico.

4.1.2.Preparação das amostras para realização dos ensaios

As amostras de sedimentos coletadas foram transportadas ao laboratório nos sacos de plástico transparente e após a sua chegada, foram acondicionadas em caixas plásticas, para decantação e posterior colocação nas bandejas para secagem ao ar. Esta secagem levou em torno de 2 a 3 dias para cada amostra.

Para ilustrar estas etapas são apresentadas nas Figuras 4.4 a 4.6, fotos de algumas amostras em diferentes estágios de secagem.



(a) pontos A1-P2 e A1-P3.

(b) pontos da Área 2.

Figura 4.4 – Amostras acondicionadas nas caixas plásticas ao chegarem ao laboratório. (a) pontos A1-P2 e A1-P3 e (b) pontos da Área 2.



(a) ponto A2-P1.

(b) ponto A2-P3.

Figura 4.5 – Amostras secas ao ar, antes de serem destorroadas: (a) ponto A2-P1 e (b) ponto A2-P3.



(a) antes da secagem.

(b) após a secagem.

Figura 4.6 – Amostra do ponto A3-P2: (a) antes da secagem ao ar e (b) após a secagem.

Pode-se observar um padrão de granulometria dos sedimentos variando basicamente entre a predominância de material bem fino e material granular. A amostra A2-P1 apresenta uma maior fração de finos, que com a caracterização

táctil-visual pode-se classificá-la como siltosa, enquanto que, as amostras dos pontos A2-P3 e A1-P5 apresentam uma matriz arenosa com presença de muitas conchas.

A Tabela abaixo reúne as amostras coletadas, com as respectivas predominâncias de material, conforme a caracterização tátil-visual.

Tabela 4.2 – Pontos amostrados e caracterizados tátil-visualmente.

Ponto	Caracterização	Ponto	Caracterização
A1-P2	arenoso	A3-P1	siltoso
A1-P3	arenoso	A3-P2	siltoso
A1-P3A	siltoso	A3-P3	arenoso
A1-P4	arenoso	A3-P4	siltoso
A1-P5	arenoso	A3-P5	arenoso
A1-P6	arenoso	A4-P1	siltoso
A1-P7	arenoso	A4-P2	siltoso
A2-P1	siltoso	A4-P3	siltoso
A2-P2	siltoso	A4-P4	siltoso
A2-P3	arenoso	A4-P5	siltoso
		A4-P6	arenoso

Finalizando a preparação, todas as amostras secas ao ar foram então destorroadas e novamente acondicionadas em sacos plásticos para posterior execução dos ensaios.

4.2. Ensaio realizados

Para a caracterização geotécnica dos sedimentos da Lagoa de Jacarepaguá, foram realizados os ensaios para determinação do Teor de Matéria Orgânica (MO), da Densidade Relativa dos Grãos (G_s), da Umidade Higroscópica (w), da Granulometria e dos Limites de Atterberg (liquidez – W_L e plasticidade - W_P). As metodologias de execução desses ensaios são descritas nos itens a seguir.

Todos os ensaios citados foram realizados no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, com o auxílio de técnicos do próprio laboratório.

4.2.1. Matéria Orgânica

Segundo Santos (2001) *apud* Castiglia (2006), o teor de matéria orgânica (MO) pode ser determinado por gravimetria, com o aquecimento da amostra e

consequente queima da fração orgânica, ou por ensaio químico, com a oxidação da fração orgânica por dicromato de potássio em meio sulfúrico.

A determinação da MO, neste trabalho, foi realizada pelo método de queima a 440°C segundo a norma da ABNT NBR 13600 de maio de 1996.

O ensaio foi realizado em duplicata para cada amostra, sendo o resultado final a média aritmética destes 2 resultados, expresso em porcentagem.

4.2.2. Densidade Relativa dos Grãos

A determinação da densidade relativa dos grãos (G_s) foi realizada segundo a norma ABNT NBR 6508 de outubro de 1984.

Por ser um ensaio muito sensível a variações de resultados, em função da dificuldade de se garantir a retirada total do ar dos picnômetros, foram realizadas triplicatas para cada amostra. Os resultados com variações maiores que 0,02 foram classificados como não válidos e descartados. O resultado final corresponde à média aritmética dos resultados classificados como válidos.

4.2.3. Umidade Higroscópica

A umidade higroscópica (w) foi determinada de acordo com o anexo da norma ABNT NBR 6457 de agosto de 1986. Assim como para o ensaio de MO, este foi realizado em duplicata para cada amostra, sendo o resultado final a média aritmética destes 2 resultados, expresso em porcentagem.

4.2.4. Granulometria

A análise granulométrica das amostras de sedimento da Lagoa de Jacarepaguá foi realizada em duas etapas, peneiramento e sedimentação, a partir das diretrizes da norma ABNT NBR 7181 de dezembro de 1984.

Pode-se assim determinar as frações de pedregulho, areia, silte e argila presentes em cada amostra.

4.2.5. Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg compreendem o Limite de Liquidez (W_L) e o Limite de Plasticidade (W_P).

O primeiro corresponde ao teor de umidade que separa o estado de consistência líquido do plástico. O ensaio utiliza o aparelho de Casagrande, o

qual é preconizado juntamente com o procedimento de execução pela norma ABNT NBR 6459 de outubro de 1984.

Já o segundo corresponde ao teor de umidade que separa o estado semi-sólido do estado plástico, com ensaio executado segundo a norma ABNT NBR 7180 de outubro de 1984.

A partir desses valores (W_L e W_P) é possível calcular o Índice de Plasticidade (IP) de acordo com a equação:

$$IP = W_L - W_P$$

Fisicamente, o IP é a faixa de umidade onde o solo permanece no estado plástico.

A Figura 4.11 apresenta as mudanças de estado com seus limites correspondentes.

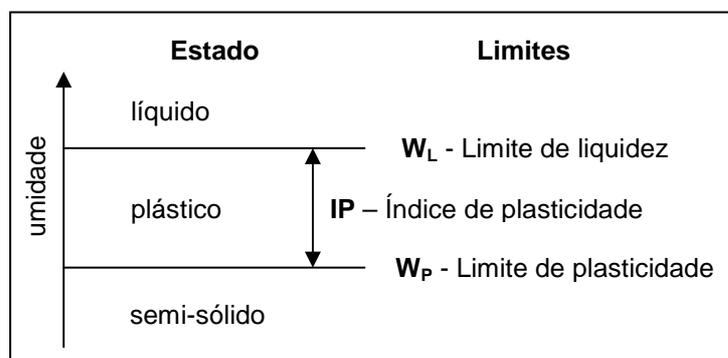


Figura 4.7 – Limites de Atterberg correspondentes as mudanças de estado de consistência (adaptado de Pinto, 2006).

4.3. Resultados

Os resultados de todos os ensaios realizados nas amostras de sedimento coletadas na Lagoa de Jacarepaguá são apresentados nas tabelas a seguir, conforme a seguinte divisão:

- Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras da Área 1.
- Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras da Área 2.
- Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras da Área 3.
- Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras da Área 4.

A Tabela 4.7 apresenta a classificação final do tipo de sedimento, com sua respectiva sigla conforme a classificação SUCS, pela norma ASTM D2487-10 e a Tabela 4.8 o significado de cada sigla utilizada nesta classificação.

Nas páginas seguintes a estas Tabelas são apresentadas as Figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 com os gráficos das curvas granulométricas para as Áreas 1, 2, 3, 4 e todas juntas, respectivamente.

Foram criados boletins para cada ponto de sedimento amostrado separadamente. Estes boletins estão localizados no Apêndice I e possuem informações sobre a coleta das amostras como: coordenadas, profundidade e imagem de localização do ponto e os resultados obtidos nos ensaios executados.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios realizados nas amostras da Área 1.

Ponto	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gs	Granulometria (%)				w (%)	MO (%)
					Pedregulho	Areia	Silte	Argila		
A1-P2	-	-	-	2,605	0,0	89,2	9,7	1,1	0,73	6,85
A1-P3	-	-	-	2,626	0,0	88,0	9,4	2,6	0,56	4,67
A1-P3A	130,2	NP	-	2,398	0,0	26,7	59,6	13,7	7,90	44,94
A1-P4	-	-	-	2,627	0,0	86,1	10,1	3,8	0,78	6,38
A1-P5	-	-	-	2,617	0,3	93,6	5,4	0,7	0,28	1,31
A1-P6	-	-	-	2,624	0,0	87,3	9,8	2,9	0,72	4,94
A1-P7	-	-	-	2,607	0,0	87,9	9,5	2,6	1,25	5,45

- : ensaio não realizado.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios realizados nas amostras da Área 2.

Ponto	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gs	Granulometria (%)				w (%)	MO (%)
					Pedregulho	Areia	Silte	Argila		
A2-P1	101,4	93,2	8,2	2,597	0,0	7,4	59,6	33,0	4,68	23,66
A2-P2	134,3	100,6	33,7	2,459	0,0	6,6	67,1	26,3	5,07	31,47
A2-P3	-	-	-	2,625	0,0	89,7	6,5	3,8	1,21	2,85

- : ensaio não realizado.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios realizados nas amostras da Área 3.

Ponto	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gs	Granulometria (%)				w (%)	MO (%)
					Pedregulho	Areia	Silte	Argila		
A3-P1	112,0	89,5	22,5	2,462	0,0	9,0	62,5	28,5	9,79	30,91
A3-P2	96,0	72,1	23,9	2,503	0,0	3,5	57,0	39,5	8,47	24,31
A3-P3	-	-	-	2,617	0,0	85,4	8,6	6,0	0,67	5,83
A3-P4	134,1	101,6	32,5	2,455	0,0	14,0	62,2	23,8	4,35	31,09
A3-P5	-	-	-	2,619	0,0	80,7	15,0	4,3	0,34	3,30

- : ensaio não realizado.

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios realizados nas amostras da Área 4.

Ponto	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gs	Granulometria (%)				w (%)	MO (%)
					Pedregulho	Areia	Silte	Argila		
A4-P1	85,5	53,2	32,3	2,596	0,0	0,7	62,8	36,5	1,84	12,75
A4-P2	73,5	47,5	26,0	2,591	0,0	9,0	63,9	27,1	3,33	10,32
A4-P3	110,2	87,8	22,5	2,587	0,0	22,0	53,6	24,4	2,28	23,23
A4-P4	83,2	67,9	15,3	2,576	0,0	15,0	63,8	21,2	2,44	17,14
A4-P5	72,3	56,9	15,4	2,585	0,0	7,2	61,6	31,2	5,20	13,15
A4-P6	-	-	-	2,622	9,8	70,1	12,1	8,0	0,18	1,61

- : ensaio não realizado.

Tabela 4.7 – Classificação das amostras segundo o SUCS.

Ponto	Classificação		Ponto	Classificação	
	Nomenclatura	Sigla		Nomenclatura	Sigla
A1-P2	Areia mal graduada com silte	SP-SM	A3-P1	Silte orgânico	OH
A1-P3	Areia bem graduada com silte	SW-SM	A3-P2	Silte orgânico	OH
A1-P3A	Silte orgânico com areia	OH	A3-P3	Areia siltosa	SM
A1-P4	Areia siltosa	SM	A3-P4	Silte orgânico	OH
A1-P5	Areia mal graduada com silte	SP-SM	A3-P5	Areia siltosa	SM
A1-P6	Areia siltosa	SM	A4-P1	Silte orgânico	OH
A1-P7	Areia siltosa	SM	A4-P2	Silte orgânico	OH
A2-P1	Silte orgânico	OH	A4-P3	Silte orgânico com areia	OH
A2-P2	Silte orgânico	OH	A4-P4	Silte orgânico com areia	OH
A2-P3	Areia mal graduada com silte	SP-SM	A4-P5	Silte orgânico	OH
			A4-P6	Areia siltosa	SM

Tabela 4.8 – Significado de cada sigla utilizada na classificação dos sedimentos.

Símbolo	Termo
S	Areia
M	Silte
O	Orgânico
H	Alta Plasticidade
P	Mal graduado
W	Bem graduado

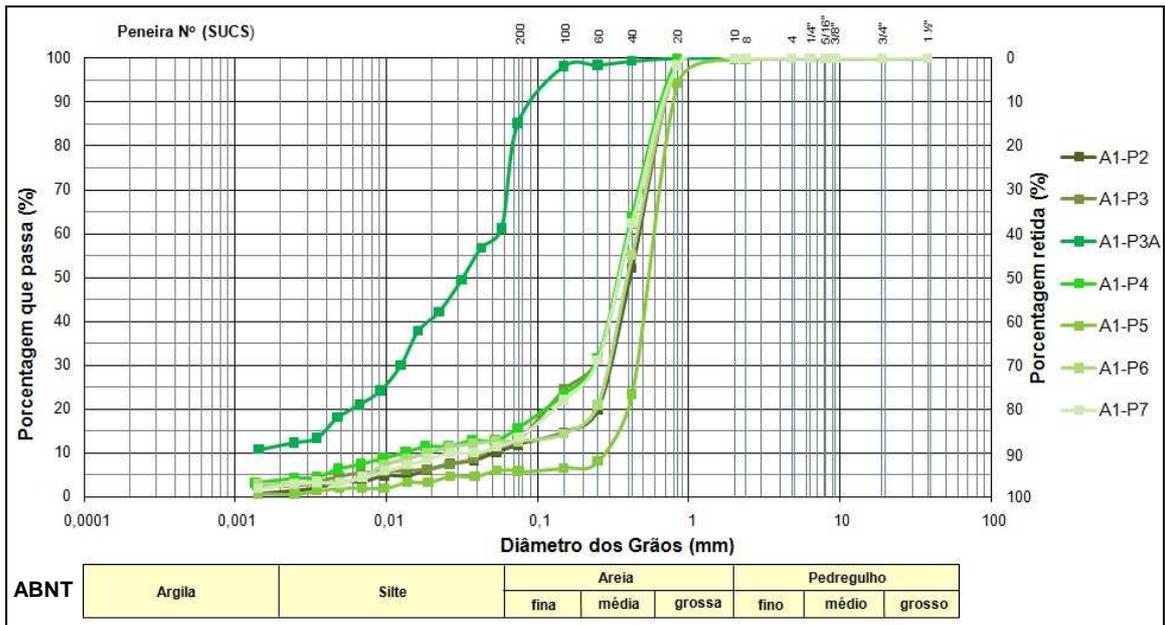


Figura 4.8 – Curvas granulométricas das amostras analisadas da Área 1.

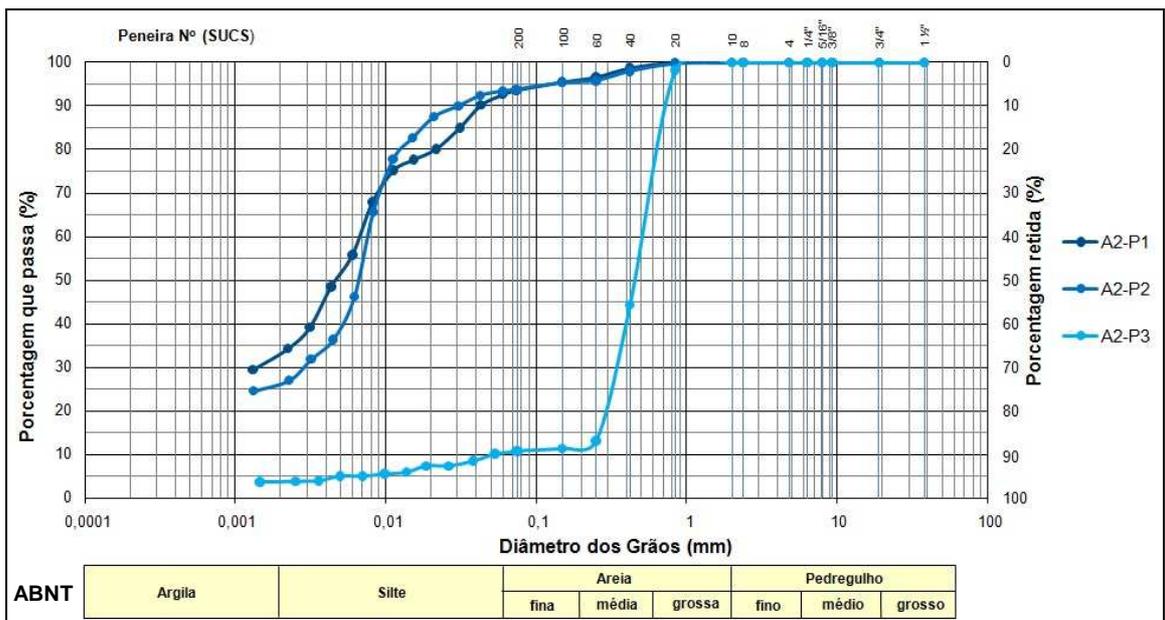


Figura 4.9 – Curvas granulométricas das amostras analisadas da Área 2.

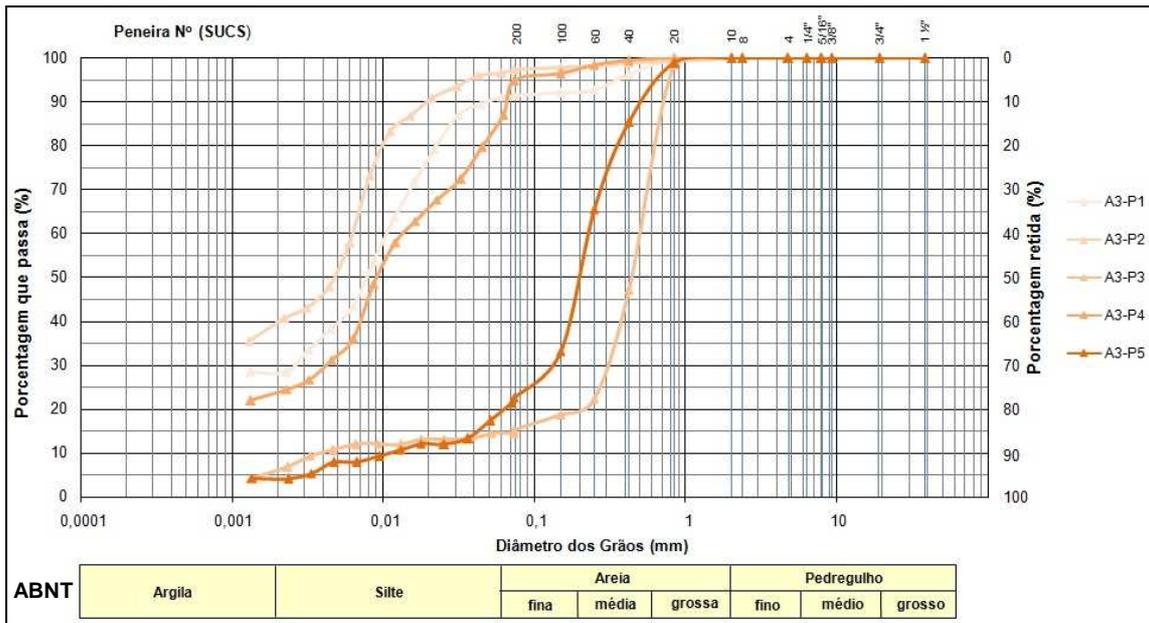


Figura 4.10 – Curvas granulométricas das amostras analisadas da Área 3.

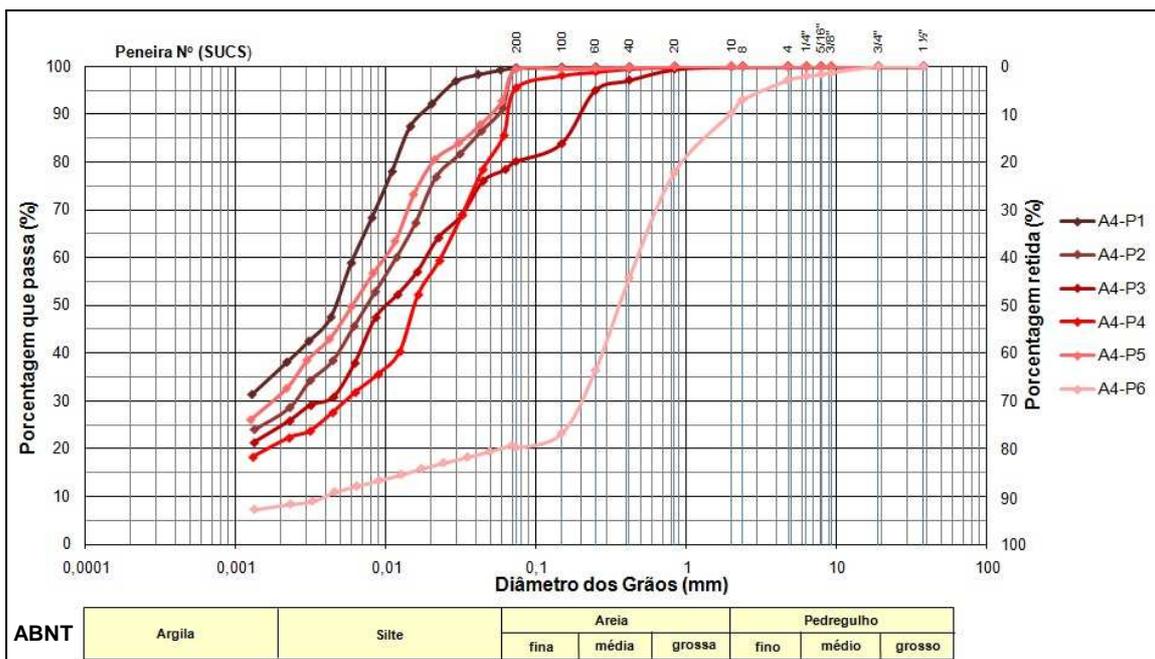


Figura 4.11 – Curvas granulométricas das amostras analisadas da Área 4.

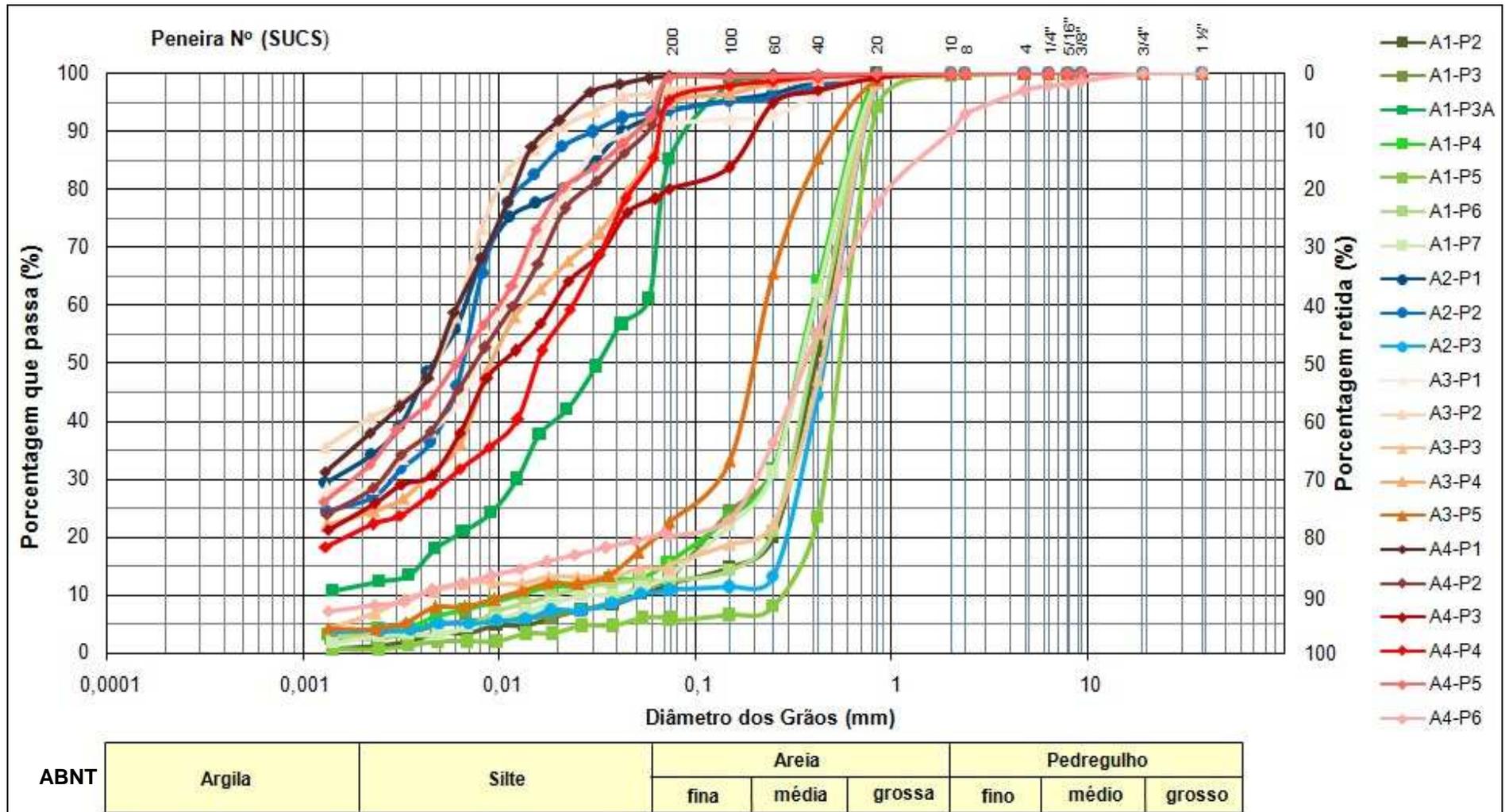


Figura 4.12 – Curvas granulométricas de todas as amostras analisadas.

4.3.1. Discussão dos resultados

Com os resultados dos ensaios de granulometria foi possível observar que a fração do tipo de solo com maior porcentagem em cada amostra, corresponde com a classificação preliminar dada pela caracterização tátil-visual. As amostras anteriormente classificadas como arenosas, obtiveram mais de 50% de areia pelo resultado do ensaio, da mesma forma que as amostras classificadas como siltosas obtiveram mais de 50% de silte. Dessa forma, a caracterização tátil-visual realizada foi validada.

Ainda de acordo com os resultados da granulometria, ressalta-se que as amostras de sedimento arenoso coletadas estão situadas nos locais onde ocorrem as menores profundidades na Lagoa de Jacarepaguá, como observado no Capítulo 3 a partir dos modelos batimétricos em 3 e 2 dimensões gerados no *RockWorks 14*. Na Figura 4.13 é reapresentado o modelo batimétrico em 2D no qual estão indicados os pontos de coleta com matriz arenosa.

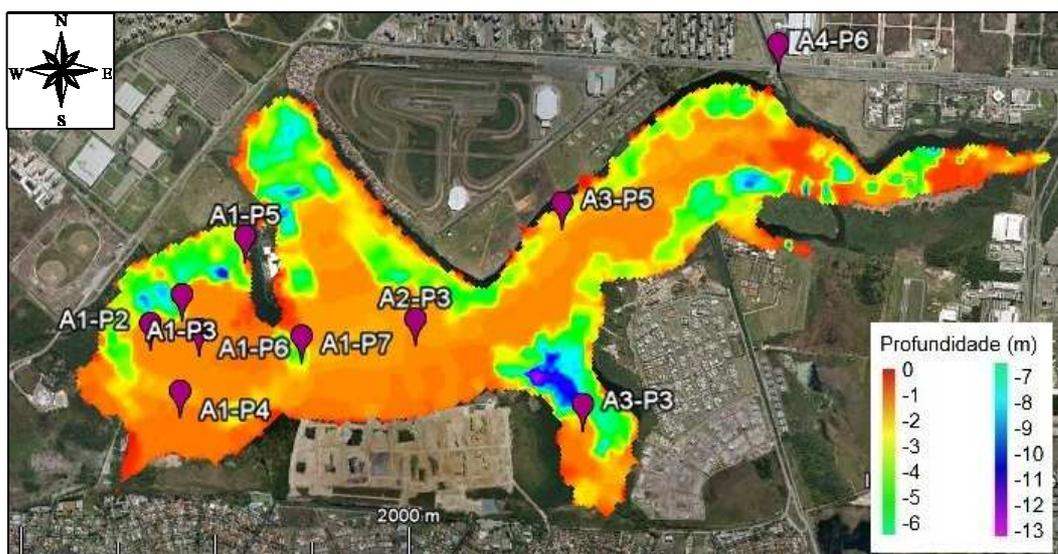


Figura 4.13 – Modelo batimétrico 2D com pontos de amostragem de matriz arenosa.

Em oposição, os sedimentos de matriz fina, caracterizados como siltosos, se encontram nas maiores profundidades da lagoa, conforme apresentado na Figura 4.14.



Figura 4.14 – Modelo batimétrico 2D com pontos de amostragem de matriz siltosa.

Na Figura 4.15, indicados a partir das curvas granulométricas, podem ser observados de forma clara os 2 tipos de sedimentos predominantes encontrados na lagoa, arenosos e siltosos, classificados preliminarmente pela caracterização tátil-visual. Esta estratificação dos tipos de sedimentos encontrados (arenosos mais rasos e siltosos mais profundos) pode ser explicada em função do processo de sedimentação e formação das lagoas da baixada de Jacarepaguá, conforme apresentado no Capítulo 2. Mais especificadamente, a fração arenosa encontrada pode ser indicativa da camada de areia de fundo de enseada, com areia de granulação média, enquanto que fração siltosa remete a camada de leques aluviais, mais profunda e abaixo da camada de areia de fundo de enseada, ambas caracterizadas por Roncarati e Neves (1975) e apresentadas na Figura 2.3.

De acordo com COPPETEC (1996), os baixos valores de densidade dos grãos (G) são um indício de que os sedimentos amostrados contêm alto teor de matéria orgânica. Isto ocorre, pois a densidade da MO é da ordem de $0,5 \text{ g/cm}^3$, muito baixa em relação à fração mineral do sedimento. Além disso, elevados teores de carbono orgânico também podem estar associados a um aumento da macroporosidade, reduzindo assim a densidade. Complementar ao já exposto, a MO é caracterizada como altamente hidrofílica, ou seja, com alta capacidade de absorção de água, resultando em teores de umidade tipicamente elevados. (Castiglia, 2006 e Valladares *et al*, 2008).

Os resultados apresentados dos ensaios executados neste trabalho, comprovaram estas duas características da MO, baixa densidade e altamente hidrofílica. As amostras com maiores concentrações de MO, foram as que

obtiveram menores valores de G e complementarmente as que obtiveram maiores valores de umidade higroscópica (w).

Por meio da análise conjunta dos resultados dos ensaios de teor de MO e granulometria realizados, observou-se um padrão já esperado: os teores de matéria orgânica foram maiores nos sedimentos de granulação mais fina. Isto é explicado pelo fato da fração fina do sedimento possuir uma interação química com a matéria orgânica.

Segundo a proposição de Jenkins (Caputo, 1998), os solos podem ser classificados em 3 níveis de plasticidade pelo índice de plasticidade (IP), calculado a partir dos resultados dos ensaios de determinação dos Limites de Atterberg (W_L e W_P), conforme apresentado na Tabela 4.9. A Tabela 4.10 apresenta esta classificação para as amostras de sedimentos da Lagoa de Jacarepaguá. Ressalta-se que só foi possível realizar estes ensaios nas amostras de granulometria fina, ou seja, para as amostras indicadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 – Níveis de Plasticidade (adaptado de Caputo, 1998)

Níveis de Plasticidade	
Fracamente plásticos	$1 < IP \leq 7$
Medianamente plásticos	$7 < IP \leq 15$
Altamente plásticos	$IP > 15$

Tabela 4.10 – Classificação do nível de plasticidade das amostras de sedimento com de granulometria fina da Lagoa de Jacarepaguá.

Amostra	IP (%)	Classificação
A2-P1	8,3	medianamente plástico
A2-P2	33,7	altamente plástico
A3-P1	22,5	altamente plástico
A3-P2	23,9	altamente plástico
A3-P4	32,5	altamente plástico
A4-P1	32,3	altamente plástico
A4-P2	26	altamente plástico
A4-P3	22,5	altamente plástico
A4-P4	15,3	altamente plástico
A4-P5	15,4	altamente plástico

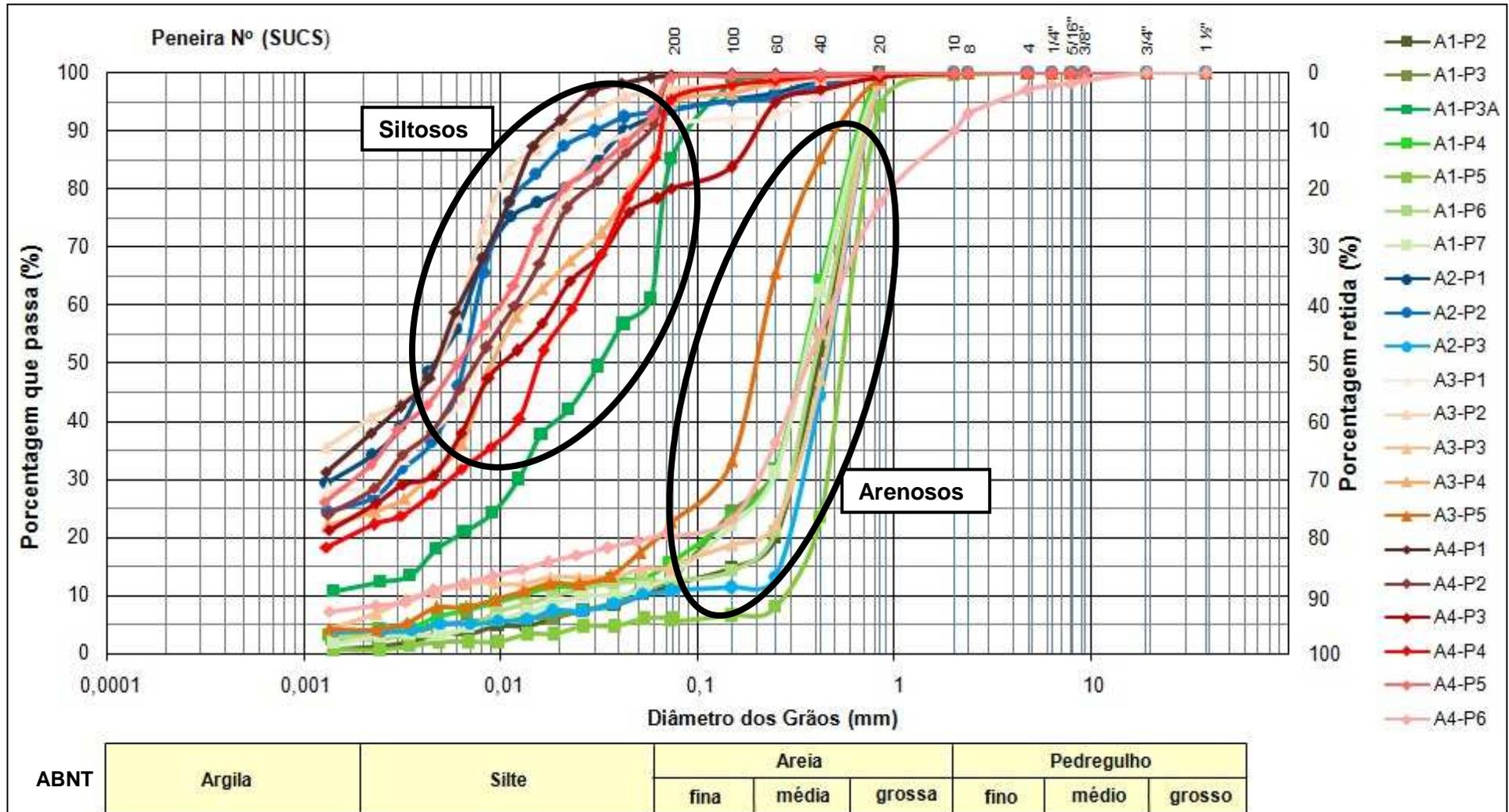


Figura 4.15 – Identificação dos 2 principais tipos de sedimento presentes na Lagoa de Jacarepaguá.

4.4. Ensaio complementares

A partir da constatação de que os sedimentos arenosos estão situados nas menores profundidades (como observado na Figura 4.17 apresentada), decidiu-se realizar ensaios complementares visando gerar mais informações sobre este sedimento que já vem sendo utilizado como material para aterro há anos, como observado pela existência das cavas profundas e pode ser utilizado também como agregado para concreto.

Para a primeira finalidade, foram realizados ensaios de permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Estes ensaios visam determinar o coeficiente de permeabilidade (k), os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ)).

Ressalta-se que apenas ensaios geotécnicos não são suficientes para caracterização deste material. Devem ser realizadas análises químicas para que assim seja determinado se este sedimento está ou não contaminado por algum tipo de composto químico que possa gerar efeitos adversos à saúde humana. Algumas dessas análises químicas serão apresentadas no Capítulo 5.

Para a segunda finalidade, agregado para concreto, é necessário executar uma série de ensaios segundo a norma ABNT NBR 7211 de 2009: Agregados para concreto – Especificação. Por questão de quantidade de material disponível ainda em laboratório, não foi possível executar tais ensaios, mas de forma meramente informativa esse ensaios são expostos no item 4.4.2.

Conforme mostrado no gráfico das curvas granulométricas na Figura 4.12, os sedimentos amostrados na Lagoa de Jacarepaguá são predominantemente de 2 tipos: siltosos e arenosos. A escolha das amostras arenosas a serem direcionadas a estes ensaios, foi a partir deste gráfico. Do grupo das arenosas, decidiu-se ensaiar a com maior teor de silte e opostamente, a com menor teor de silte, ou seja, A3-P5 e A1-P5 respectivamente, visando observar a influência da variação de silte na permeabilidade e na resistência das mesmas. Infelizmente não foi possível ensaiar a amostra A1-P5 em função da pouca quantidade de material restante no laboratório. Dessa forma, escolheu-se para a realização dos ensaios a amostra A2-P3, por possuir o segundo menor teor de silte.

A Tabela 4.11, apresenta as porcentagens das frações de areia e silte presentes nessas amostras, assim como a sua classificação final pela norma ASTM D2487-10.

Tabela 4.11 – Informações das amostras A2-P3 e A3-P5.

Amostras	Frações (%)		Classificação	
	Areia	Silte	Nomenclatura	Sigla
A2-P3	89,7	6,5	Areia mal graduada com silte	SP-SM
A3-P5	80,7	15,0	Areia siltosa	SM

4.4.1. Finalidade: Aterro hidráulico

Para a realização dos ensaios de permeabilidade e de resistência ao cisalhamento destas duas amostras (A2-P3 e A3-P5), necessitou-se definir se elas seriam corpos de provas densos ou fofos, já que são amostras deformadas.

Segundo Almeida (2005), a compacidade de um solo granular pode ser expressa qualitativamente como muito fofa, fofa, medianamente compacta, compacta a partir da correlação com a dificuldade de penetração observada durante ensaios de campo, como o *Standart Penetration Test* (SPT), ou o *Cone Penetration Test* (CPT). De forma quantitativa, a compacidade é determinada a partir do grau de compacidade relativa (CR) ou densidade relativa (DR).

Dessa forma, nos subitens a seguir, são apresentadas a etapa de preparação das amostras para estes ensaios, os procedimentos de execução dos ensaios e os resultados dos mesmos.

4.4.1.1. Preparação das amostras

Optou-se em utilizar um corpo de prova denso, com densidade relativa (DR) de 80%. Sabendo-se os volumes dos moldes para realização dos ensaios, necessitava-se determinar a massa de cada solo a ser utilizada nos moldes para obtenção de uma DR igual a 80%. Para estes cálculos, foi ainda necessário determinar experimentalmente os valores dos índices de vazios máximo e mínimo, que são apresentados nos subitens a seguir.

Essa determinação foi feita a partir das equações apresentadas abaixo, com o seguinte procedimento: com o valor da DR e dos índices de vazios máximo e mínimo, calculou-se o índice de vazios “natural”. Com este, calculou-se a massa específica e com esta determinou-se a massa necessária para cada tipo de solo em cada molde.

$$DR = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}}$$

$$e = \frac{\rho_g}{\rho_s} - 1$$

$$m_s = \rho_s V$$

Sendo:

- m a massa em g;
- V o volume em cm³;
- e o índice de vazios;
- ρ_s a massa específica seca em g/cm³;
- ρ_g a massa específica dos grãos em g/cm³;
- $e_{m\acute{a}x}$ o índice de vazios máximo;
- $e_{m\acute{i}n}$ o índice de vazios mínimo.

4.4.1.1.1. Índice de vazios máximo ($e_{m\acute{a}x}$)

No caso de uma amostra de solo ou sedimento com partículas perfeitamente esféricas, com uma compacidade qualitativa muito fofa, estas partículas estariam organizadas segundo a Figura 4.16, e seria possível a partir deste arranjo determinar o índice de vazios máximo desta amostra.

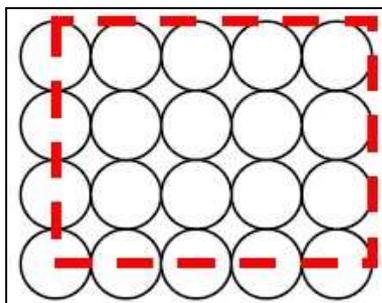


Figura 4.16 – Representação do máximo índice de vazios em um solo granular com partículas perfeitamente esféricas (Almeida, 2005).

A determinação do índice de vazios máximo foi realizada de acordo com as diretrizes do método A, da norma ABNT MB-3324 de novembro de 1990.

Cada amostra foi ensaiada 5 vezes, de forma a se obter um valor médio final. Os valores com diferenças maiores que 0,05 foram descartados do cálculo desta média.

Para a amostra A2-P3 foi obtido um $e_{m\acute{a}x}$ igual a 1,17 e para a amostra A3-P5 igual a 1,38.

4.4.1.1.2. Índice de vazios mínimo ($e_{m\acute{i}n}$)

No caso da mesma amostra de solo ou sedimento (com partículas perfeitamente esféricas), mas com uma compacidade qualitativa densa, estas

partículas estariam organizadas segundo a Figura 4.17, e seria possível com este arranjo determinar o índice de vazios mínimo desta amostra.

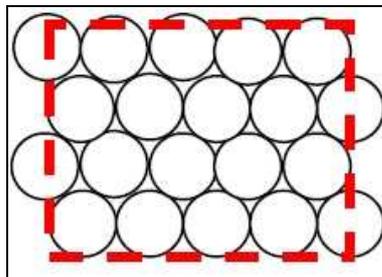


Figura 4.17 – Representação do mínimo índice de vazios em um solo com partículas perfeitamente esféricas (Almeida, 2005).

A determinação do índice de vazios mínimo foi realizada de acordo com as diretrizes do método B.1, da norma ABNT MB-3388 de fevereiro de 1991.

Cada amostra foi ensaiada 5 vezes, de forma a se obter um valor médio final. Os valores com diferenças maiores que 0,05 foram descartados do cálculo desta média, da mesma forma que foi feito para o índice de vazios máximo.

Para a amostra A2-P3 foi obtido um e_{\min} igual a 0,78 e para a amostra A3-P5 igual a 0,89.

4.4.1.2. Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento de um solo é função de dois componentes: embricamento e resistência entre as partículas. Este segundo componente pode ser dividido em outros: coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) (Gerscovich, 2010). A Figura 4.18 apresenta estes mecanismos de resistência.

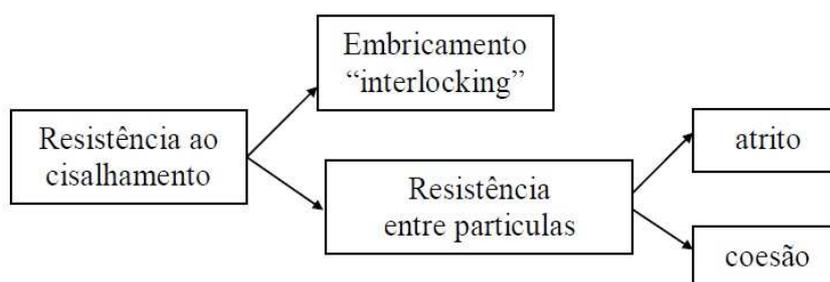


Figura 4.18 – Mecanismos de resistência ao cisalhamento (Adaptado de Gerscovich, 2010).

O embricamento é definido como o trabalho necessário para movimentar a partícula ascendentemente (Gerscovich, 2010). Para um solo denso, como o utilizado neste trabalho, existe uma força adicional para superar o embricamento entre as partículas, causando assim, necessariamente uma expansão volumétrica durante o ensaio, chamada de dilatância.

A coesão, referente a uma parcela da resistência entre as partículas do solo, pode ser dividida em: coesão aparente, resultante das pressões capilares da água contida nos solos e coesão verdadeira, proveniente de pequenas atrações entre partículas que dependem da natureza dos solos ou sedimentos (Atkinson, 1993).

Ainda segundo Atkinson (1993), para solos ou sedimentos com granulometria fina, o ângulo de atrito (ϕ) aumenta com a diminuição da plasticidade e para solos granulares, o ϕ parece depender principalmente da forma e aspereza dos grãos, e do fato da amostra ser bem ou mal graduada.

Estes dois componentes são explicitados no critério de ruptura de *Mohr-Coulomb*, utilizado neste trabalho, pela equação abaixo, e graficamente na Figura 4.19.

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi'$$

Onde:

- τ é a tensão cisalhante efetiva em KPa;
- σ' é a tensão normal efetiva em KPa;
- $\operatorname{Tg} \phi'$ é a tangente do ângulo de atrito interno e;
- c' é a coesão aparente.

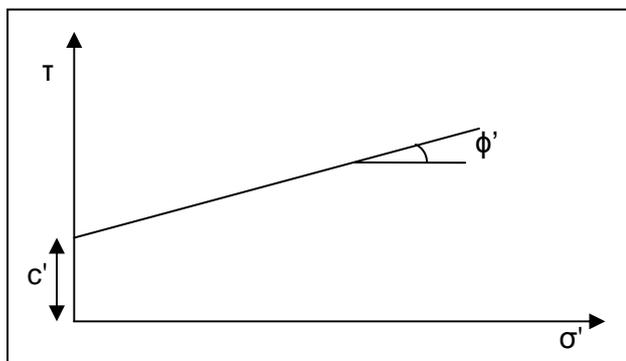


Figura 4.19 – Representação gráfica do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Atualmente existem muitos métodos para determinação da resistência ao cisalhamento de um solo, mas as duas técnicas normalmente utilizadas são: o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio triaxial (Das, 2007).

Para a determinação dos parâmetros de resistência das areias selecionadas (A2-P3 e A3-P5) foi escolhido o ensaio de cisalhamento direto, por possuir como vantagem simplicidade e facilidade de execução.

Segundo Das (2007), têm-se como desvantagens deste tipo de ensaio:

- A ruptura ocorre em um plano pré-determinado: determina-se o plano de ruptura no ato de moldagem do corpo de prova indeformado. Isso

favorece ensaios no qual se deseja verificar o grau de anisotropia de uma amostra, analisando diversos planos de ruptura em direções diferentes a orientação das partículas do solo. No caso dos ensaios a serem realizados com as amostras de sedimentos da lagoa, por serem amostras deformadas e o objetivo do ensaio é obter os valores da coesão e do ângulo de atrito, a direção do plano de ruptura não é um item relevante.

- Não há controle de drenagem: este tipo de ensaio impossibilita o controle de drenagem do corpo de prova, pois a caixa não possui um sistema de vedação adequado e eficiente. Assim como na desvantagem anterior, este item não é relevante a este trabalho, pois as amostras de sedimento da lagoa se encontram secas e não há a necessidade de determinação das poropressões para estudo das tensões efetivas.

O ensaio de cisalhamento direto pode ser realizado de duas formas: com tensão controlada ou com deformação controlada. No primeiro, a força de cisalhamento é aplicada em incrementos iguais até que o corpo de prova sofra ruptura, e no segundo, uma taxa constante de deslocamento cisalhante é aplicada a uma metade da caixa por um motor que atua por meio de engrenagens, conforme mostrado na Figura 4.20. A vantagem do segundo método é que no caso de uma areia compacta, a resistência ao cisalhamento de pico (na ruptura) assim como a resistência ao cisalhamento inferior (no ponto após a ruptura, chamado de resistência última), podem ser observadas e identificadas em gráficos. Nos ensaios de tensão controlada, a resistência ao cisalhamento de pico somente pode ser aproximada, pois a ruptura ocorre em um nível de tensão em algum ponto entre o incremento de carga pré-ruptura e o incremento de carga de ruptura. Contudo, comparados com os ensaios de deformação controlada, estes provavelmente modelam melhor as situações reais de campo (Das, 2007).

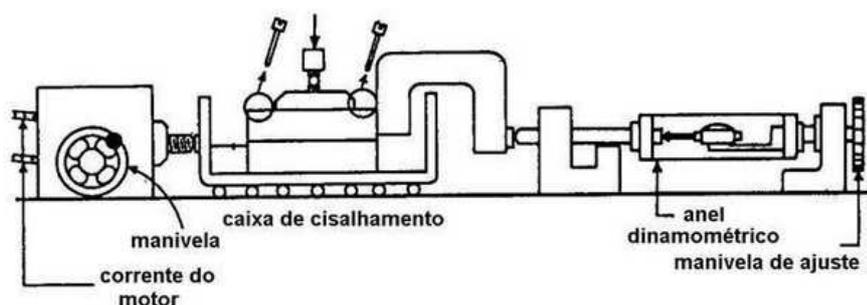


Figura 4.20 – Esquema do equipamento do ensaio de cisalhamento direto com deformação controlada (Gerscovich, 2010).

Em função do que foi exposto, foi utilizado o método de deformação controlada nos ensaios de cisalhamento direto realizados. A taxa de deslocamento cisalhante foi medida por um extensômetro horizontal, a força resistente ao cisalhamento foi medida por um anel dinamométrico horizontal e as variações de volume do corpo de prova durante o ensaio foram obtidas das leituras de um extensômetro vertical.

A caixa utilizada no equipamento possui 102 mm x 102 mm de extensão e 25 mm de altura. Para cada amostra ensaiada foram determinados 3 pontos de ruptura, ou seja, o ensaio foi realizado 3 vezes variando-se a tensão vertical aplicada.

A seguir são apresentados os dados específicos de execução dos ensaios e os resultados dos mesmos para cada uma das amostras separadamente.

- Amostra A2-P3:

A amostra A2-P3, conforme já apresentado, é a segunda amostra arenosa com menor teor de silte. Para a realização dos ensaios foi calculada sua massa necessária para a caixa do equipamento de forma a seguir a DR=80% determinada anteriormente.

A Tabela 4.12, apresenta os dados específicos dos 3 ensaios realizados.

Tabela 4.12 – Dados dos ensaios de cisalhamento direto realizados na amostra A2-P3.

Ensaio	Massa Aplicada (kg)	Tensão Vertical Aplicada (KPa)	Velocidade da engrenagem (mm/min)	Duração do ensaio (min)	Intervalo de leitura (min)
1	7	51	0,9555	10	0,5
2	20	114	0,6392	20	0,5
3	40	211	0,6392	20	0,5

Nesta tabela, pode ser observado que a velocidade do Ensaio 1 foi maior do que a dos outros 2 ensaios (Ensaio 2 e 3) e o tempo de duração do mesmo foi metade dos seguintes. Esta diminuição da velocidade e aumento do tempo de execução nos ensaios seguintes pode-se ser explicada, pois com os resultados do Ensaio 1 em mãos, observou-se que a ruptura ocorreu com 4,5 minutos de ensaio e com apenas 4 mm de deslocamento horizontal da caixa superior, ou seja, o ensaio ocorreu muito rápido resultando em um deslocamento horizontal pequeno. Dessa forma, diminuindo a velocidade de ensaio e aumentando o tempo de duração do mesmo, obteve-se um maior detalhamento do processo de ruptura da amostra, aumentando o número de pontos a serem plotados nos gráficos, facilitando assim a observação do ponto exato da ruptura. Esta

diferença no número de pontos obtidos entre os ensaios pode ser observada no gráfico apresentado na Figura 4.21, no qual o Ensaio 1 foi finalizado com um menor deslocamento horizontal e possui menos pontos em sua curva.

Como já foi exposto, em um ensaio de cisalhamento direto, realizam-se leituras de 3 medidas: deslocamento horizontal, deslocamento vertical e força cisalhante. A partir dessas leituras foram calculadas as tensões cisalhantes e plotados os gráficos de tensão cisalhante vs deslocamento horizontal e deslocamento vertical vs deslocamento horizontal apresentados nas Figuras 4.21 e 4.22 respectivamente.

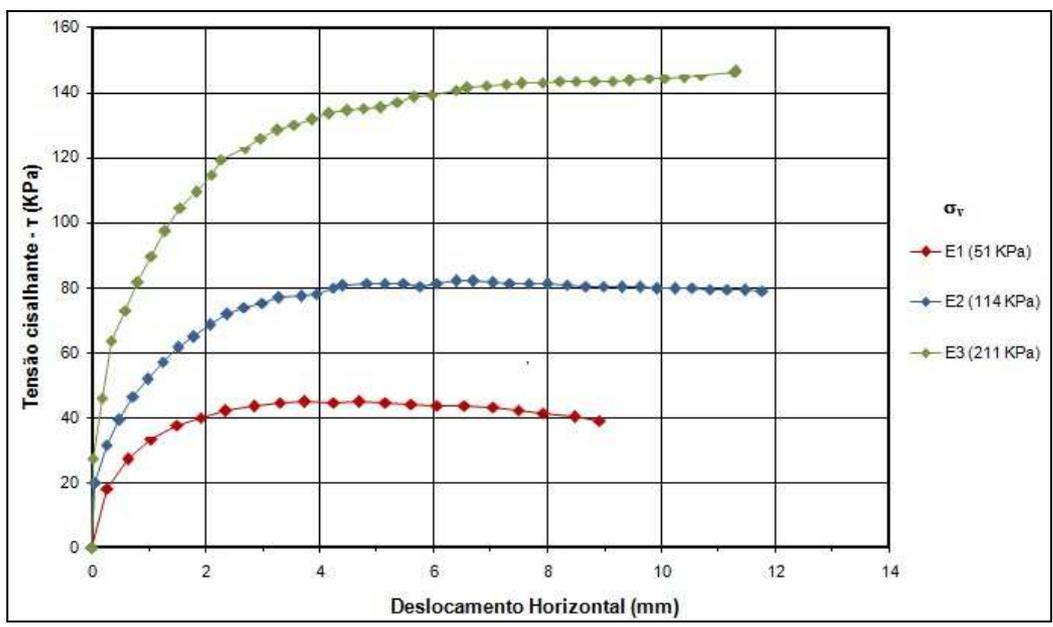


Figura 4.21 – Gráfico da tensão cisalhante (KPa) vs o deslocamento horizontal (mm) da amostra A2-P3.

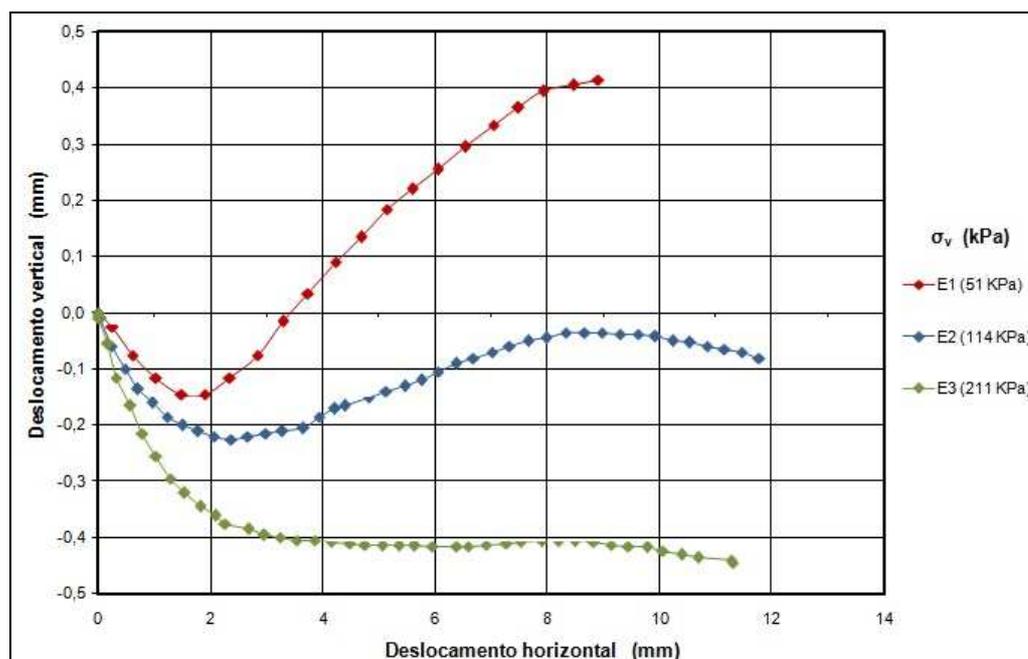


Figura 4.22 – Gráfico do deslocamento vertical (mm) vs o deslocamento horizontal (mm) da amostra A2-P3.

Analisando o gráfico da Figura 4.21 deslocamento horizontal vs tensão cisalhante, pode-se observar os pontos de ruptura das amostras para os 3 ensaios realizados. Para o Ensaio 1, esta ruptura ocorreu em torno de 4 mm de deslocamento horizontal, obtendo-se uma tensão cisalhante de 44,88 KPa. Já a amostra do Ensaio 2 rompeu com um deslocamento horizontal em torno de 7 mm com uma tensão cisalhante igual a 81,94 KPa. E no Ensaio 3 a ruptura ocorreu a um deslocamento horizontal de cerca de 9,8 mm com uma tensão cisalhante de 143,51 KPa.

A ruptura do Ensaio 1 é observada mais claramente neste gráfico pois houve a formação do pico e após este há uma ligeira queda na curva. Já para os Ensaios 2 e 3, o ponto de ruptura não foi claramente observado. Sendo assim, o critério utilizado para determinação dos mesmos foi a observação de uma constância nos valores de tensão cisalhante após um determinado tempo, não só no gráfico, mas também na planilha com os resultados dos ensaios. Dessa forma, o ponto de ruptura foi determinado ao início dessa constância nos valores.

Os dados de ruptura já apresentados no texto para cada ensaio desta amostra, foram compilados e são novamente apresentados na Tabela 4.13, abaixo.

Tabela 4.13 – Dados de tensão normal e tensão cisalhante nos pontos de ruptura dos 3 ensaios realizados da amostra A2-P3.

Ensaio	Tensão Normal Efetiva σ (KPa)	Tensão Cisalhante τ (KPa)
1 (51 KPa)	53,4	44,88
2 (114 KPa)	122,09	81,94
3 (211 KPa)	231,47	143,51

Analisando o gráfico do deslocamento vertical vs deslocamento horizontal, da Figura 4.22, observa-se uma tendência de contração da amostra, seguida de uma expansão (dilatação) e depois de uma nova contração, sendo o início desta no ponto de ruptura e mantida até o final do ensaio.

A amostra do Ensaio 1 se contraiu até uma diferença de 0,15 mm, e neste ponto, com deslocamento horizontal de 1,5 mm, começou a se expandir, tendo esse comportamento até o final do ensaio, chegando a +0,4 mm. No Ensaio 2, a amostra se contraiu até -0,225 mm, expandiu até -0,035 mm e contraiu de novo até -0,080 mm, quando o ensaio chegou ao fim. A primeira transição, de contração para expansão, ocorreu com um deslocamento horizontal igual a 2,3 mm, e a segunda, de expansão para contração, aconteceu com 8,5 mm de deslocamento horizontal. Já no Ensaio 3, a amostra sofreu contração até -0,415 mm, expansão até -0,406 mm e novamente contração até -0,445 mm. As transições de contração para expansão e expansão para contração ocorreram com 6,2 mm e 8,2 mm de deslocamento horizontal respectivamente.

Segundo o critério de ruptura Mohr-Coulomb, ao se plotar os pares de dados, tensão cisalhante e tensão normal efetiva, em um gráfico obtém-se os parâmetros de resistência desejados: coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). A Figura 4.23 apresenta este gráfico da amostra A2-P3, com os dados obtidos nos ensaios (os pontos no gráfico são as representações de cada ensaio realizado), com a envoltória de ruptura traçada, assim como a sua equação, fornecida por regressão linear.

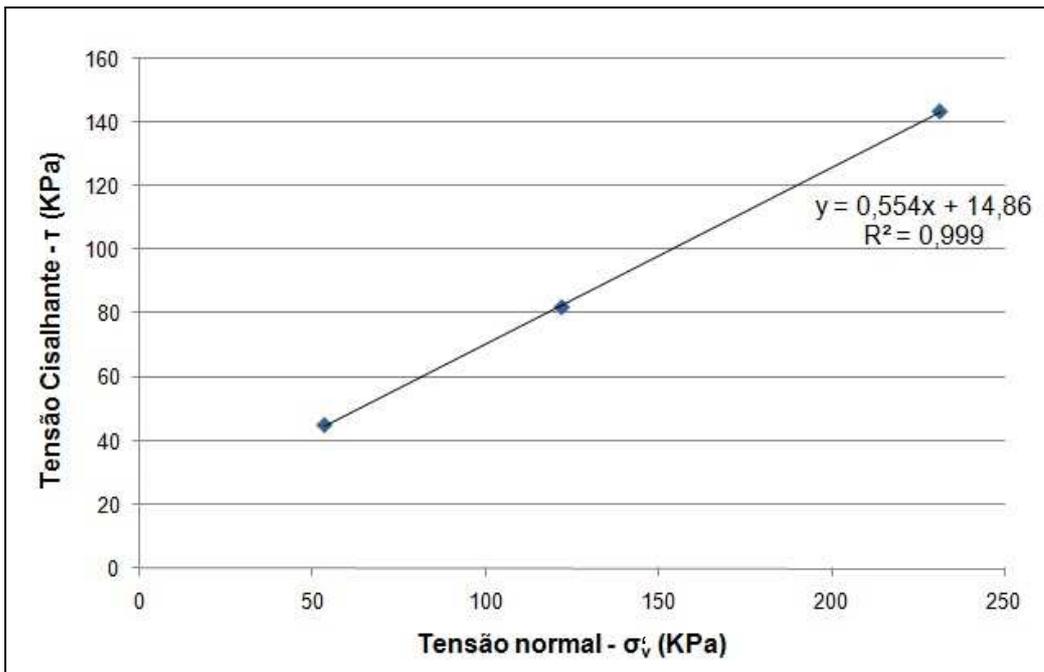


Figura 4.23 – Gráfico do critério de ruptura Mohr-Coulomb com os dados de ruptura dos 3 ensaios realizados da amostra A2-P3.

A partir da equação do plano de ruptura fornecida, obtêm-se os parâmetros de resistência necessários, os quais são apresentados na Tabela abaixo.

Tabela 4.14 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento da amostra A2-P3.

Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento	
Coesão - c' (KPa)	14,86
Ângulo de atrito - ϕ' (graus)	28,9

- Amostra A3-P5

A amostra A3-P5, conforme já apresentado, é amostra arenosa com maior teor de silte. Da mesma forma que para a execução dos ensaios da amostra A2-P3, para a amostra A3-P5 foi calculada a massa necessária para a caixa do equipamento de forma a seguir a DR igual a 80%, determinada anteriormente.

Devido aos resultados obtidos nos ensaios da amostra A2-P3 após a diminuição da velocidade do deslocamento horizontal e o aumento no tempo de duração do ensaio, manteve-se os mesmos padrões de dados específicos para os ensaios da amostras A3-P5, menos para o Ensaio 3, com tensão vertical aplicada de 211 KPa. Para este, necessitou-se do aumento do tempo de duração do ensaio para 25 minutos, pois até 20 minutos de duração não havia sido observada a tendência de diminuição ou constância dos valores de tensão cisalhante. Assim, com este aumento no tempo de ensaio, conseguiu-se o

resultado esperado com 22,5 minutos de duração do mesmo. Estes dados específicos de ensaio da amostra A3-P5 podem ser observados na Tabela abaixo.

Tabela 4.15 – Dados dos ensaios de cisalhamento direto realizados na amostra A3-P5.

Ensaio	Massa Aplicada (kg)	Tensão Vertical Aplicada (KPa)	Velocidade da engrenagem (mm/min)	Duração do ensaio (min)	Intervalo de leitura (min)
1	7	51	0,6392	20	0,5
2	20	114	0,6392	20	0,5
3	40	211	0,6392	25	0,5

A partir dessas leituras de deslocamento horizontal, deslocamento vertical e tensão cisalhante foram plotados os gráficos de tensão cisalhante vs deslocamento horizontal e deslocamento vertical vs deslocamento horizontal apresentados nas Figuras 4.24 e 4.25 respectivamente, conforme procedimento também realizado para a amostra A2-P3.

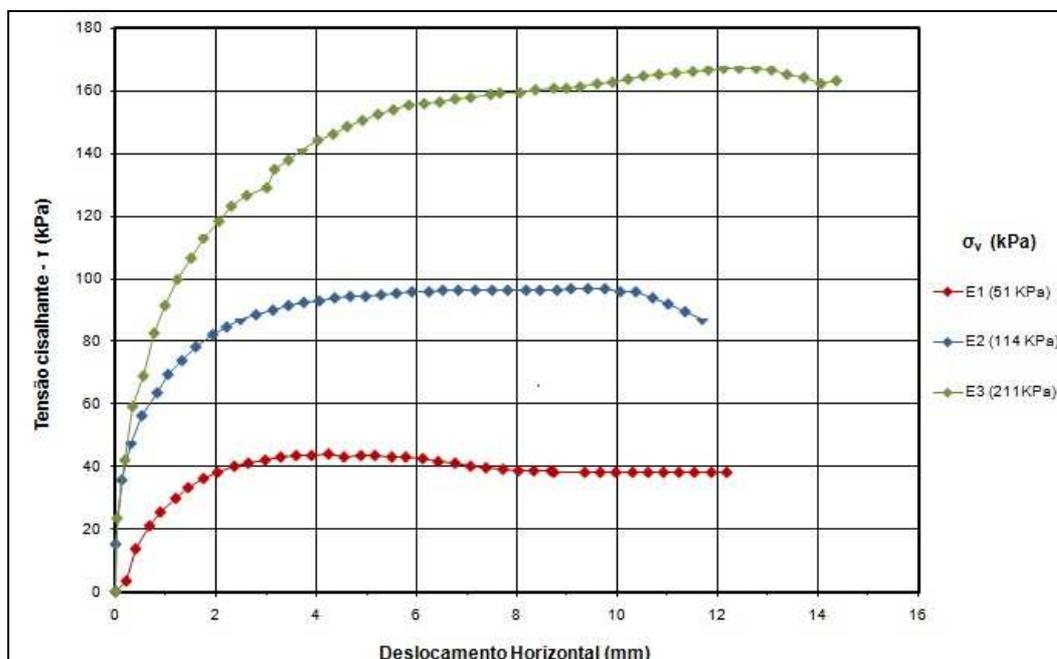


Figura 4.24 – Gráfico da tensão cisalhante (KPa) vs o deslocamento horizontal (mm) da amostra A3-P5.

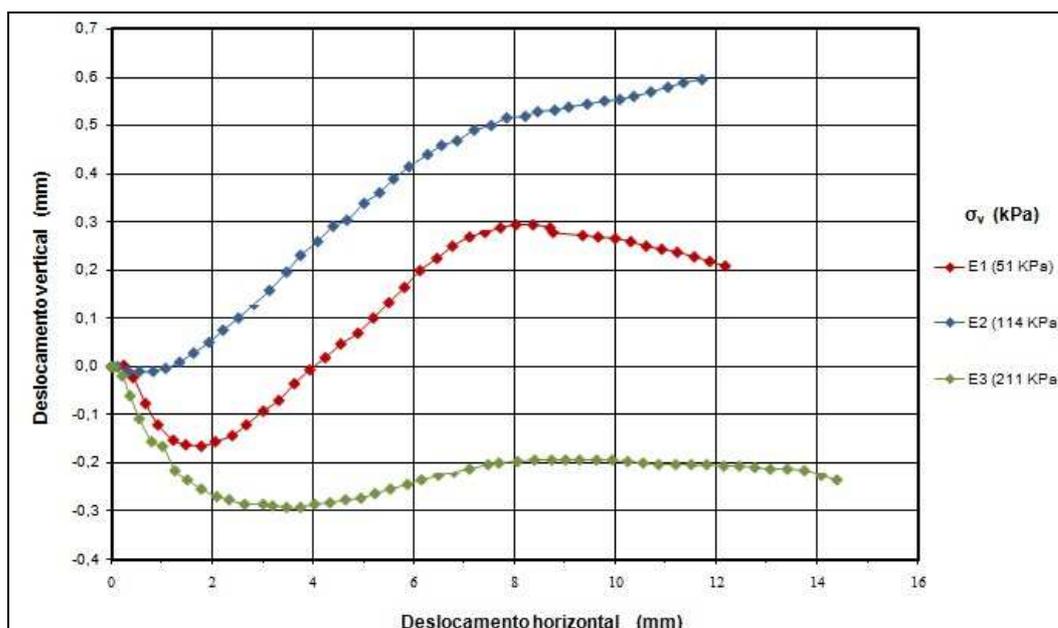


Figura 4.25 – Gráfico do deslocamento vertical (mm) vs o deslocamento horizontal (mm) da amostra A3-P5.

Com o mesmo procedimento realizado para a amostra A2-P3 (análise do gráfico tensão cisalhante vs deslocamento horizontal) pode-se observar os pontos de ruptura das amostras para os 3 ensaios realizados visualizando a Figura 4.24. Para o Ensaio 1, esta ruptura ocorreu em torno de 4,3 mm de deslocamento horizontal, obtendo-se uma tensão cisalhante de 43,94 KPa. Já a amostra do Ensaio 2 rompeu com um deslocamento horizontal em torno de 9 mm com uma tensão cisalhante igual a 96,82 KPa. E no Ensaio 3 a ruptura ocorreu a um deslocamento horizontal de cerca de 13,9 mm com uma tensão cisalhante de 167,27 KPa.

Diferentemente da amostra A2-P3, onde os pontos de ruptura dos Ensaios 2 e 3 não foram observados claramente e necessitou-se utilizar o critério da constância nos valores da tensão cisalhante para determinar o ponto de ruptura, todos os 3 ensaios da amostra A3-P5 tiveram os seus pontos de ruptura claramente observados com a diminuição dos valores de tensão cisalhante.

Os dados de ruptura já apresentados no texto para cada ensaio desta amostra, foram compilados e são novamente apresentados na Tabela 4.16, abaixo.

Tabela 4.16 – Dados de tensão normal e tensão cisalhante nos pontos de ruptura dos 3 ensaios realizados da amostra A3-P5.

Ensaio	Tensão Normal Efetiva σ' (KPa)	Tensão Cisalhante τ (KPa)
1 (51 KPa)	53,68	43,94
2 (114 KPa)	125,66	96,82
3 (211 KPa)	241,80	167,27

Analisando o gráfico do deslocamento vertical vs deslocamento horizontal, da Figura 4.25, observa-se a mesma tendência da amostra A2-P3: contração da amostra, seguida de uma expansão e depois de uma nova contração, sendo esta última após o ponto de ruptura e até o final do ensaio.

No Ensaio 1, a amostra se contraiu até -0,16 mm, expandiu até +0,29 mm e contraiu de novo até +0,21 mm, quando o ensaio chegou ao fim. A primeira transição, de contração para expansão, ocorreu com um deslocamento horizontal igual a 1,7 mm, e a segunda, de expansão para contração, aconteceu com 8,1 mm de deslocamento horizontal. A amostra do Ensaio 2 se contraiu até -0,01 mm, e neste ponto, com deslocamento horizontal de 0,65 mm, começou a se expandir, tendo esse comportamento até o final do ensaio, chegando a +0,59 mm. Já no Ensaio 3, a amostra sofreu contração até -0,29 mm, expansão até -0,19 mm e novamente contração até -0,23 mm. As transições de contração para expansão e expansão para contração ocorreram com 3,5 mm e 9,0 mm de deslocamento horizontal respectivamente.

A Figura 4.26 apresenta o gráfico do critério de ruptura de Mohr-Coulomb para a amostra A3-P5. Foram inseridos os valores de tensão cisalhante e tensão normal, obtidos nos 3 ensaios discriminados na Tabela 4.16, e traçado o plano de ruptura, com sua equação fornecida por regressão linear, de forma a se obter os parâmetros de resistência desejados: coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ').

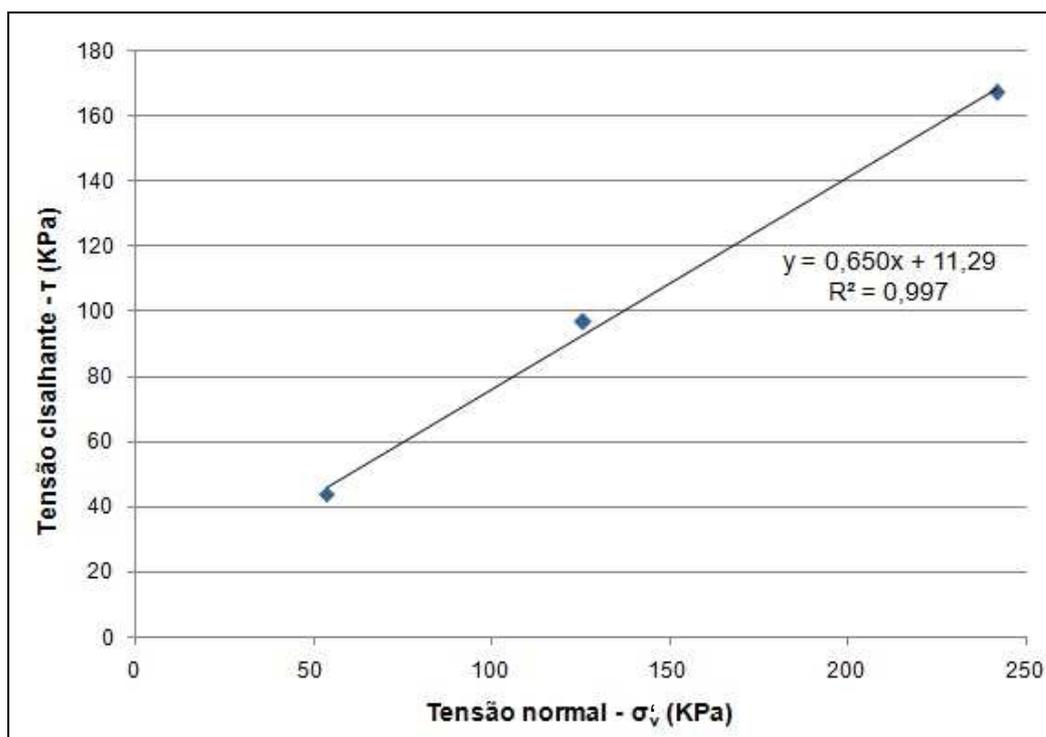


Figura 4.26 – Gráfico do critério de ruptura Mohr-Coulomb com os dados de ruptura dos 3 ensaios realizados da amostra A3-P5.

A partir da equação da envoltória de resistência fornecida, obtêm-se os parâmetros de resistência necessários, os quais são apresentados na Tabela abaixo.

Tabela 4.17 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento da amostra A3-P5.

Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento	
Coesão – c' (KPa)	11,29
Ângulo de atrito - ϕ' (graus)	33,0

4.4.1.3. Permeabilidade

A permeabilidade é a maior ou menor facilidade com que a água atravessa o solo, sendo o grau de permeabilidade expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade (ou condutividade hidráulica) em cm/s ou m/s (Caputo, 1996 *apud* Pazzetto, 2009).

Esta permeabilidade ocorre em função da existência de vazios interconectados pelos quais a água pode fluir de pontos de alta energia para pontos de baixa energia (Das, 2007).

O conhecimento do valor da permeabilidade é muito importante em algumas obras de engenharia, essencialmente, na estimativa da vazão que percolará pelo meio do maciço e da fundação em barragens de terra, em obras

de drenagem, rebaixamento do lençol d'água, adensamento etc (Pazzetto, 2009).

Segundo Das (2007), a condutividade hidráulica depende de vários fatores como:

- Viscosidade do fluido;
- Distribuição de tamanho dos poros;
- Distribuição granulométrica;
- Índice de vazios;
- Rugosidade das partículas minerais;
- Grau de saturação;
- Temperatura e;
- Macroestrutura.

Os coeficientes de permeabilidade destas 2 amostras (A2-P3 e A3-P5) foram determinados em laboratório, a partir das diretrizes da norma ABNT NBR 13292 de abril de 1995, em um permeâmetro de parede rígida, conforme o esquema mostrado na Figura 4.27, abaixo.

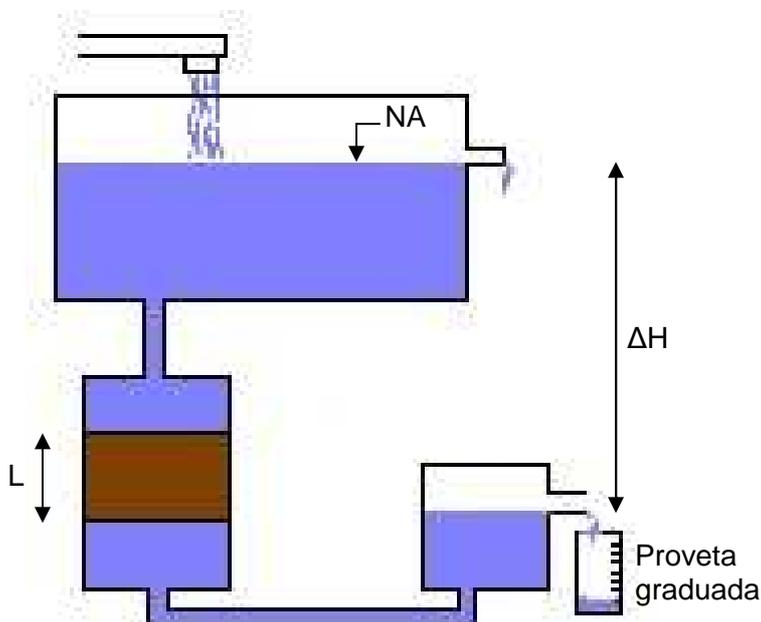


Figura 4.27 – Esquema do ensaio de permeabilidade a carga constante.

Para cada amostra (A2-P3 e A3-P5) foram realizados 5 ensaios, de duração de 5 minutos cada, com intervalo de leituras de 10 segundos. Estas leituras eram feitas em gramas, ou seja, anotava-se a massa de água percolante no corpo de prova. A metodologia utilizada foi direcionar esta água percolante a

um recipiente acondicionado em uma balança, dessa forma, realizavam-se as leituras em gramas nos intervalos de 10 segundos.

A condutividade hidráulica foi calculada para cada ensaio a partir da equação de Darcy abaixo e o resultado final a partir de uma média aritmética.

Onde:

$$k = \frac{Q}{i A}$$

- k é o coeficiente de permeabilidade em m/s;
- Q é a vazão em m³/s;
- i é o gradiente hidráulico.
- A é área transversal em m².

A seguir são apresentados separadamente os resultados obtidos nos ensaios para as duas amostras escolhidas.

- Amostra A2-P3:

Para esta amostra, utilizou-se um gradiente hidráulico igual a 2,8%.

Após a realização dos 5 ensaios, foi plotado o gráfico apresentado na Figura 4.28, abaixo, de Tempo de Leitura em segundos por Leitura da massa de água percolante em gramas.

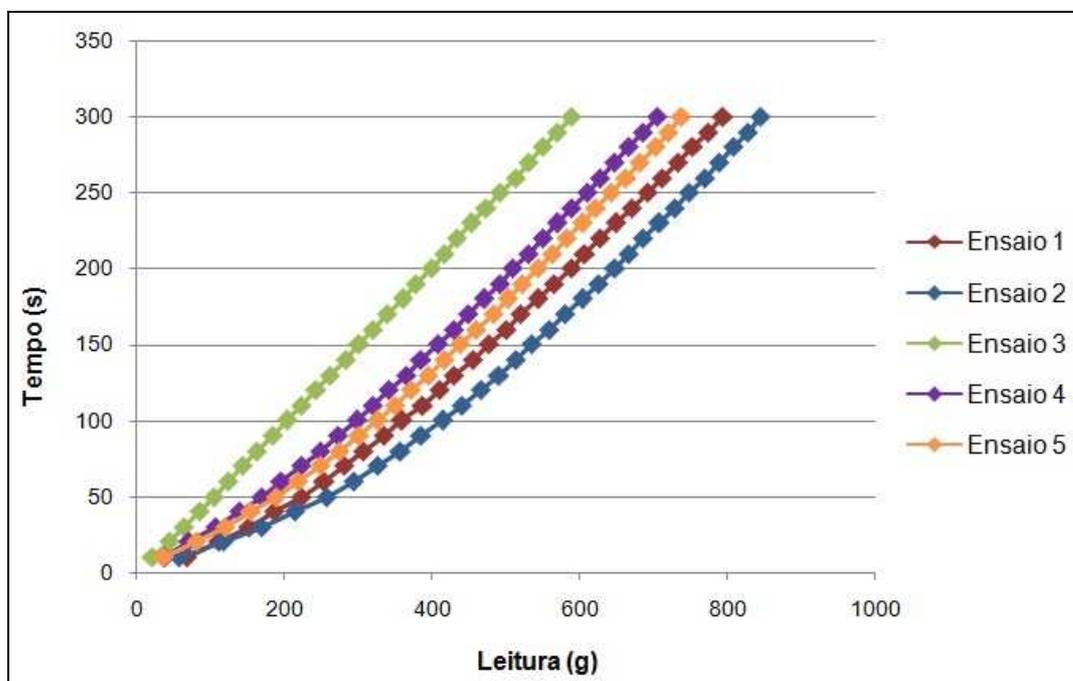


Figura 4.28 – Gráfico do tempo (s) vs leitura (g) dos ensaios para a amostra A2-P3.

Observa-se que nos ensaios 1, 2, 4 e 5, ocorreu uma curvatura inicial, indicando uma não-linearidade nas leituras iniciais. Isto pode ser ocasionado por bolhas de ar dentro do sistema do permeâmetro ou, pelo fato da amostra não estar 100% saturada ao início do ensaio como era de se esperar. Após essas leituras iniciais, passa-se a obter uma linearidade dos dados, de forma a indicar realmente um ensaio de carga constante e fluxo permanente. Essa não linearidade inicial das leituras não é observada no ensaio 3.

Complementando, a Tabela abaixo indica os resultados do coeficiente de permeabilidade calculado para cada ensaio, assim como a média final em m/s.

Tabela 4.18 – Resultado do ensaio de permeabilidade para a amostra A2-P3.

Ensaio	1	2	3	4	5
k (m/s)	1,13E-04	1,19E-04	9,23E-05	1,05E-04	1,09E-04
Média k (m/s)	1,08E-04				

- Amostra A3-P5:

Para esta amostra, utilizou-se um gradiente hidráulico igual a 1,6%.

Da mesma forma que para a amostra A2-P3, plotou-se o gráfico de Tempo de Leitura em segundos por Leitura da massa de água percolante em gramas dos 5 ensaios realizados para a amostra A3-P5, o que é apresentado na Figura 4.29, abaixo.

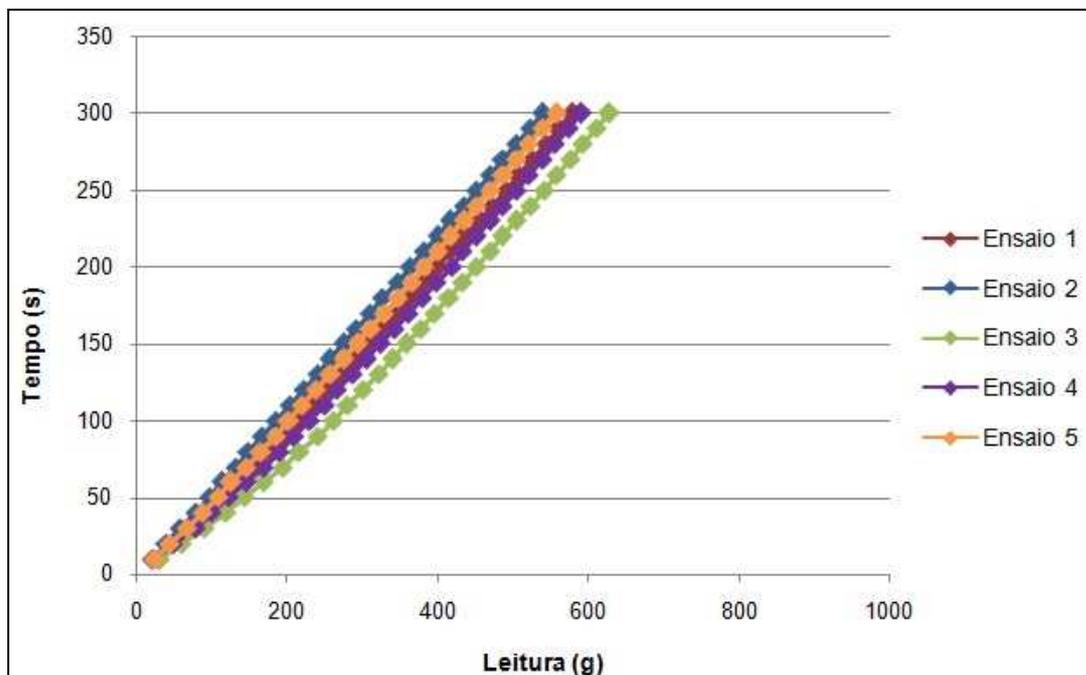


Figura 4.29 – Gráfico do tempo (s) vs a leitura (g) dos ensaios para a amostra A3-P5.

Observa-se pelo gráfico acima que para esta amostra, apenas o ensaio 3 apresentou uma não linearidade relevante nas primeiras leituras.

Complementando também, a Tabela abaixo indica os resultados do coeficiente de permeabilidade calculado para cada ensaio, assim como a média final em m/s.

Tabela 4.19 – Resultado do ensaio de permeabilidade para a amostra A3-P5.

Ensaio	1	2	3	4	5
k (m/s)	2,37E-04	2,25E-04	2,52E-04	2,42E-04	2,29E-04
Média k (m/s)	2,37E-04				

4.4.2. Finalidade: Agregado para concreto

Os requisitos exigidos para a recepção e produção de agregados destinados à produção de concreto são explicitados na norma ABNT NBR 7211 de 2009.

Para a realização dos ensaios normatizados, primeiramente necessita-se determinar se o material a ser analisado é “miúdo” ou “grúdo”. O termo agregado grúdo é utilizado para materiais que ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Já o agregado miúdo representa o material passante nesta mesma peneira (Mehta e Monteiro, 1994; ABNT NBR 7211, 2009).

No caso específico da Lagoa de Jacarepaguá, os sedimentos arenosos encontrados seriam classificados como agregados miúdos, de forma que serão apresentados apenas os ensaios normatizados para esta particularização de tamanho de grão.

Segundo a norma de especificação, os agregados miúdos devem satisfazer uma série de requisitos a partir dos ensaios discriminados abaixo:

- Granulometria, determinada pela ABNT NBR NM 248 de 2003.
- Substâncias nocivas:
 - Determinação de torrões de argila e materiais friáveis segundo a norma ABNT NBR MB 8 de 2010;
 - Determinação de materiais carbonosos de acordo com a norma ASTM C 123;
 - Determinação do material fino que passa através da peneira 0,075mm por lavagem (material pulverulento) segundo a norma ABNT NBR NM 46 de 2001;

- Determinação das impurezas orgânicas seguindo a norma ABNT NM 49 de 2001.
- Durabilidade:
 - Teor de cloretos e sulfatos segundo a norma ABNT MB 2686 de 2009;
 - Análise das reações álcali-agregado de acordo com a norma ABNT NBR 15577-1 de 2008.

Além dos ensaios obrigatórios listados acima, ainda há os chamados ensaios especiais, com requisitos específicos, sendo uma exigência por parte do consumidor ou por prescrições especiais adicionais. Alguns destes ensaios e seus métodos são exemplificados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Ensaio especiais para agregado miúdo (ABNT NBR 7211, 2009).

Propriedades Físicas	Método
Massa específica	ABNT NBR NM 52 de 2009
Massa unitária	ABNT NBR MB 45 de 2006
Absorção de água	ABNT NBR NM 30 de 2001
Inchamento	ABNT NBR 6467 ou ABNT NBR MB 215 de 2009
Teor de partículas leves	ABNT NBR 9936 ou ABNT NBR MB 2697 de 1987
Umidade superficial	ABNT NBR 9775 ou ABNT NBR MB 2642 de 1987

Como já foi exposto, não foi possível a execução dos ensaios obrigatórios descritos em função da pequena quantidade de amostra restante no laboratório após os ensaios de granulometria, teor de matéria orgânica, densidade dos grãos e limites de Atterberg, permeabilidade e cisalhamento direto realizados anteriormente.

4.4.3. Discussão dos resultados

Os resultados obtidos para os parâmetros de resistência, a partir do ensaio de cisalhamento direto, indicaram que a segunda amostra com menor teor de silte (A2-P3) apresentou uma maior coesão e um menor ângulo de atrito em comparação com a amostra com maior teor de silte (A3-P5), no entanto, esta diferença não é significativa.

Com relação aos resultados obtidos de condutividade hidráulica, de acordo com a Tabela 4.22, adaptada de Das (2007), os valores obtidos de coeficientes

de permeabilidade, classificam as amostras ensaiadas como areias médias a grossas.

Tabela 4.22 – Valores típicos da condutividade hidráulica dos solos saturados (adaptado de Das, 2007).

Solo	Permeabilidade (m/s)
Argila	$< 10^{-9}$
Silte	$10^{-7} - 10^{-9}$
Areia Fina	$10^{-4} - 10^{-5}$
Areia Média a Grossa	$10^{-2} - 10^{-4}$
Pedregulho	$10^0 - 10^{-2}$

Para verificar se a classificação dada às areias a partir dos resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade (Tabela 4.22) é o que as amostras apresentam na realidade, em questão de tipos de materiais e suas quantidades, discriminou-se na Tabela 4.23 as porcentagens dos diferentes tamanhos de grãos de areia obtidos nos ensaios de granulometria realizados anteriormente. Nesta tabela, observa-se uma predominância da areia média, seguida de areia grossa, nas duas amostras ensaiadas, validando assim a classificação prévia dada.

Tabela 4.23 – Discriminação das frações dos tipos de areia das amostras ensaiadas.

Frações (%)	A2-P3	A3-P5
Areia Fina	2,0	8,8
Areia Média	55	41,7
Areia Grossa	32,6	30,2
Areia	89,6	80,7

Este resultado mostra que a diferença no percentual de silte presente nas amostras ensaiadas não é relevante quanto às permeabilidades.

Os ensaios especificados para caracterização do sedimento arenoso como agregado miúdo não foram executados, pois não havia material suficiente restante dos ensaios realizados anteriormente. Por isso, não há qualquer resultado a ser discutido.