

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS FINOS DO LEITO MARINHO NA PRAIA
DO CASSINO-RS

por

Míriam Zanol Remde

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, dezembro, 2018

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS FINOS DO LEITO MARINHO NA PRAIA
DO CASSINO-RS

Por

Míriam Zanol Remde
Engenheira Geóloga

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. Waldir Terra Pinto

Co-orientador: Prof. Dr. Diego de Freitas Fagundes

Aprovada por:

Prof. Dr. José Antônio Scotti Fontoura

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Lauro Júlio Calliari

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves

EE/FURG

Prof. Dr. Cezar Augusto Burkert Bastos

EE/FURG

Prof. Dr. Adelir José Strieder

CE/UFPEL

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 19 de dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Waldir Terra Pinto pela orientação no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço ao co-orientador e amigo, Prof. Dr. Diego de Freitas Fagundes por ter me acompanhado nestes anos de trabalho e por nunca ter deixado de acreditar.

Agradeço ao Prof. Dr. Cezar Augusto Burkert Bastos pela valiosa ajuda na execução dos ensaios e pela amizade.

Agradeço a toda equipe do Laboratório de Geotecnia e Concreto Prof. Cláudio R. R. Dias pela ajuda na execução dos ensaios.

Agradeço a todos os envolvidos no projeto “Programa de Monitoramento do Sítio de Despejo e Área Adjacente do Material Dragado do Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande”, em especial aos Prof. Dr. José Antônio S. Fontoura e a Profa. Dra. Débora Machado pela permissão para utilização das amostras que tornaram este trabalho possível.

Agradeço ao mestre e amigo Prof. Dr. Adelir José Strieder, pelas conversas e incentivos ao longo de todos estes anos, foram muito importantes no desenvolvimento da minha vida acadêmica e profissional.

Agradeço a equipe do CEME-SUL/FURG pela execução dos ensaios de difração de raios-X.

Agradeço aos familiares e amigos pelo apoio e pela compreensão em todos os momentos.

Agradeço as amigas Juliana Fonseca e Manuela Coitinho pela ajuda nos momentos mais difíceis.

RESUMO

A praia do Cassino frequentemente apresenta ocorrência de lama em sua orla, sendo a origem desse material amplamente discutida pela comunidade local. O projeto “Programa de Monitoramento do Sítio de Despejo e Área adjacente do Material Dragado do Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande” está desenvolvendo trabalho de pesquisa no sentido de verificar a origem destes sedimentos que surgem na praia. Durante o monitoramento foram coletadas amostras de sedimento em diferentes pontos de controle. A coleta de amostras foi feita pela equipe formada por integrantes do Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG) do Instituto de Oceanografia e do Laboratório de Engenharia Costeira (LEC) da Escola de Engenharia em um dos cruzeiros oceanográficos do projeto de monitoramento. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas entre as cotas batimétricas de 5 m e 10,5 m. As amostras deformadas foram analisadas pelo LEC e as indeformadas foram utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho. O objetivo desta dissertação é a caracterização geotécnica e geomecânica dos solos finos do fundo marinho da praia do Cassino, afim de colaborar para o entendimento da deposição e origem destes sedimentos. Para atingir este objetivo, foram executados ensaios para determinação dos índices físicos, curva granulométrica, limites de consistência, determinação da resistência não drenada, parâmetros de compressibilidade, teor de matéria orgânica e definição da mineralogia das 12 amostras indeformadas de solos finos estudadas. As amostras foram classificadas pelo diagrama de Shepard (1954) como argilas siltosas. Pela metodologia SUCS, os solos foram classificados como argilas muito plásticas e argilas siltes orgânicos ou altamente plásticos. O limite de liquidez apresentou valores entre 61% à 85%, com média igual a 73% e para o limite de plasticidade, valor máximo foi 45% e mínimo 21%, com média igual a 31%. Os valores médios de γ_s (peso específico real dos grãos), γ_{nat} (peso específico natural) e índice de vazios foram 25,73 kN/m³, 13,27 kN/m³ e 4,06 respectivamente. As amostras se encontravam saturadas e com umidade natural entre 129,96% e 213,88%, com apenas um ponto com valores distintos de grau de saturação e umidade. As curvas resultantes dos ensaios de adensamento indicaram solos normalmente adensados. Todas as amostras apresentaram a mesma mineralogia, sendo compostas por quartzo, k-feldspato, muscovita, illita, caulinita e esmectita.

Palavras-chaves: caracterização geotécnica, sedimento marinho, solos finos.

ABSTRACT

The Cassino beach, in Brazil, frequently presents occurrence of mud in its shore. Where this material comes from is an object widely discussed by local community. The project “Programa de Monitoramento do Sítio de Despejo e Área adjacente do Material Dragado do Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande” is developing a research aiming to verify the source of these sediments that occur at the beach. During monitoring samples of sediment from different control points were collected by the team of the Oceanography Institute’s Laboratory of Geological Oceanography (Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG) do Instituto de Oceanografia) and by the Engineering School’s Laboratory of Coastal Engineering (Laboratório de Engenharia Costeira (LEC) da Escola de Engenharia). The gathering of samples took place during an oceanographic cruise. There were gathered samples both disturbed and undisturbed in between 5m and 10.5m bathymetric depths. The disturbed samples were analysed by the LEC and the undisturbed were used to the development of this work. The purpose of this Master’s dissertation is to execute the geotechnical and geomechanical characterization of fine soils from the seabed of Cassino’s beach, in order to collaborate to the understanding of sediment’s deposition and origin. To achieve this objective there were executed tests for determination of physical indices, particle size curve, limits of consistency, determination of undrained resistance, compressibility parameters, organic matter content, and definition of mineralogy from the 12 fine soil analysed samples. The samples were classified by Shepard diagram (1954) as silty clay. By the USCS methodology, soils were classified as very plastic clays and as organic or highly plastic clay silts. The liquidity threshold presented range values from 61% to 85%, with an average of 73%. To the plasticity limit, the maximum and minimum values were 45% and 21%, respectively, with an average of 31%. The medium values of γ_s (unit weight of grains), γ_{nat} (natural unit weight) and void index found were 25,73 kN/m³, 13,27 kN/m³ and 4,06, respectively. The samples were found saturated and with natural water content levels between 129,96% and 213,88%, with only one point presenting distinct values of saturation and water content. The curves resulting from the consolidation tests pointed to normally consolidated soils. All samples presented the same mineralogy, being composed of quartz, k-feldspar, muscovite, illite, kaolinite and smectite.

Keywords: geotechnical characterization, marine sediments, fine soils.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Relevância e justificativa	15
1.2. Objetivos da pesquisa.....	15
1.3. Resumo dos capítulos.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Contexto geológico da Bacia de Pelotas	17
2.2. Caracterização geotécnica de sedimentos marinhos finos	22
2.2.1. Parâmetros de compressibilidade e deformação	23
2.2.2. Resistência não drenada - S_u	30
2.2.3. Amostragem	31
2.2.4. Classificação de sedimentos marinhos.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1. Área de estudo.....	37
3.2. Coleta das amostras.....	38
3.3. Procedimentos de laboratório.....	41
3.3.1. Ensaio de palheta de laboratório	42
3.3.2. Ensaio do cone de queda	43
3.3.3. Determinação dos índices físicos	44
3.3.4. Adensamento Oedométrico	46
3.3.5. Preparação das amostras deformadas.....	47
3.3.6. Determinação da curva granulométrica	47
3.3.7. Ensaio do picnômetro.....	47
3.3.8. Determinação dos limites de Atterberg	48
3.3.9. Difração de raios X	51
3.3.10. Determinação do conteúdo de matéria orgânica	54
4. RESULTADOS	55
4.1. Granulometria	55
4.2. Limites de Atterberg, índice de plasticidade e índice de atividade coloidal	56
4.3. Classificação dos solos.....	59
4.4. Índices físicos.....	60
4.5. Resistência não drenada (S_u)	62
4.6. Adensamento oedométrico	64

4.7. Matéria orgânica.....	73
4.8. Difração de raios X	75
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	78
5.1. Conclusões	78
5.2. Sugestões para pesquisas futuras	79
6. REFERÊNCIAS.....	80
APÊNDICE A – Curvas altura da amostra versus raiz do tempo	83
APÊNDICE B – Curvas altura da amostra versus log do tempo	89
APÊNDICE C – Curvas tensão versus índice de vazios.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fisiografia e principais estruturas da Bacia de Pelotas e área continental adjacente (Fonte: Modificado de Urien & Martins, <i>apud</i> Barboza et al., 2008)	17
Figura 2.2. Perfil esquemático (W-E) transversal aos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. (Fonte: Modificado de Tomazelli & Villwock, 2005).....	19
Figura 2.3. Pontos amostrais na plataforma continental externa na Bacia de Pelotas. (Fonte: Wally, 2011)	20
Figura 2.4. Classificação de Shepard para sedimentos da plataforma continental externa da Bacia de Pelotas. a) Região Norte. b) Região Central. c) Região Sul. (Fonte: modificado de Wally, 2011) ...	20
Figura 2.5. Mapa faciológico da Bacia de Pelotas. (Fonte: modificado de Paixão, 2012)	21
Figura 2.6. Desenho esquemático da câmara oedométrica. (Fonte: Caputo, 2015).....	24
Figura 2.7. Curva indicando o comportamento de solos argilosos sob compressão oedométrica. (Fonte: Pinto, 2006)	25
Figura 2.8. Método de Casagrande para determinação da tensão de pré-adensamento. (Fonte: Modificado de Barnes, 2016).....	26
Figura 2.9. Determinação da tensão de pré-adensamento pelo método de Pacheco Silva. (Fonte: Pinto, 2006)	26
Figura 2.10. Exemplo de determinação do C_v pelo método de Casagrande. (Fonte: Caputo, 2015)	29
Figura 2.11. Exemplo de determinação do C_v pelo método de Taylor. (Fonte: Modificado de Fernandes, 2016).....	30
Figura 2.12. Desenho esquemático da câmara de compressão triaxial. (Fonte: Barnes, 2016)	31
Figura 2.13. Vibracore sendo posicionado. a) Equipamento sendo içado pelo guindaste na embarcação. b) Equipamento parcialmente submerso. c) Vista do Vibracore posicionado sobre o leito marinho. (Fonte: https://coastal.er.usgs.gov/capabilities/shipboard/drillrigs/vibracore.html Acesso: 07/12/2018).....	33
Figura 2.14. Distribuição granulométrica referente a NBR 6502 (ABNT, 1995).....	34
Figura 2.15. Diagrama trilinear de classificação dos solos de Shepard. (Fonte: Modificado de Shepard, 1954)	34
Figura 2.16. Gráfico de plasticidade de Casagrande. (Fonte: Das & Sobhan, 2014)	36
Figura 3.1. Mapa do estado do Rio Grande do Sul. Destacado em vermelho o território do município de Rio Grande e em amarelo, área de estudo.	37
Figura 3.2. Localização dos pontos de controle e trajeto da embarcação. (Fonte: Equipe LOG/LEC-FURG).....	38

Figura 3.3. Guindaste da lancha Larus movimentando os amostradores: a) Draga de Petersen. b) Box Corer. c) Amostrador fechado após a coleta do solo. d) Compartimentos superiores abertos para a retirada da subamostra através da cravação de um tubo de PVC. e) Abertura do compartimento inferior para a retirada da subamostra. (Fonte: Cortesia LOG/LEC-FURG).....	40
Figura 3.4. Tubos contendo as amostras indeformadas. a) Identificação da data da coleta. b) Tubos identificados com o ponto amostral. c) Vedação e indicação da base da amostra no tubo.	41
Figura 3.5. Equipamento utilizado no ensaio de palheta de laboratório.	42
Figura 3.6. Equipamento utilizado no ensaio do cone de queda.	44
Figura 3.7. Amostra parcialmente extrudada na moldagem do anel.	45
Figura 3.8. Prensas utilizadas no ensaio de adensamento oedométrico.	46
Figura 3.9. Desenho esquemático do ensaio do Picnômetro. (Fonte: Pinto, 2006)	48
Figura 3.10. Limites de Atterberg. (Fonte: Pinto, 2006).....	49
Figura 3.11. Materiais necessários para realização dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade.	50
Figura 3.12. Difratorômetro de Raios X com câmara para temperaturas criogênicas, Bruker, D8 Advance. (Fonte: CEME-SUL/FURG).....	53
Figura 4.1. Curvas granulométricas de todas as amostras.	55
Figura 4.2. Gráfico de plasticidade de Casagrande.....	58
Figura 4.3. Relação entre Índice de Plasticidade e percentual da fração argila.	58
Figura 4.4. Classificação das amostras no diagrama de Shepard (1954). Círculo vermelho: amostra #P20. Círculos verdes: demais amostras.	59
Figura 4.5. Heterogeneidade das amostras. a) Diferença na cor dos sedimentos. b) Vazios de origem orgânica. c) Descontinuidade natural do solo.	62
Figura 4.6. Resistência não drenada pelo método da palheta de laboratório versus umidade.	63
Figura 4.7. Correlação entre S_u obtido pelo ensaio de palheta e pelo cone de Queda.....	64
Figura 4.8. Gráfico C_v versus tensão do estágio de carga, amostra #P50.	68
Figura 4.9. Gráfico C_v versus tensão do estágio de carga, amostra #P31.....	68
Figura 4.10. Gráfico de Limite de Liquidez versus C_v médio (Taylor).	69
Figura 4.11. Gráfico de percentual de umidade versus C_v médio (Taylor).	69
Figura 4.12. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P21.....	71
Figura 4.13. Gráfico de limite de liquidez versus índice de compressão.....	72
Figura 4.14. Gráfico de teor de umidade versus índice de compressão.....	73
Figura 4.15. Gráfico de peso específico real dos grãos versus teor de matéria orgânica.....	74

Figura 4.16. Gráfico de resistência não drenada (obtida no ensaio de palheta de laboratório) versus teor de matéria orgânica.	75
Figura 4.17. Difratoograma da amostra #P18.	76
Figura 4.18. Difratoograma da amostra #P30.	76
Figura 4.19. Difratoograma da amostra #P18. Lâmina orientada natural, glicolada e calcinada.	77
Figura 4.20. Difratoograma da amostra #P41. Lâmina orientada natural, glicolada e calcinada.	77
Figura A.1. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P11.	83
Figura A.2. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P18.	83
Figura A.3. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P20.	84
Figura A.4. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P21.	84
Figura A.5. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P23.	85
Figura A.6. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P30.	85
Figura A.7. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P31.	86
Figura A.8. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P33.	86
Figura A.9. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P41.	87
Figura A.10. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P43.	87
Figura A.11. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P48.	88
Figura A.12. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P50.	88
Figura B.1. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P11.	89
Figura B.2. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P18.	89
Figura B.3. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P20.	90
Figura B.4. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P21.	90
Figura B.5. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P23.	91
Figura B.6. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P30.	91
Figura B.7. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P31.	92
Figura B.8. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P33.	92
Figura B.9. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P41.	93
Figura B.10. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P43.	93
Figura B.11. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P48.	94
Figura B.12. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P50.	94
Figura C.1. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P11.	95
Figura C.2. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P18.	96

Figura C.3. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P20.....	97
Figura C.4. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P21.....	98
Figura C.5. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P23.....	99
Figura C.6. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P30.....	100
Figura C.7. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P31.....	101
Figura C.8. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P33.....	102
Figura C.9. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P41.....	103
Figura C.10. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P43.....	104
Figura C.11. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P48.....	105
Figura C.12. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P50.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Parâmetros dos solos normalmente necessários para aplicações em Engenharia Geotécnica no ambiente marinho. (Fonte: Modificado de Thompson & Beasley, 2012).....	23
Tabela 2.2. Correlações de C_c com teor de umidade e limite de liquidez para solos argilo-siltosos moles. (Fonte: Modificado de Fernandes, 2016)	28
Tabela 2.3. Aplicações e tipos de amostradores superficiais. (Fonte: Modificado de Thompson & Beasley, 2012).....	32
Tabela 2.4. Sistema Unificado de Classificação de Solos (Fonte: ASTM, 2017).....	35
Tabela 3.1. Pontos amostrais. (Fonte: Equipe LOG/LEC-FURG).....	39
Tabela 3.2. Constante de calibração das molas. (Fonte: Viatest)	43
Tabela 3.3. Classificação dos solos de acordo com índice de plasticidade segundo Jenkins. (Fonte: Caputo, 2015).....	50
Tabela 3.4. Classificação dos solos de acordo com o índice de atividade coloidal. (Fonte: Pinto, 2006)	51
Tabela 3.5. Posições referentes aos picos principais (direção (001)) dos argilominerais em condições normais, após glicolagem e aquecimento. (Fonte: modificado de Albers, et al., 2002)	52
Tabela 4.1. Percentuais das frações argila, silte e areia de acordo com classificação NBR 6502 (ABNT, 1995).	56
Tabela 4.2. Resultados de LL , LP , Ip e Ia	57
Tabela 4.3. Classificação das amostras segundo metodologia SUCS.....	60
Tabela 4.4. Índices físicos.	61
Tabela 4.5. Resultados do Su pelos ensaios de Cone de queda ($K = 0,8$) e Palheta de laboratório. ..	63
Tabela 4.6. Parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento oedométrico.	64
Tabela 4.7. Tabela resumo do coeficiente de adensamento - C_v	67
Tabela 4.8. Valores de coeficiente de permeabilidade calculados a partir dos coeficientes de adensamento obtidos pelos métodos de Taylor e de Casagrande.....	70
Tabela 4.9. Teor de matéria orgânica.	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Cc	Índice de Compressão
Cd	Índice de Descarga
Cr	Índice de Recompressão
C _v	Coeficiente de adensamento
H	Medida da penetração do cone
Hd	Altura drenante
Ia	Índice de atividade coloidal
I _p	Índice de plasticidade
k	Coeficiente de permeabilidade
K _{mv}	Constante ensaio cone de queda
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MO	Matéria orgânica
m _v	Coeficiente de variação volumétrica
Q	Peso do cone
Su	Resistência não drenada dos solos
V	Volume
w	Teor de umidade
W	Peso
W _s	Peso de sólidos
W _w	Peso de água
Θ _f	Máximo ângulo de torção da mola
σ' _{vm}	Tensão de pré-adensamento
σ' _{vo}	Tensão efetiva vertical n
γ _{nat}	Peso específico natural
γ _s	Peso específico real dos grãos
γ _w	Peso específico da água

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEME-SUL	Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul
FURG	Universidade Federal do Rio Grande - FURG
LEC	Laboratório de Engenharia Costeira
LOG	Laboratório de Oceanografia Geológica
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos

1. INTRODUÇÃO

1.1. Relevância e justificativa

Ao longo dos anos foram registrados inúmeros eventos de ocorrência de lama na praia do Cassino, litoral sul do Rio Grande do Sul. Desde então, a origem desta lama é amplamente discutida por questões ambientais e também socioeconômicas, uma vez que a localidade é um importante ponto turístico da região.

Afim de acompanhar os eventos de surgimento de lama na praia e determinar sua origem, a área referente a plataforma continental interna da praia do Cassino está sendo estudada pelo projeto “Programa de Monitoramento do Sítio de Despejo e Área Adjacente do Material Dragado do Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande”. Este projeto é coordenado pelo Laboratório de Oceanografia Geológica - LOG do Instituto de Oceanografia e conta com participação do Laboratório de Engenharia Costeira - LEC da Escola de Engenharia.

Durante os trabalhos de campo sistemáticos de monitoramento na praia do Cassino, são coletadas, entre outros dados, amostras deformadas e/ou indeformadas de solo do fundo marinho.

O presente trabalho apresenta o estudo destas amostras indeformadas de solos finos através da execução de ensaios de caracterização geotécnica e geomecânica. Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Geotecnia e Concreto Prof. Cláudio Dias da FURG e forneceram resultados com o objetivo auxiliar os estudos propostos no programa de monitoramento do Balneário Cassino.

1.2. Objetivos da pesquisa

Os objetivos desta pesquisa podem ser divididos em objetivo geral e objetivos específicos. O objetivo geral é a caracterização geotécnica dos sedimentos finos presentes no leito marinho da praia do Cassino, litoral sul do Rio Grande do Sul.

Os objetivos específicos são elencados da seguinte forma:

- Análise descritiva da granulometria, índices físicos e determinação dos limites de consistência das amostras;
- Determinação de parâmetros de resistência com a utilização dos ensaios de cone de queda e palheta de laboratório (mini-vane test);
- Determinação de parâmetros de compressibilidade e deformação de solos argilosos: coeficiente de adensamento (C_v) de cada estágio de carga, e o Índice de Recompressão (Cr),

Índice de Compressão (C_c), Índice de Descarga (C_d) e a tensão de pré-adensamento do solo (σ'_{vm}) de cada amostra;

- Utilização do método de Difração de raio X para determinar a composição mineralógica das amostras.

1.3. Resumo dos capítulos

O Capítulo 2 contém a revisão bibliográfica, apresentando o embasamento teórico para o desenvolvimento da dissertação. Nele são apresentados tópicos importantes no estudo de solos finos, sistemas de classificação de sedimentos marinhos e uma breve contextualização das características geológicas e de deposição dos sedimentos marinhos na Bacia de Pelotas.

A metodologia proposta é descrita no Cap. 3. Estão descritos a área de estudo e o processo de amostragem. São detalhados também os ensaios de laboratório utilizado para a caracterização geotécnica das amostras.

Os resultados observados nos diversos ensaios executados nas amostras do leito marinho da praia do Cassino são discutidos no Cap. 4.

O Capítulo 5 contém uma breve síntese das conclusões desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Contexto geológico da Bacia de Pelotas

A Bacia de Pelotas é uma das bacias de margem continental brasileiras. Ela é estruturalmente delimitada ao norte pelo Alto de Torres e ao sul pelo Alto de Polônio (Fig. 2.1). A bacia possui aproximadamente 25000 km² até a cota batimétrica de 3.000m de profundidade (Bueno et al., 2007).

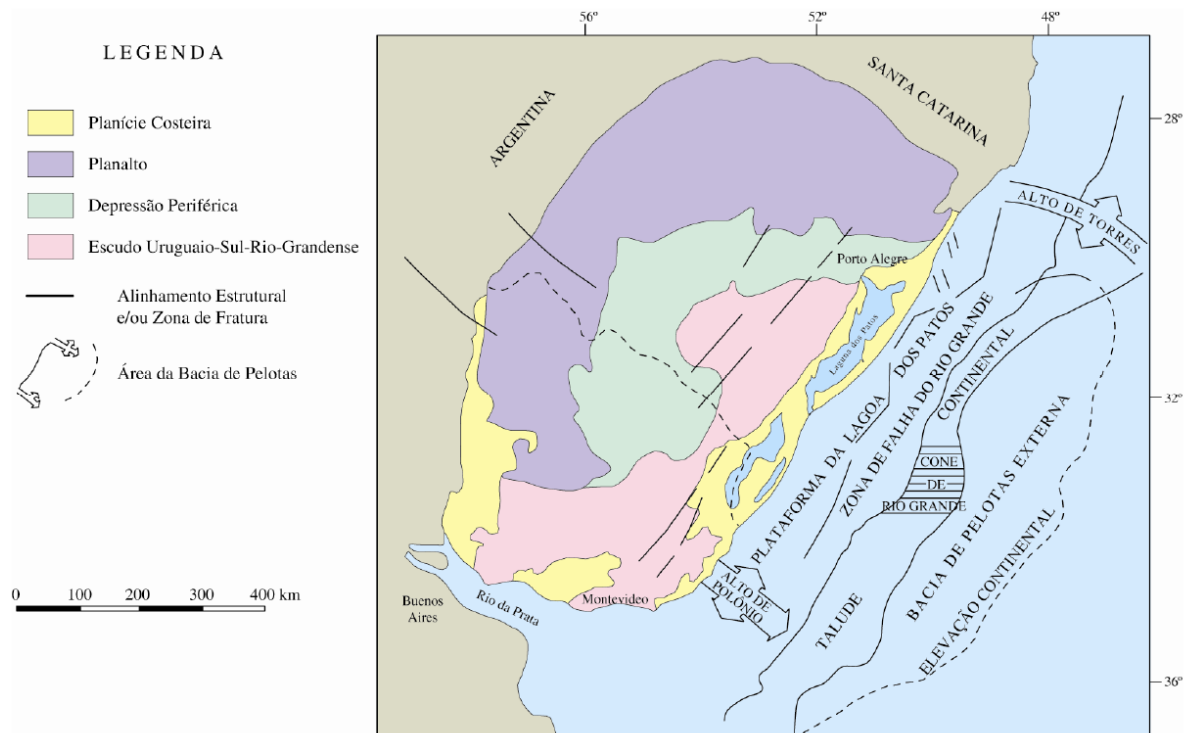


Figura 2.1. Fisiografia e principais estruturas da Bacia de Pelotas e área continental adjacente (Fonte: Modificado de Urien & Martins, *apud* Barboza et al., 2008)

A Bacia de Pelotas é bastante estudada na sua porção emersa, a Planície Costeira do Rio Grande do Sul. A Planície Costeira no Rio Grande do Sul compreende uma área com cerca de 620 quilômetros de comprimento e cerca de 100 quilômetros de largura. O relevo na região é baixo e tende a ser plano ao longo do litoral. Os sedimentos aflorantes foram acumulados em sistemas deposicionais distintos: um sistema de leques aluviais ocupando uma faixa contínua ao longo da parte mais interna da planície costeira e quatro diferentes sistemas deposicionais transgressivos-regressivos do tipo laguna-barreira (Fig. 2.2) (Tomazelli & Villwock, 2000; Tomazelli & Villwock, 2005). As fácies que compõem estes sistemas deposicionais podem ser resumidas da seguinte forma:

- Sistema Depositional de Leques Aluviais: apresenta fácies sedimentares associadas

aos ambientes de encosta das terras altas adjacentes à planície costeira. Estas fácies incluem depósitos resultantes de processos gravitacionais, mais próximos as rochas fonte, e gradam para depósitos transportados e em meio aquoso, mais distantes das rochas fonte. Este processo iniciou, provavelmente, no final do Terciário.

- Sistema Depositional Laguna-Barreira I: mais antigo sistema deposicional do tipo “laguna-barreira” da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, se desenvolveu como resultado de um primeiro evento transgressivo-regressivo pleistocênico, com idade absoluta de aproximadamente 400ka. Possui fácies sedimentares correspondentes a areias quartzo-feldspáticas avermelhadas, de granulação fina a média, muito bem arredondadas, semi-consolidadas com elevado conteúdo em matriz siltico-argilosa de origem diagenética. Crostas e nódulos ferruginosos se encontram disseminados nos sedimentos.
- Sistema Depositional Laguna-Barreira II: resultou de um segundo evento transgressivo-regressivo pleistocênico cujo pico transgressivo, com idade absoluta aproximada de 325 ka. Possui fácies de areias quartzo-feldspáticas, castanho-amareladas, bem arredondadas, envoltas em uma matriz siltico-argilosa de natureza diagenética.
- Sistema Depositional Laguna-Barreira III: barreira associada a um terceiro evento transgressivo-regressivo pleistocênico. Apresenta fácies arenosas de ambiente praial (areias quartzosas claras, finas, bem selecionadas com estratificação) e marinho raso, recobertas por depósitos eólicos. Este sistema possui idade absoluta aproximada de 120 ka.
- Sistema Depositional Laguna-Barreira IV: o mais recente sistema deposicional do tipo “laguna barreira” da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, desenvolveu-se durante o Holoceno como consequência da última grande transgressão pós-glacial. Este sistema engloba um complexo grupo de fácies.

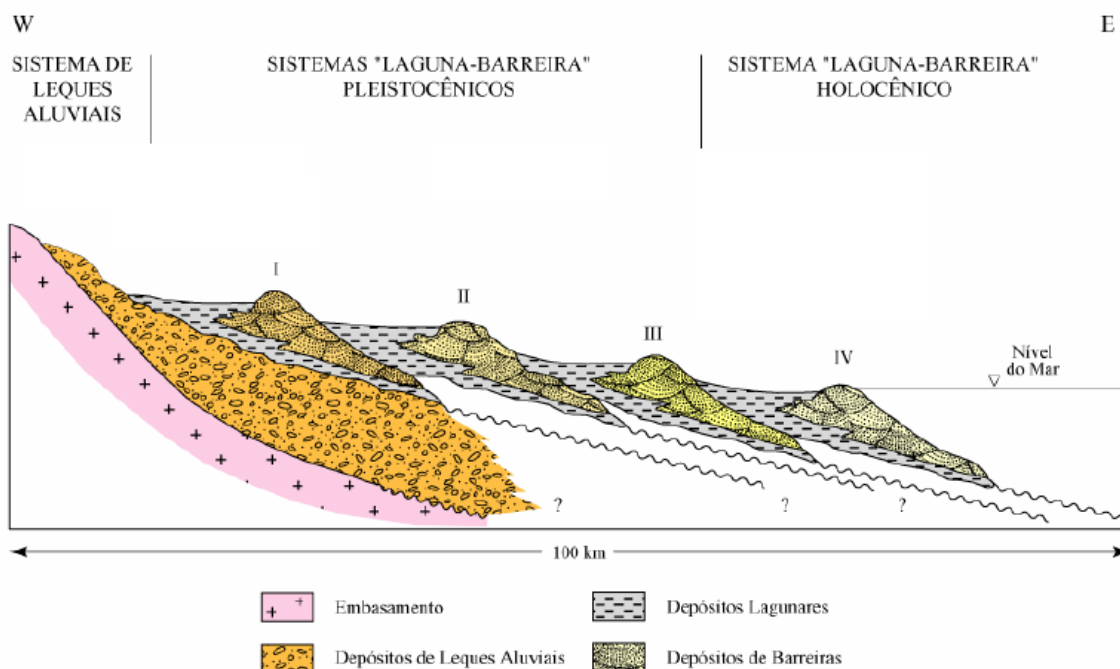


Figura 2.2. Perfil esquemático (W-E) transversal aos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. (Fonte: Modificado de Tomazelli & Villwock, 2005)

O estudo do leito marinho apresenta desafios em termos de amostragem de rochas e sedimentos. O que torna a porção submersa pouco estudada quando comparada com a Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Borzone & Griep (1991) estudaram a distribuição granulométrica dos sedimentos superficiais da plataforma continental interna da Bacia de Pelotas. Os autores utilizaram amostras coletadas em 3 diferentes cruzeiros oceanográficos em transversais ao norte e ao sul da desembocadura da Lagoa dos Patos, com profundidade variando aproximadamente entre 4 e 8 metros. Foram descritos sedimentos predominantemente arenosos (mais arenosos quanto mais próximos da costa) e um aumento evidente na fração fina em pontos mais profundos e também mais próximos da desembocadura da lagoa.

Wally (2011) caracterizou a porção da plataforma continental externa da Bacia de Pelotas através de 45 testemunhos de subsuperfície (Fig. 2.3). Os parâmetros analisados foram pH, Carbono Orgânico Total, Nitrogênio Total, Fósforo Total, granulometria e metais. A Bacia foi dividida em três regiões para a análise: Norte, Central e Sul. A classificação granulométrica utilizou o diagrama de Shepard e seu resultado é apresentado na Fig. 2.4. Fica evidente a predominância de sedimentos finos, o que é coerente com a sedimentação esperada para oceano profundo. Apesar da contribuição sedimentar continental ser importante na porção sul da Bacia de Pelotas, esta não influencia significativamente na origem dos sedimentos que apresentam predominância da origem marinha.

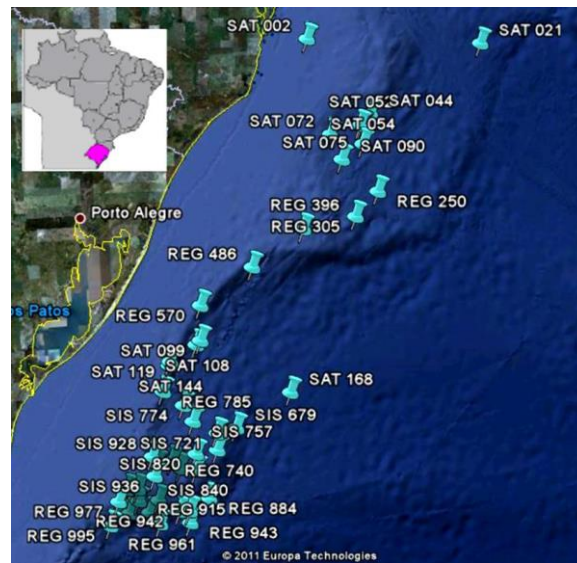


Figura 2.3. Pontos amostrais na plataforma continental externa na Bacia de Pelotas. (Fonte: Wally, 2011)

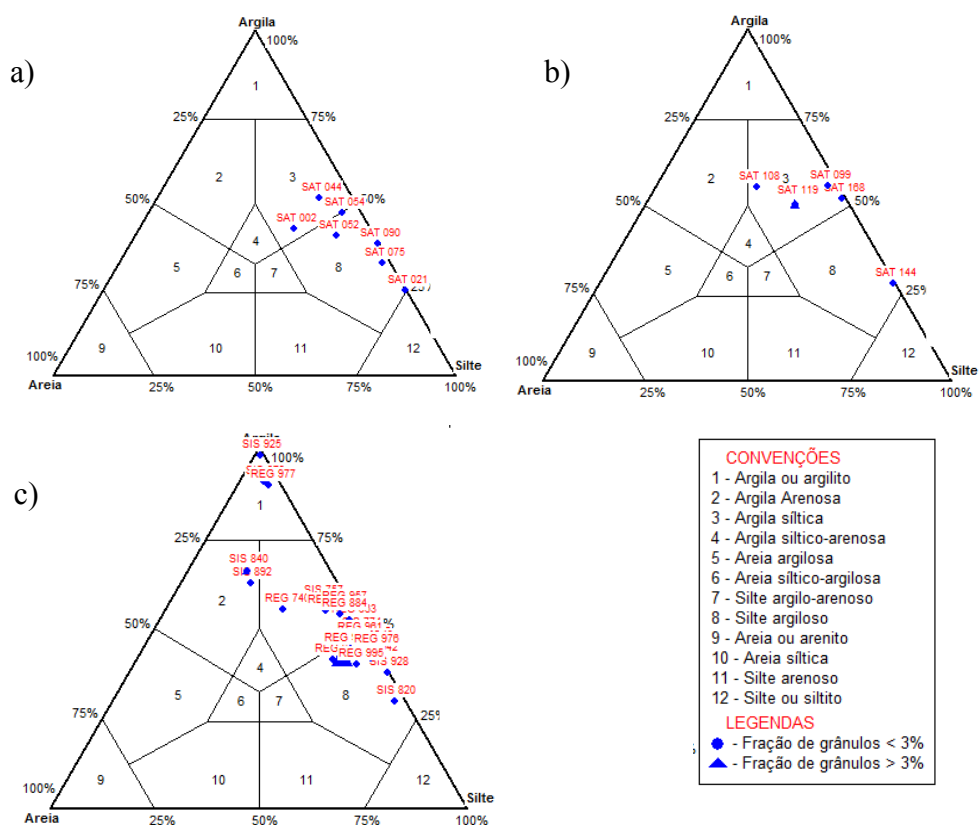


Figura 2.4. Classificação de Shepard para sedimentos da plataforma continental externa da Bacia de Pelotas. a) Região Norte. b) Região Central. c) Região Sul. (Fonte: modificado de Wally, 2011)

Paixão (2012) produziu um grande banco de dados com 1.695 amostras superficiais de sedimentos ao longo de toda a Bacia de Pelotas, contemplando a plataforma continental, talude e oceano profundo. A autora individualizou 11 fácies sedimentares. A plataforma continental apresentou predominância de sedimentos arenosos e na região do talude foram identificados majoritariamente sedimentos finos. A Figura 2.5 apresenta o mapa desenvolvido por Paixão (2012) e as fácies individualizadas.

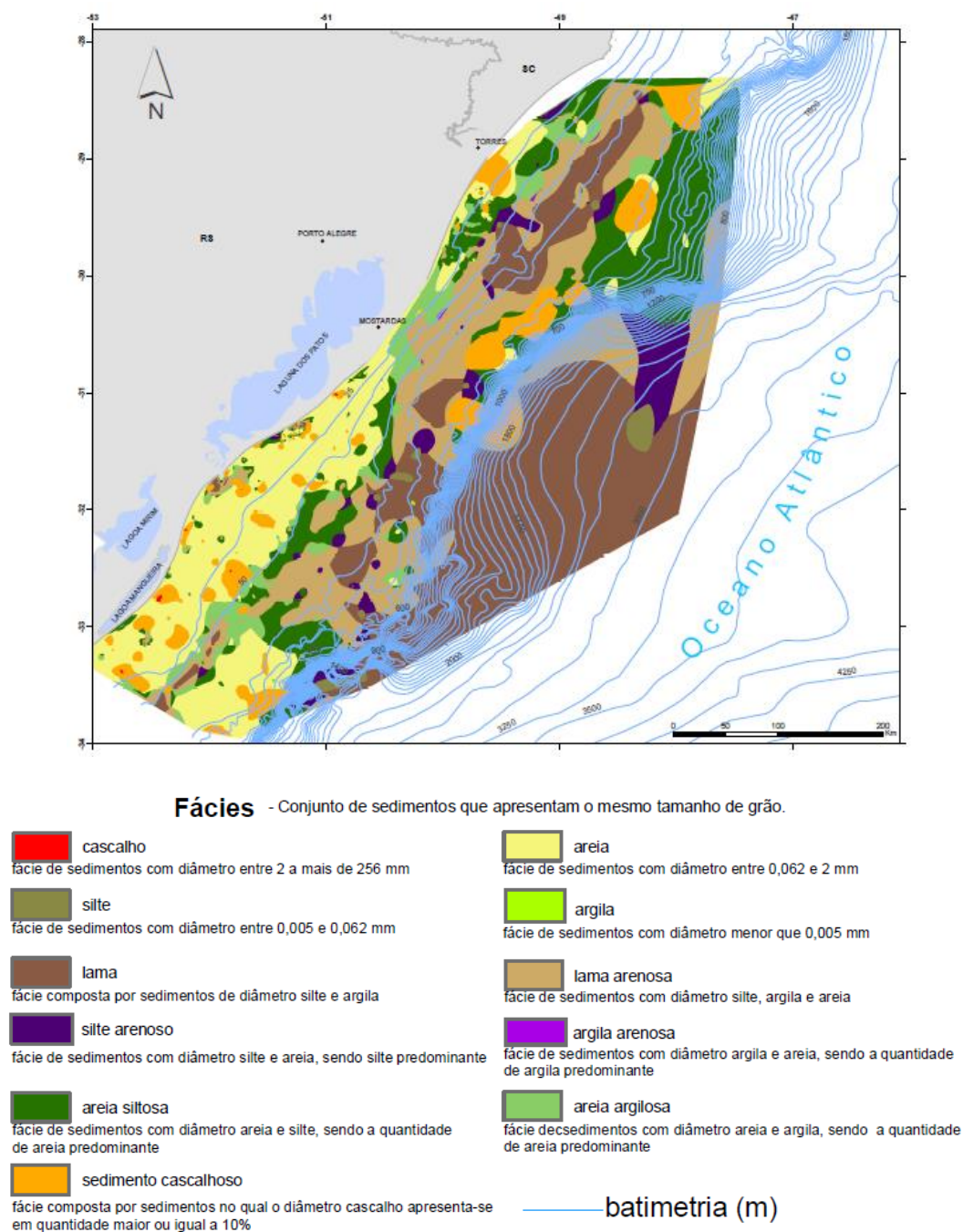


Figura 2.5. Mapa faciológico da Bacia de Pelotas. (Fonte: modificado de Paixão, 2012)

Valério (2017) executou caracterização geotécnica em amostras de sedimentos coletados na Lagoa dos Patos entre São Lourenço do Sul e Rio Grande, e sedimentos marinhos coletados entre Rio Grande e Torres. O estudo encontrou resultados coerentes quanto à classificação granulométrica apresentada por Paixão (2012) para os sedimentos marinhos. Amostras coletadas mais ao sul apresentaram maiores percentuais de argila, umidade, índice de plasticidade e menor resistência.

Praias oceânicas abertas, como as encontradas na Bacia de Pelotas, apresentam o domínio de ondas e correntes. Nestes casos, os sedimentos têm predominância arenosa em cotas batimétricas menores (mais próximo à linha de costa) e sedimentos predominantemente argilosos em cotas batimétricas maiores (Suguio, 2003). Apesar dessa dinâmica de praia, os estudos apresentados indicam que nas proximidades da desembocadura da Lagoa dos Patos os sedimentos apresentam maior proporção da fração fina.

Antiqueira & Calliari (2005) estudaram as características sedimentares da desembocadura da Laguna dos Patos. A classificação textural dos sedimentos apresentou concentração de sedimentos finos (argila siltica e areia-silte-argila) no canal de acesso a barra de Rio Grande. Quanto ao zoneamento hidrodinâmico utilizando o diagrama de Pejrup (1988), o local foi classificado como hidrodinâmica moderada.

Eventos de tempestade de grande duração podem ressuspender os sedimentos finos e transporta-los para a praia. Na praia do Cassino diversas vezes ao longo dos anos foi registrada a presença de bancos de lama próximos à linha de costa (Calliari et al., 2000; Calliari & Faria, 2003).

2.2. Caracterização geotécnica de sedimentos marinhos finos

A caracterização de sedimentos apresenta diferentes finalidades. Sob um ponto de vista de formação do ambiente deposicional, o conhecimento da granulometria e sua distribuição espacial, o formato dos grãos, mineralogia, auxiliam a explicar a formação e origem destes sedimentos. Para a engenharia, determinar as características geotécnicas dos sedimentos é fundamental para obtenção de parâmetros para o desenvolvimento de projetos em ambientes costeiros e marinhos.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos parâmetros do solo normalmente necessários para aplicações em Engenharia Geotécnica. Para o caso de solos argilosos, nota-se que há sempre a necessidade de definir a resistência não drenada (S_u) e para algumas aplicações, também é necessário obter os parâmetros de compressibilidade e deformação. A obtenção destas informações, quando se estuda ambientes marinhos apresenta desafios, seja para ensaios *in loco* ou na retirada de amostras para execução de ensaios de laboratório. Trata-se de um ambiente inóspito e seu estudo envolve

grande mobilização de recursos financeiros e humanos.

Tabela 2.1. Parâmetros dos solos normalmente necessários para aplicações em Engenharia Geotécnica no ambiente marinho. (Fonte: Modificado de Thompson & Beasley, 2012)

Aplicações em Engenharia Geotécnica no ambiente marinho	Classificação dos solos	Tamanho de grão	Limites de Atterberg	Propriedades de resistência		Propriedades de compressibilidade		
				Argila	Areia	Argila		Areia
				Su	ϕ	Cv, k	Cc	Cc
Fundações superficiais	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Âncora de peso morto	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não
Fundações estacas profundas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Ancoragem por estaca	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Âncora com enterramento	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Enterramento por arraste	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não
Penetração	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não
Perfuração	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Erosão	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não
Estabilidade de taludes	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não

2.2.1. Parâmetros de compressibilidade e deformação

As deformações nos solos geradas por carregamentos podem acontecer rapidamente após a construção ou lentamente após a aplicação da carga. As rápidas são as que ocorrem em solos arenosos

ou argilosos não saturados e as lentas as que ocorrem em solos argilosos saturados, pois é necessária a expulsão da água dos poros do solo para que ocorra a deformação (recalque).

Para estimar, em solos argilosos saturados, o valor do recalque total e a velocidade que ele ocorrerá, são necessários parâmetros obtidos através do ensaio de adensamento oedométrico. O ensaio consiste em moldar uma amostra indeformada em um anel rígido, ajustado em uma câmara oedométrica, onde a drenagem é permitida por cima e por baixo da amostra através do encaixe de pedras porosas (Fig. 2.6). Esta câmara é posicionada em uma prensa onde recebe estágios de incrementos de carga e a deformação causada é medida ao longo do tempo.

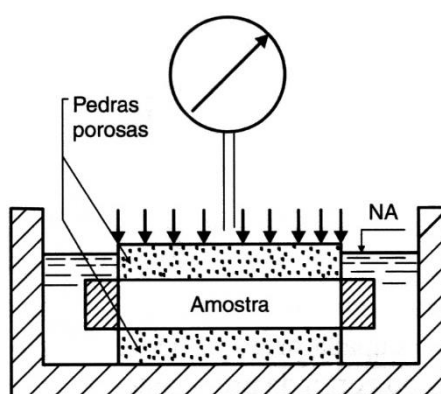


Figura 2.6. Desenho esquemático da câmara oedométrica. (Fonte: Caputo, 2015)

A partir dos resultados do recalque final de cada estágio, é formada a curva de variação do índice de vazios versus tensão vertical em escala logarítmica. A Figura 2.7 apresenta uma curva característica de um solo argiloso. Esta curva possui três trechos aproximadamente lineares. A inclinação do primeiro trecho, mais horizontalizado, representa o Índice de Recompressão (Cr). O segundo trecho, mais íngreme, representa a chamada reta virgem. A inclinação desta reta representa o Índice de Compressão (Cc). O último trecho é formado na fase de descarregamento do ensaio, sua inclinação representa o Índice de Descarga (Cd).

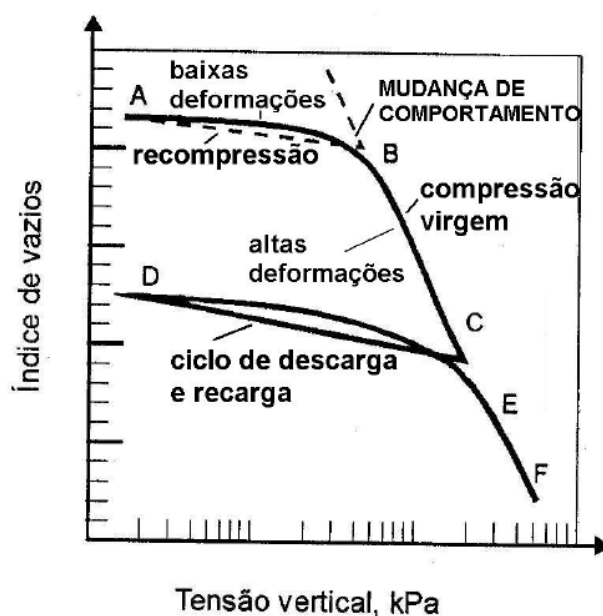


Figura 2.7. Curva indicando o comportamento de solos argilosos sob compressão oedométrica.

(Fonte: Pinto, 2006)

Os índices C_r , C_c e C_d são utilizados para o cálculo do recalque de solos argilosos. Para carregamentos na faixa de tensão vertical compreendida na reta de recompressão, variações de tensão efetiva vertical causarão baixas deformações. Isso ocorre devido a memória de carga do solo argiloso. No caso de carregamentos no intervalo de tensões compreendidas na reta virgem, variações de tensão efetiva vertical causarão grandes deformações.

Sendo tão brusca a mudança de comportamento entre os dois trechos de deformação, é fundamental a determinação deste ponto onde ocorre a alteração. A tensão onde isto ocorre é chamada tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) que representa a máxima tensão sofrida pelo solo. A tensão de pré-adensamento é obtida de forma gráfica pelos métodos de Casagrande e de Pacheco Silva.

O método de Casagrande para determinação do σ'_{vm} está representado na Fig. 2.8 e segue os seguintes passos:

1. Encontrar o ponto de máxima curvatura (menor raio);
2. Traçar por este ponto uma tangente à curva e uma horizontal;
3. Traçar a bissetriz entre a tangente e a horizontal;
4. O encontro da bissetriz com o prolongamento da reta virgem é o ponto que representa a tensão de pré-adensamento.

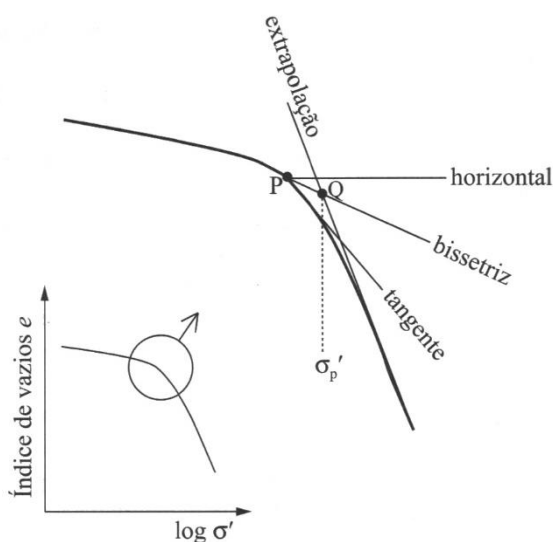


Figura 2.8. Método de Casagrande para determinação da tensão de pré-adensamento. (Fonte: Modificado de Barnes, 2016)

A Figura 2.9 apresenta a aplicação do método de Pacheco Silva para determinação da tensão de pré-adensamento. A aplicação consiste em:

1. Prolonga-se a reta virgem até o encontro com uma horizontal traçada do índice de vazios inicial;
2. Do ponto de interseção baixa-se uma vertical até a curva;
3. Deste último ponto traça-se uma horizontal até o prolongamento da reta virgem.

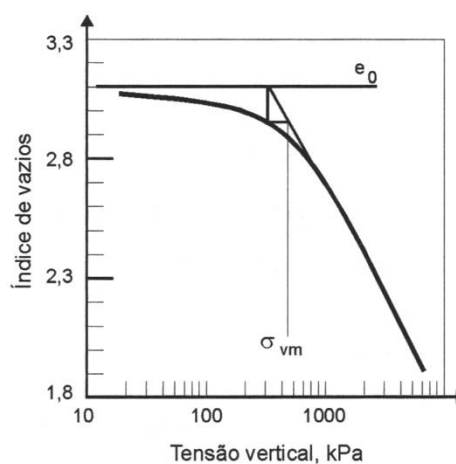


Figura 2.9. Determinação da tensão de pré-adensamento pelo método de Pacheco Silva. (Fonte: Pinto, 2006)

A relação entre a tensão de pré-adensamento e a tensão efetiva do solo (σ'_{v0}) é utilizada para classificar o solo em normalmente adensado, pré-adensado ou subadensado. Essa relação é chamada de Razão de Pré-Adensamento (OCR). O OCR é calculado pela Eq. (2.1):

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} \quad (2.1)$$

Quando:

OCR = 1, solo normalmente adensado;

OCR > 1, solo pré-adensado;

OCR < 1, solo sub-adensado (em adensamento).

O OCR é um parâmetro bastante utilizado para correlações empíricas com outras propriedades do solo.

A Tabela 2.2 apresenta uma série de correlações empíricas entre o índice de compressão e a umidade natural do solo e o limite de liquidez. Observando a diferença entre as equações indicadas na Tab. 2.2, fica evidente a variabilidade do C_c em função das características locais de cada solo, sendo importante ressaltar que o uso destas equações deve ser feito com cautela.

Outro importante parâmetro obtido através do ensaio de Adensamento Oedométrico é o Coeficiente de Adensamento (C_v). O C_v quantifica a velocidade de dissipação da poropressão, ou seja, a velocidade dos recalques.

O coeficiente de adensamento também é obtido de forma gráfica a partir dos resultados do ensaio de adensamento. A cada estágio de carga são produzidos gráficos de recalque pelo tempo onde são aplicados os métodos de determinação do C_v .

Tabela 2.2. Correlações de C_c com teor de umidade e limite de liquidez para solos argilo-siltosos moles. (Fonte: Modificado de Fernandes, 2016)

Equação (w e LL em %)	Local e outros dados	Referência
$C_c = 0,01 (w - 5)$	Argilas da Grécia e Estados Unidos	Azzouz, Krizek e Corotis (1976)
$C_c = 0,01 w$	Argilas de Chicago e Alberta, EUA ($St < 1,5$)	Koppula (1981)
$C_c = 0,01 (w - 7,55)$	Solos argilo-siltosos do Bangladesh (130 resultados)	Serajuddin (1987)
$C_c = 0,004 (w - 434,5)$	Argilas do Recife, Brasil ($w > 200\%$)	Coutinho, Oliveira e Oliveira (2000)
$C_c = 0,14 (w - 6,71)$	Argilas do Recife, Brasil ($w \leq 200\%$)	Coutinho, Oliveira e Oliveira (2000)
$C_c = 0,013 w$	Argilas do Rio de Janeiro, Brasil	Almeida et al. (2008)
$C_c = 0,013 (w - 10,46)$	Solos argilo-siltosos moles, Portugal (109 resultados, $R^2 = 0,87$)	Esteves (2013)
$C_c = 0,013 (LL - 18)$	Argilas siltosas de Rio Grande, Brasil	Dias (1993)

O método de Casagrande utiliza gráfico da variação da altura do corpo de prova versus tempo em escala logarítmica. O exemplo gráfico é apresentado na Fig. 2.10. A aplicação do método é feita da seguinte forma:

1. Ajuste do início do adensamento. Para um tempo “t” da fase inicial, soma-se a ordenada uma distância correspondente ao recalque entre “t” e “4t”;
2. Definição do final do adensamento primário. Intersecção de uma tangente ao trecho intermediário com uma assíntota do trecho final da curva;
3. No ponto médio entre o início e o final do adensamento primário tem-se o valor referente a 50% do adensamento;
4. Calcula-se o C_v com a seguinte fórmula:

$$C_v = \frac{0,197 . H d^2}{t_{50}} \quad (2.2)$$

Onde: H_d é a máxima distância de drenagem da amostra e t_{50} é o tempo referente ao 50% do adensamento primário.

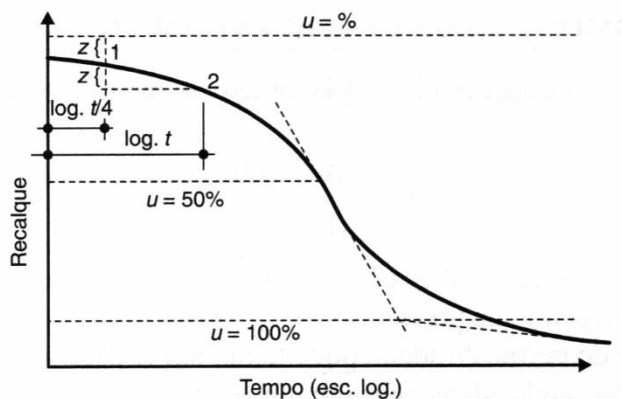


Figura 2.10. Exemplo de determinação do C_v pelo método de Casagrande. (Fonte: Caputo, 2015)

Outra forma de determinar o C_v é aplicando o método de Taylor. Este também é um método gráfico e utiliza curva de variação de altura do corpo de prova em relação a raiz quadrada do tempo. A Figura 2.11 apresenta um exemplo prático, que é aplicado da seguinte forma:

1. Ajuste do início do adensamento. Prolonga-se o trecho inicial retilíneo até interceptar as ordenadas. O ponto de intersecção corresponde ao início do adensamento.
2. Definição do tempo para 90% do adensamento. Traça-se uma reta com abcissas 1,15 vezes maior que aquela ajustada ao trecho retilíneo inicial. A intersecção desta reta com a curva define o ponto de 90% de adensamento.
3. Calcula-se o C_v com a seguinte fórmula:

$$C_v = \frac{0,848 \cdot H_d^2}{t_{90}} \quad (2.3)$$

Onde: H_d é a máxima distância de drenagem da amostra e t_{90} é o tempo referente ao 90% do adensamento primário.

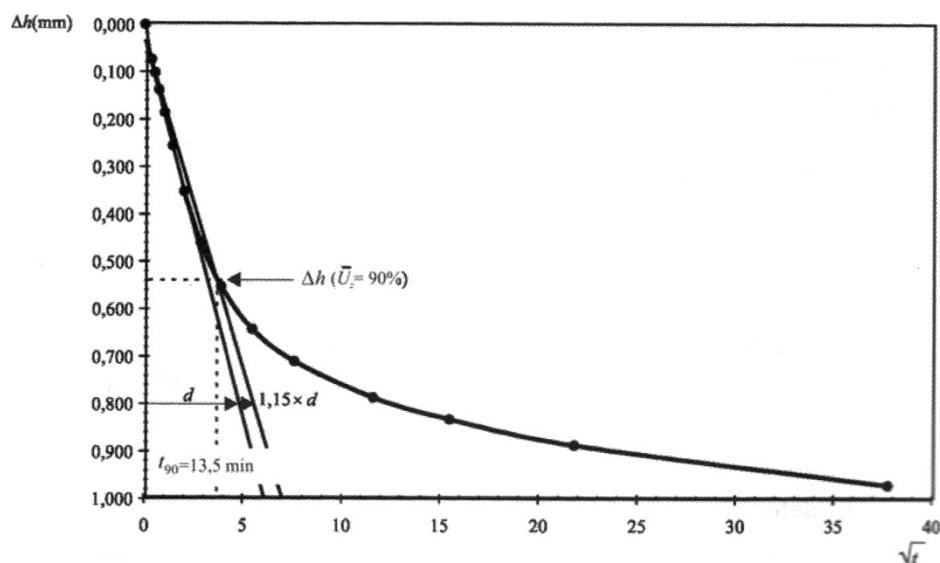


Figura 2.11. Exemplo de determinação do C_v pelo método de Taylor. (Fonte: Modificado de Fernandes, 2016)

Os dois métodos de determinação do C_v , Casagrande e Taylor, devem obter resultados próximos. Vale salientar que a aplicação dos métodos fica condicionada ao traçado das respectivas curvas teóricas.

2.2.2. Resistência não drenada - S_u

A baixa permeabilidade das argilas em relação as areias, faz com que seja importante o estudo da resistência do solo argiloso em termos não drenados. Em uma situação de carregamento em solo argiloso, o solo pode ser levado a ruptura sem que haja tempo para a dissipação das poropressões. Neste caso o solo apresentará um comportamento de resistência dita não drenada.

A resistência não drenada pode ser determinada em campo, em laboratório ou através de correlações empíricas com outras propriedades do solo. O S_u pode ser obtido através de ensaios in situ como o *Vane Test*. O ensaio consiste na medida do torque necessário para girar uma cruzeta metálica cravada no solo em uma dada profundidade. A penetração do equipamento deve ser feita lentamente até a posição desejada, evitando ao máximo a alteração das condições iniciais do solo. Este ensaio pode ser executado tanto com, quanto sem a presença de lâmina d'água.

A determinação do S_u em laboratório depende inicialmente da possibilidade de coletar amostras indeformadas, assunto abordado no item 2.2.3. Sendo viável a extração de amostra indeformada, podemos estimar o S_u através dos ensaios de Palheta de laboratório (ver item 3.3.1),

Cone de Queda Livre (ver item 3.3.2), compressão simples e compressão triaxial. Para a execução dos ensaios de compressão simples e triaxial em solos argilosos existe a necessidade de que o material a ser ensaiado seja consolidado suficientemente de forma que permita a moldagem do corpo de prova.

O ensaio de compressão simples consiste em carregar axialmente um corpo de prova não confinado. Geralmente, estes ensaios são feitos em uma velocidade que leva o corpo de prova a ruptura em torno de 10 a 15min (Pinto, 2006). Nesta velocidade não há condições de drenagem, assim a resistência encontrada é considerada não drenada.

O ensaio de compressão triaxial permite a aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico. A Figura 2.12 apresenta o desenho esquemático da câmara utilizada no ensaio. O corpo de prova é envolvido por uma membrana de borracha e posicionado no interior da câmara que é preenchida por água, aplicando uma pressão confinante. A câmara permite a execução do ensaio de forma drenada e não drenada. Para obtenção do S_u , executa-se o ensaio sem drenagem.

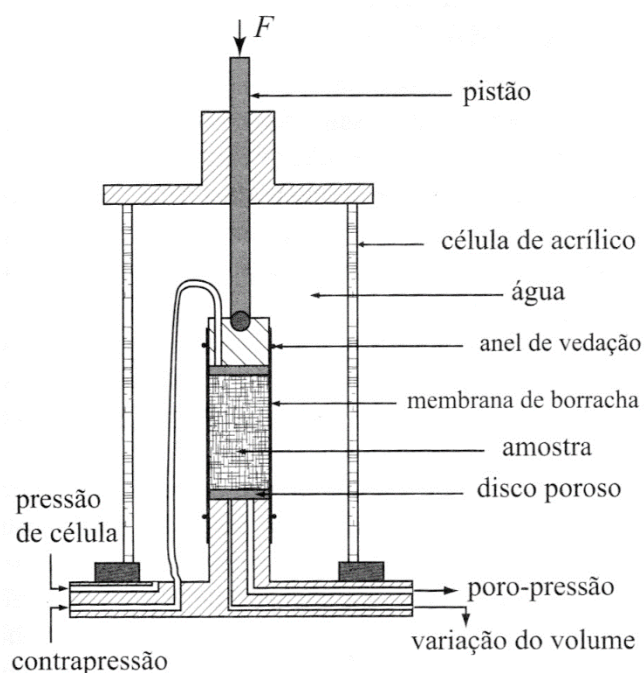


Figura 2.12. Desenho esquemático da câmara de compressão triaxial. (Fonte: Barnes, 2016)

2.2.3. Amostragem

A definição do tipo de amostragem a ser adotada é função do objetivo da campanha. A

determinação em laboratório dos parâmetros apresentados, necessita de uma coleta de amostras indeformadas de boa qualidade, já a determinação da granulometria do solo, por exemplo, permite a utilização de amostras deformadas. São chamadas de amostras indeformadas aquelas que mantêm suas características (índices físicos) originais do campo com a amostragem.

Thompson & Beasley (2012) classificaram os tipos de amostradores superficiais para amostragem com lâmina d'água quanto a qualidade da amostra e usos adequados (Tab. 2.3). A qualidade da amostra se refere a relativamente indeformada (muito alta e alta qualidade) e deformada (baixa e moderada qualidade).

Tabela 2.3. Aplicações e tipos de amostradores superficiais. (Fonte: Modificado de Thompson & Beasley, 2012)

Tipo de amostrador	Qualidade da amostra	Comprimento máximo da amostra (m)	Aplicação	Comentários
Draga	Baixa	0,61	Classificação dos solos (SUCS) e alguns índices físicos	Barato e sem limitação de profundidade da lâmina d'água
Box corer	Muito alta	0,61	Classificação dos solos (SUCS), ensaios de resistência e índices físicos	Sem limitação da lâmina d'água; pré disparo provoca atrasos em águas profundas
Amostrador de gravidade	Alta	1,22 / 3,05 / 9,14	Classificação dos solos (SUCS), ensaios de resistência e índices físicos	Sem limitação de profundidade da lâmina d'água
Vibracorer	Moderada	6,10 – 12,20	Classificação dos solos (SUCS) e índices físicos	Usado principalmente nas areias; profundidade da água limitada por cabos de energia

Segundo Thompson & Beasley (2012), a utilização do amostrador do tipo Draga é método mais simples de obter amostras do leito marinho. Este amostrador é capaz de coletar sedimentos deformados de todos os tipos de granulometria. Os autores também salientam a necessidade de atenção ao amostrar sedimentos muito finos para que não ocorra a perda da fração fina no processo.

Box corer é um amostrador que retira amostras de solo relativamente indeformadas. O amostrador é posicionado na superfície do leito marinho com ajuda de um guindaste e quando solto, crava no solo utilizando somente o peso próprio e aprisiona uma porção de sedimento indeformado no seu interior.

Amostradores de gravidade são tubos amostrais que cravam no solo por queda livre. São posicionados na lâmina d'água entre 3,05m e 6,1m do fundo, onde então são soltos para a cravação em queda livre. Estes equipamentos podem possuir pistão para ajudar a manter amostras mais moles dentro do tubo amostral no momento do içamento.

Vibracoreers (Fig. 2.13) são utilizados em solos não coesivos onde amostradores de gravidade não conseguem atingir grande penetração. O processo consiste na penetração no sedimento de um tubo submetido a alta frequência que permite a amostragem contínua ao longo da profundidade. As dimensões do tubo e o mecanismo que gera a vibração dependem do modelo de Vibracore.

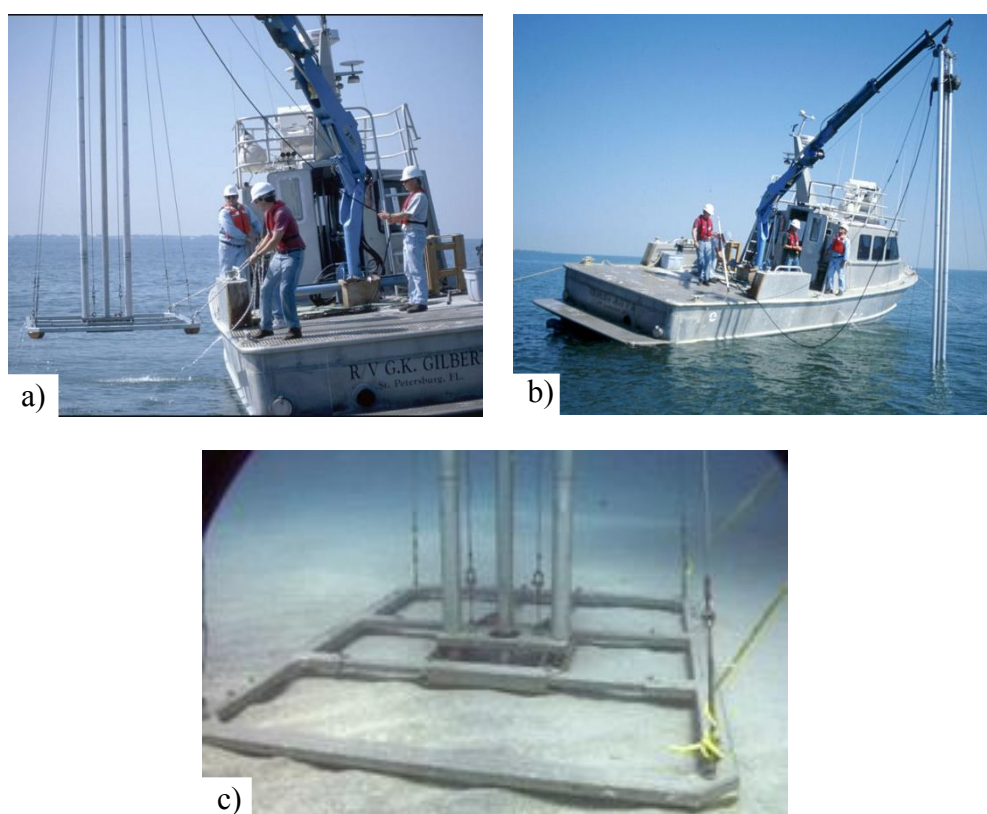


Figura 2.13. Vibracore sendo posicionado. a) Equipamento sendo içado pelo guindaste na embarcação. b) Equipamento parcialmente submerso. c) Vista do Vibracore posicionado sobre o leito marinho. (Fonte: <https://coastal.er.usgs.gov/capabilities/shipboard/drillrigs/vibracore.html>

Acesso: 07/12/2018)

2.2.4. Classificação de sedimentos marinhos

A NBR 6502 (ABNT, 1995) define classificação granulométrica como sendo aquela feita

segundo as dimensões dos seus grãos ou partículas e suas diferentes porcentagens de ocorrência. Esta norma determina o diâmetro equivalente referente a cada fração granulométrica (Fig. 2.14).

Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho
0,002	0,06	0,2	0,6	2	(mm)

Figura 2.14. Distribuição granulométrica referente a NBR 6502 (ABNT, 1995).

Em uma tentativa de padronizar a classificação dos solos baseados nos percentuais das frações areia, silte e argila, Shepard (1954) desenvolveu um diagrama trilinear de classificação. O autor tomou como base outros sistemas utilizados na época para unificar as classificações já existentes e posteriormente enviou um questionário, verificando a aprovação do método pelos demais pesquisadores da área. O método desenvolvido por Shepard (1954) ainda é muito utilizado atualmente. A Figura 2.15 apresenta o diagrama de classificação de Shepard.

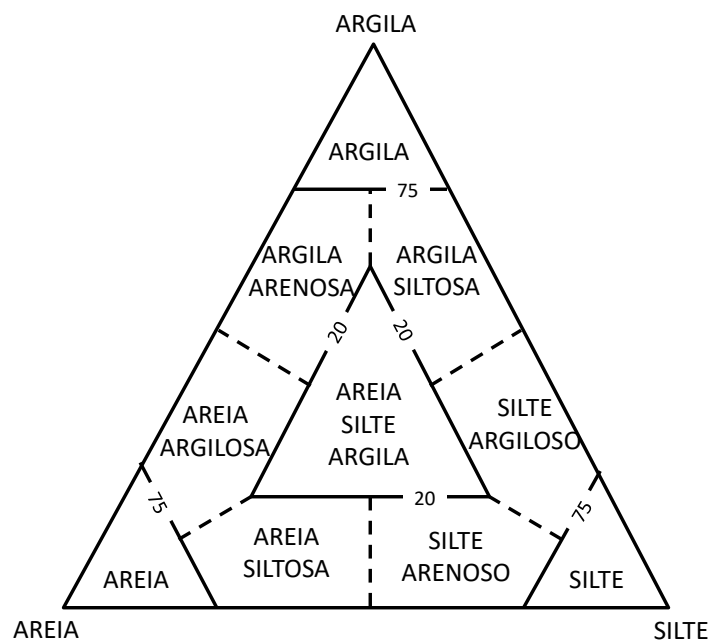


Figura 2.15. Diagrama trilinear de classificação dos solos de Shepard. (Fonte: Modificado de Shepard, 1954)

O Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) é um sistema de classificação

geotécnica, utiliza classes baseadas na distribuição granulométrica dos solos e em seus parâmetros de consistência. A norma técnica D2487 (ASTM, 2017) descreve a forma de classificação pelo sistema SUCS. Os solos são classificados em 3 grupos: Solos Grossos, Solos Finos e Turfas, dentro destes grupos os solos são divididos em 15 classes. A Tabela 2.4 apresenta os critérios para determinação destas classes que são aplicados juntamente com o gráfico de plasticidade de Casagrande (Fig. 2.16). Assim, cada classe fica identificada por duas letras maiúsculas.

Tabela 2.4. Sistema Unificado de Classificação de Solos (Fonte: ASTM, 2017).

CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DOS SUBGRUPOS E NOMES DOS GRUPOS					CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	
ENSAIOS DE LABORATÓRIO					SÍMBOLO GRUPO	NOME DO GRUPO
Solos Grossos	Pedregulhos. Mais que 50% da fração grossa retida na peneira 4,8mm	Pedregulhos limpos; % passada na peneira 0,074mm < 5%	Cu ≥ 4 / 1 ≤ Cc ≤ 3		GW	Pedregulho bem graduado
			Cu < 4 e/ou 1 > Cc > 3		GP	Pedregulho mal graduado
		Pedregulhos com finos; % passada na peneira 0,074mm > 12%	Finos Classificados como	ML	GM	Pedregulho siltoso
				MH		
				CL	GC	Pedregulho argiloso
				CH		
	Areias. Mais que 50% da fração grossa passa na peneira 4,8mm	Areias limpas; % passada na peneira 0,074mm > 5%	Cu ≥ 6 / 1 ≤ Cc ≤ 3		SW	Areia bem graduada
			Cu < 6 e/ou 1 > Cc > 3		SP	Areia mal graduada
		Areias limpas; % passada na peneira 0,074mm > 12%	Finos Classificados como	ML	SM	Areia siltosa
				MH		
				CL	SC	Areia argilosa
				CH		
Solos Finos	Siltos e argilas LL < 50%	Inorgânicos	IP > 7, pontos sobre ou acima da linha A		CL	Argila pouco plástica
			IP < 4, pontos abaixo da linha A		ML	Silte
		Orgânicos	LLseco < 0,75 LLnatural		OL	Argila orgânica Silte orgânico
	Siltos e argilas LL ≥ 50%	Inorgânicos	Pontos sobre ou acima da linha A		CH	Argila muito plástica
			Pontos abaixo da linha A		MH	Silte elástico
		Orgânicos	LLseco < 0,75 LLnatural		OH	Argila orgânica Silte orgânico
Solos altamente orgânicos		Principalmente matéria orgânica, cor escura e cheiro			PT	Turfa

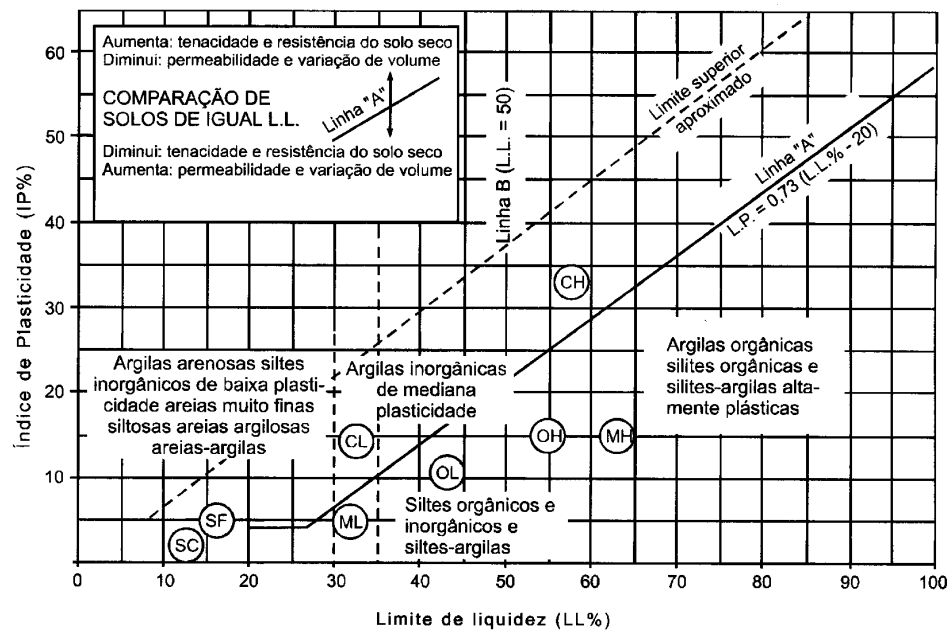


Figura 2.16. Gráfico de plasticidade de Casagrande. (Fonte: Das & Sobhan, 2014)

Noorany (1989) pontua que o sistema unificado pode ser aplicado diretamente quando o solo em questão for marinho de origem não biogênica. Quando estes solos de origem sedimentar apresentarem entre 10% e 50% de partículas de origem biogênica, esta informação deve ser acrescentada a classificação tradicional SUCS. Para solos de origem biogênica (50% dos grãos), o autor sugere o acréscimo de uma letra na classificação: “B”, quando grãos bioclásticos e “Ca” quando calcário. Noorany (1989) apresenta fluxograma para simples aplicação do método.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda os materiais e técnicas utilizadas para a caracterização geotécnica proposta. São descritas a área de estudo, a coleta das amostras e todos os procedimentos de laboratório necessários para realizar a caracterização dos solos estudados.

3.1. Área de estudo

A área de estudo está localizada no litoral sul do Rio Grande do Sul e compreende a porção submersa da praia do Cassino no município de Rio Grande (Fig. 3.1).



Figura 3.1. Mapa do estado do Rio Grande do Sul. Destacado em vermelho o território do município de Rio Grande e em amarelo, área de estudo.

A área de estudo contempla parte da plataforma continental da praia do Cassino e foi delimitada no projeto “Programa de Monitoramento do Sítio de Despejo e Área Adjacente do Material Dragado do Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande”. Este projeto tem como objetivo acompanhar os eventos de surgimento de lama na praia e determinar sua origem.

3.2. Coleta das amostras

No dia 04/04/2018, uma equipe formada por pesquisadores LOG/LEC-FURG, executou levantamento de dados periódicos para o monitoramento dos sedimentos do fundo marinho na praia do Cassino. O trajeto previsto e os pontos de controle do monitoramento se encontram na Fig. 3.2, iniciando no ponto #P50. Devido a mudança das condições do mar, não foi possível completar o trajeto previsto. Assim, a Tab. 3.1 apresenta os pontos verificados durante o cruzeiro oceanográfico em questão.

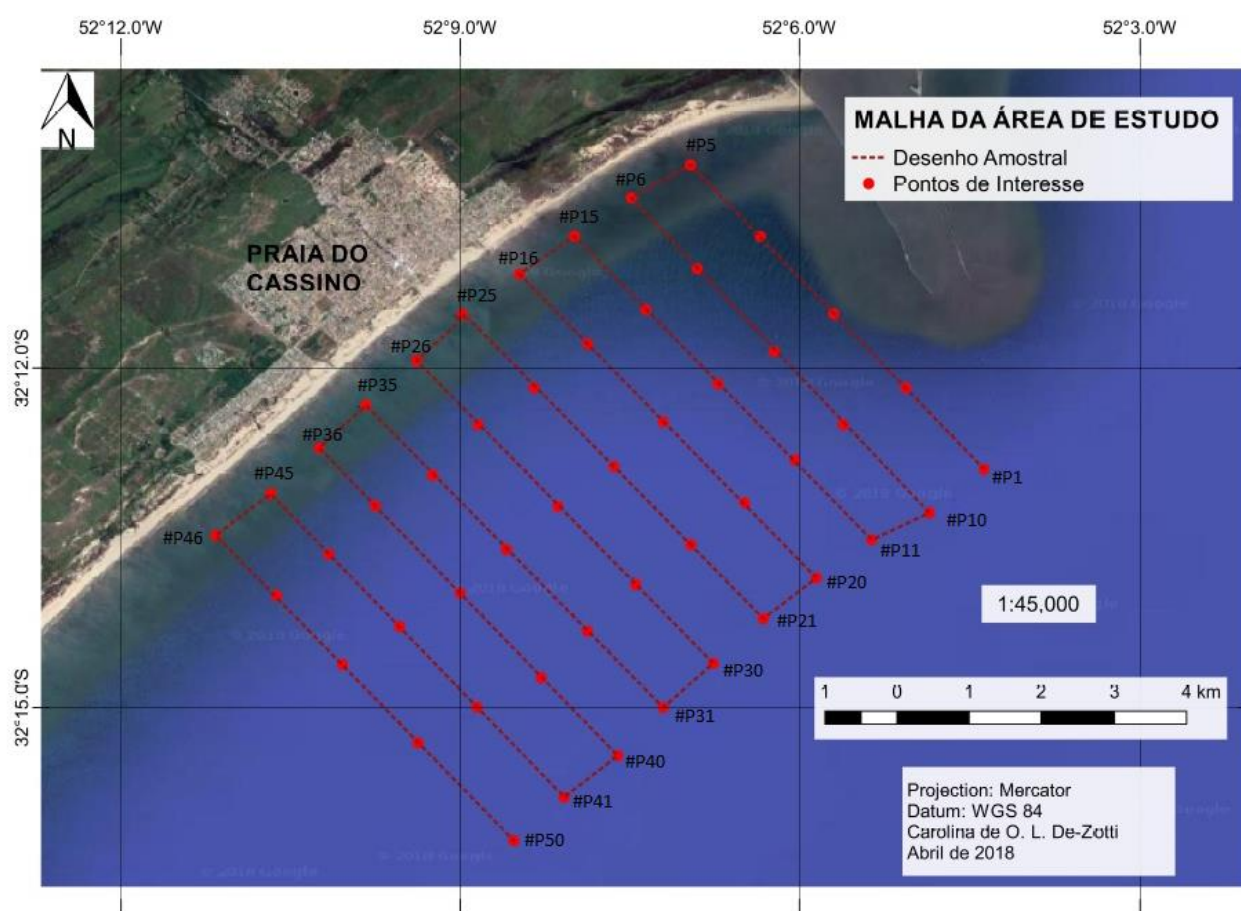


Figura 3.2. Localização dos pontos de controle e trajeto da embarcação. (Fonte: Equipe LOG/LEC-FURG)

A coleta de amostras foi realizada com a lancha Larus da FURG. Durante todo o trajeto o fundo marinho foi monitorado em tempo real com a utilização de um ecobatímetro que utiliza duas frequências, 200 e 50 kHz. A frequência de 200 kHz foi utilizada para mapear a camada superficial da lama. A frequência de 50 kHz, por ter capacidade de penetrar nas camadas de lama, foi utilizada para o mapeamento das camadas de areia mais profundas.

Tabela 3.1. Pontos amostrais. (Fonte: Equipe LOG/LEC-FURG)

	LATITUDE		LONGITUDE		PROFUNDIDADE	Amostra	
	graus	minutos	graus	minutos	m	Indeformada	Deformada
#P11	32	13,509	52	5,372	10	X	X
#P18	32	12,504	52	7,173	9	X	X
#P20	32	13,897	52	5,828	10	X	X
#P21	32	14,214	52	6,285	10	X	X
#P23	32	12,84	52	7,66	8	X	X
#P28	32	13,263	52	8,08	9	-	X
#P30	32	14,637	52	6,71	10,5	X	X
#P31	32	14,968	52	7,194	10	X	X
#P33	32	13,566	52	8,614	8	X	X
#P35	32	12,316	52	9,826	5	-	X
#P36	32	12,692	52	10,227	5	-	X
#P38	32	14,023	52	8,985	8	-	X
#P40	32	15,462	52	7,577	10	-	X
#P41	32	15,765	52	8,022	10	X	X
#P43	32	14,264	52	9,601	8	X	X
#P45	32	13,084	52	10,707	5	-	X
#P46	32	13,557	52	11,054	6	-	X
#P48	32	14,63	52	10,027	8	X	X
#P50	32	16,166	52	8,535	10	X	X

Ao atingir os pontos determinados, foram verificados quais os tipos de materiais indicados pelo ecobatímetro: areia, argila ou lama fluida. Em locais onde a presença de areia foi observada, a amostragem foi feita com a utilização de uma draga Petersen (Fig. 3.3-a), coletando apenas amostras deformadas para determinação das granulometrias nos pontos. Já em locais onde a presença de argila ou lama eram indicadas, foi utilizado o amostrador do tipo Box Corer (Fig. 3.3-b) que possibilita a coleta de amostras indeformadas.

Em cada um dos pontos de amostragem de solos finos, o Box Corer foi posicionado com a ajuda de um guindaste presente na embarcação e liberado de forma que o amostrador penetra no sedimento apenas com peso próprio. O amostrador possui um sistema de gatilho que aprisiona o sedimento indeformado no seu interior, o que permitiu que o mesmo pudesse ser içado pelo guindaste de volta a superfície sem perda de material (Fig. 3.3-c). Desta amostra total coletada, foi preparada

uma subamostra, que foi mantida indeformada, através da cravação (Fig. 3.3-d) e retirada de um tubo de PVC (Fig. 3.3-e). Estes tubos foram identificados e devidamente vedado para manutenção das características físicas do material coletado.

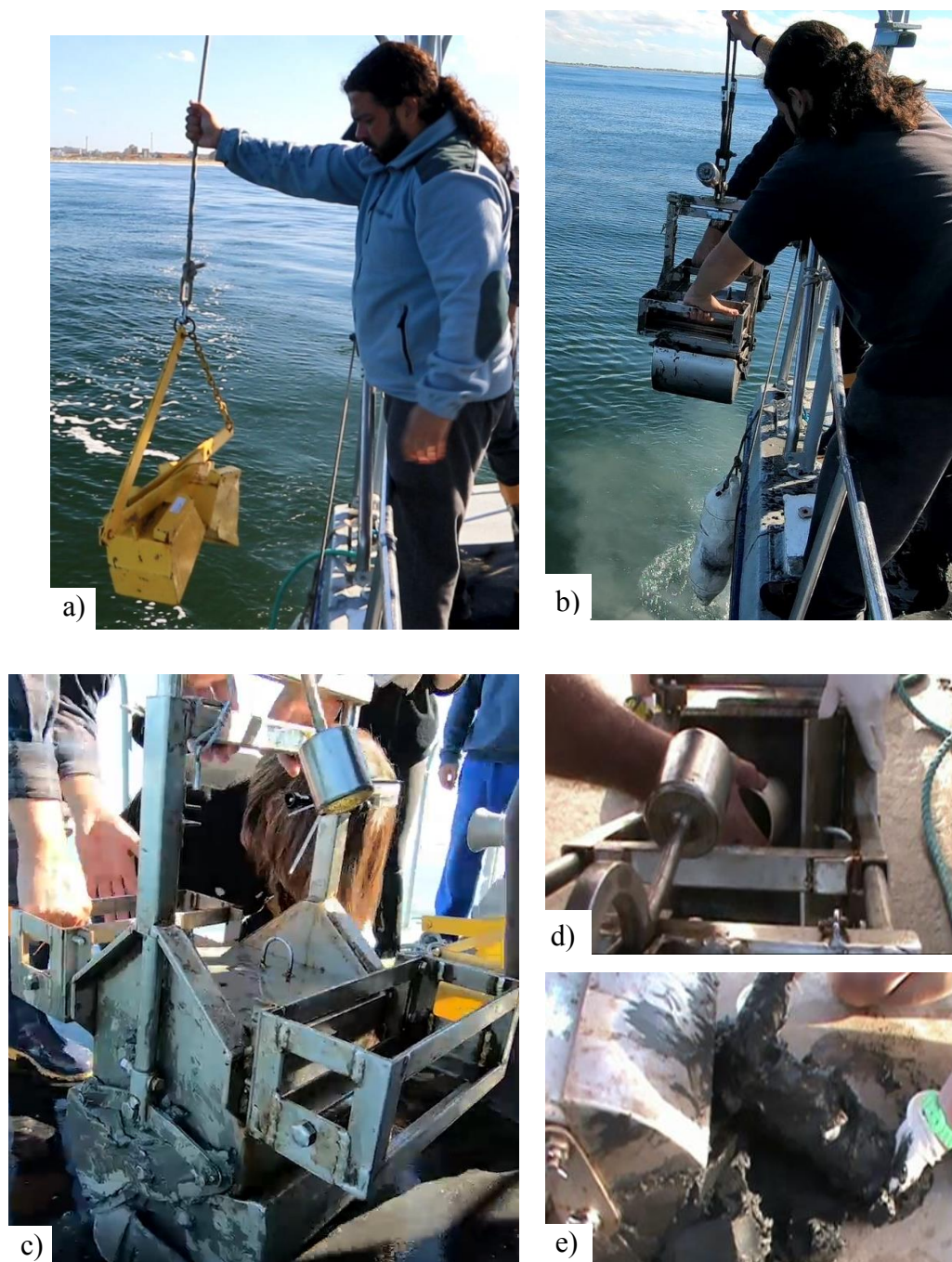


Figura 3.3. Guindaste da lancha Larus movimentando os amostradores: a) Dragas de Petersen. b) Box Corer. c) Amostrador fechado após a coleta do solo. d) Compartimentos superiores abertos para a retirada da subamostra através da cravação de um tubo de PVC. e) Abertura do compartimento inferior para a retirada da subamostra. (Fonte: Cortesia LOG/LEC-FURG)

3.3. Procedimentos de laboratório

A caracterização geotécnica foi realizada utilizando 12 amostras indeformadas. As Figuras 3.4, apresentam as amostras coletadas devidamente identificadas com dia da coleta (Fig. 3.4-a), pontos amostrados (Fig. 3.4-b) e indicação do topo e base da amostra (Fig. 3.4-c). As informações referentes a estas amostras são apresentadas na Tab. 3.1. As amostras deformadas foram analisadas pela equipe LEC-FURG.

A manutenção da umidade natural das amostras é fundamental para a adequada caracterização geotécnica. Assim, os tubos foram vedados no momento da coleta (Fig. 3.4-c) e posteriormente armazenados em uma câmara úmida no laboratório até a abertura dos mesmos no momento dos ensaios.

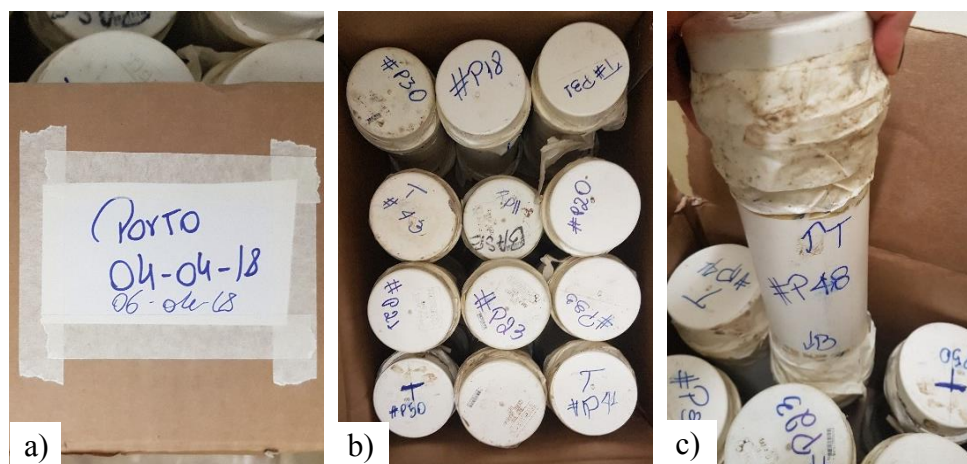


Figura 3.4. Tubos contendo as amostras indeformadas. a) Identificação da data da coleta. b) Tubos identificados com o ponto amostral. c) Vedação e indicação da base da amostra no tubo.

Como as amostras coletadas não apresentam grandes quantidades de solo, foi necessário adotar uma sequência de execução dos ensaios de forma a otimizar ao máximo o aproveitamento das mesmas. Os primeiros ensaios realizados foram o de palheta de laboratório e o cone de queda no topo da amostra. Estes ensaios foram executados com a amostra indeformada ainda no interior do tubo de PVC. Na sequência o solo foi parcialmente extrudido do tubo de PVC permitindo a execução de novos ensaios de cone de queda na profundidade da palheta de laboratório e também a retirada de um anel para determinação de índices físicos. Este anel, de dimensões e peso conhecido, é moldado com solo indeformado e o conjunto solo mais anel é pesado. Estas informações, acrescidas da determinação do teor de umidade (método da estufa) e do peso específico real dos grãos são

suficientes para o cálculo dos índices físicos do solo natural.

Após a execução dos ensaios supracitados, o solo é removido totalmente do tubo e colocado para secar ao ar. Quando seco, o solo é destorroado para a execução dos demais ensaios: limites de Atterberg, análise granulométrica (sedimentação e peneiramento), determinação da densidade dos grãos (picnômetro), difração de raios X e teor de matéria orgânica.

Estes ensaios estão descritos a seguir na ordem de execução apresentada. Todos os ensaios geotécnicos foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Concreto Prof. Cláudio R. R. Dias na Universidade Federal do Rio Grande - FURG, exceto os ensaios de Difração de raio X que foram executados no Centro de Microscopia Eletrônica – CEME-SUL/FURG e Laboratório de Difractometria de Raios X na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

3.3.1. Ensaio de palheta de laboratório

O ensaio de palheta de laboratório é uma versão de laboratório do ensaio de palheta de campo, também conhecido como *Vane Test*. Este ensaio, conforme apresentado por Head (1994), consiste em medir o torque necessário para romper um pequeno cilindro, de dimensões iguais a da palheta, no interior de uma amostra de solo argiloso. Este processo deve ocorrer de forma rápida (1 giro por segundo da manivela) para não permitir que ocorra a drenagem e tendo assim o valor da resistência não drenada das argilas. O ensaio é realizado com o equipamento apresentado na Fig. 3.5. Este possui palheta com 12,7 mm de altura e 12,7 mm de diâmetro.



Figura 3.5. Equipamento utilizado no ensaio de palheta de laboratório.

Para utilização deste ensaio, assume-se que o solo é isotrópico e que a distribuição das tensões é uniforme. Assim, o cálculo da resistência não drenada das argilas é dado pela Eq. (3.1):

$$Su = Kmv \cdot \frac{\theta_f}{4,29} \quad (3.1)$$

Onde: Su é a resistência não drenada do solo, θ_f é o máximo ângulo de torção da mola medido no ensaio.

O valor de Kmv é gerado a partir das curvas de calibração da mola fornecidas pelo fabricante do equipamento (Tab. 3.2).

Tabela 3.2. Constante de calibração das molas. (Fonte: Viatest)

Mola nº	Kmv (N mm/grau de torção)
1	3,4783
2	2,5259
3	1,7000
4	1,1830

3.3.2. Ensaio do cone de queda

O ensaio do cone de queda foi originalmente concebido para determinação da resistência não drenada das argilas (Su) (Hansbo, 1957). Internacionalmente é utilizado para determinação do limite de liquidez (BS 1377, 1990). No Brasil o uso do cone de queda para determinação do LL não é normatizado, sendo utilizado para este fim somente o ensaio do Aparelho de Casagrande. O ensaio consiste em posicionar um cone metálico na superfície da amostra de argila e solta-lo em queda livre. A medida da penetração do cone no solo é utilizada na Eq. (3.2) para o cálculo do Su .

$$Su = K \cdot \frac{Q}{H^2} \quad (3.2)$$

Onde: Q é o peso do cone, H é a medida da penetração do cone no solo e K é uma constante, que depende do ângulo do cone, da rugosidade da sua superfície e do tipo de argila.

O equipamento utilizado neste estudo (Fig.3.6) possui um cone de 30° de ápice e tem massa

de 80g.



Figura 3.6. Equipamento utilizado no ensaio do cone de queda.

3.3.3. Determinação dos índices físicos

Índices físicos constituem relações entre pesos e volumes do solo. Alguns destes parâmetros são obtidos de forma experimental em laboratório e outros através de equações utilizando os dados experimentais de outros índices.

O peso específico natural do solo (γ_{nat}) é obtido através da moldagem de um anel com solo indeformado. O anel tem seu peso e dimensões determinadas previamente. Existem formas diversas de executar a moldagem do anel, dependendo do tipo de amostra utilizada. Neste estudo, como já descrito anteriormente, as amostras recebidas no laboratório estão em tubos de PVC. A execução do ensaio de palheta amolga o solo até uma profundidade de cerca de 7 cm a partir do topo da amostra, assim esta parcela da amostra é extrudada do interior do tubo e removida com o auxílio de um fio de corte. Com a remoção da parcela amolgada a moldagem do anel pode ser realizada na parcela indeformada da amostra. Cuidadosamente o anel é cravado e concomitantemente o restante do solo é extraído do tubo (Fig. 3.7). Com o anel penetrando totalmente o solo, esta porção é cortada e com o auxílio do fio de corte o anel é esculpido, mantendo o solo indeformado no seu interior. O conjunto anel mais solo é pesado. O valor referente ao γ_{nat} é calculado utilizando a Eq. (3.3):

$$\gamma_{nat} = \frac{W}{V} \quad (3.3)$$

Onde:

W - peso do solo em kN

V - volume do anel em m³.



Figura 3.7. Amostra parcialmente extrudada na moldagem do anel.

Após a extração do anel, são coletadas amostras de solo para determinação do teor de umidade na profundidade de aproximadamente 7 cm, de forma que o valor de umidade obtido seja representativo aos pontos onde o ensaio de palheta e a moldagem do anel foram executadas. A determinação o teor de umidade foi feita através do método da estufa descrito pela NBR 6457 (ABNT, 2016) que consiste em coletar duas porções de solo em cápsulas de peso previamente conhecidos e pesar o conjunto solo mais cápsula antes e depois de permanecerem 48 horas na estufa. A diferença de peso é referente ao peso de água que evapora na estufa. A partir destes dados o teor de umidade é calculado pela Eq. (3.4):

$$w = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Onde:

W_w - peso de água

W_s - peso de sólidos

Ao se manusear as amostras nota-se a coloração escura e forte odor, característicos da presença de matéria orgânica nos solos. Desta forma, a norma recomenda que seja utilizada a estufa com temperatura igual a 60°C para evitar a queima da matéria orgânica.

Os demais índices físicos podem ser calculados a partir dos valores supracitados, juntamente com o peso específico real dos grãos (γ_s) descrito a seguir no item 3.3.7.

3.3.4. Adensamento Oedométrico

Ensaio de adensamento oedométrico é descrito pela NBR 12007 (ABNT, 1990). O anel moldado para cálculo dos índices físicos é inserido na câmara oedométrica e esta é posicionada na prensa de adensamento (Fig. 3.8) onde recebe incrementos de carga e a deformação causada na amostra é medida. Cada carregamento tem duração de 24h onde as deformações são registradas em intervalos de tempo padrão definidos em norma. Utilizou-se os seguintes estágios de carga: 6,25 kPa, 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. A descarga foi feita mantendo os estágios apresentados, sendo retirado um estágio a cada 12h.

Através deste ensaio são obtidas curvas de deformação pelo tempo, a cada estágio, e tensão x deformação, ao final do ensaio. As curvas de deformação pelo tempo fornecem o coeficiente de adensamento (C_v) de cada estágio e a curva tensão x deformação são obtidos o Índice de Recompressão (C_r), Índice de Compressão (C_c), Índice de Descarga (C_d) e a tensão de pré-adensamento do solo (σ'_{vm}), importantes parâmetros de deformação para solos argilosos.



Figura 3.8. Prensas utilizadas no ensaio de adensamento oedométrico.

3.3.5. Preparação das amostras deformadas

Após a execução dos ensaios já descritos, a amostra de solo é retirada na totalidade do tubo que a mantinha indeformada. Para a sequência dos ensaios, é necessário que o solo esteja apenas com umidade higroscópica e que seja destorroadado.

As amostras foram colocadas em bandejas e deixadas secando ao ar durante o tempo necessário para a secagem da amostra. Após secas as amostras foram destorroadas com o uso de almofariz de porcelana com mão de gral para não fragmentar os grãos. Inicialmente, o material foi destorroadado até estar em granulometria passante na peneira #10 (2 mm), dimensão exigida em norma para execução do ensaio de sedimentação e picnômetro. O material restante foi destorroadado até atingir diâmetro passante na peneira #40 (0,42 mm), granulometria exigida em norma para execução dos ensaios de determinação de limites de Atterberg.

3.3.6. Determinação da curva granulométrica

A granulometria do solo foi obtida através do ensaio de sedimentação (método do densímetro) e peneiramento, conforme descrito na NBR 7181 (ABNT, 2016). Para a preparação do ensaio uma certa quantidade de solo passante na peneira #10 (a quantidade varia com o tipo de solo) é colocada em um recipiente reagindo com 125 ml de hexametáfosfato de sódio por no mínimo 12 horas. Esta mistura é colocada em um dispersor mecânico por 15 minutos antes de ser transferida para uma proveta com capacidade de 1 litro (completada com água destilada caso necessário). A proveta deve ser agitada por 1 minuto para a homogeneização da mistura. O ensaio consiste em leituras de densidade feitas na proveta com o auxílio de um densímetro durante 24 horas, o espaçamento das leituras é padrão, determinado na norma. Ao final da última leitura, de 24 horas, o material é lavado na peneira #200 (0,074mm). O material retido é levado para estufa para posterior procedimento de peneiramento fino.

O ensaio de sedimentação é baseado no princípio da Lei de Stokes, assim, ao colocar-se certa quantidade de solo em suspensão em água, as partículas cairão com velocidades proporcionais ao quadrado de seus diâmetros. O uso de defloculante hexametáfosfato de sódio, na preparação prévia da amostra a ser ensaiada, age na desagregação dos grãos minerais aglutinados garantindo que os valores calculados usando a lei de Stokes sejam de fato o diâmetro individual equivalente dos grãos.

3.3.7. Ensaio do picnômetro

O ensaio do picnômetro é executado para determinação do peso específico real dos grãos (γ_s)

e é descrito pela NBR 6458 (ABNT, 2016). O γ_s é uma característica dos sólidos do solo, representa a relação entre o peso e o volume desta fase.

Para a execução do ensaio, é necessário colocar um peso conhecido de solo seco (quantidade especificada na norma de acordo com o tipo de solo) em solução com água destilada por 12 horas para saturar a amostra. Após este período, a mistura é transferida para o dispersor mecânico onde permanece durante 15 minutos. O solo é então transferido para o picnômetro e é levado por 30 minutos na bomba de vácuo para retirar o ar que ainda possa estar retido entre os grãos de solo. Completa-se o volume do picnômetro com água destilada e obtém-se o peso e a temperatura. O peso do picnômetro somente com água destilada, mais o peso do solo seco usado, menos o peso do picnômetro contendo solo mais água destilada representa o peso de água deslocado (Fig.3.9).

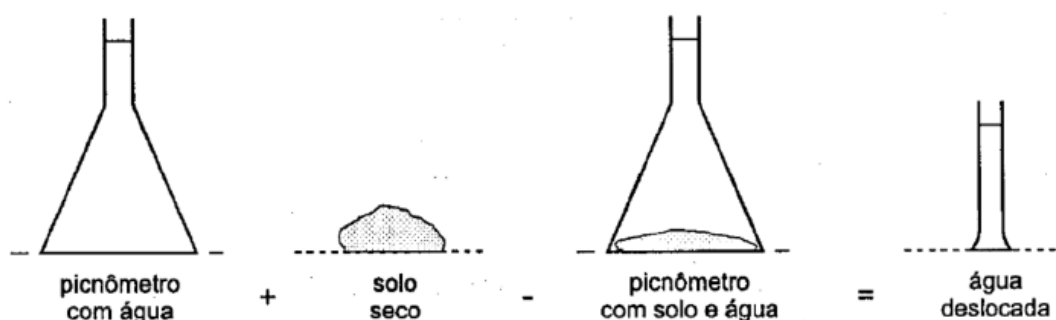


Figura 3.9. Desenho esquemático do ensaio do Picnômetro. (Fonte: Pinto, 2006)

O cálculo do peso específico real dos grãos (γ_s) é feito aplicando estes valores medidos no ensaio na Eq. (3.5):

$$\gamma_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \cdot \gamma_w \quad (3.5)$$

Onde:

M_s = massa do solo seco

M_1 = massa do picnômetro com solo e água

M_2 = massa do picnômetro com água destilada

3.3.8. Determinação dos limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg representam os teores de umidade do solo que distinguem os diferentes estados de consistência (Fig. 3.10). O Limite de Plasticidade (LP) representa o teor de

umidade limite entre os estados semi-sólido e plástico, e o Limite de Liquidez (*LL*) representa o teor de umidade limite entre os estados plásticos e líquido.

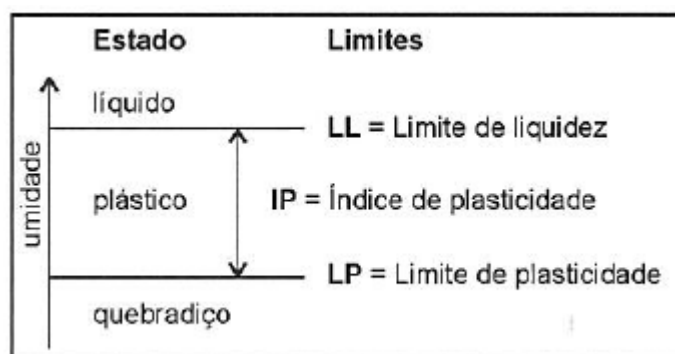


Figura 3.10. Limites de Atterberg. (Fonte: Pinto, 2006)

Para a execução destes ensaios, utiliza-se os seguintes materiais: aproximadamente 200g de solo seco ao ar e destorroado com material passante na peneira #40 (descrito no item 3.3.5), água destilada, placa de vidro, cilindro metálico com dimensões de 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento (gabarito para ensaio de determinação do *LP*) e aparelho de Casagrande (equipamento utilizado no ensaio de determinação do *LL*) (Fig. 3.11).

A NBR 7180 (ABNT, 2016) descreve o ensaio para determinação do *LP*. O procedimento consiste em encontrar o teor mínimo de umidade no qual é possível moldar um cilindro de solo com 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento sem fissurar. Ao atingir este ponto, é feita a determinação do teor de umidade dos cilindros pelo método da estufa.

A NBR 6459 (ABNT, 2016) descreve a determinação do *LL* através do uso do aparelho de Casagrande. O método consiste em encontrar o teor de umidade no qual se fecha uma ranhura feita no solo disposto na concha metálica do equipamento, por meio de 25 golpes a velocidade constante, desta concha contra a base fixa.



Figura 3.11. Materiais necessários para realização dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade.

Índice de Plasticidade (I_p) é calculado a partir dos valores dos limites de consistência e avalia o solo quanto a sua plasticidade. O I_p representa a diferença entre o LL e o LP (Eq. 3.6). O valor do I_p permite a classificação quando a plasticidade do solo (Tab. 3.3).

$$I_p = LL - LP \quad (3.6)$$

Tabela 3.3. Classificação dos solos de acordo com índice de plasticidade segundo Jenkins. (Fonte: Caputo, 2015)

Índice de Plasticidade	Classificação
$1 < I_p < 7$	Solo fracamente plástico
$7 < I_p < 15$	Solo medianamente plástico
$I_p > 15$	Solo altamente plástico
$I_p = NP$	Não plástico

A partir do I_p , outro parâmetro importante é obtido, o Índice de atividade coloidal (I_a). O I_a indica o potencial da fração argilosa em conferir plasticidade ao solo. É utilizado também como indicativo do argilomineral presente no solo (Tab. 3.4). O I_a é calculado a partir da Eq. (3.7).

$$I_a = \frac{I_p}{\% \text{ Argila}} \quad (3.7)$$

Tabela 3.4. Classificação dos solos de acordo com o índice de atividade coloidal. (Fonte: Pinto, 2006)

$I_a > 0,75$	Solo inativo – indicativo de argila 1:1
$0,57 < I_a < 1,25$	Solo de atividade normal
$I_a > 1,25$	Solo ativo – indicativo de argila 2:1

3.3.9. Difração de raios X

A difratometria de raios X corresponde a umas das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento. É uma técnica rápida e barata que utiliza, normalmente, amostras de material cristalino pulverizado.

A difração de raios X ocorre segundo a Lei de Bragg (Eq. 3.8), a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram. Ao incidir um feixe de raios X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração. O feixe difratado sem mudança do comprimento de onda, resultante da dispersão dos raios X pelos elétrons do cristal, só é reproduzido se for satisfeita a Eq. (3.8). Deste modo, cada substância tem um padrão de difração único e próprio.

$$n \lambda = 2d \sin \theta \quad (3.8)$$

Onde:

n = é um número inteiro correspondente à ordem de difração

λ = comprimento de onda dos raios atômicos no retículo difratados

d = distância interplanar

θ = ângulo de difração

Os ensaios de difração de raios X tem como resultados pares de valores de ângulos 2θ e sua respectiva intensidade medida. Assim geram-se difratogramas, gráficos de ângulos 2θ versus

intensidade, utilizados para a identificação dos minerais através dos picos apresentados.

A identificação dos argilominerais apresenta desafios devido a sua estrutura planar que quando depositados no porta amostras do equipamento tendem a formar uma orientação preferencial. Outras características de formação, como baixa cristalinidade e o aparecimento de camadas interestratificada com diferentes argilominerais, dificultam a identificação. Moore & Reynolds (1997) enfatizam a complexidade da identificação dos diferentes argilominerais e ressalta não ser possível determinar um procedimento padrão que seja aplicável a todos os casos.

A identificação dos grupos de argilominerais é amplamente executada através da utilização de lâminas orientadas e expostas aos tratamentos de calcinação e glicolagem. A comparação dos difratogramas obtidos com a amostra natural e as expostas aos tratamentos permite a identificação dos grupos de argilominerais devido ao deslocamento e extinção dos picos (Albers et al., 2002). A Tabela 3.5 apresenta alguns exemplos utilizados para a identificação de argilominerais.

Tabela 3.5. Posições referentes aos picos principais (direção (001)) dos argilominerais em condições normais, após glicolagem e aquecimento. (Fonte: modificado de Albers et al., 2002)

Distância Interplanar (Condições normais)	Distância Interplanar (Após glicolagem)	Distância Interplanar (Após aquecimento)	Argilomineral
7	7	-	Caulinita
10	10	10	Ilita
14	14	14	Clorita
14	17	14	Clorita expansível
12	17	10	Montmorilonita-12
14	17	10	Montmorilonita-14
14	14	10	Vermiculita

Os ensaios de difração de raios X foram executados em duas fases. A primeira fase constituiu a avaliação da mineralogia total do solo utilizando amostras não orientadas, onde uma dada quantidade de solo com granulometria passante na peneira #200 e seco em estufa é vertido no porta amostras do equipamento. A segunda fase constituiu a seleção de amostras para execução de novos ensaios de difração de raios X com lâmina orientada para a caracterização dos argilominerais.

As análises preliminares com amostras não orientadas foram executadas utilizando o difratômetro de raios X Bruker D8 Advance do Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul –

FURG (CEME – SUL), localizado no Campus Carreiros. As amostras foram submetidas aos ensaios de difração de raios X analisadas no intervalo de ângulo 2θ de 2° a 60° ao passo de $0,02^\circ$ por segundo. Este intervalo foi definido visando difratar minerais de alto ângulo e os de baixo ângulo (argilominerais).



Figura 3.12. Difratorômetro de Raios X com câmara para temperaturas criogênicas, Bruker, D8 Advance. (Fonte: CEME-SUL/FURG)

Após verificação dos difratogramas obtidos nos ensaios iniciais, amostras foram selecionadas e enviadas para execução da identificação dos argilominerais. Estes ensaios foram executados pelo Laboratório de Difractometria de Raios X da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O procedimento para análise das amostras orientadas fornecido pelo laboratório foi o seguinte:

- Quarteamento da amostra;
- Desagregação em gral de porcelana;
- Desagregação por agitação durante 14 horas em agitador orbital;
- Desagregação por ultrassom de ponteira durante 5 minutos com amostra em solução;
- Estabilização da temperatura para controle da viscosidade do fluido;
- Cálculo do tempo de decantação respectivo para cada fração de acordo com a Lei de Stokes. O processo de decantação normal foi utilizado para separar da amostra a fração

$< 2\mu\text{m}$. O tempo estipulado para essa fração foi de 5h 05min 30s;

- Preparação de lâminas delgadas por pipetagem.

As lâminas foram analisadas no estado natural, saturadas com etileno glicol (verifica existência de minerais expansivos) e calcinada aquecida a 550°C (avalia argilominerais que colapsam a estrutura nessas condições). A análise por difração de raios X foi realizada em um difratômetro de raios X marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000 (Θ - 2Θ) equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), operado a 40 kV e 25 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário, em um intervalo angular de $2,3$ a 32° em passo de $0,002$ por 2s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 2 mm e 0,2 mm no detector.

3.3.10. Determinação do conteúdo de matéria orgânica

A determinação do teor de matéria orgânica foi executada pelo método de queima a 440°C descrito na norma técnica NBR 13600 (ABNT, 1996).

Para a execução do ensaio, as amostras são previamente secas em estufa à temperatura de 105°C a 110°C . Devendo permanecer no mínimo 24h, até apresentar constância de massa. Após a retirada da amostra da estufa, esta deve ser vedada com papel alumínio e transferida para o dessecador até atingir a temperatura ambiente.

A amostra preparada conforme descrito acima, é então colocada na mufla e a temperatura aumentada gradualmente até atingir 440°C . A amostra deve permanecer na mufla até a queima total da matéria orgânica, ou seja, até atingir a constância de massa. Este tempo é da ordem de 12h.

A amostra é pesada antes e depois da queima total em mufla. Assim, para determinar o teor de matéria orgânica, utiliza-se a Eq. (3.9):

$$MO = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \cdot 100 \quad (3.9)$$

Onde: MO é o teor de matéria orgânica, A é a massa da amostra seca a estufa à temperatura de 105°C a 110°C em gramas e B é a massa da amostra queimada em mufla à temperatura de 440°C em gramas.

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta resultados da caracterização geotécnica. Os dados obtidos estão apresentados através de tabelas e gráficos e estão acompanhados de análise e discussão.

4.1. Granulometria

A distribuição granulométrica encontrada nas amostras estudadas é apresentada na Fig. 4.1 através das curvas granulométricas obtidas através dos ensaios de sedimentação e peneiramento. Na Tabela 4.1 estão os percentuais de cada fração granulométrica de acordo com a classificação da NBR 6502 (ABNT,1995).

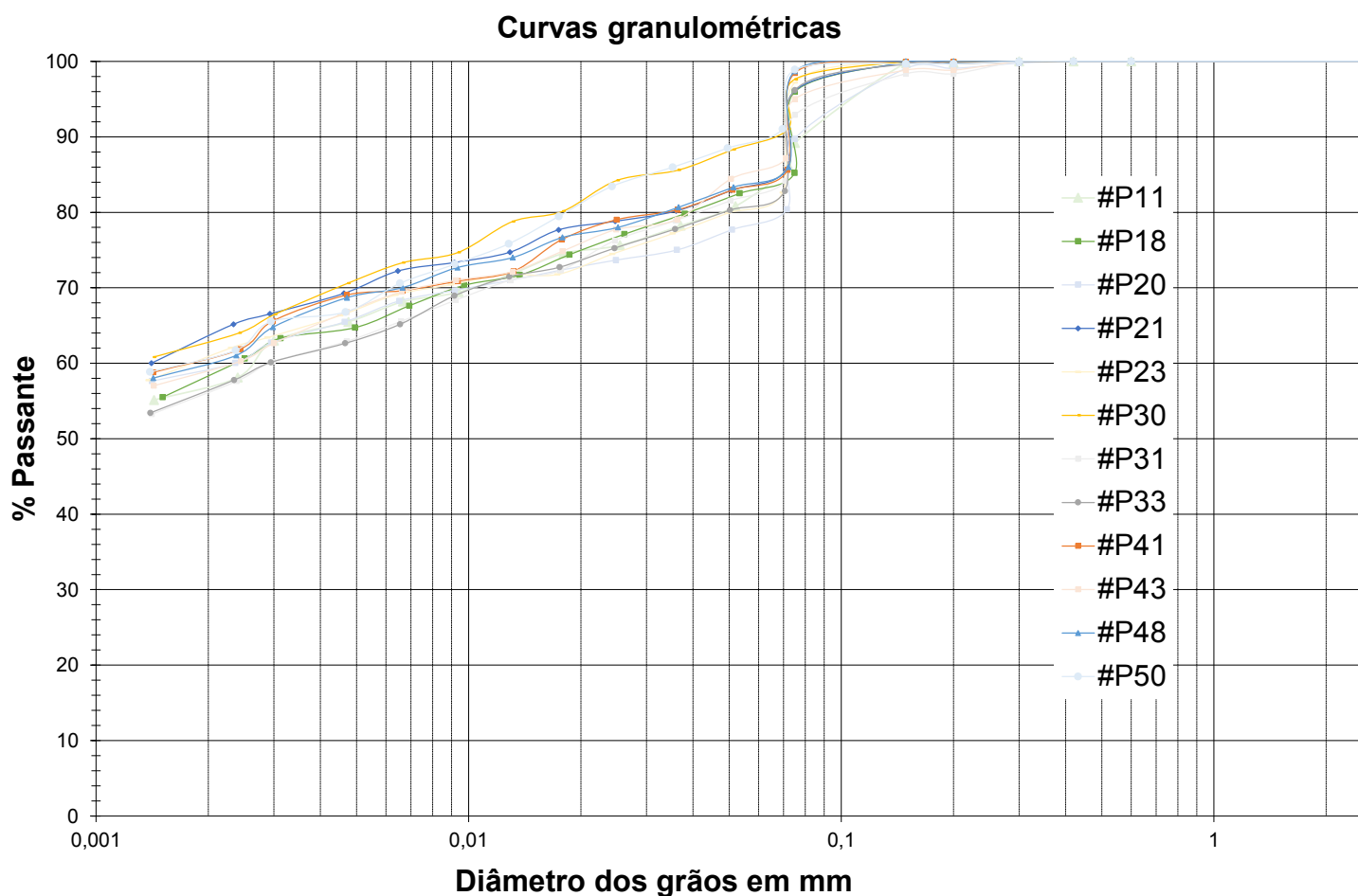


Figura 4.1. Curvas granulométricas de todas as amostras.

Tabela 4.1. Percentuais das frações argila, silte e areia de acordo com classificação NBR 6502 (ABNT, 1995).

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)
	< 0,002	0,002 - 0,06	0,06-0,2	0,2 - 0,6
#P11	57	26	17	0
#P18	58	25	17	0
#P20	59	19	21	1
#P21	64	20	16	0
#P23	61	20	19	0
#P30	63	27	10	0
#P31	56	26	16	2
#P33	56	25	19	0
#P41	61	23	16	0
#P43	59	27	13	1
#P48	60	24	16	0
#P50	61	29	10	0

As curvas granulométricas apresentadas na Fig. 4.1 mostram similaridade na distribuição granulométrica das amostras analisadas. Todas as amostras possuem predominância da fração argilosa com valores entre 56 e 64 %. Apenas 3 amostras apresentaram grãos classificados como areia média, ainda que de forma pouco significativa (1 e 2%). Estes resultados eram esperados em vista que a amostragem indeformada com o uso do Box Corer somente é possível para solos finos.

4.2. Limites de Atterberg, índice de plasticidade e índice de atividade coloidal

A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de limite de plasticidade e de liquidez. O valor máximo encontrado para *LL* foi 85%, nas amostras #P43 e #P50 e o valor mínimo de 61% no ponto #P41. Para o *LP*, os valores variaram entre 45 e 21%. O índice de plasticidade, apesar de ter valores variando entre 24 e 51%, classifica todos os solos estudados como altamente plástico. O índice de atividade coloidal do solo (*Ia*) indica 9 amostras classificadas como solo inativo, indicativo de argila 1:1, e 3 amostras classificadas como de atividade normal. Importante ressaltar que muitas amostras se encontram próximas ao valor limítrofe entre as duas classificações.

Tabela 4.2. Resultados de *LL*, *LP*, *Ip* e *Ia*.

Amostra	LL (%)	LP (%)	Ip (%)	Argila (%)	Ia
#P11	79	38	41	57	0,72
#P18	68	25	43	58	0,74
#P20	70	26	44	59	0,75
#P21	76	28	48	64	0,75
#P23	62	38	24	61	0,39
#P30	77	29	48	63	0,76
#P31	72	21	51	56	0,91
#P33	70	37	33	56	0,59
#P41	61	22	39	61	0,64
#P43	85	41	44	59	0,75
#P48	72	23	49	60	0,82
#P50	85	45	40	61	0,66

Todos os solos estudados aparecem à direita da Linha B no gráfico de plasticidade de Casagrande (Fig. 4.2), indicando solos compressíveis e muito plásticos. Em relação a Linha A, ocorreram pontos acima e abaixo, mas todos próximos a esta linha, indicando possível influência do conteúdo de matéria orgânica nas características de plasticidade dos solos estudados.

A Figura 4.3 apresenta a relação entre o índice de plasticidade e o percentual da fração argila das amostras. Como visto na análise granulométrica, os solos estudados não possuem variação relevante quanto ao percentual de argila, mas apresentam variação entre 24% e 51% no índice de plasticidade.

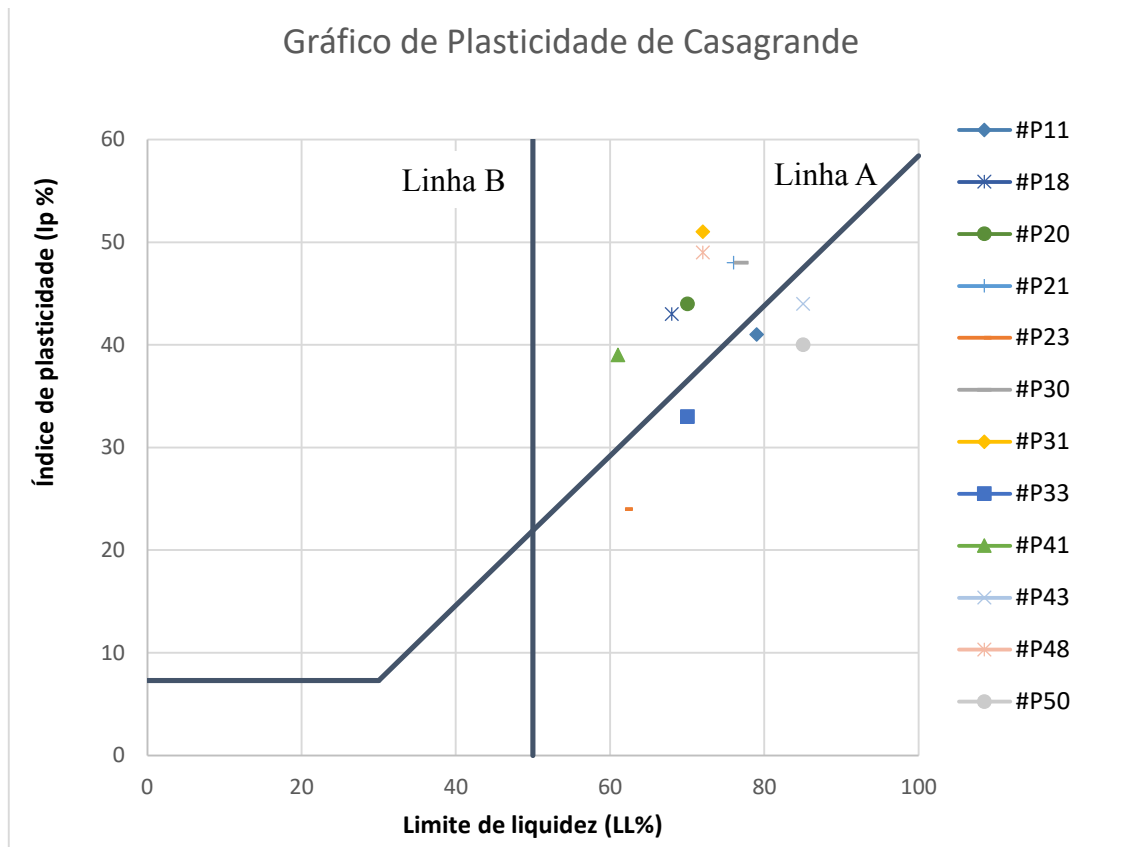


Figura 4.2. Gráfico de plasticidade de Casagrande.

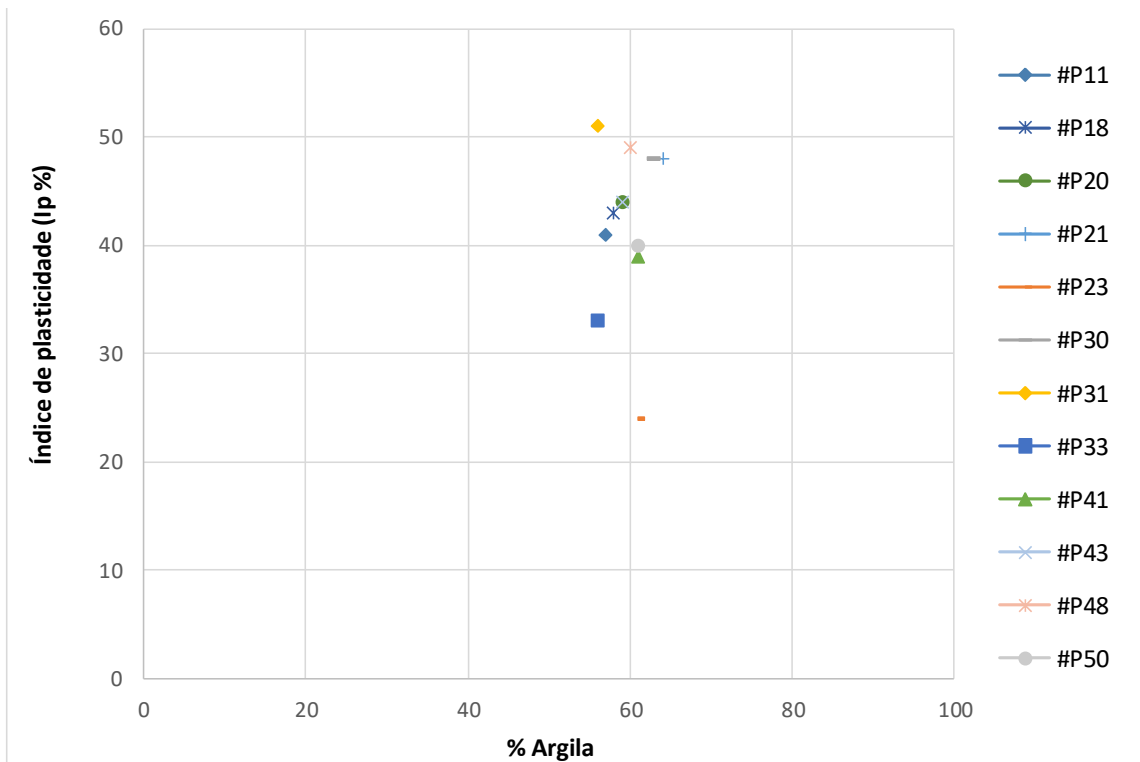


Figura 4.3. Relação entre Índice de Plasticidade e percentual da fração argila.

4.3. Classificação dos solos

As frações granulométricas apresentadas na Tab. 4.1 permitem a classificação dos solos de acordo com o descrito na NBR 6502 (ABNT, 1995). Esta classificação textural utiliza as duas frações granulométricas predominantes no solo para classifica-lo. Desta forma, os solos estudados foram classificados como argilas siltosas, exceto a amostra #P20 que foi classificada como argila arenosa.

Na área de sedimentologia, o diagrama de Shepard (1954) é um método bastante utilizado e também de baseia na relação percentual entre as frações granulométricas. Neste caso, a classificação utiliza um diagrama trilinear (Fig. 4.4). As amostras avaliadas por este método foram também foram classificadas como argilas siltosas, com exceção da amostra #P20, classificada como argila arenosa.

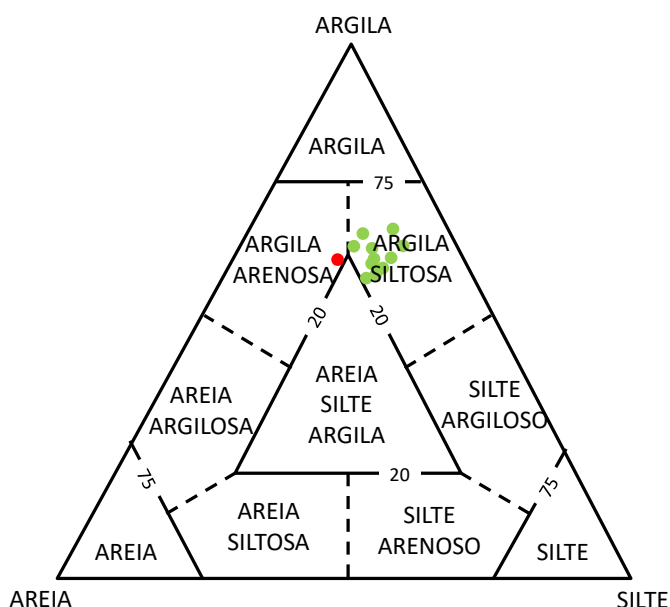


Figura 4.4. Classificação das amostras no diagrama de Shepard (1954). Círculo vermelho: amostra #P20. Círculos verdes: demais amostras.

A classificação geotécnica dos solos utiliza os percentuais das frações granulométricas e índices de plasticidade. Nooray (1989) sugere que o Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, tradicional método de classificação geotécnica, pode ser utilizado para solos marinhos de origem não biogênica. De acordo com o sistema SUCS os solos estudados são definidos como da classe *CH* (argila muito plástica) para os pontos #P18, #P20, #P21, #P30, #P31, #P41 e #P48. Os demais pontos são classificados como *MH* ou *OH* (argilas e siltes orgânicos ou siltes altamente plásticos). A Tabela 4.3 apresenta o resultado da classificação pela metodologia SUCS.

Tabela 4.3. Classificação das amostras segundo metodologia SUCS.

Amostra	Classificação SUCS
#P11	MH ou OH
#P18	CH
#P20	CH
#P21	CH
#P23	MH ou OH
#P30	CH
#P31	CH
#P33	MH ou OH
#P41	CH
#P43	MH ou OH
#P48	CH
#P50	MH ou OH

4.4. Índices físicos

Os índices físicos são apresentados na Tab. 4.4. Os valores do peso específico real dos grãos (γ_s), peso específico natural (γ_{nat}) e umidade (w) foram obtidos de forma experimental. O índice de vazios (e) e a saturação (S) foram calculados a partir dos anteriores.

O peso específico real dos grãos apresentou valor médio igual a 25,73 kN/m³, assumindo valores entre 26,39 kN/m³ e 23,90 kN/m³. Esta variação pode estar relacionada com conteúdo de matéria orgânica, como apresentado no item 4.7.

O peso específico natural do solo (γ_{nat}) médio encontrado foi 13,27 kN/m³, apresentando valores máximo e mínimo de 15,30 kN/m³ e 12,39 kN/m³, respectivamente. O índice de vazios médio calculado foi de 4,06, com valor máximo de 5,64 no ponto #P23 e mínimo de 2,76 no ponto #P41.

A umidade natural do solo apresentou valores entre 129,96% e 213,88%. Apenas o ponto #P50 obteve o teor de umidade discrepante em relação as demais, onde foi encontrado valor de 85,64%. O tubo amostral deste ponto não apresentava boa vedação, o que pode ter causado a perda de umidade. Este fato também justifica o grau de saturação obtido, enquanto todas as amostras se encontravam saturadas, a amostra #P50 apresentou grau de saturação igual a 78%.

Tabela 4.4. Índices físicos.

Amostra	γ_s (kN/m ³)	γ_{nat} (kN/m ³)	w %	e	S (%)
#P11	25,06	13,19	134,30	3,45	97,51
#P18	23,90	12,88	166,70	3,96	100
#P20	25,67	13,62	131,90	3,37	100
#P21	25,71	12,98	186,66	4,68	100*
#P23	26,39	12,47	213,88	5,64	100
#P30	24,91	13,46	164,79	3,90	100*
#P31	26,86	14,67	127,67	3,17	100*
#P33	26,93	12,70	203,20	5,43	100
#P41	25,01	15,30	129,96	2,76	100*
#P43	26,60	13,03	169,17	4,49	100
#P48	25,23	12,39	190,25	4,91	98
#P50	26,46	12,57	85,64	2,91	78

*Grau de saturação calculado excedeu 100%.

O grau de saturação é um índice físico calculado utilizando os índices obtidos de forma experimental. Este representa a relação percentual entre o volume de água e o volume de vazios do solo e tem como valor máximo 100%. A Tabela 4.4 indica 4 amostras em que os valores de grau de saturação calculados foram maiores do que 100%. Problemas na determinação experimental de alguns dos índices físicos podem ter causado esse resultado. A heterogeneidade do solo também pode ser um fator que contribuiu para esta ocorrência. O anel utilizado para determinar o γ_{nat} representa uma porção de solo retirada a 7 centímetros do topo da amostra, enquanto o γ_s é obtido com uma porção de solo que representa o conteúdo integral do tubo (ver 3.3.5 Preparação da amostra deformada). Durante a execução dos ensaios foram registrados tubos com diferença marcante na cor em porções do solo (Fig.4.5-a) e a presença de descontinuidades (Fig 4.5-b e Fig 4.5-c) que podem influenciar na determinação dos índices físicos.

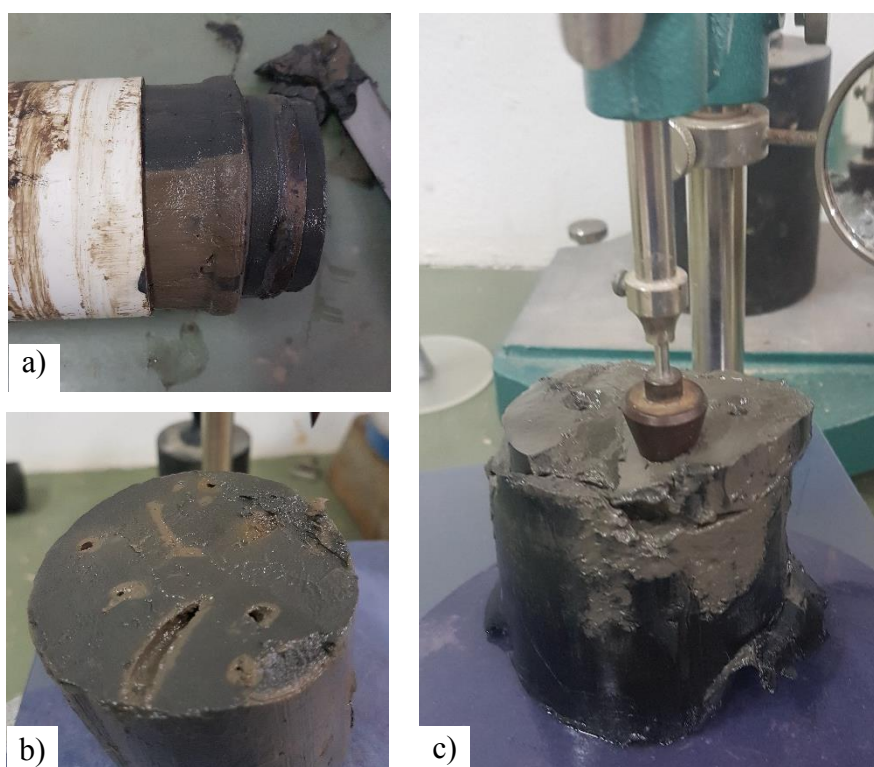


Figura 4.5. Heterogeneidade das amostras. a) Diferença na cor dos sedimentos. b) Vazios de origem orgânica. c) Descontinuidade natural do solo.

4.5. Resistência não drenada (S_u)

A resistência não drenada (S_u) foi obtida através do ensaio de palheta de laboratório e pelo ensaio do cone de queda. A Tabela 4.5 apresenta os resultados destes ensaios. As amostras #P18 e #P21 não possuem valor de S_u pelo método do cone de queda porque não foi possível executar o ensaio nestas amostras.

Observando estes valores disposto no gráfico da Fig. 4.6, nota-se que apesar de uma dispersão dos dados, é possível identificar, conforme esperado, uma tendência de diminuição do S_u com o aumento do teor de umidade.

A determinação da resistência não drenada pelo método do cone de queda é feita através da Eq. (3.2). O fator K presente na Eq. (3.2) é um parâmetro obtido experimentalmente. Para os resultados apresentados na Tab. 4.5, o fator K utilizado foi 0,8, valor recomendado na bibliografia (Hansbo, 1957). Karlsson (1961) sugere que o valor do fator é influenciado pela mineralogia do solo. Pinto et al. (2018) em estudo com solos artificiais, observaram que o fator K para solos produzidos com 70% caulim e 30% bentonita foi 0,94 e para solos com traço 60 % caulim, 20 % bentonita e 20% areia fina, o valor de K foi 0,73. A Figura 4.7 apresenta a relação linear entre o S_u obtido pelo ensaio

de palheta de laboratório, e o valor encontrado no ensaio do cone de queda neste trabalho. Apesar do número limitado de ensaios, os resultados indicam que para os solos estudados o valor de K com melhor ajuste é de aproximadamente 0,61.

Tabela 4.5. Resultados do S_u pelos ensaios de Cone de queda ($K = 0,8$) e Palheta de laboratório.

Amostra	Cone	Palheta	w %
	Su (kPa)	Su (kPa)	
#P11	2,34	1,80	134,30
#P18	-	0,70	166,71
#P20	5,75	4,10	131,90
#P21	-	0,60	186,66
#P23	0,97	0,40	232,30
#P30	2,61	2,30	159,41
#P31	1,30	1,70	192,02
#P33	1,64	1,90	203,20
#P41	0,91	0,70	165,50
#P43	2,62	2,50	169,17
#P48	2,73	2,50	190,25
#P50	3,74	2,10	85,64

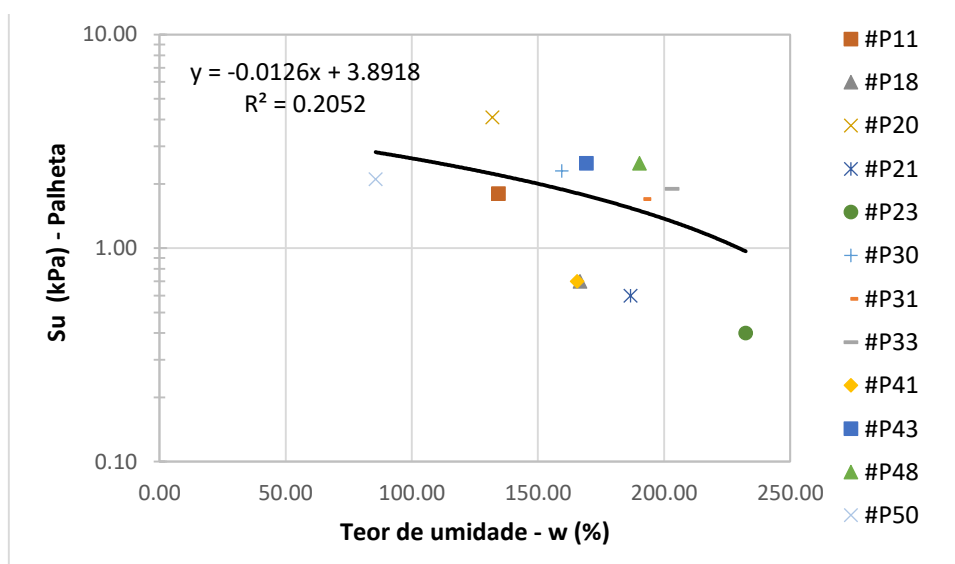


Figura 4.6. Resistência não drenada pelo método da palheta de laboratório versus umidade.

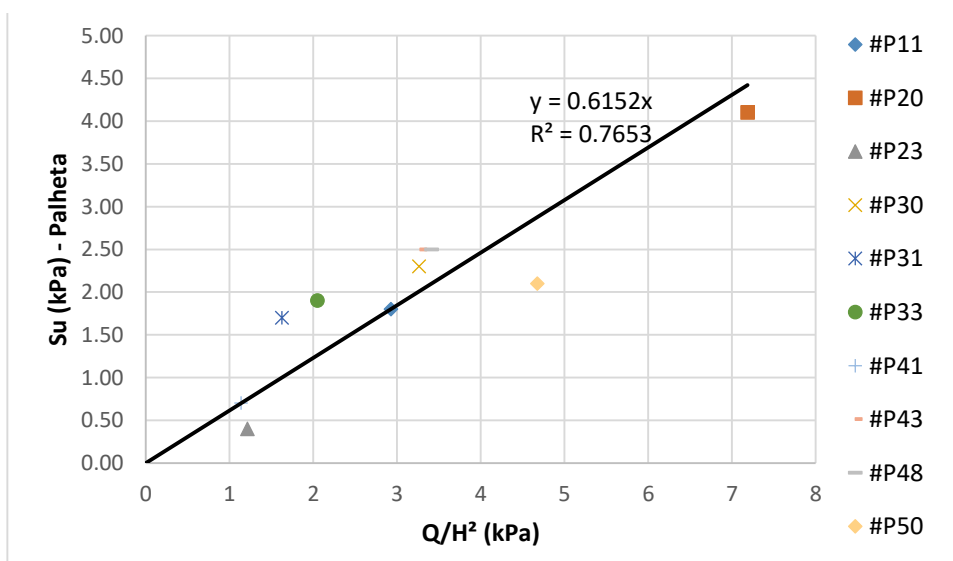


Figura 4.7. Correlação entre S_u obtido pelo ensaio de palheta e pelo cone de Queda.

4.6. Adensamento oedométrico

As 12 amostras estudadas foram submetidas ao ensaio de adensamento oedométrico. A Tabela 4.6 apresenta os parâmetros obtidos através deste ensaio. As médias dos C_v 's encontrados por amostra são apresentados na Tab. 4.7, juntamente com sua respectiva média e o desvio padrão.

Tabela 4.6. Parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento oedométrico.

Amostra	Estágio (kPa)	C_v (cm ² /s) Método de Casagrande	C_v (cm ² /s) Método de Taylor	C_c	C_d
#P11	6,25	$3,47 \times 10^{-4}$	$5,12 \times 10^{-4}$	1,12	0,10
	12,5	$1,01 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-4}$		
	25	$1,01 \times 10^{-4}$	$1,78 \times 10^{-4}$		
	50	$9,72 \times 10^{-5}$	$2,35 \times 10^{-4}$		
	100	$1,65 \times 10^{-4}$	$2,49 \times 10^{-4}$		
	200	$2,08 \times 10^{-4}$	$2,47 \times 10^{-4}$		
	400	$2,60 \times 10^{-4}$	$2,42 \times 10^{-4}$		
#P18	6,25	$2,04 \times 10^{-4}$	$1,74 \times 10^{-4}$	0,81	0,04
	12,5	$4,22 \times 10^{-5}$	$1,13 \times 10^{-4}$		
	25	*	$1,85 \times 10^{-4}$		
	50	$1,76 \times 10^{-4}$	$1,74 \times 10^{-4}$		
	100	$9,88 \times 10^{-4}$	$7,00 \times 10^{-4}$		
	200	$1,76 \times 10^{-3}$	$1,16 \times 10^{-3}$		
	400	*	$2,99 \times 10^{-3}$		

Amostra	Estágio (kPa)	Cv (cm ² /s) Método de Casagrande	Cv (cm ² /s) Método de Taylor	Cc	Cd
#P20	6,25	7,56 x10 ⁻⁵	1,23 x10 ⁻⁴	1,12	0,07
	12,5	4,19 x10 ⁻⁵	4,78 x10 ⁻⁵		
	25	4,43 x10 ⁻⁵	5,46 x10 ⁻⁵		
	50	4,86 x10 ⁻⁵	8,40 x10 ⁻⁵		
	100	1,20 x10 ⁻⁴	9,75 x10 ⁻⁵		
	200	7,12 x10 ⁻⁵	1,15 x10 ⁻⁴		
	400	3,34 x10 ⁻⁴	3,32 x10 ⁻⁴		
#P21	6,25	1,28 x10 ⁻⁴	1,59 x10 ⁻⁴	1,38	0,38
	12,5	9,39 x10 ⁻⁵	8,33 x10 ⁻⁵		
	25	7,17 x10 ⁻⁵	1,11 x10 ⁻⁴		
	50	7,03 x10 ⁻⁵	1,20 x10 ⁻⁴		
	100	8,77 x10 ⁻⁵	1,18 x10 ⁻⁴		
	200	7,51 x10 ⁻⁵	1,31 x10 ⁻⁴		
	400	8,04 x10 ⁻⁵	1,37 x10 ⁻⁴		
#P23	6,25	7,54 x10 ⁻⁵	6,52 x10 ⁻⁵	1,68	0,27
	12,5	1,27 x10 ⁻⁵	7,07 x10 ⁻⁵		
	25	4,69 x10 ⁻⁵	6,03 x10 ⁻⁵		
	50	5,11 x10 ⁻⁵	5,97 x10 ⁻⁵		
	100	5,35 x10 ⁻⁵	7,52 x10 ⁻⁵		
	200	5,87 x10 ⁻⁵	7,73 x10 ⁻⁵		
	400	4,32 x10 ⁻⁵	5,67 x10 ⁻⁵		
#P30	6,25	2,11 x10 ⁻⁴	2,72 x10 ⁻⁴	1,02	0,06
	12,5	*	1,14 x10 ⁻⁴		
	25	8,91 x10 ⁻⁵	1,50 x10 ⁻⁴		
	50	1,51 x10 ⁻⁴	1,98 x10 ⁻⁴		
	100	1,25 x10 ⁻⁴	1,89 x10 ⁻⁴		
	200	*	1,20 x10 ⁻³		
	400	*	1,50 x10 ⁻³		
#P31	6,25	4,34 x10 ⁻⁴	9,81 x10 ⁻⁴	1,26	0,08
	12,5	7,80 x10 ⁻⁵	2,71 x10 ⁻⁴		
	25	2,17 x10 ⁻⁴	3,32 x10 ⁻⁴		
	50	1,79 x10 ⁻⁴	3,48 x10 ⁻⁴		
	100	3,55 x10 ⁻⁴	6,25 x10 ⁻⁴		
	200	6,81 x10 ⁻⁴	6,71 x10 ⁻⁴		
	400	9,21 x10 ⁻⁴	1,09 x10 ⁻³		

Amostra	Estágio (kPa)	Cv (cm ² /s) Método de Casagrande	Cv (cm ² /s) Método de Taylor	Cc	Cd
#P33	6,25	*	2,71 x10 ⁻⁴	1,81	0,18
	12,5	*	7,02 x10 ⁻⁵		
	25	4,49 x10 ⁻⁵	6,77 x10 ⁻⁵		
	50	5,91 x10 ⁻⁵	9,16 x10 ⁻⁵		
	100	4,57 x10 ⁻⁵	8,38 x10 ⁻⁵		
	200	5,82 x10 ⁻⁵	6,28 x10 ⁻⁵		
	400	5,79 x10 ⁻⁵	7,29 x10 ⁻⁵		
#P41	6,25	4,98 x10 ⁻⁴	1,08 x10 ⁻³	0,45	0,06
	12,5	6,70 x10 ⁻⁵	8,38 x10 ⁻⁴		
	25	2,97 x10 ⁻⁴	1,18 x10 ⁻³		
	50	3,98 x10 ⁻⁵	8,53 x10 ⁻⁴		
	100	*	1,80 x10 ⁻³		
	200	*	2,99 x10 ⁻³		
	400	*	1,61 x10 ⁻³		
#P43	6,25	1,15 x10 ⁻⁴	1,38 x10 ⁻⁴	0,91	0,04
	12,5	4,48 x10 ⁻⁵	5,49 x10 ⁻⁵		
	25	4,89 x10 ⁻⁵	7,20 x10 ⁻⁵		
	50	7,04 x10 ⁻⁵	1,13 x10 ⁻⁴		
	100	*	1,08 x10 ⁻³		
	200	9,52 x10 ⁻⁴	9,28 x10 ⁻⁴		
	400	2,21 x10 ⁻³	1,12 x10 ⁻³		
#P48	6,25	1,01 x10 ⁻⁴	1,65 x10 ⁻⁴	1,26	0,12
	12,5	*	7,11 x10 ⁻⁵		
	25	1,03 x10 ⁻⁴	2,46 x10 ⁻⁴		
	50	1,05 x10 ⁻⁴	2,38 x10 ⁻⁴		
	100	1,38 x10 ⁻⁴	2,41 x10 ⁻⁴		
	200	1,64 x10 ⁻⁴	2,90 x10 ⁻⁴		
	400	2,08 x10 ⁻⁴	3,06 x10 ⁻⁴		
#P50	6,25	1,09 x10 ⁻⁴	1,09 x10 ⁻⁴	1,63	0,2
	12,5	*	4,69 x10 ⁻⁵		
	25	3,70 x10 ⁻⁵	5,47 x10 ⁻⁵		
	50	5,42 x10 ⁻⁵	6,64 x10 ⁻⁵		
	100	5,03 x10 ⁻⁵	6,13 x10 ⁻⁵		
	200	5,46 x10 ⁻⁵	6,84 x10 ⁻⁵		
	400	4,97 x10 ⁻⁵	7,12 x10 ⁻⁵		

* Não foi possível calcular o Cv pelo método de Casagrande. Estágios não apresentaram o formato da curva teórica.

Tabela 4.7. Tabela resumo do coeficiente de adensamento - C_v .

Amostra	C_v médio por amostra (cm^2/s)	
	Método de Taylor	Método de Casagrande
#P11	$2,63 \times 10^{-4}$	$1,83 \times 10^{-4}$
#P18	$7,84 \times 10^{-4}$	$6,35 \times 10^{-4}$
#P20	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,05 \times 10^{-4}$
#P21	$1,23 \times 10^{-4}$	$8,67 \times 10^{-5}$
#P23	$6,64 \times 10^{-5}$	$4,88 \times 10^{-5}$
#P30	$5,17 \times 10^{-4}$	$1,44 \times 10^{-4}$
#P31	$6,17 \times 10^{-4}$	$4,09 \times 10^{-4}$
#P33	$1,03 \times 10^{-4}$	$5,32 \times 10^{-5}$
#P41	$1,48 \times 10^{-3}$	$2,26 \times 10^{-4}$
#P43	$5,00 \times 10^{-4}$	$5,74 \times 10^{-4}$
#P48	$2,22 \times 10^{-4}$	$1,36 \times 10^{-4}$
#P50	$6,83 \times 10^{-5}$	$5,91 \times 10^{-5}$
Média	$4,06 \times 10^{-4}$	$2,22 \times 10^{-4}$
Desvio Padrão	$3,98 \times 10^{-4}$	$1,96 \times 10^{-4}$

A variação do Coeficiente de Adensamento (C_v) com o aumento do carregamento não apresentou padrão de comportamento quando as amostras são comparadas. A Figura 4.8 apresenta a evolução do C_v ao longo do ensaio (amostra #P50) onde é possível identificar que o parâmetro se mantém pouco alterado com o aumento da tensão vertical. Já na Fig. 4.9 são apresentados, como exemplo, os resultados da amostra #P31 onde o C_v aumenta com o aumento do carregamento do ensaio. Observa-se que o estágio inicial de 6,25 kPa, em geral, apresenta valores discrepantes em relação aos demais estágios.

Em relação a comparação entre os métodos para estimar o C_v , nota-se que o método de Taylor tende a apresentar valores maiores do que os encontrados com o método de Casagrande. Como alguns estágios de carga não formaram a curva teórica para a aplicação do método de Casagrande, as próximas análises aplicam os C_v 's calculados pelo método de Taylor.

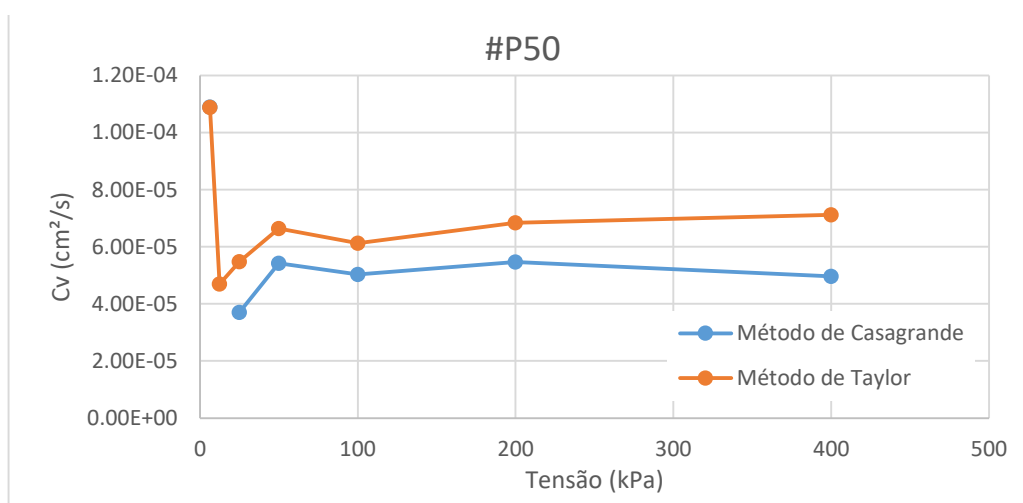


Figura 4.8. Gráfico C_v versus tensão do estágio de carga, amostra #P50.

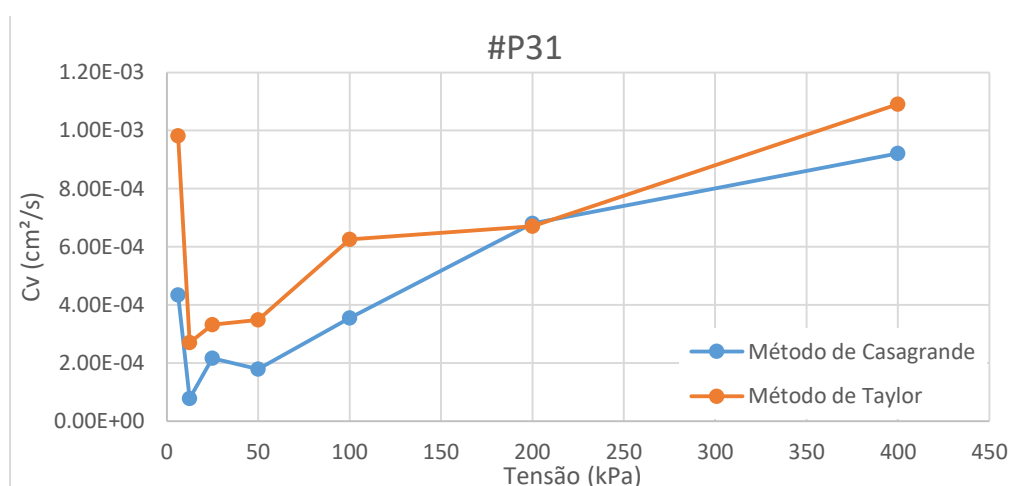


Figura 4.9. Gráfico C_v versus tensão do estágio de carga, amostra #P31.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam o gráfico do C_v médio versus LL e o gráfico C_v médio versus umidade, respectivamente. Nas duas avaliações é possível identificar uma leve correlação negativa entre os parâmetros, onde ocorre a diminuição do C_v com o aumento do LL e da umidade. Isto é, a velocidade de deformações decresce com o limite de liquidez e o teor de umidade do sedimento. Não se observa significância estatística na correlação.

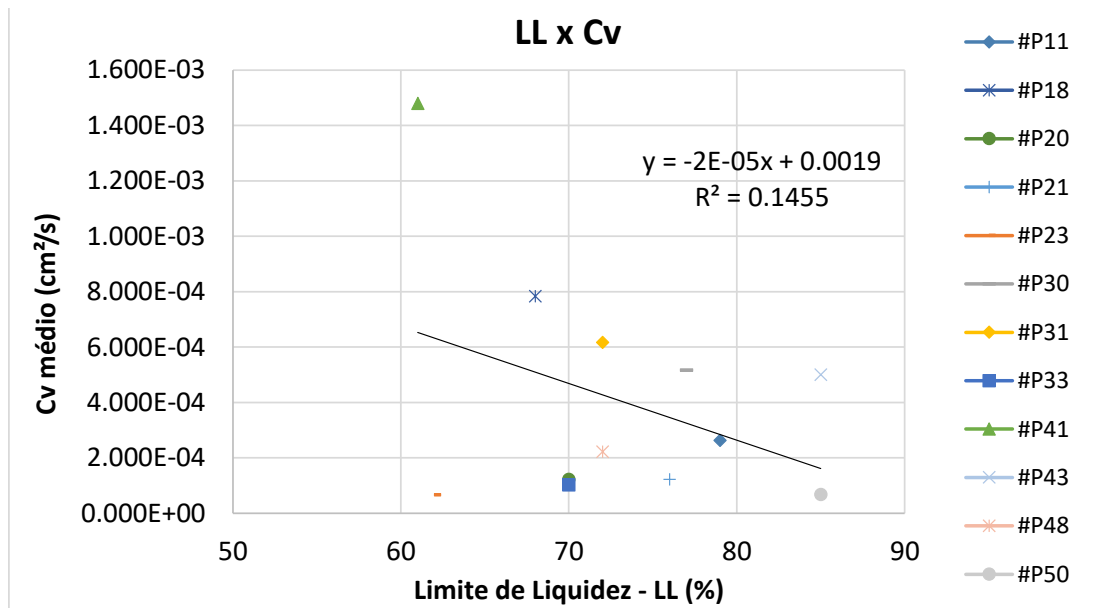


Figura 4.10. Gráfico de Limite de Liquidez versus C_v médio (Taylor).

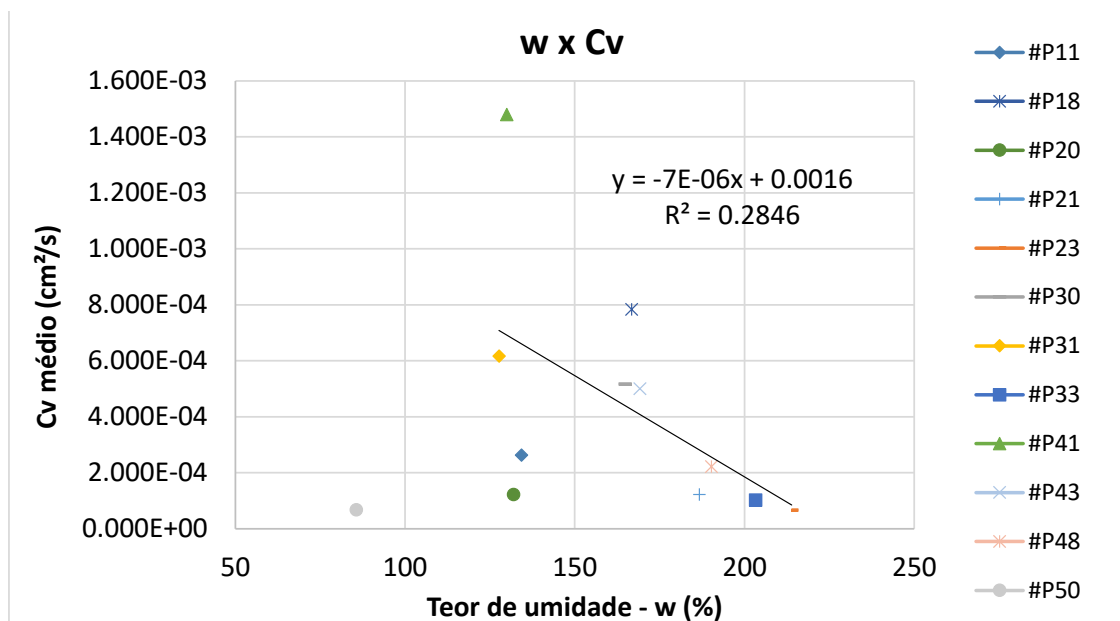


Figura 4.11. Gráfico de percentual de umidade versus C_v médio (Taylor).

A partir dos resultados do ensaio de adensamento oedométrico também é possível obter o coeficiente de permeabilidade (k) do solo. O k indica a facilidade com que a água flui através do solo, este é um importante parâmetro para o estudo de solos finos. O cálculo do k é feito através da Eq. (4.1).

$$k = C_v \cdot \gamma_w \cdot m_v \quad (4.1)$$

Onde:

C_v - coeficiente de adensamento,

γ_w - peso específico da água,

m_v - coeficiente de variação volumétrica.

A Tabela 4.8 apresenta os valores referentes ao coeficiente de permeabilidade (k), para as amostras estudadas, calculados utilizando coeficiente de adensamento (C_v) obtidos pelos métodos de Casagrande e Taylor. Os resultados possuem ordem de grandeza esperada para solos classificados como argilas siltosas, portanto compatíveis com os solos estudados.

Tabela 4.8. Valores de coeficiente de permeabilidade calculados a partir dos coeficientes de adensamento obtidos pelos métodos de Taylor e de Casagrande.

Amostra	k (cm/s)	
	C_v Método de Taylor	C_v Método de Casagrande
#P11	$1,67 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-5}$
#P18	$5,99 \times 10^{-5}$	$4,85 \times 10^{-5}$
#P20	$6,43 \times 10^{-6}$	$5,54 \times 10^{-6}$
#P21	$1,01 \times 10^{-5}$	$7,10 \times 10^{-6}$
#P23	$6,19 \times 10^{-6}$	$4,55 \times 10^{-6}$
#P30	$3,37 \times 10^{-5}$	$9,37 \times 10^{-6}$
#P31	$3,56 \times 10^{-5}$	$2,36 \times 10^{-5}$
#P33	$8,03 \times 10^{-6}$	$4,15 \times 10^{-6}$
#P41	$4,65 \times 10^{-5}$	$7,09 \times 10^{-6}$
#P43	$3,59 \times 10^{-5}$	$4,12 \times 10^{-5}$
#P48	$1,41 \times 10^{-5}$	$8,68 \times 10^{-6}$
#P50	$5,91 \times 10^{-6}$	$5,12 \times 10^{-6}$

A Figura 4.12 apresenta a curva referente ao recalque (variação do índice de vazios) em relação a tensão vertical aplicada em cada estágio de carga e descarga para a amostra #P21. Todas as amostras avaliadas apresentaram curvas semelhantes, possuindo apenas o trecho linear referente a reta virgem e o trecho referente a descarga do ensaio. O fato indica que a tensão de pré-adensamento do sedimento, se existente, tem valor inferior ao do primeiro estágio de carga (6,25 kPa). Desta curva foram retirados os parâmetros de Índice de recompressão (C_c) e Índice de descarga (C_d) apresentados

na Tab. 4.6.

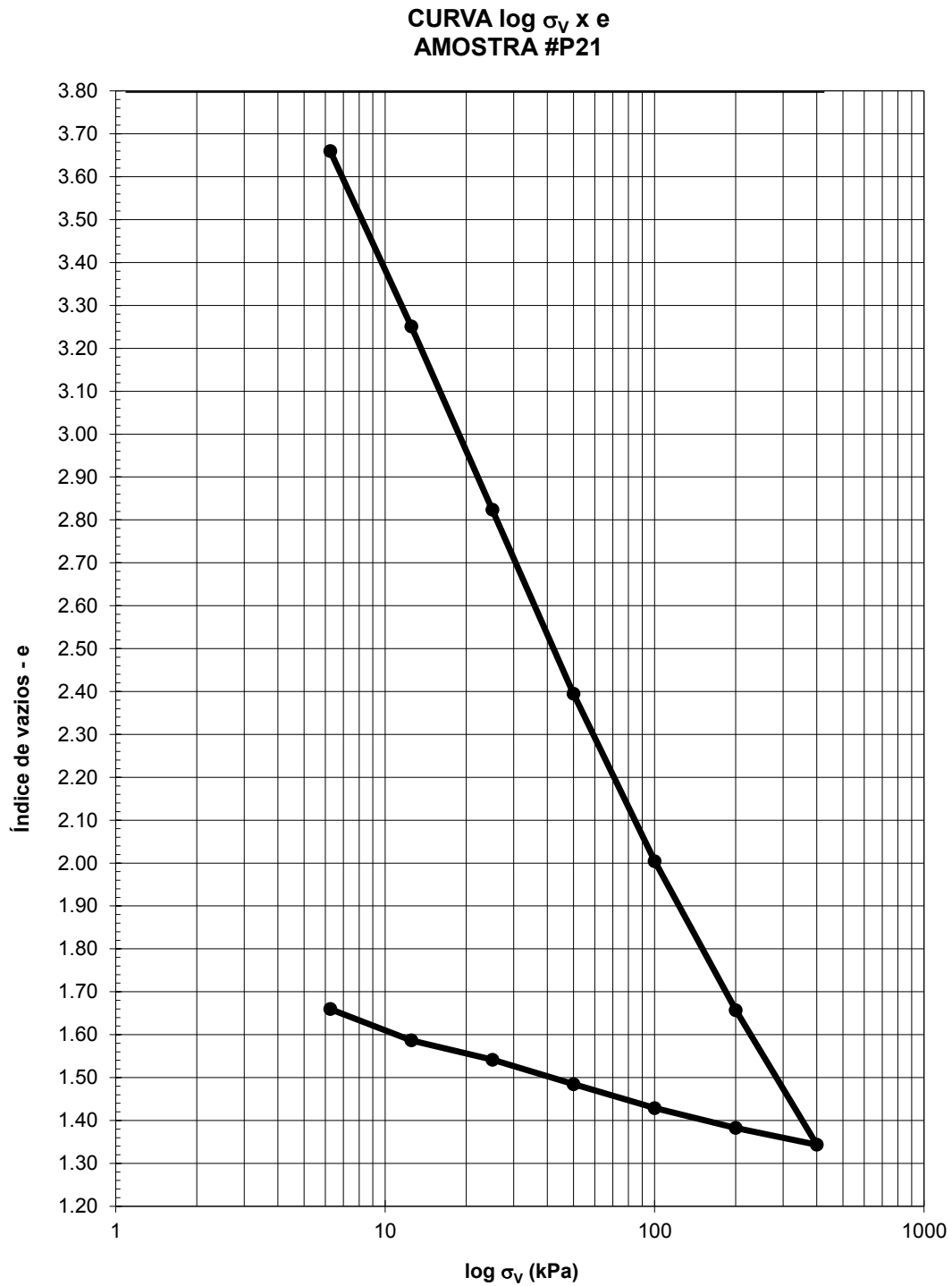


Figura 4.12. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P21.

O índice de compressão tem sido correlacionado com o limite de liquidez e com a umidade do solos. A Fig. 4.13 apresenta o gráfico do *LL* versus *Cc*. A linha de tendência indicada desconsidera os valores dos pontos #P23 e #P33. Nos dados obtidos neste estudo, estes parâmetros não indicam correlação forte devida a grande variabilidade encontrada.

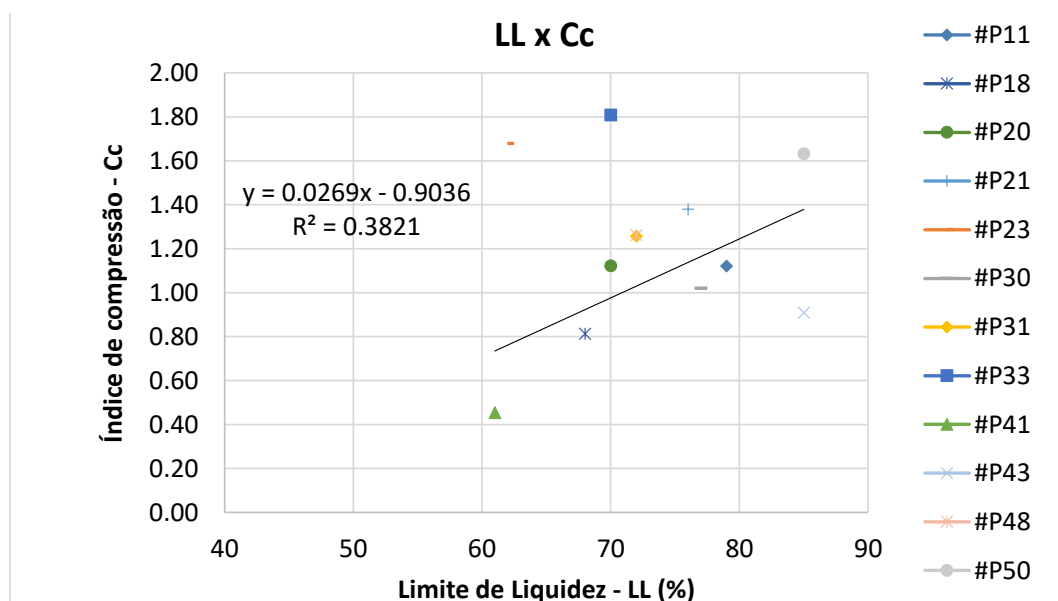


Figura 4.13. Gráfico de limite de liquidez versus índice de compressão.

Analisando o gráfico apresentado na Fig. 4.14, verifica-se a correlação entre o teor de umidade e o índice de compressão. Apesar da grande dispersão dos dados, é possível verificar a tendência de aumento do índice de compressão com o aumento do teor de umidade. A linha de tendência presente na Fig. 4.14 exclui o valor anômalo encontrado para a amostra #P50. Este ponto apresenta teor de umidade discrepante em relação as demais amostras possivelmente por problema na vedação do tubo que continha a amostra, como já discutido anteriormente.

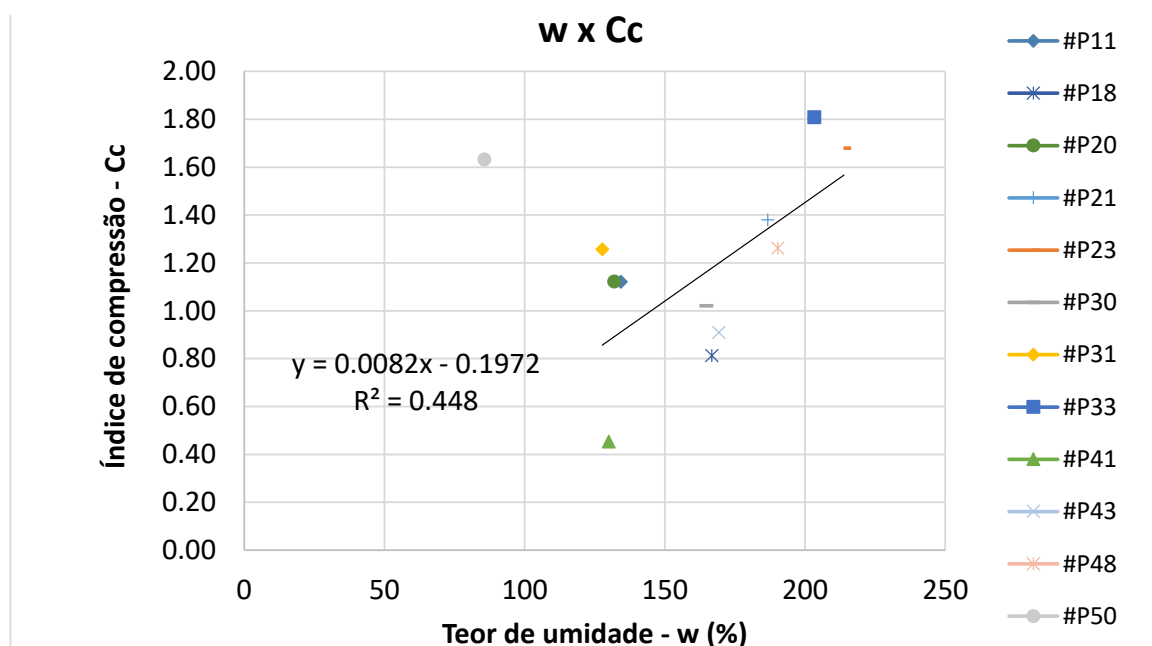


Figura 4.14. Gráfico de teor de umidade versus índice de compressão.

4.7. Matéria orgânica

Os resultados obtidos no ensaio de determinação do teor de matéria orgânica estão apresentados na Tab.4.9. O valor máximo encontrado foi de 3,58% na amostra #P18 e o valor mínimo foi de 1,13% na amostra #P50.

A quantificação da matéria orgânica em sedimentos pode ser obtida através de diferentes métodos. Os valores tendem a ser bastante distintos e influenciado pela escolha do método. Leong & Tanner (1999) salientam que os métodos que utilizam a queima da matéria orgânica, podem superestimar os valores. Escosteguy et. al. (2007) discutem a influência da temperatura utilizada no processo de queima, e concluem que temperaturas mais baixas, como 360°C, diminuiriam a influência da perda de outros elementos, como água estrutural de alguns minerais, causando este resultado superestimado. Silva et. al. (1999) enfatiza que o método de perda de massa por calcinação direta pode não ser adequado para solos com forte presença de carbonatos (ex.: conchas) pois estes materiais também são perdidos em altas temperaturas. Neste caso é mais adequado o processo de decarbonatação com ácido de forma prévia.

Apesar da necessidade de cautela para a utilização de métodos de perda de massa por ignição, estes métodos possibilitam quantificar o teor de matéria orgânica dos solos sem gerar resíduos danosos ao meio ambiente (Escosteguy et. al. 2007).

Os solos estudados neste trabalho, apesar de serem solos marinhos, não apresentaram presença significativa de conchas, apenas pequenos fragmentos em pouca quantidade. Desta forma, o método

utilizado (NBR 13600 ABNT, 1996) deve fornecer boa estimativa da matéria orgânica presente nestes solos. Estes resultados se mostraram compatíveis com solos marinhos.

Tabela 4.9. Teor de matéria orgânica.

Amostra	Matéria Orgânica (%)
#P11	2,28
#P18	3,58
#P20	2,42
#P21	3,46
#P23	2,54
#P30	2,28
#P31	1,84
#P33	2,83
#P41	2,55
#P43	1,85
#P48	2,54
#P50	1,13

O teor de matéria orgânica no solo influencia em alguns índices físicos e parâmetros de resistência. A Figura 4.15 apresenta a relação entre o peso específico real dos grãos (γ_s) e o percentual de matéria orgânica do solo (MO). O aumento da MO acompanha a diminuição do γ_s . A Figura 4.16 indica a diminuição da resistência não drenada (S_u) com o aumento do percentual de MO .

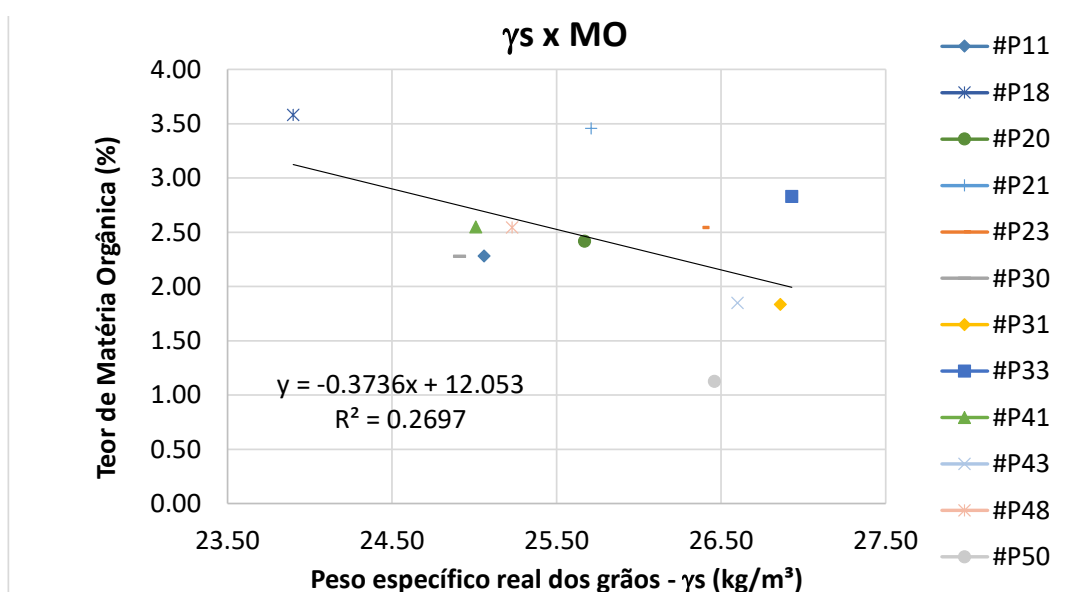


Figura 4.15. Gráfico de peso específico real dos grãos versus teor de matéria orgânica.

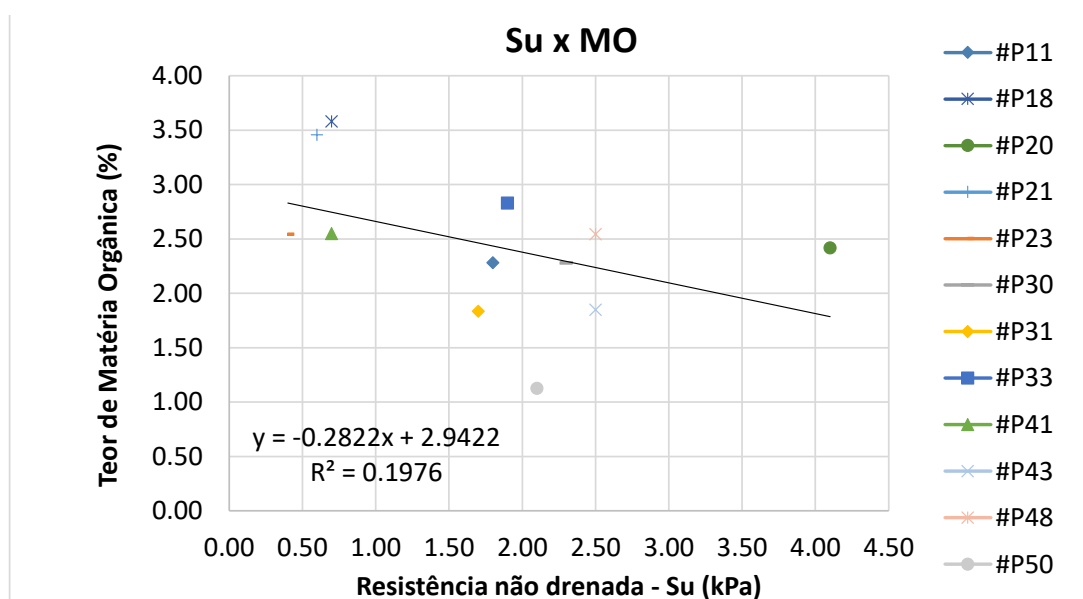


Figura 4.16. Gráfico de resistência não drenada (obtida no ensaio de palheta de laboratório) versus teor de matéria orgânica.

4.8. Difração de raios X

Os resultados obtidos pelos ensaios de difração executados no CEME-SUL, indicaram que todas as amostras avaliadas possuem a mesma composição mineralógica. Os difratogramas apresentaram os mesmos picos com apenas algumas sutis diferenças quando a intensidade. As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os difratogramas referentes as amostras #P18 e #P30, respectivamente. Através dos difratogramas foram identificadas as presenças de quartzo, muscovita, k-feldspatos, ilita e caulinita.

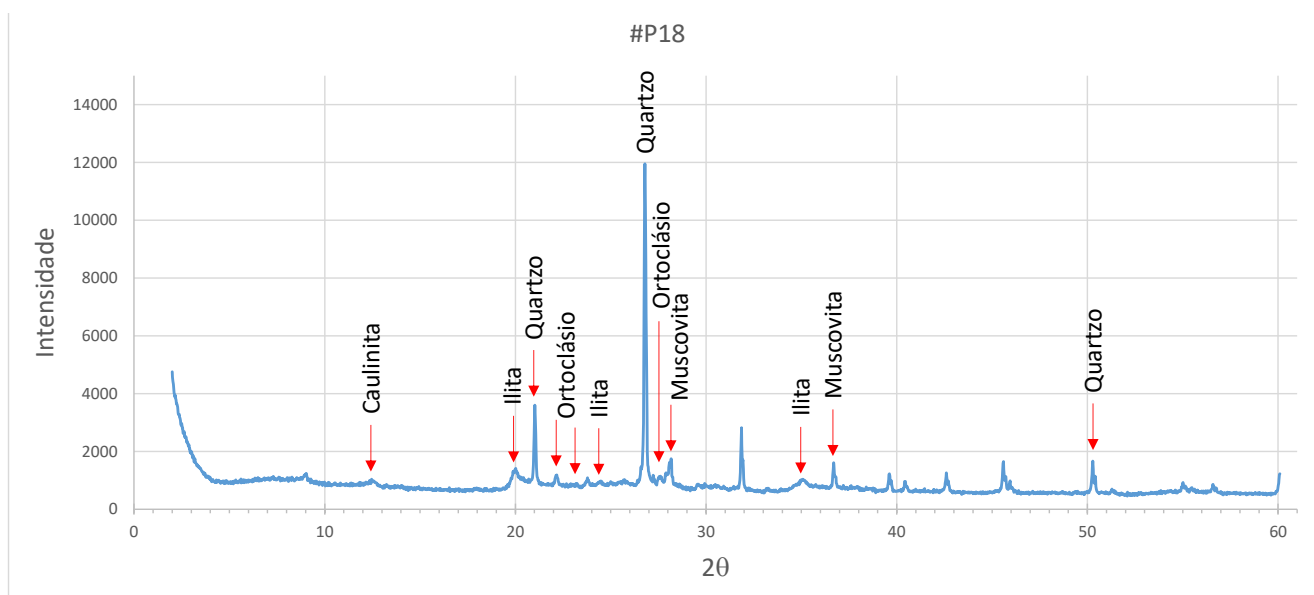


Figura 4.17. Difratoograma da amostra #P18.

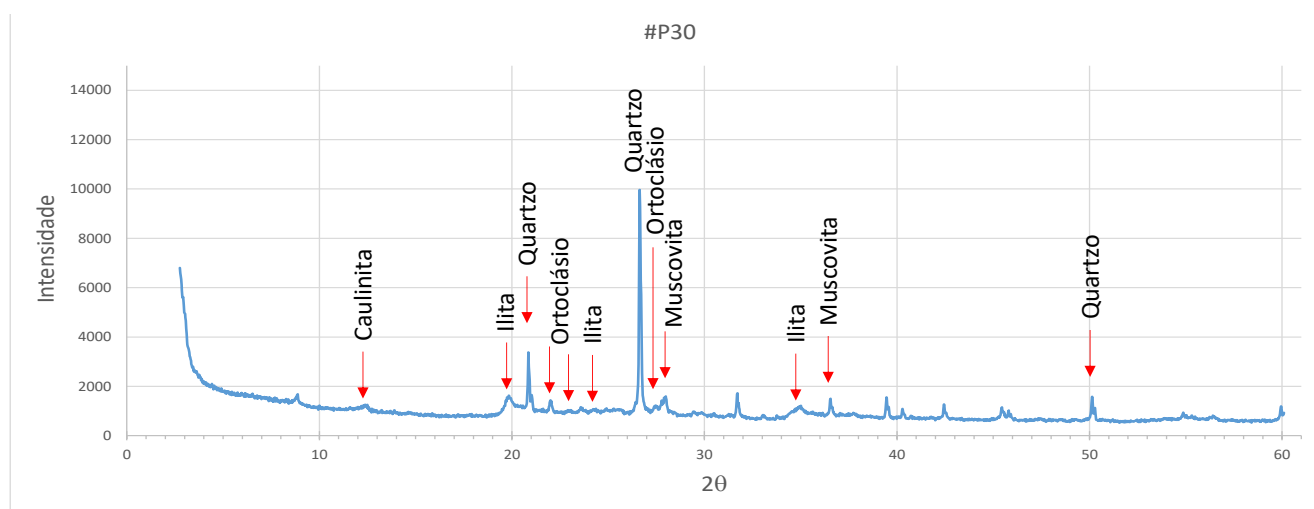


Figura 4.18. Difratoograma da amostra #P30.

As amostras #P18 e #P41 foram analisadas pelo procedimento de lâmina orientada com tratamentos de glicolagem e calcinação para a caracterização dos argilominerais. As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam os difratogramas interpretados fornecidos pelo Laboratório de Difractometria de Raios X – UFRGS. Através desta análise foi identificada a presença de esmectita, ilita, caulinita e k-feldspato nas amostras.

Embora neste estudo não tenham sido aplicadas técnicas quantitativas nos difratogramas, observando a intensidade dos picos é possível identificar a predominância dos argilominerais ilita e

caulinita em relação às esmectitas. Esta observação é coerente com a análise obtida pelo cálculo do índice de atividade coloidal (*Ia*) que apresentou indicativo de argilominerais 1:1 (ver item 4.2).

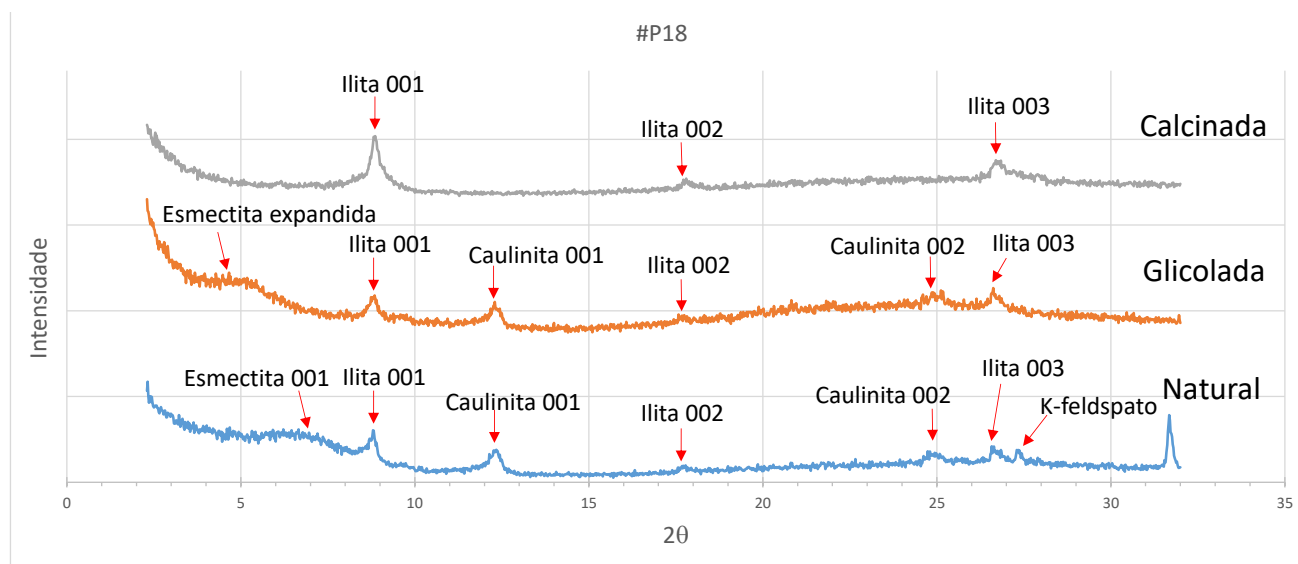


Figura 4.19. Difratoograma da amostra #P18. Lâmina orientada natural, glicolada e calcinada.

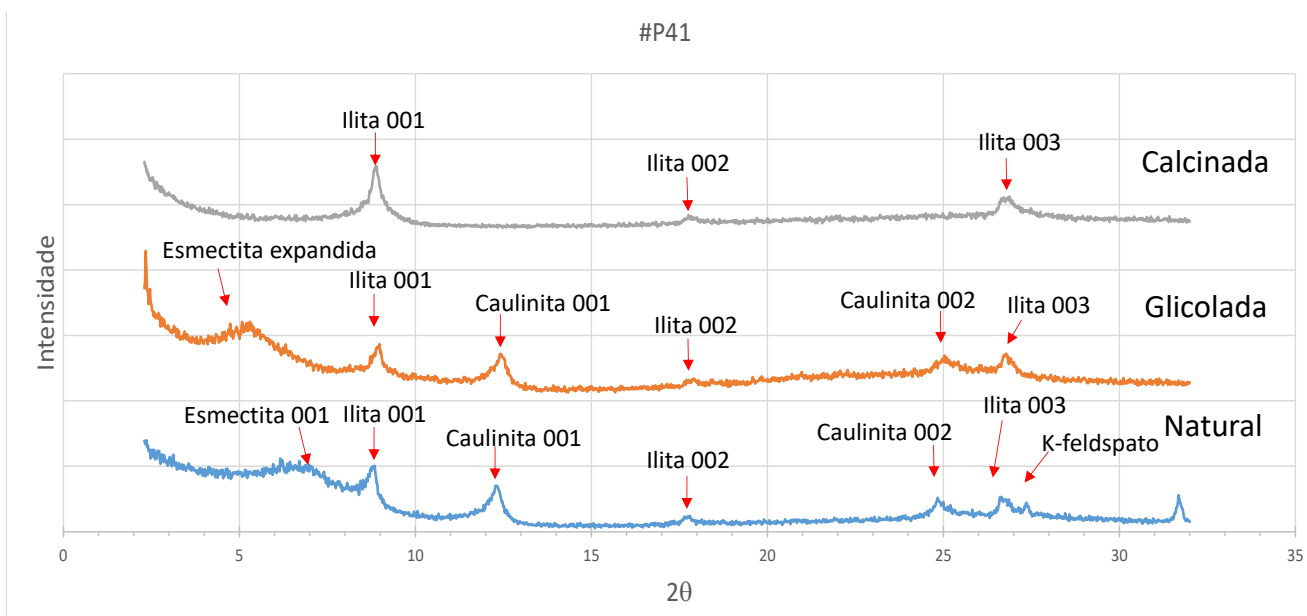


Figura 4.20. Difratoograma da amostra #P41. Lâmina orientada natural, glicolada e calcinada.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Esta dissertação objetivou a caracterização geotécnica de amostras de sedimentos coletados na plataforma continental no litoral sul do Rio Grande do Sul, em área referente a porção submersa da praia do Cassino. Os estudos focaram nas análises das amostras de solos finos com objetivo de obter características descritivas e parâmetros de resistência e deformabilidade.

5.1. Conclusões

A caracterização geotécnica de 12 amostras dos solos finos presentes no leito marinho da praia do Cassino, entre as cotas batimétricas 8m e 10,5m, foi executada. As amostras não apresentaram padrão na distribuição espacial em relação aos parâmetros estudados.

As análises granulométricas indicaram solos finos, em sua maioria classificados pelo diagrama de Shepard (1954) como argilas siltosas. A metodologia SUCS classificou estes solos como argilas muito plásticas e argilas siltes orgânicos ou siltes altamente plásticos. Esta classificação está coerente com o mapa de classificação de solos apresentado por Paixão (2012).

O limite de liquidez apresentou valores entre 61% e 85%, sendo a média dos valores igual a 73%. Para os limites de plasticidade variaram entre 45% e 21%, com valor médio das amostras igual a 31%.

Os valores médios de γ_s , γ_{nat} e índice de vazios foram 25,73 kN/m³, 13,27 kN/m³ e 4,06 respectivamente. As amostras de encontravam saturadas e com umidade natural entre 129,96% e 213,88%, com apenas o ponto #P50 obteve valores discrepante de grau de saturação e umidade. Os índices físicos obtidos apresentaram boa concordância com dados publicados por Dias & Alves (2009).

Todas as amostras estudadas apresentaram alta compressibilidade e comportamento normalmente adensado. O Índice de Compressão apresentou correlação com o teor de umidade dos solos. O coeficiente de adensamento médio obtido foi 4,06x10⁻⁴ cm²/s para o método de Taylor e 2,22x10⁻⁴ cm²/s para o método de Casagrande.

Foram obtidos baixos valores de resistência não drenada, sendo o valor mínimo 0,4 kPa e máximo 4,10 kPa. Estes resultados são compatíveis com a natureza dos solos estudados.

A avaliação da mineralogia dos solos através da técnica de Difração de Raios X, indicou a presença de quartzo, k-feldspato, muscovita e os argilominerais: caulinita, illita e esmectita.

5.2. Sugestões para pesquisas futuras

Uma dificuldade em desenvolver caracterização geotécnica de solos marinhos é a complexidade no processo de amostragem. As adversidades naturais do meio marinho e o grande custo, podem impossibilitar a obtenção de amostras, especialmente indeformadas.

As amostras utilizadas no desenvolvimento desta dissertação foram coletadas durante um cruzeiro oceanográfico do projeto “Programa de Monitoramento do Sítio de Despejo e Área Adjacente do Material Dragado do Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande”. Este projeto executa coletas sistemáticas de solo, entre outros dados. Sugere-se a continuidade da caracterização geotécnica aqui apresentada, seguindo estes procedimentos, com objetivo de verificar a evolução e modificação dos parâmetros estudados ao longo do tempo e a possível influência de eventos naturais e antrópicos na deposição destes solos finos na praia do Cassino.

A avaliação de outros parâmetros geotécnicos que envolvem o comportamento reológico das argilas, podem ser estudados através da análise da viscosidade dos materiais coletados nesta região. Por fim, a avaliação da resistência não drenada *in situ* através de equipamentos como o STING e a execução dos ensaios de palheta de laboratório diretamente na caixa de coleta do box core, pode ajudar a minimizar o efeito da amostragem nos valores de resistência não drenada destes solos.

6. REFERÊNCIAS

- ALBERS, A. P. F., MELCHIADES, F. G., MACHADO, R., BALDO, J. B., BOSCHI, A. O. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica**, v. 48, p. 34 – 37, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D2487 Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)**. Estados Unidos, 9p, 2017.
- ANTIQUEIRA, J. A. F; CALLIARI L. J. Características Sedimentares da Desembocadura da Laguna dos Patos. **GRAVEL**, n. 3, p. 39-46, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12007 Solo – Ensaio de adensamento unidimensional – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 15p, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13600 Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C**. Rio de Janeiro, 2p, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457 Amostras de solo – Preparação para ensaios de caracterização (Anexo A – Determinação do teor de umidade de solos**. Rio de Janeiro, 9p, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6458 Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 10p, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459 Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 6p, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6502 Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 18p, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7180 Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 3p, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181 Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 13p, 2016.
- BARBOZA, E. G., ROSA, M. L. C. C., AYUP-ZOUAIN, R. N. Cronoestratigrafia da Bacia de Pelotas: uma revisão das sequências deposicionais. **Gravel**, v. 6, n. 1, p. 125-138, 2008.
- BARNES, G. **Mecânica dos solos – princípios e práticas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.
- BORZONE, C. A., GRIEP, G. H. Características do sedimento superficial infralitoral da região costeira adjacente à desembocadura da Lagoa dos Patos, RS, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 18, n. 1, p. 71-78, 1991.
- BRITISH STANDAR. **BS 1377 Methods of test for soils for Civil Engineerins purposes**, 1990.

- BUENO, G. V., ZACHARIAS, A. A., OREIRO, S. G. Bacia de Pelotas. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n.2, p. 551-559, 2007.
- CALLIARI, L. J., FARIA, A. F. G. Bancos de lama na praia do Cassino: Formação, Implicações Geomorfológicas, Ambientais e Riscos Costeiros. Estudo de caso: maio de 2003. **Anais do II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. II Congresso do Quaternário dos Países de Língua Ibéricas**. 2003.
- CALLIARI, L. J., SPERANSKI, N. S., TORRONTÉGUY, M., OLIVEIRA, M. B. The mud bank of Cassino Beach, Southern Brazil: Characteristics, Processes and Effects. **Journal of Coastal Research**, SI (24), p. 318-325, 2000.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações. Volume 1 – Fundamentos**. Rio de Janeiro: LTC, 7ª Ed., 2015
- DAS, B. M., SOBHAN, K. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 8ª Ed., 2014.
- DIAS, C. R. R. Parâmetros geotécnicos da argila siltosa mole da cidade de Rio Grande – Região do Superporto. **Vetor**, v. 3, p. 19 – 34, 1993.
- DIAS, C. R. R., ALVES, A. M. L. Geotechnical properties of the Cassino Beach mud. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 589-596, 2009.
- ESCOSTEGUY, P. A. V.; GALLIASSI, K.; CERETTA, C. A. Determinação de matéria orgânica do solo pela perda de massa por ignição, em amostras do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 247-255, 2007.
- FERNANDES, M. M. **Mecânica dos solos – Volume I conceitos e princípios fundamentais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- HANSBO, S. **A new Approach to the Determination of the Shear Strength of Clay by Fall-Cone test**. Stockholm: Royal Swedish Geotechnical Institute, 1957.
- HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing**, Vol. 2. 1994.
- KARLSSON, R. Suggested Improvements in the Liquid Limit Test, with Reference to Flow Properties of Remoulded Clays. **Proceedings of International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1961, Paris**. v. 1, p. 171 – 184, 1961.
- LEONG, L. S.; TANNER, P. A. Comparison of Methods for Determination of Organic Carbon in Marine Sediment. **Marine Pollution Bulletin**, v. 38, p. 875-879, 1999.
- MASSAD, F. **Mecânica dos solos experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. JR. **X-Ray Diffraction and Identification and Analysis of Clay Minerals**. New York: Oxford University Press, 1997.
- NOORAY, I. Classification of marine sediments. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 115, n. 1, p. 23-37, 1989.

- PAIXÃO, B. E. G., 2012. **Distribuição Faciológica da Bacia de Pelotas**. Monografia de graduação em Oceanologia, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande.
- PEJRUP, M. **The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach**. In: Boer, P. L., Gelder, A., Nio, S. D. (Eds). Tide-Influenced Sedimentary Environment and Facies. D. Reidel Publishing Company, p. 289-300, 1988.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- PINTO, P. B., ALVES, A. B. P., BASTOS, C. A. B. Ensaio de cone de queda aplicado em estudos de plasticidade e resistência de solos artificiais. **Geotecnia**, n. 143, p. 85-110, 2018.
- SHEPARD, F. P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 24, n. 3, p. 151-158, 1954.
- SILVA, A. C.; TORRADO, P. V.; ABREU, J. S. JR. Métodos de quantificação da matéria orgânica do solo. **Revista Universidade de Alfenas**, v. 5, p. 21-26, 1999.
- SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. São Paulo: Editora Blucher, 2003.
- THOMPSON, D.; BEASLEY, D. J. **Handbook for Marine Geotechnical Engineering**. Califórnia, 2012.
- TOMAZELLI, L. J., VILLWOCK, J. A. Mapeamento Geológico de Planícies Costeiras: o Exemplo da Costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**, v. 3, p. 109 – 115, 2005.
- TOMAZELLI, L. J., VILLWOCK, J. A. **O Cenozóico do Rio Grande do Sul: geologia da planície costeira**. In: Holz, M. & De Ros, L. F. (eds). Geologia do Rio Grande do Sul. Edições CIGO/UFRGS, Porto Alegre, p. 375-406, 2000.
- VALÉRIO, B. S. B., 2017. **Caracterização Geotécnica de Fundo Marinho entre Rio Grande e Torres e de Fundo Lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande.
- VIATEST. **Operanting instruction Laboratory Vane Apparatus**.
- WALLY, M. K., 2011. **Bacia de Pelotas – Um Diagnóstico Geoquímico**. Monografia de graduação em Oceanologia, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande.

APÊNDICE A – Curvas altura da amostra versus raiz do tempo

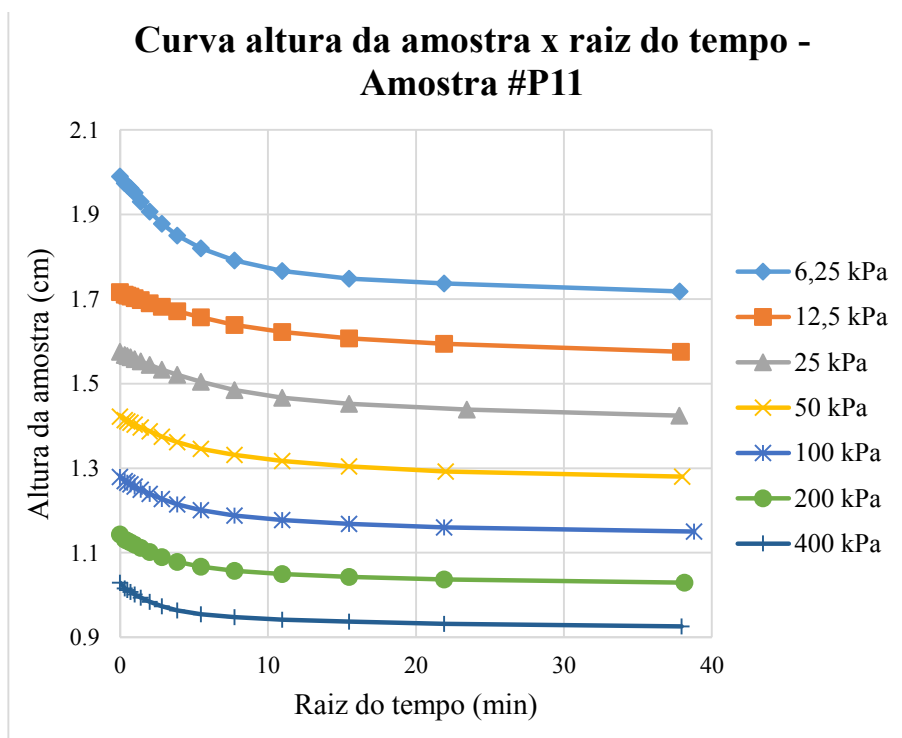


Figura A.1. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P11.

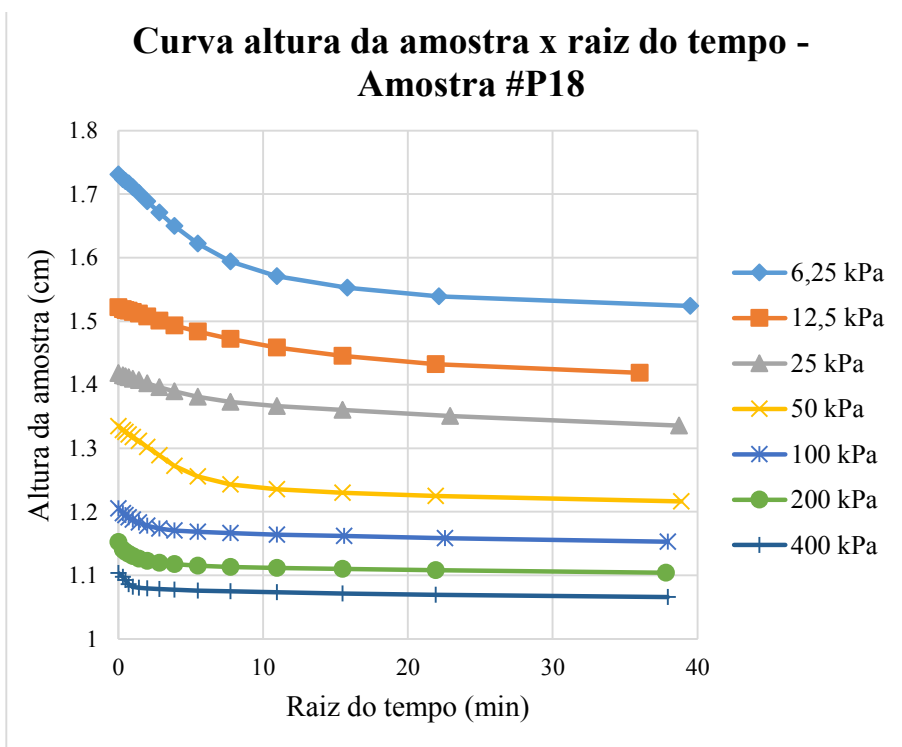


Figura A.2. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P18.

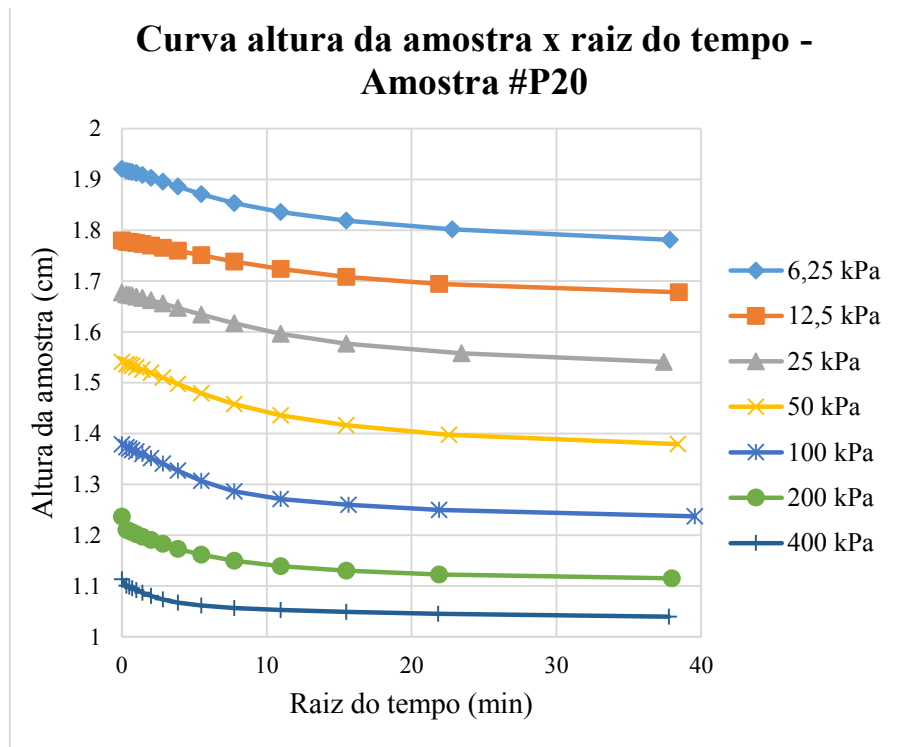


Figura A.3. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P20.

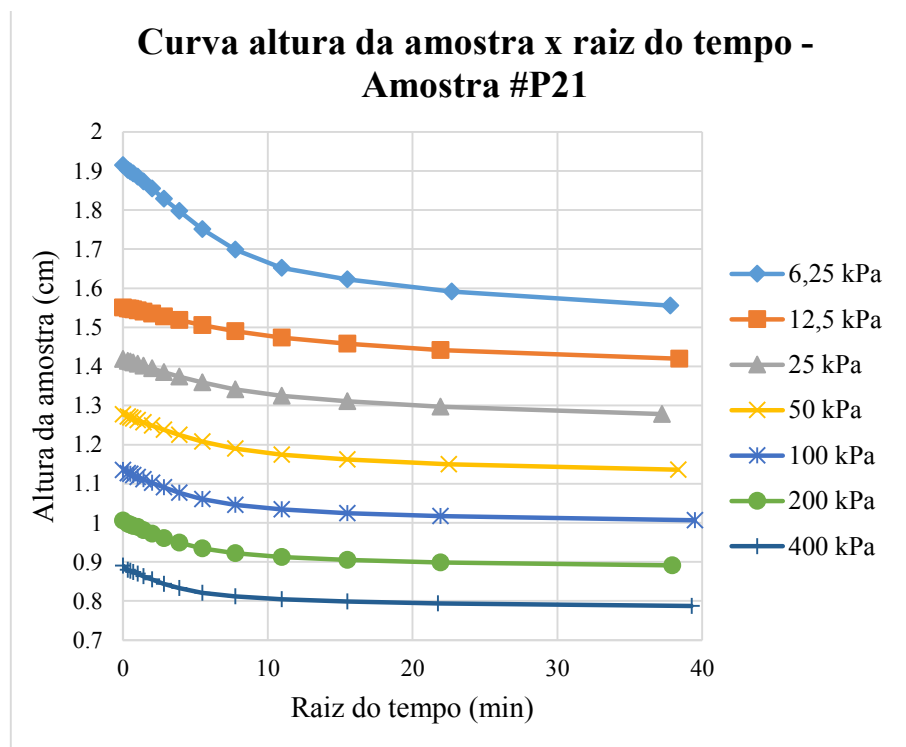


Figura A.4. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P21.

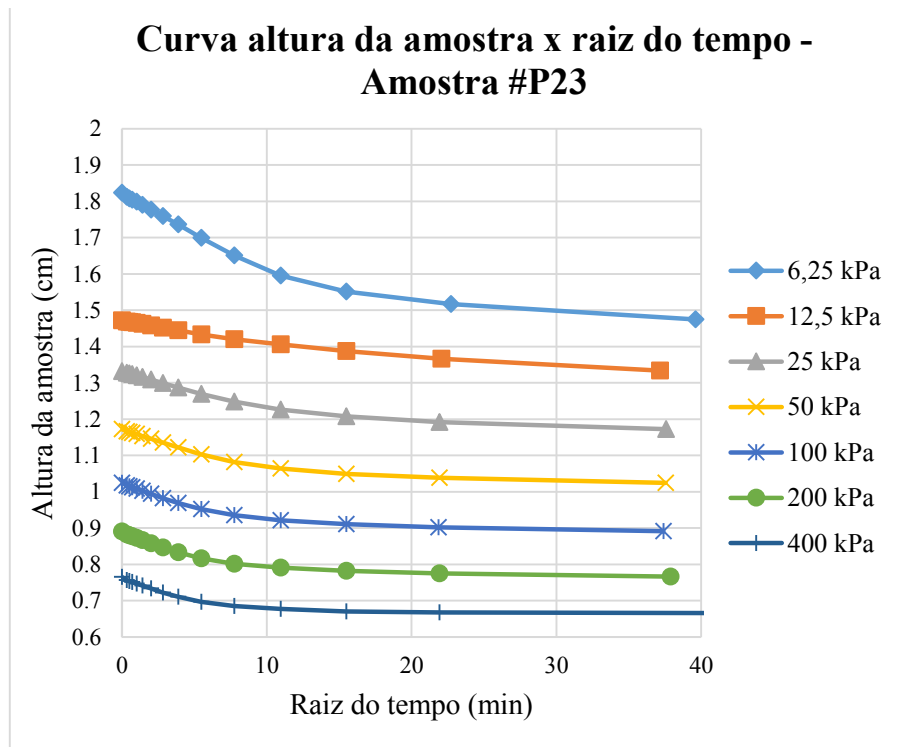


Figura A.5. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P23.

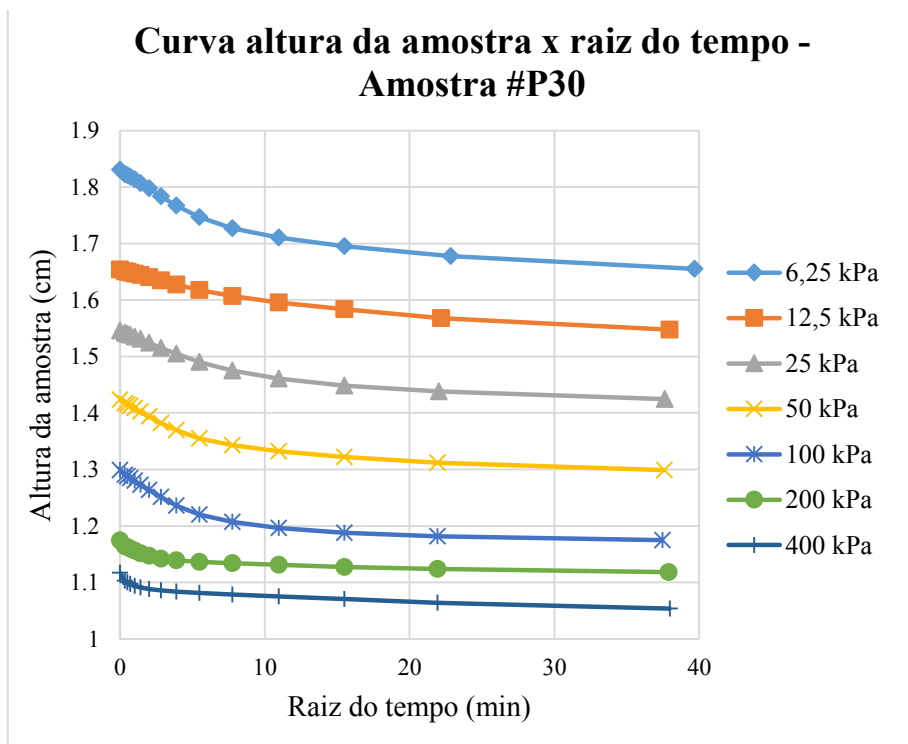


Figura A.6. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P30.

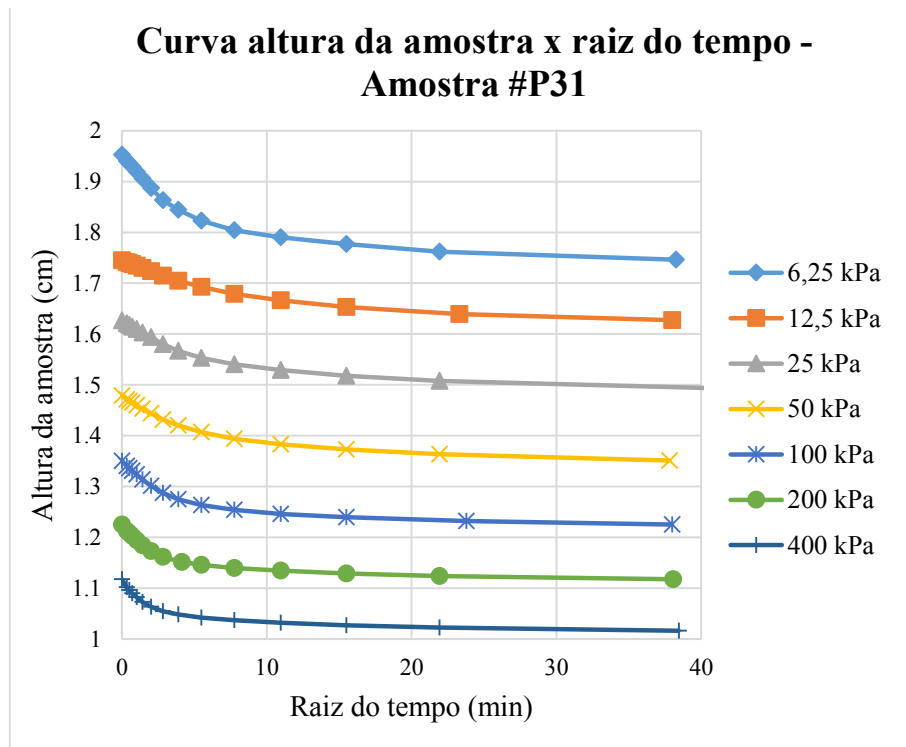


Figura A.7. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P31

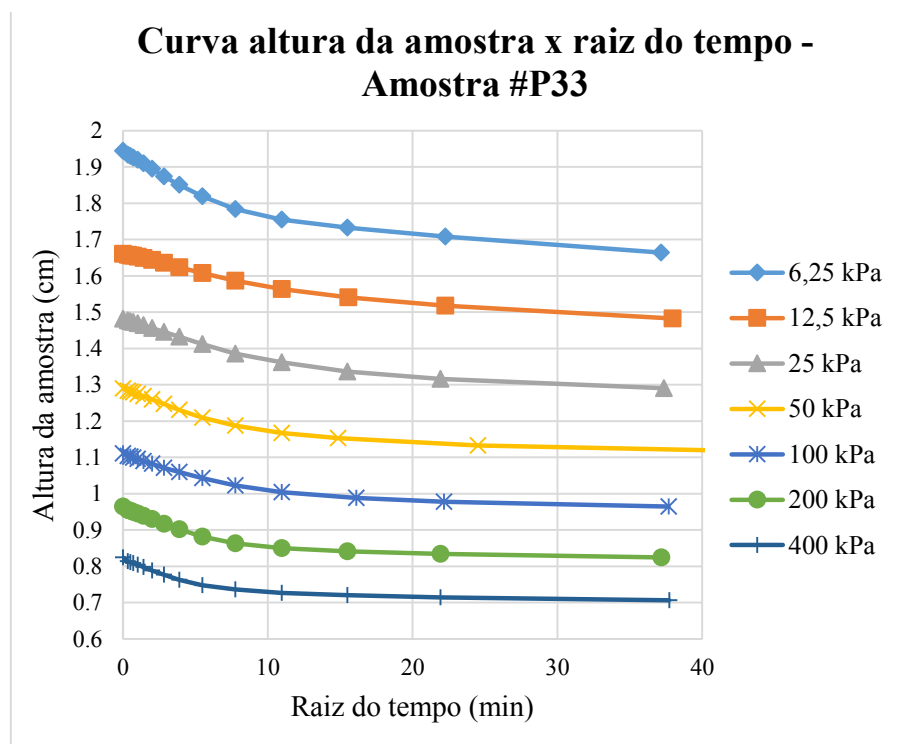


Figura A.8. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P33.

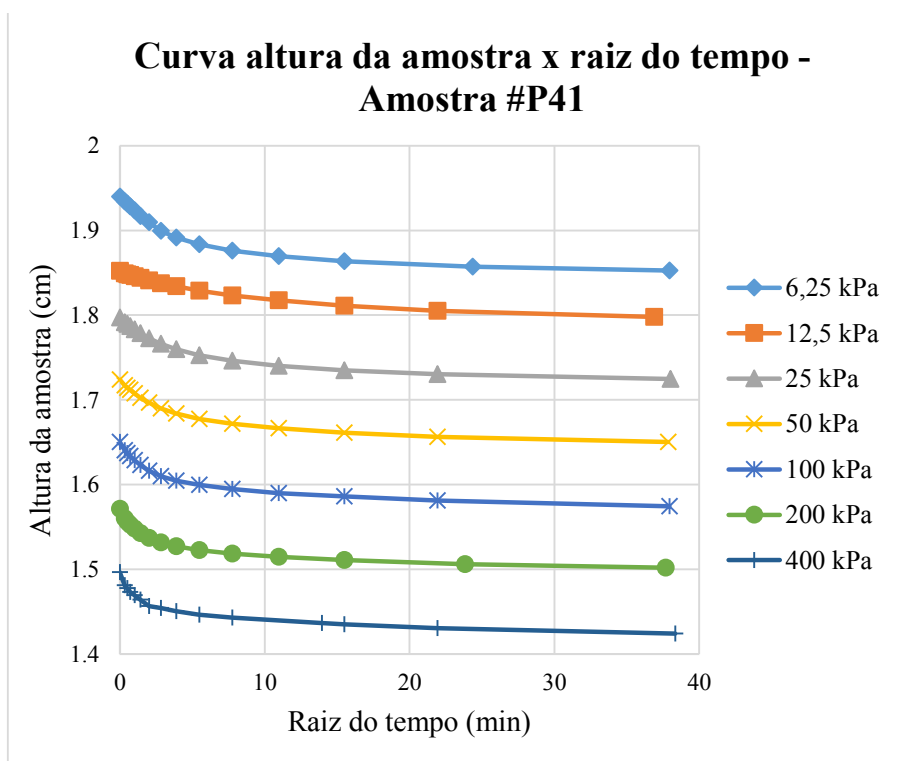


Figura A.9. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P41.

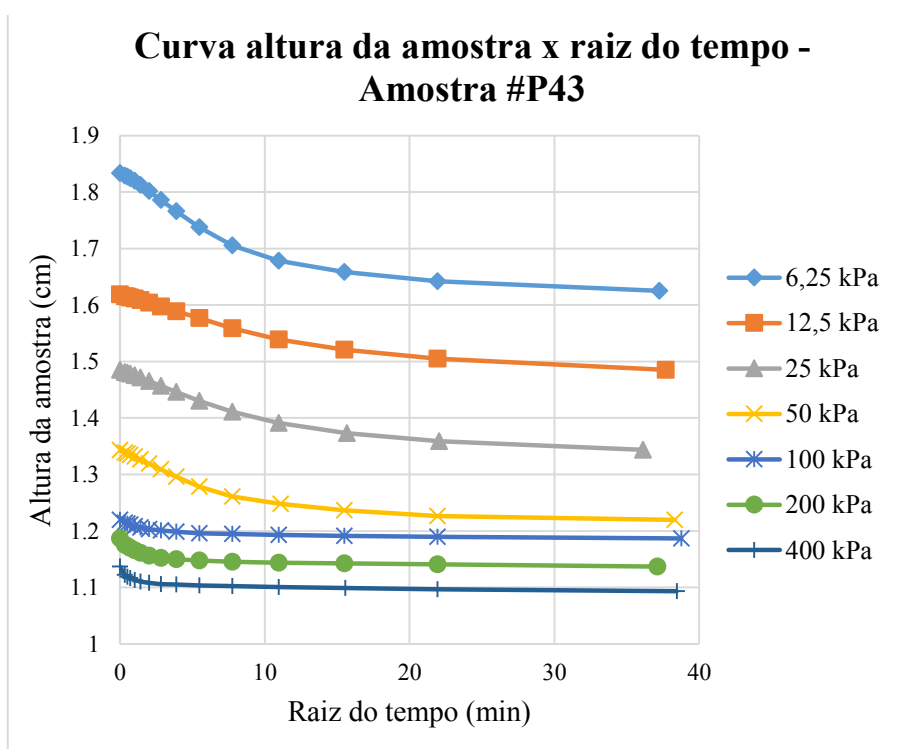


Figura A.10. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P43.

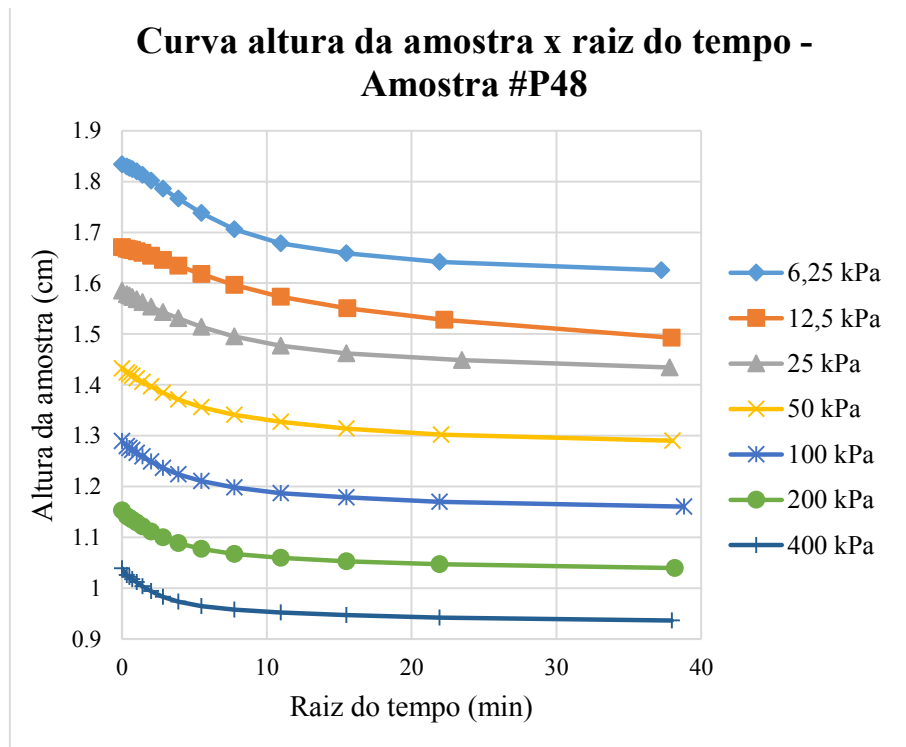


Figura A.11. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P48.

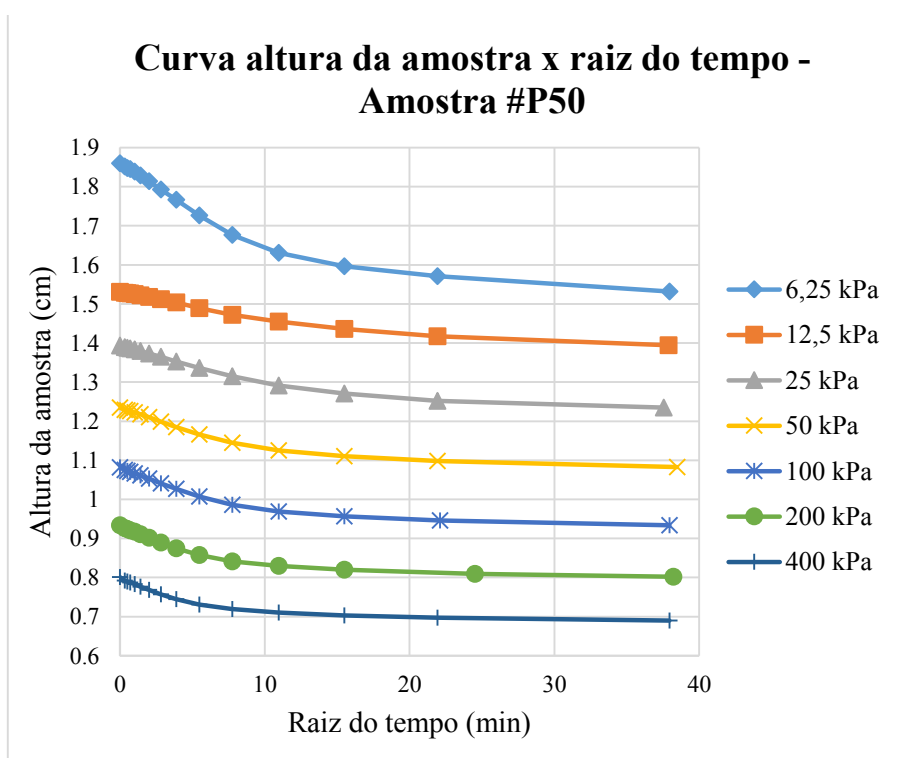


Figura A.12. Curvas altura da amostra versus raiz do tempo, amostra #P50.

APÊNDICE B – Curvas altura da amostra versus log do tempo

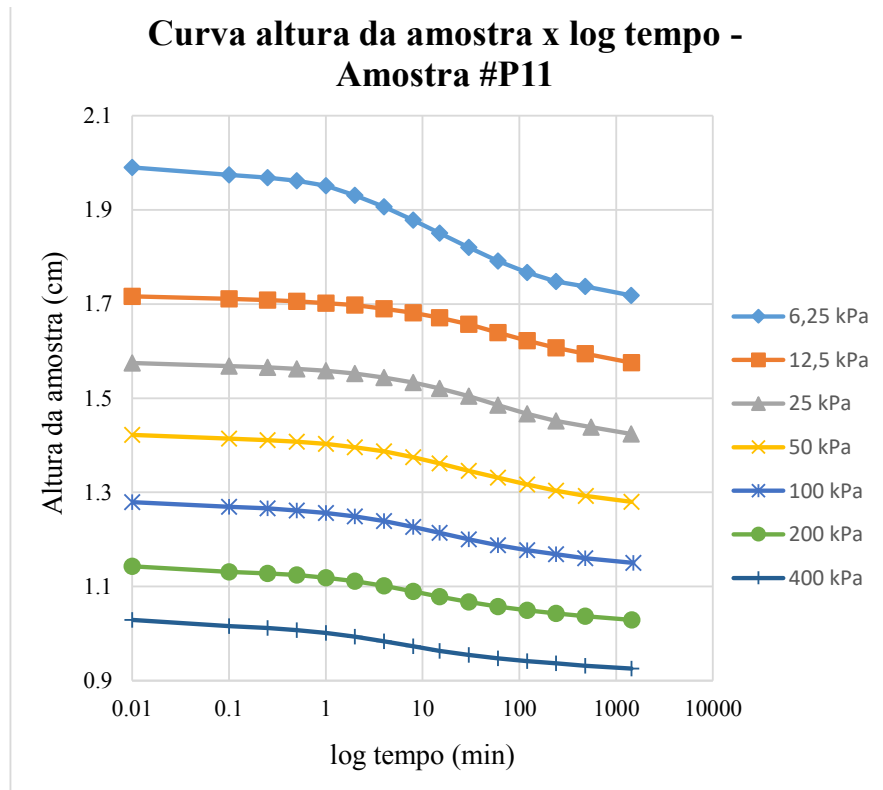


Figura B.1. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P11.

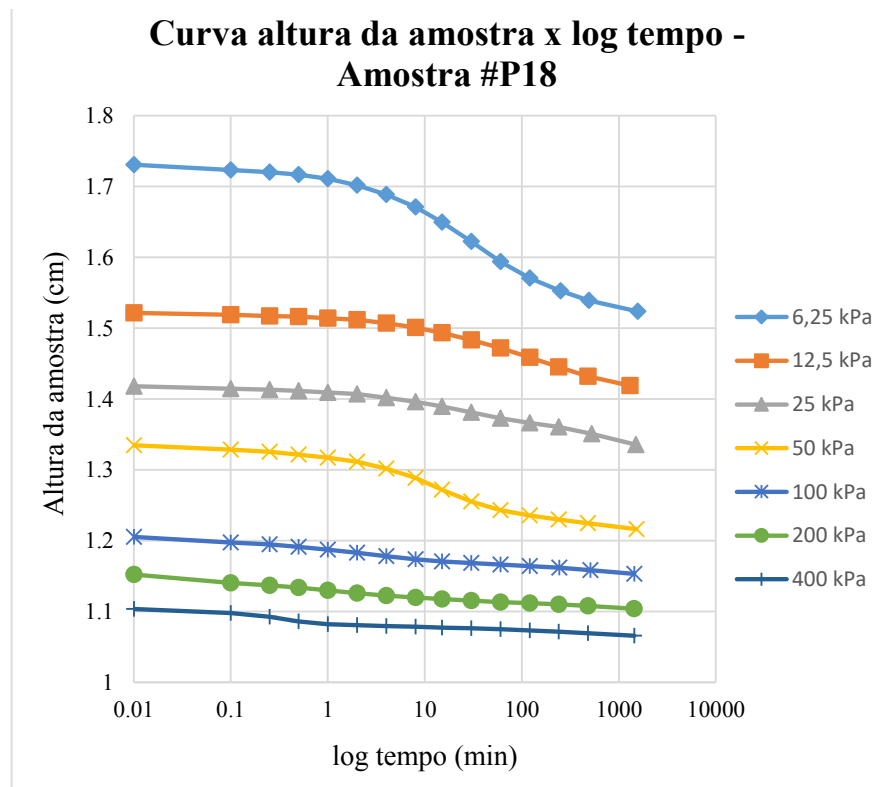


Figura B.2. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P18.

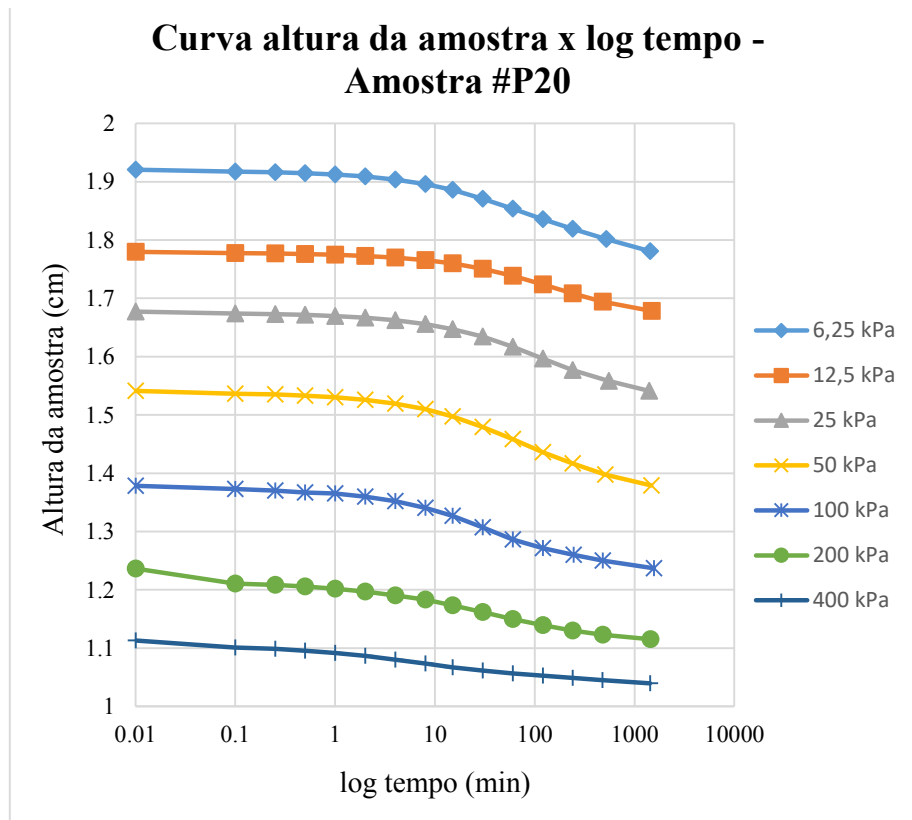


Figura B.3. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P20.

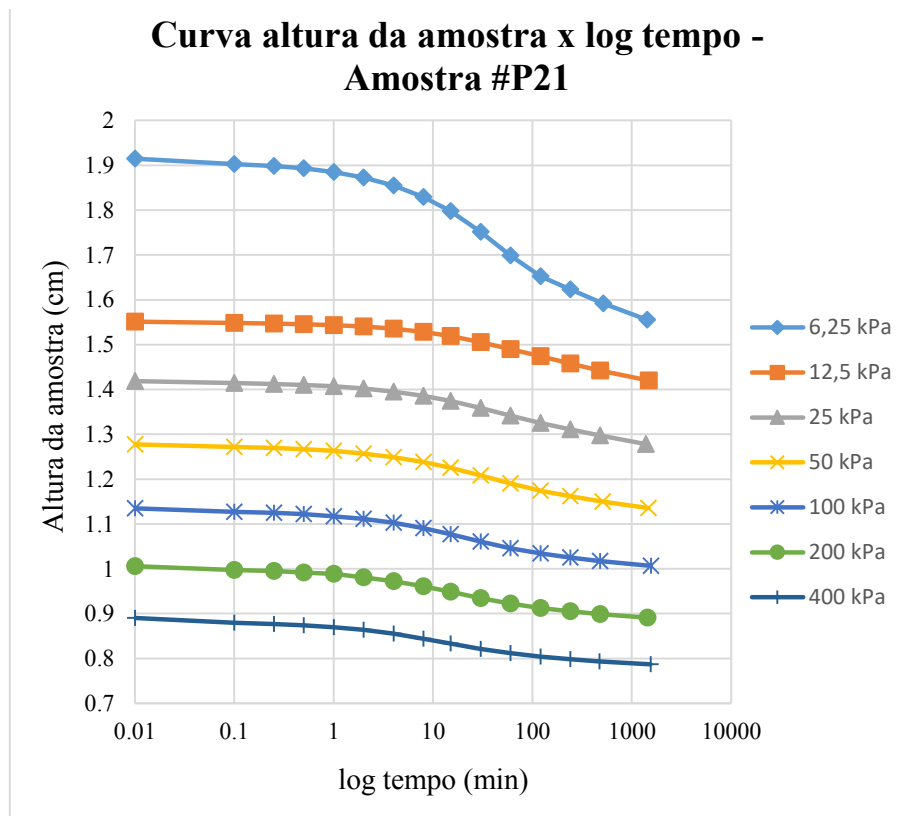


Figura B.4. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P21.

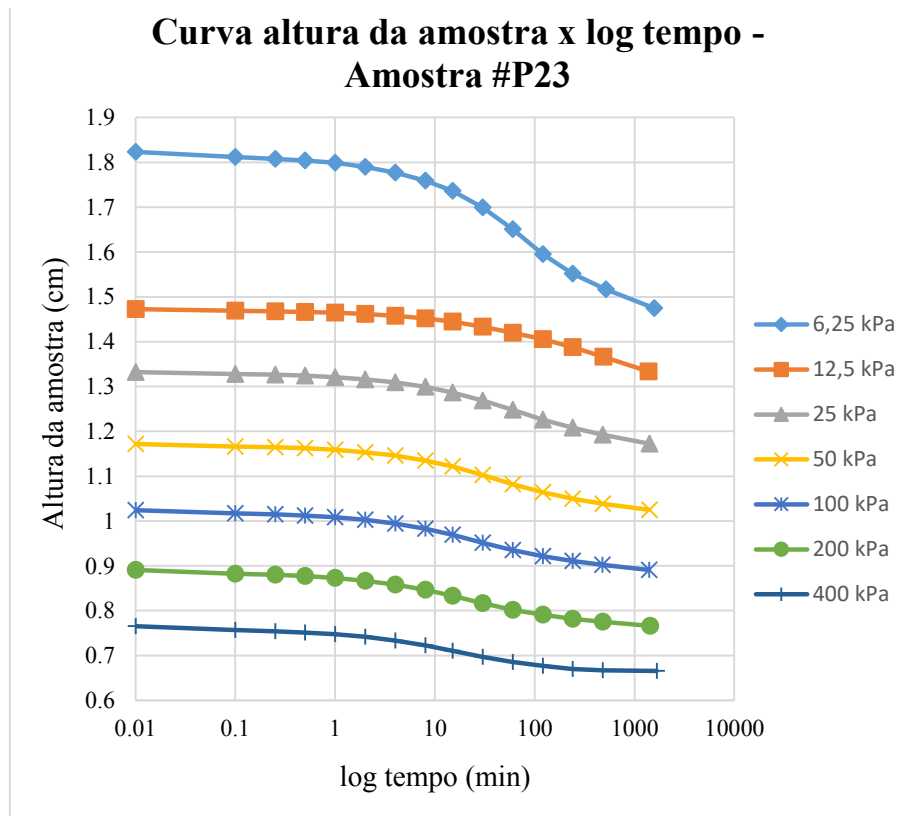


Figura B.5. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P23.

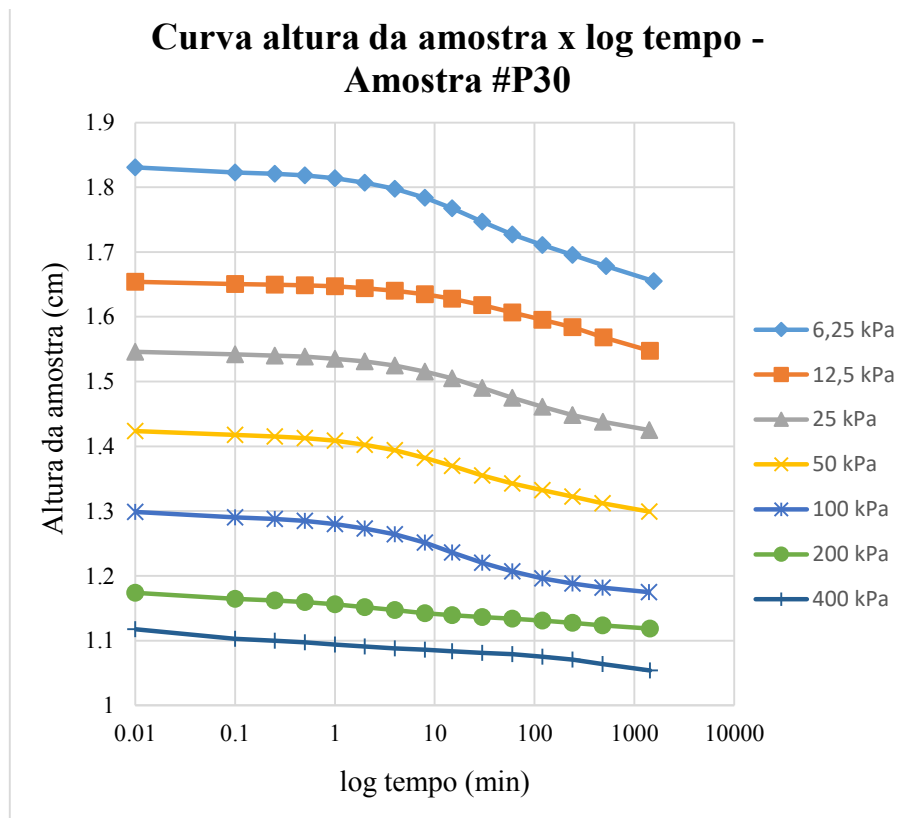


Figura B.6. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P30.

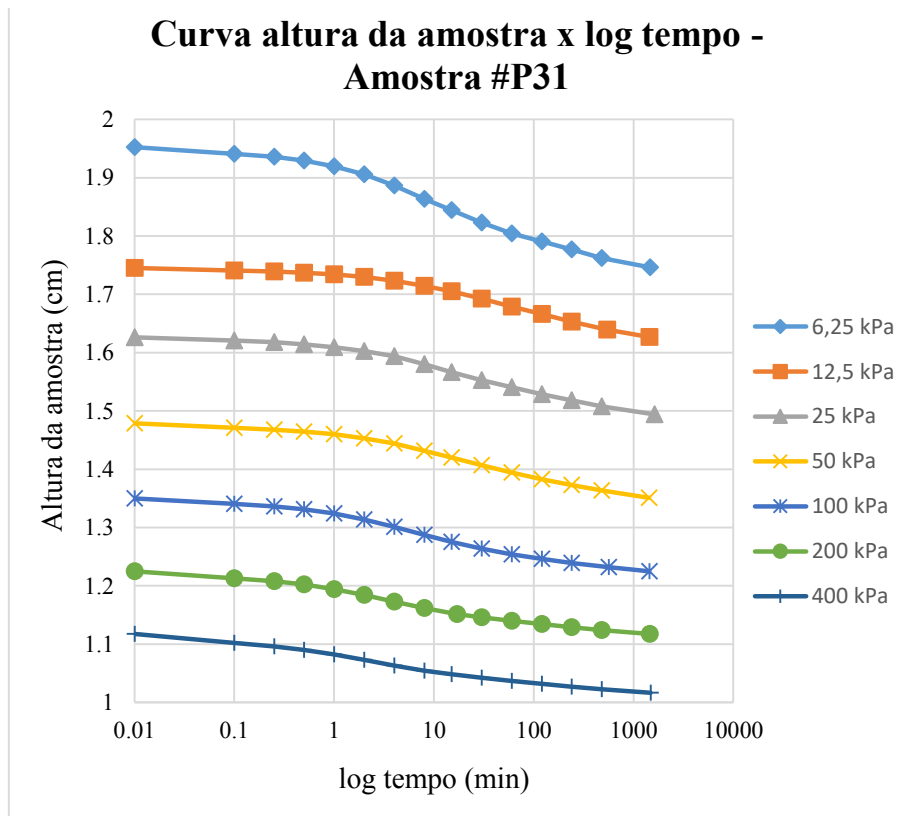


Figura B.7. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P31.

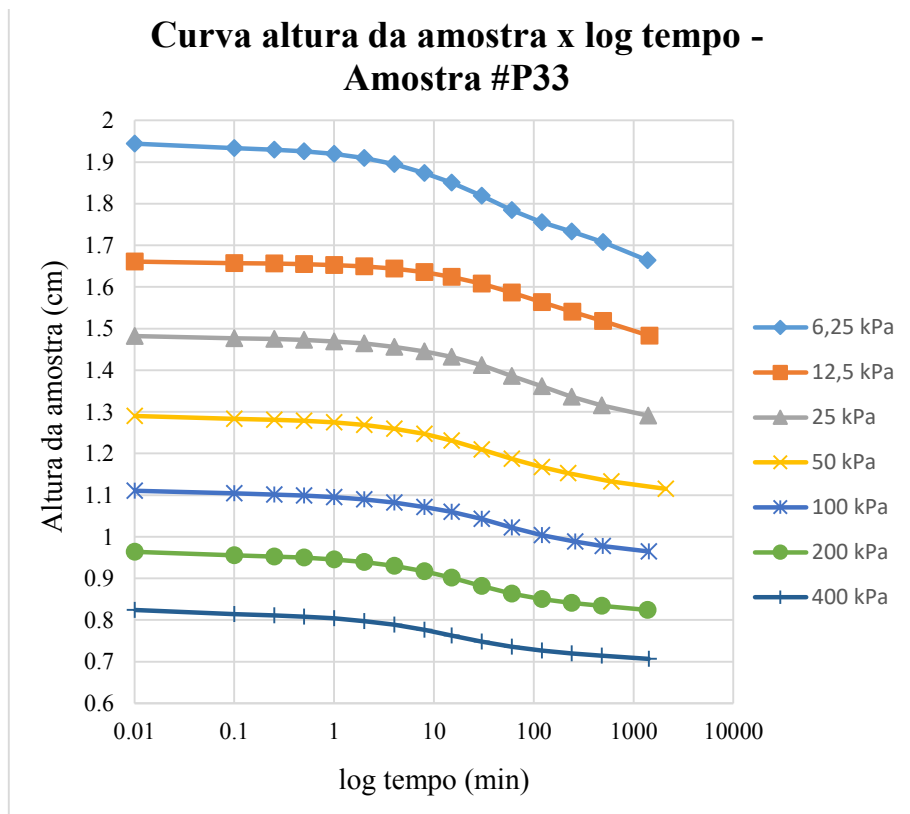


Figura B.8. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P33.

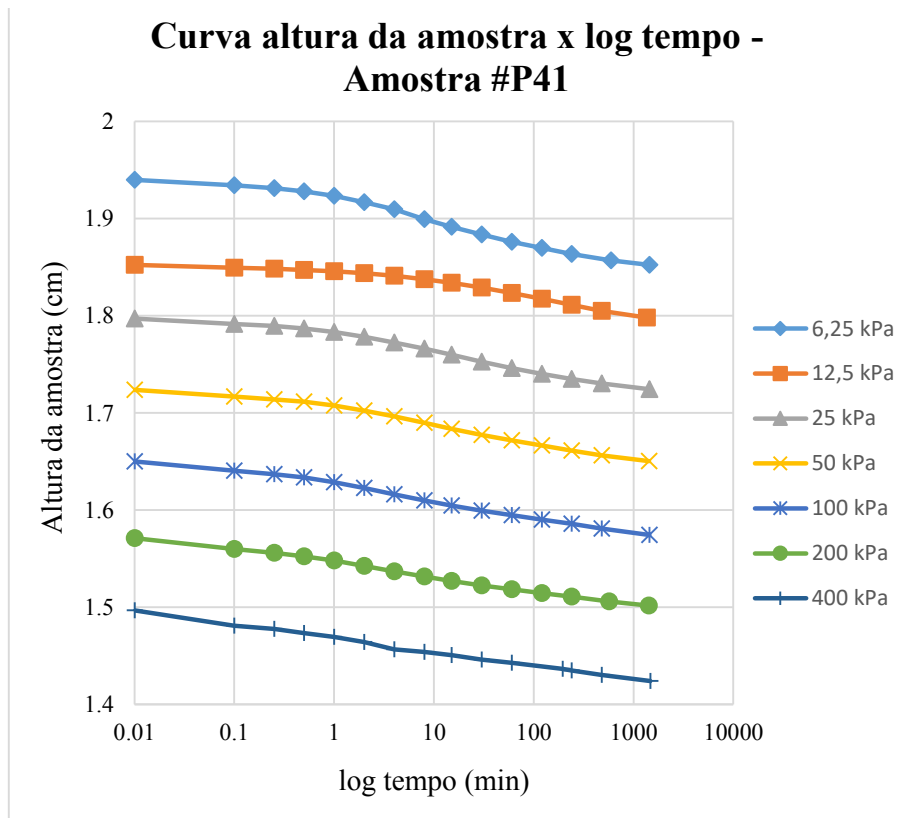


Figura B.9. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P41.

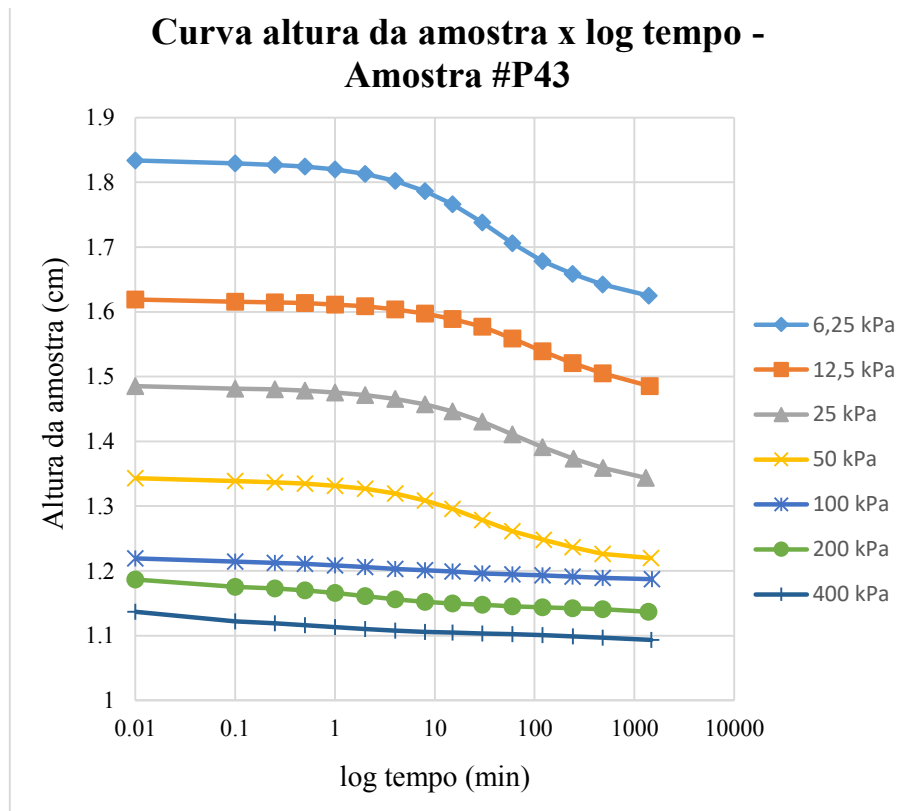


Figura B.10. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P43.

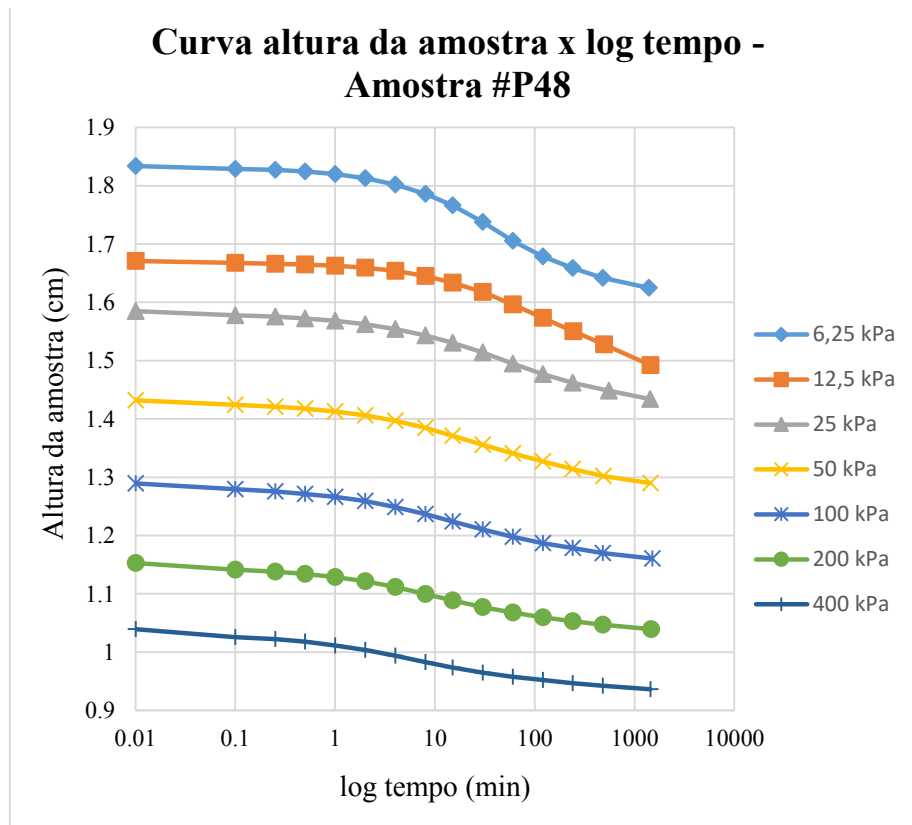


Figura B.11. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P48.

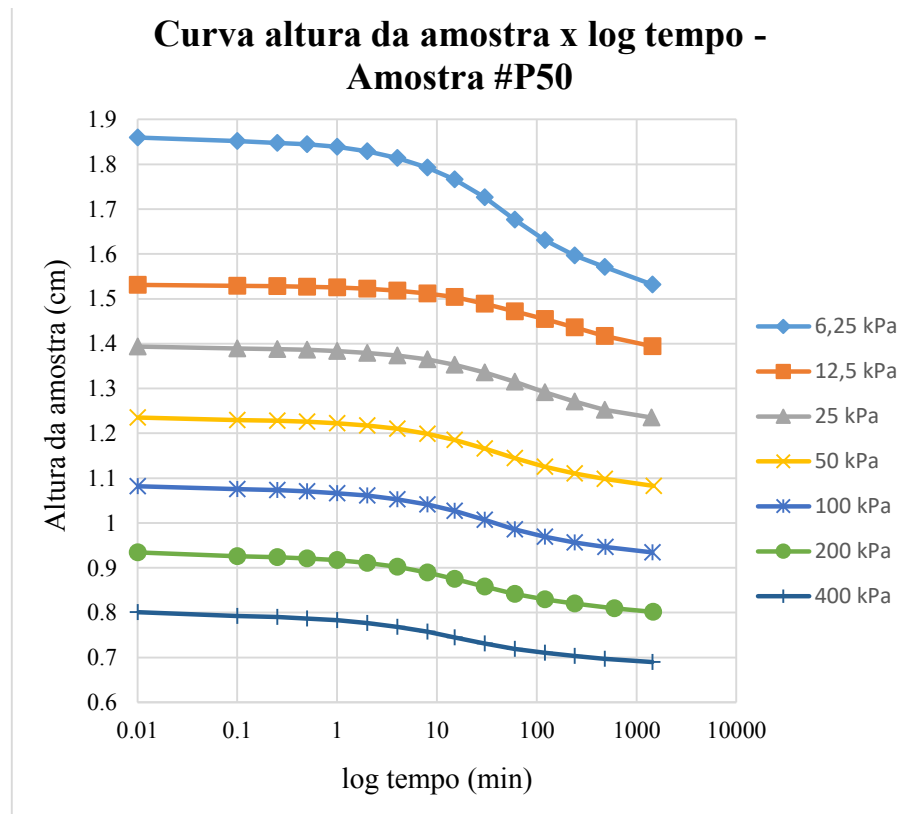


Figura B.12. Curvas altura da amostra versus log do tempo, amostra #P50.

APÊNDICE C – Curvas tensão versus índice de vazios

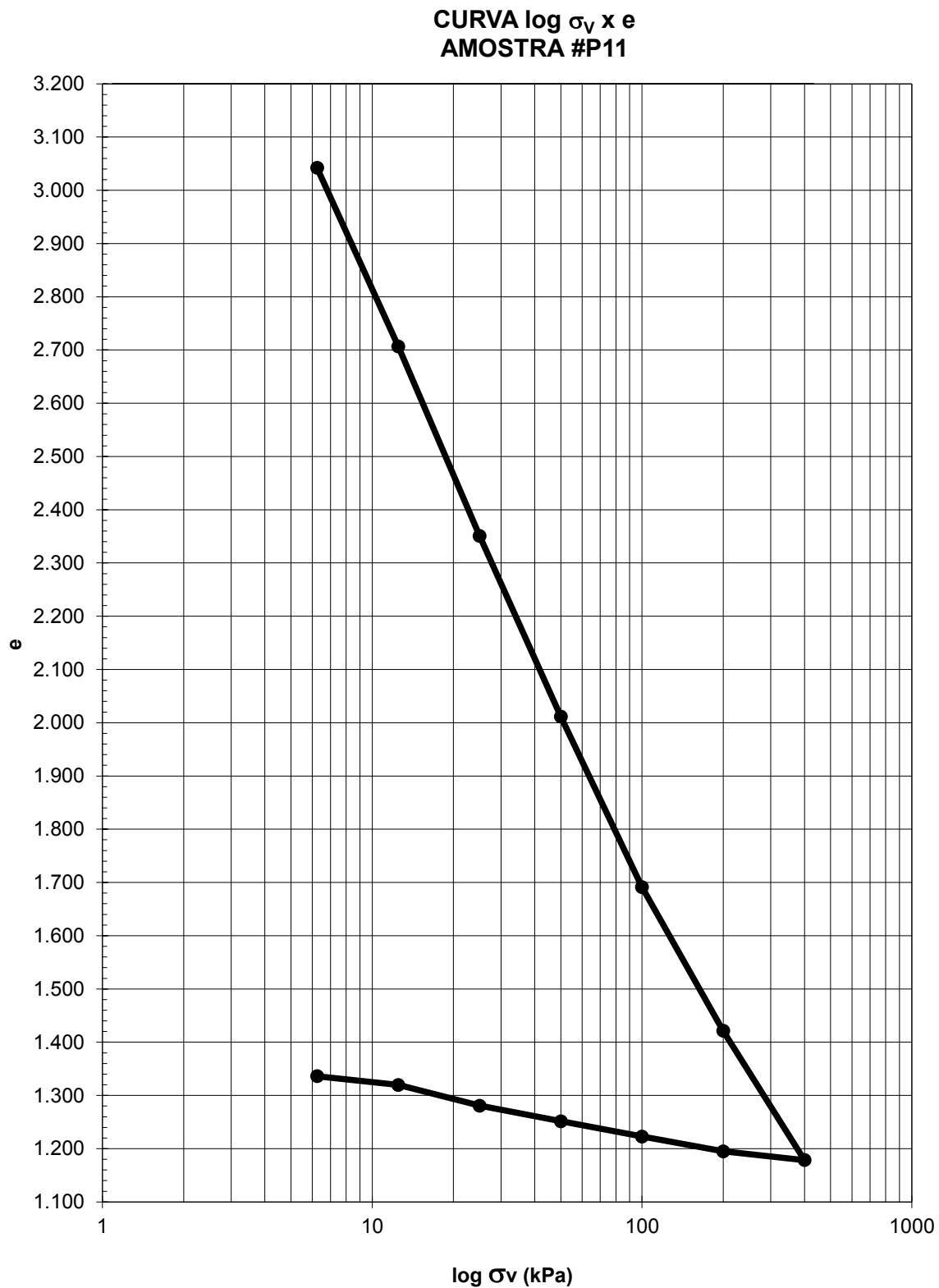


Figura C.1. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P11.

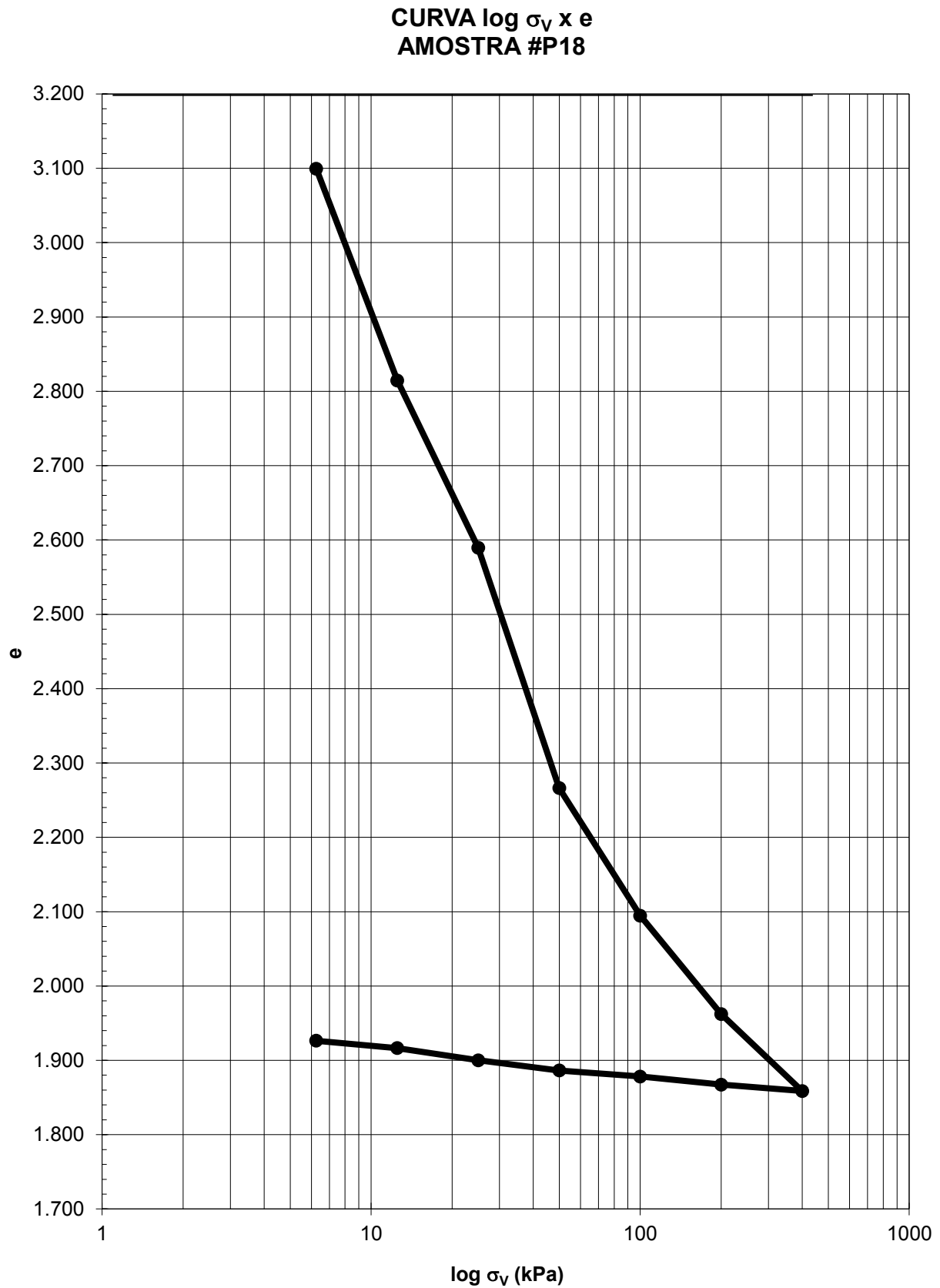


Figura C.2. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P18.

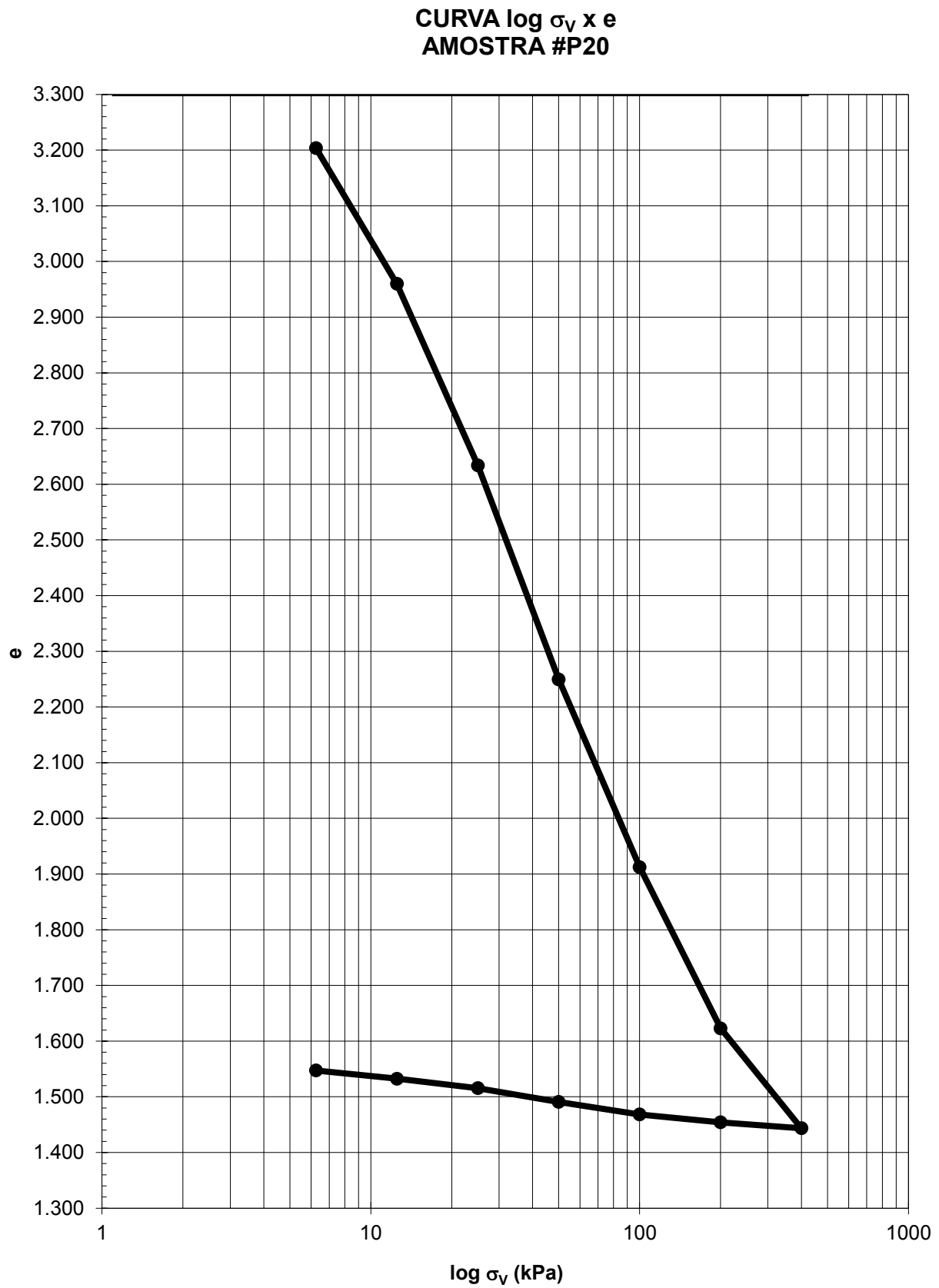


Figura C.3. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P20.

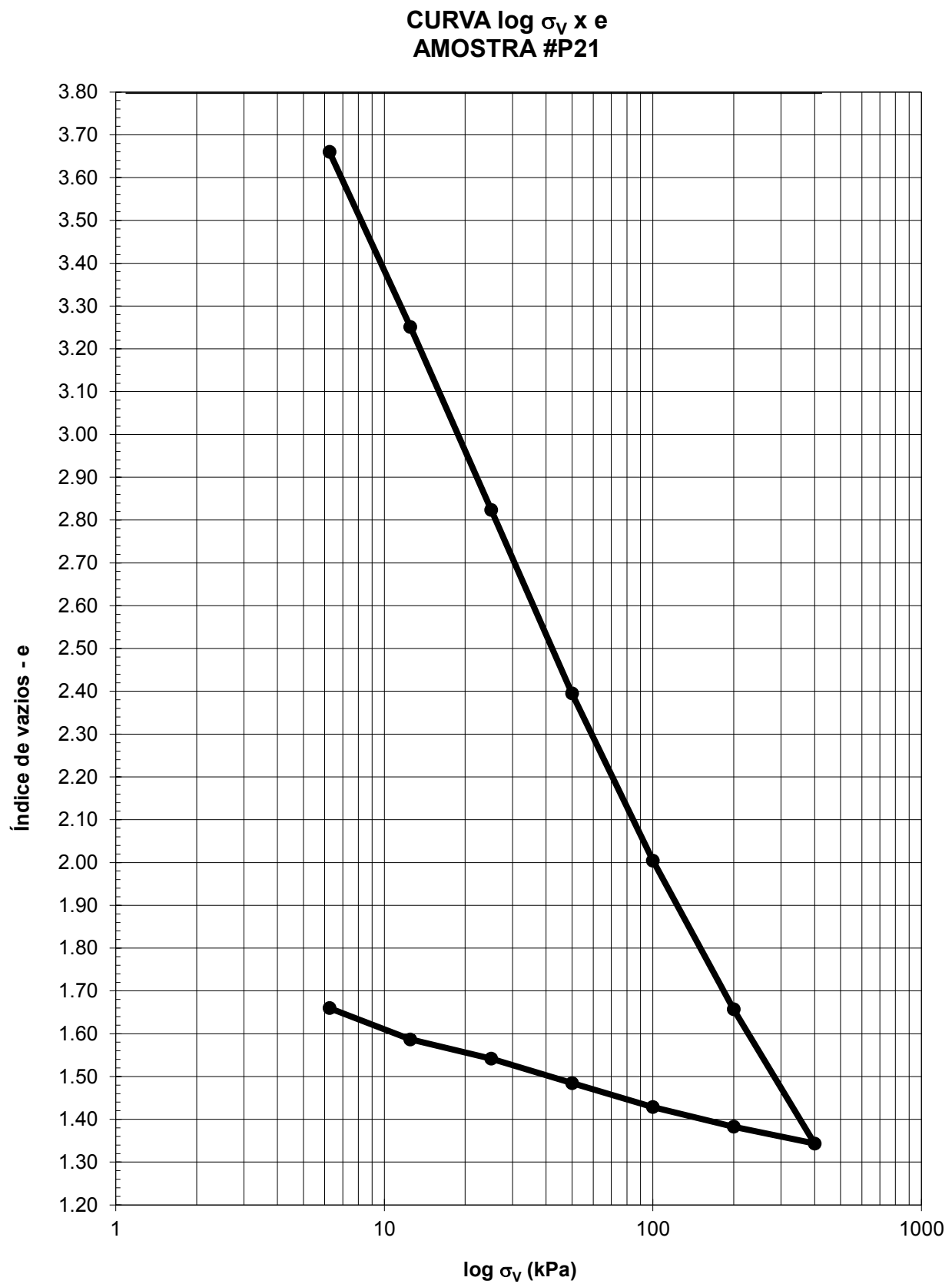


Figura C.4. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P21.

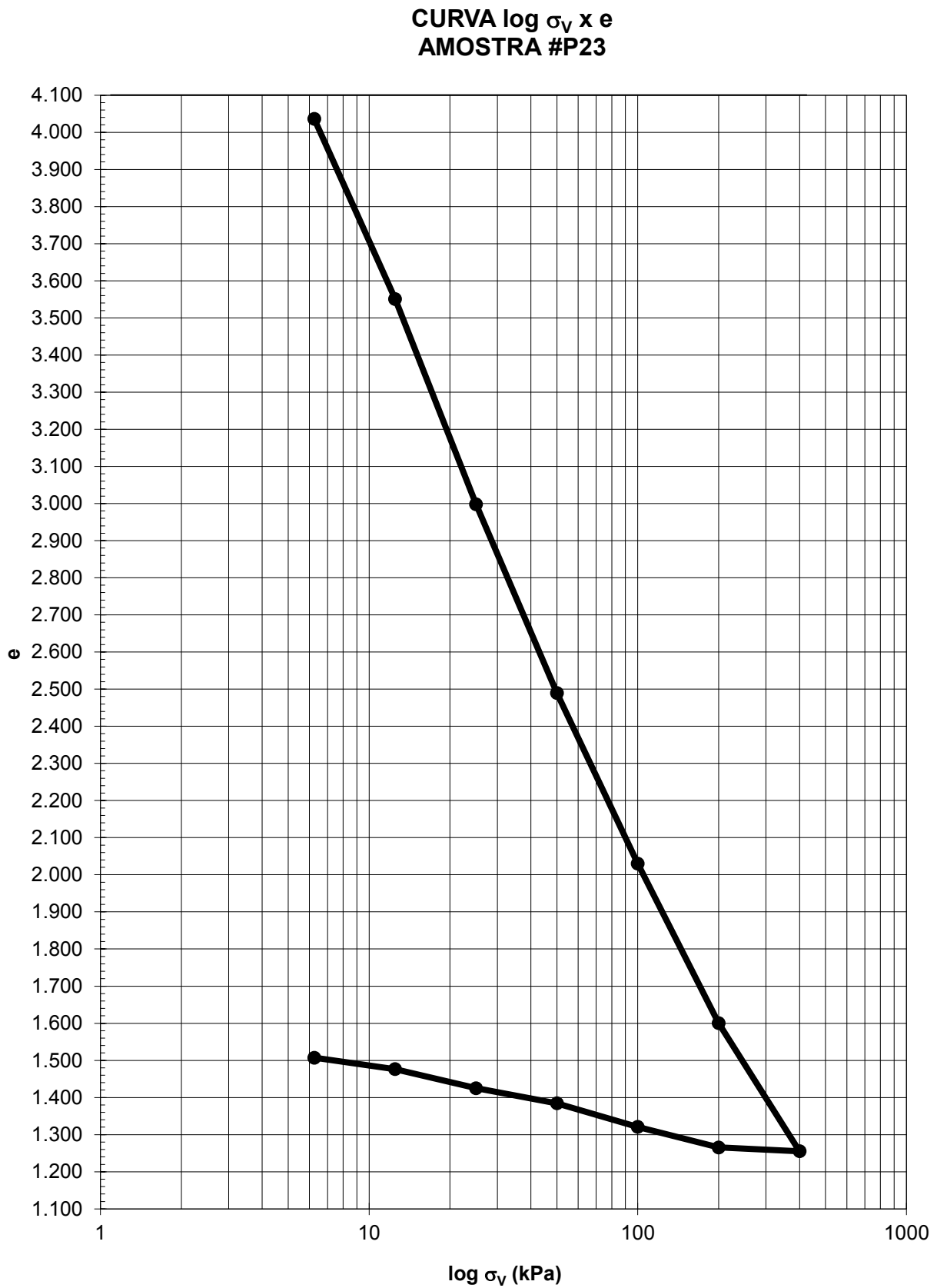


Figura C.5. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P23.

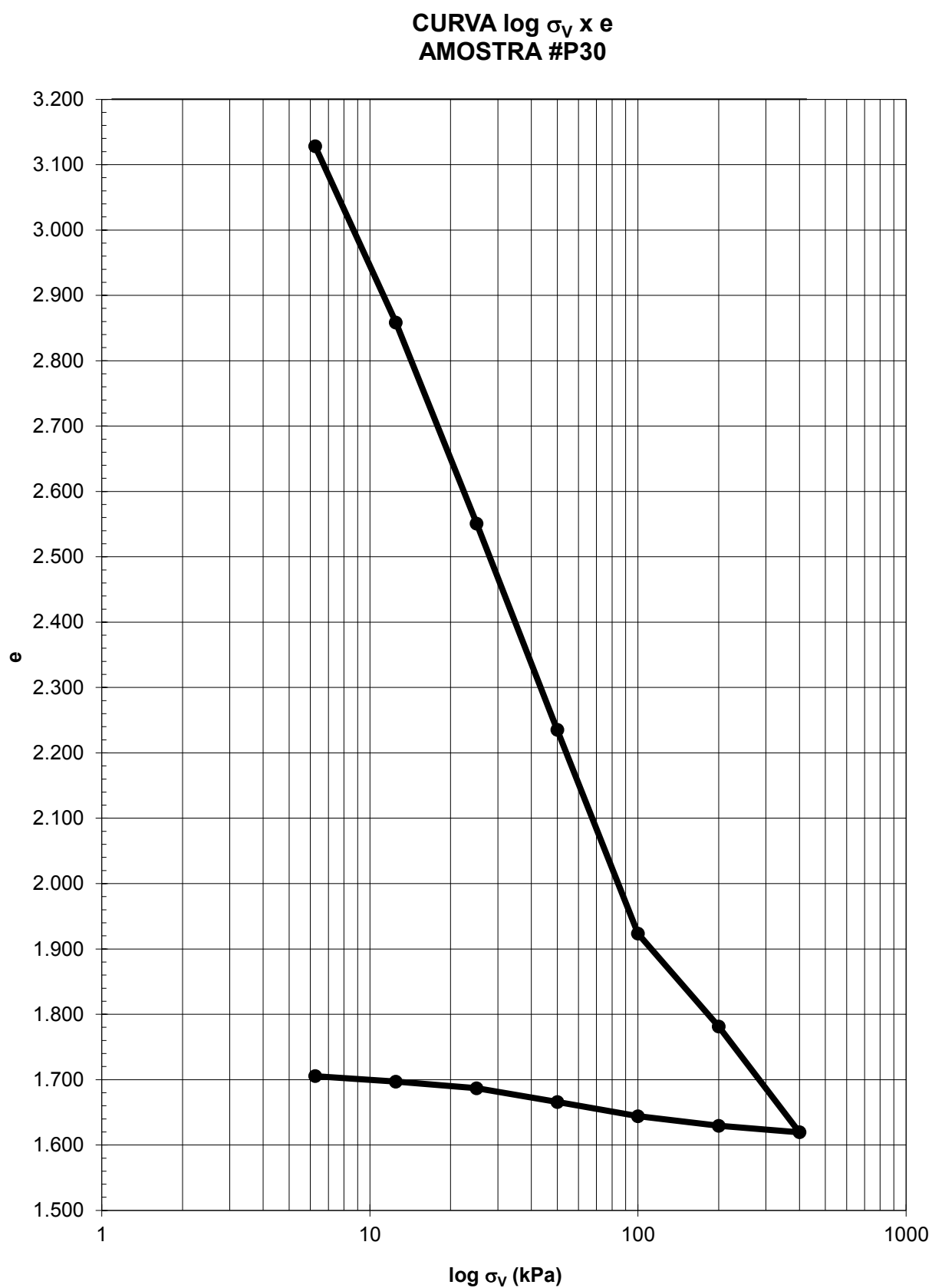


Figura C.6. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P30.

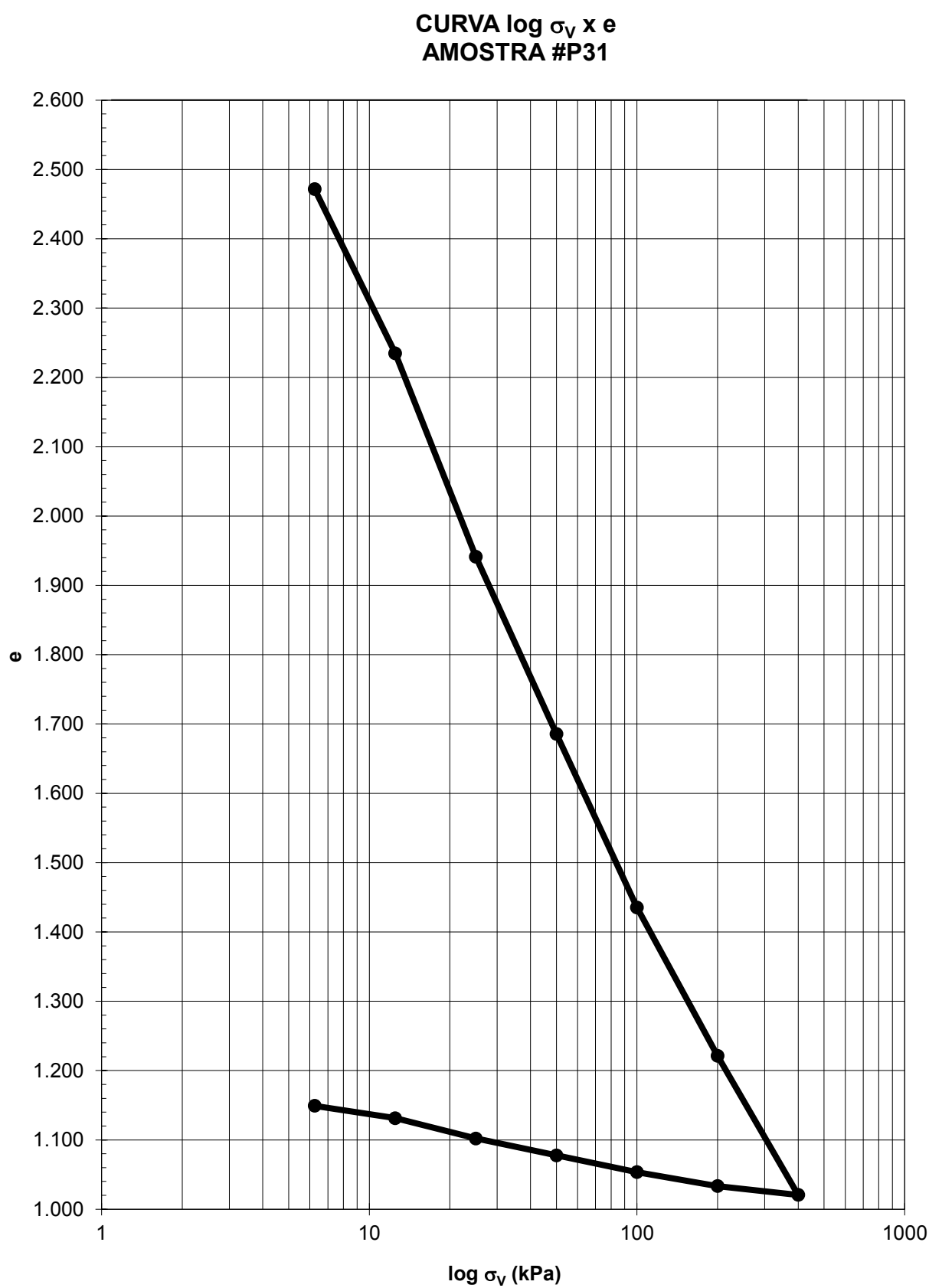


Figura C.7. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P31.

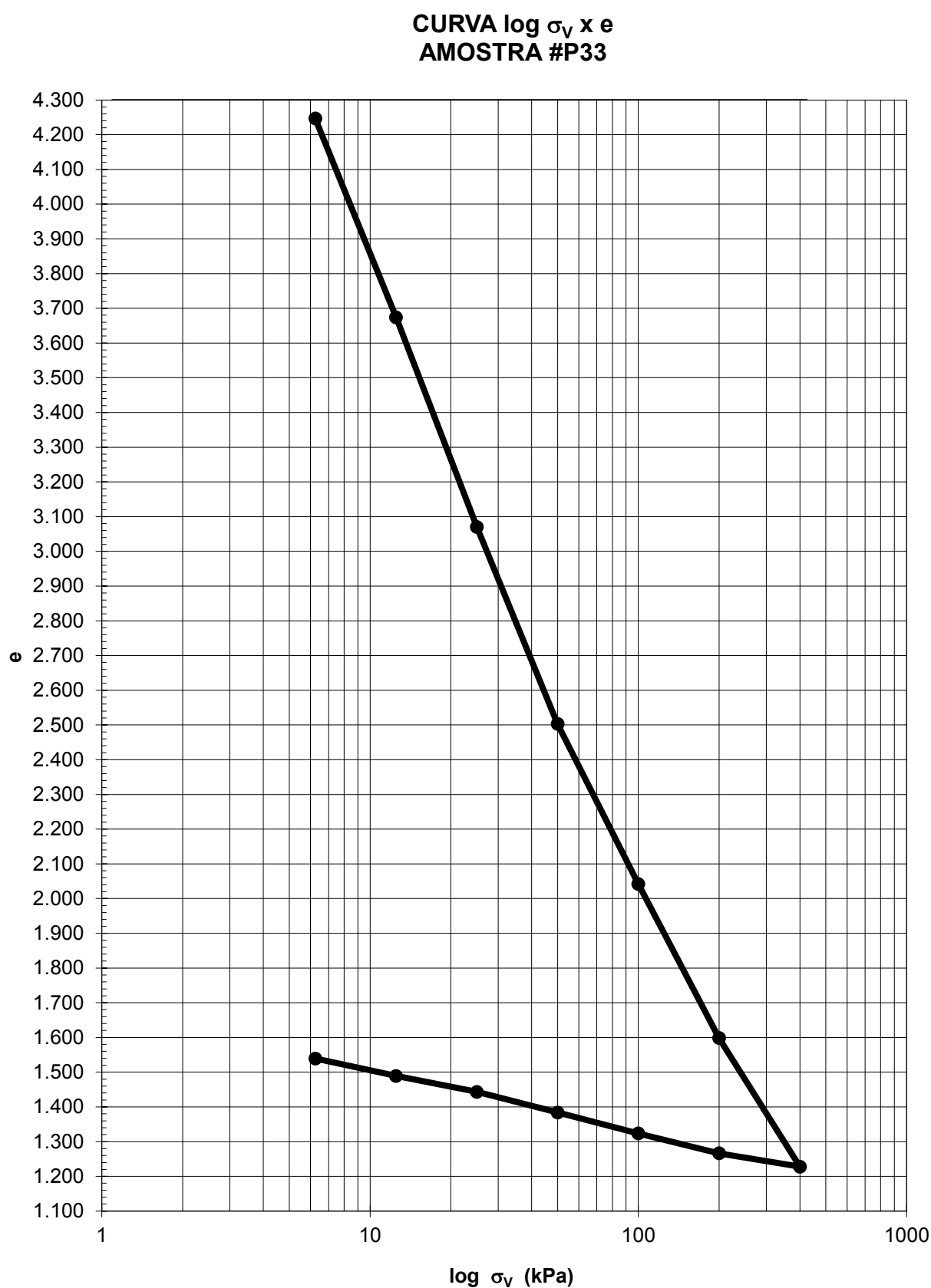


Figura C.8. Curva $\log$ da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P33.

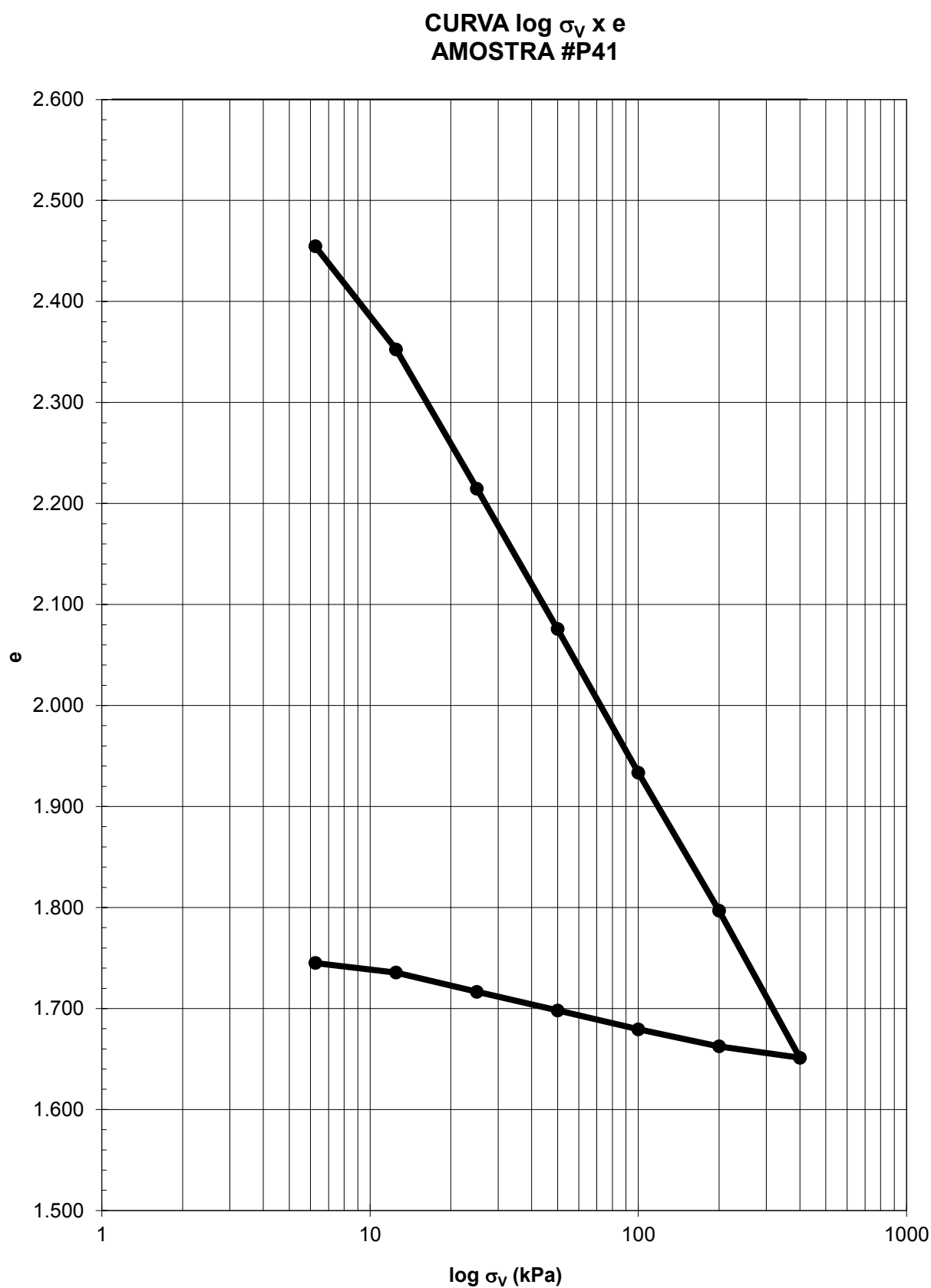


Figura C.9. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P41.

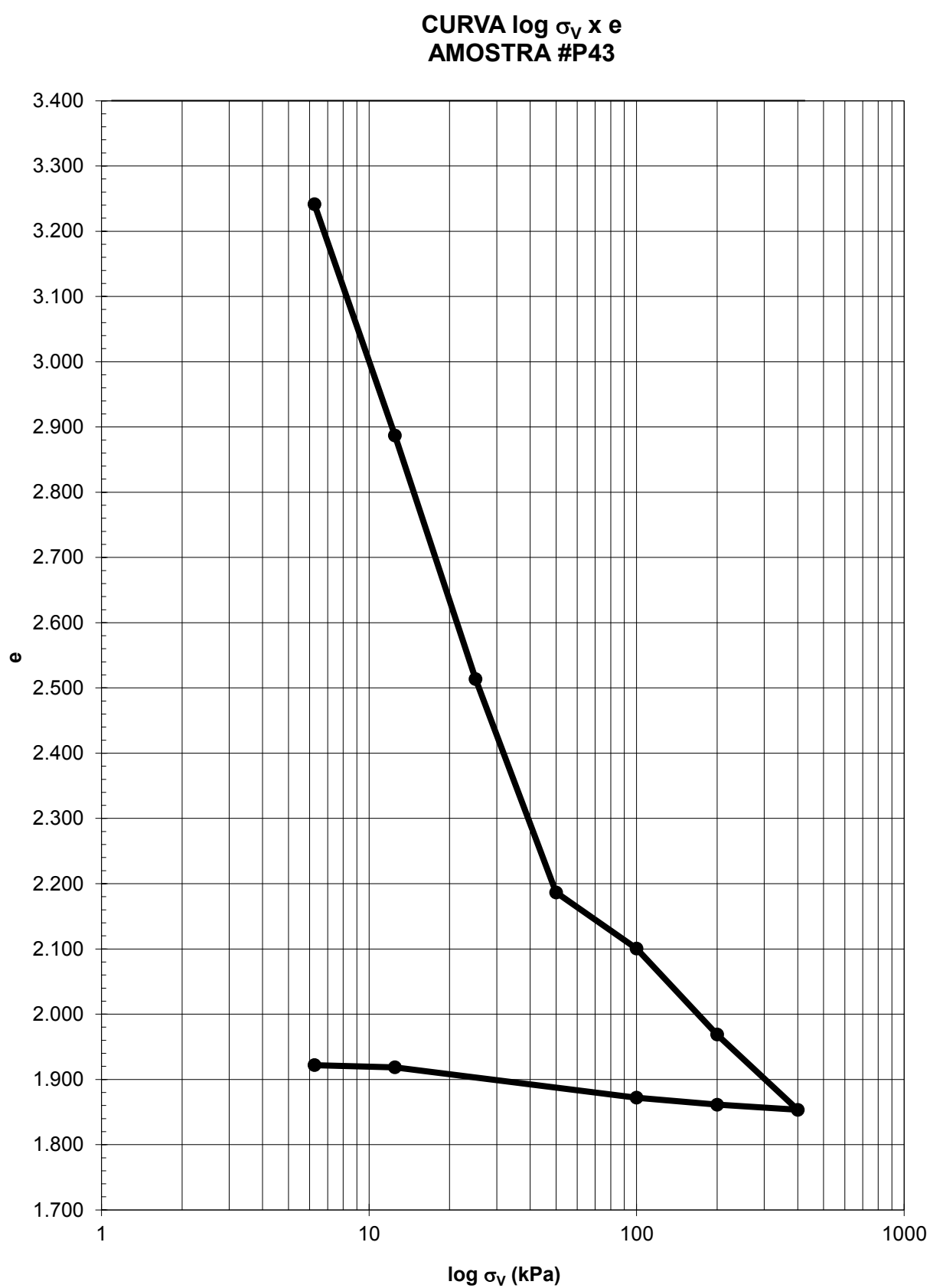


Figura C.10. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P43.

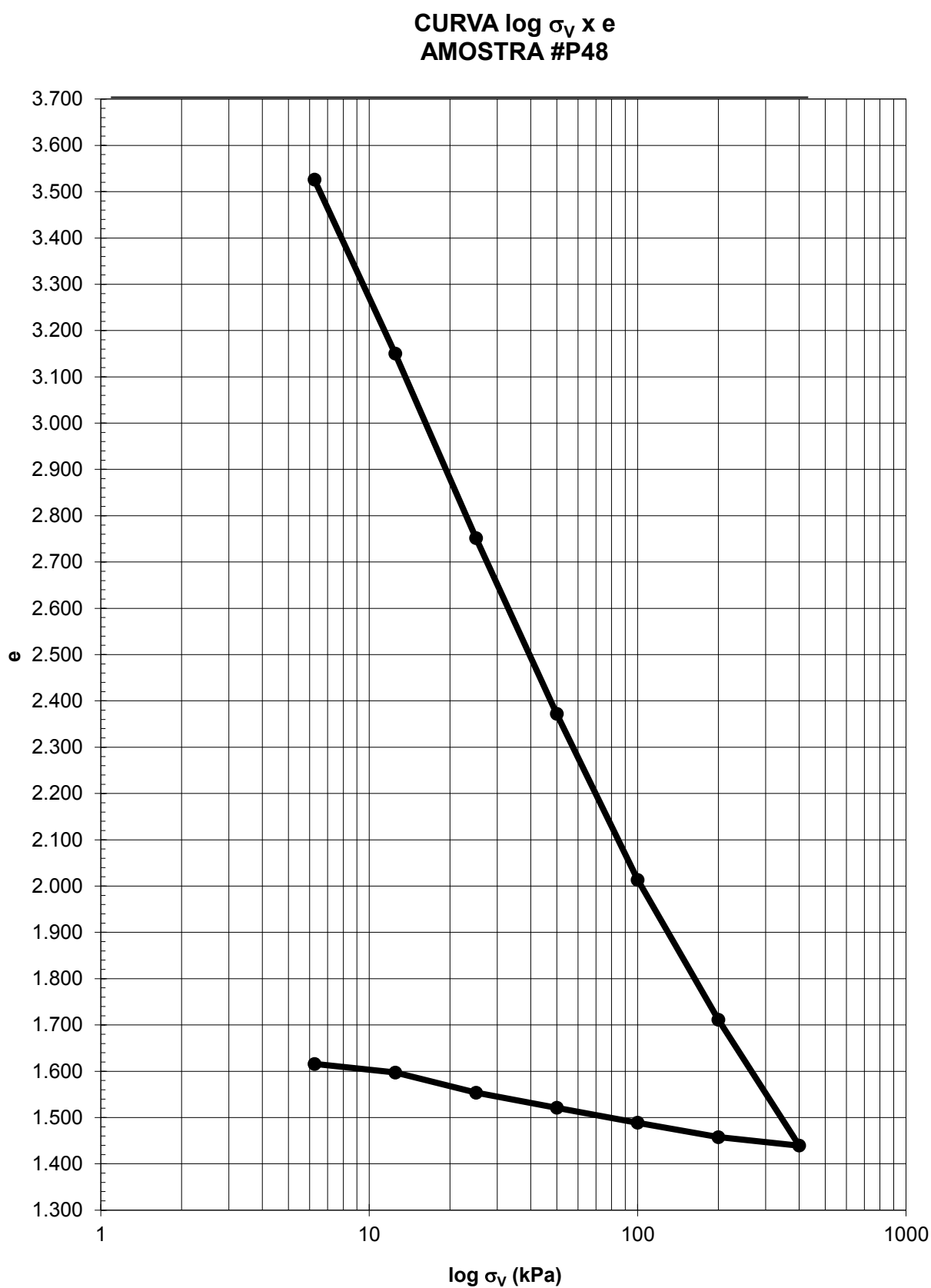


Figura C.11. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P48.

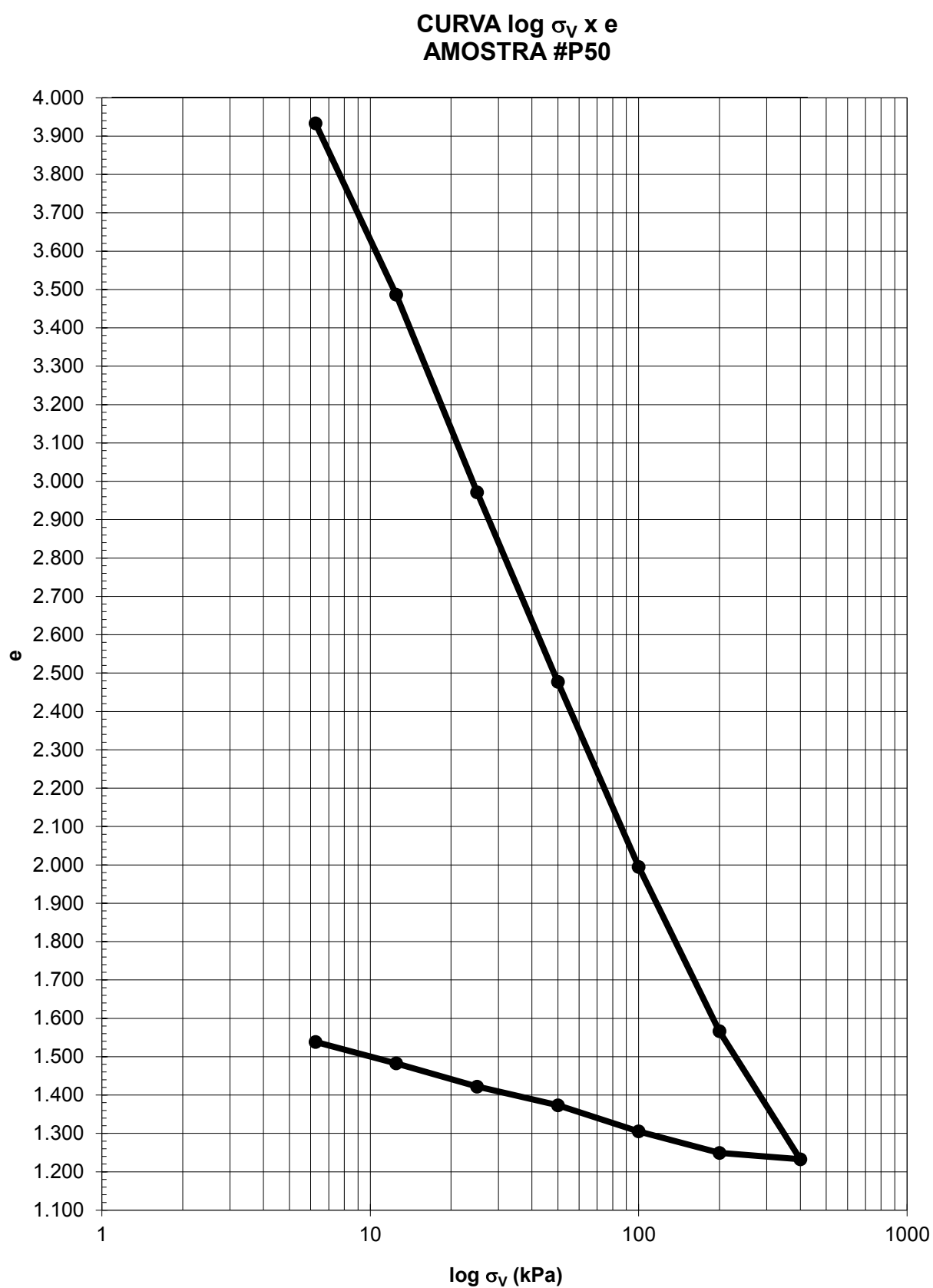


Figura C.12. Curva log da tensão vertical versus índice de vazios resultante do ensaio de adensamento oedométrico, amostra #P50.