Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Leidi Viviana Pérez Amaya

Avaliação de diferentes metodologias para reconstrução da curva de compressão oedométrica

Rio de Janeiro
2017

Leidi Viviana Pérez Amaya

Avaliação de diferentes metodologias para reconstrução da curva de compressão oedométrica

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadores: Profª. Drª. Denise Maria Soares Gerscovich

Prof. Dr. Fernando Marques

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

A479 Amaya, Leidi Viviana Pérez.
Avaliação de diferentes metodologias para reconstrução da curva de compressão oedométrica / Leidi Viviana Pérez Amaya. – 2017.
127f.

Orientadores: Denise Maria Soares Gerscovih e Fernando Marques.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Solos argilosos - Teses. 3. Solos - Compactação - Teses. I. Gerscovich, Denise Maria Soares. II. Marques, Fernando. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 624.131

Bibliotecária: Júlia Vieira CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

_____ _____

Assinatura Data

Leidi Viviana Perez Amaya

Avaliação de diferentes metodologias para reconstrução da curva de compressão oedométrica

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 01 de setembro de 2017.

Banca Examinadora:

_____

Profª. Drª. Denise Maria Soares Gerscovich (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Prof. Dr. Fernando Marques (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Prof. Dr. Marcus Peigas Pacheco
Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Profª. Drª. Bernadete Ragoni Danziger
Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Prof. Dr. Ian Schumann Marques Martins
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - COPPE

_____

Eng. Raphael Felipe Carneiro MSc
Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro

2017

DEDICATÓRIA

A Deus por ter-me falado no momento certo e me dar a força para continuar cada dia.

A minha Mãe e meu Pai por tanto amor. A minha famila linda.

E a todas essas pessoas que não desistem até conseguir realizar seus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus

Obrigada por me dar o privilégio de viver na sua graça, pelas muitas vezes que escutei sua voz me incentivando a continuar e por abrir muitas janelas quando portas eram fechadas, certamente hoje me tornei mestre porque ter você comigo.

À minha família na Colômbia

Minha mãe Celia Maria Amaya, meu pai Álvaro Perez, meus irmãos Iader Perez Romero, Yuleine Pérez Amaya, Maria Fernanda Perez Amaya, Jose Álvaro Pérez Amaya, por serem meu apoio e incentivo em todo momento. Meus sobrinhos Juan Camilo Pérez, Gabriela Pérez, Sergio David Solano e Isabela Solano por me darem tantas alegrias, vocês enchem meu coração do mais puro amor.

Eu amo muito vocês familia. Obrigada, são a melhor família do mundo e saibam que me tornei o que sou por ter recebido o mais puro amor com vocês. Sempre serei grata com vocês por terem me apoiado neste sonho.

Minhas avós Ana Teresa e Maria Gregória por cada conselho que me deram para continuar meus estudos e cada abraço cheio de amor sempre que vou visitá-las.

Meus tios, minhas tias, primos, primas e meu cunhado Danfor por sempre me darem uma mão nos momentos difíceis.

Meu anjo Rolando Pérez Argote, pelo amor ao meu pai, pela ajuda nos meus estudos e pela alegria que sempre me passou com cada abraço.

Eu amo vocês. Obrigada.

À minha família no Rio de Janeiro

Às minhas amigas queridas Soraida e Carolina, vocês sabem que não minto quando digo que são os anjos que Deus pôs nesta terra para mim. Obrigada pela paciência, amor e dedicação nos momentos que mais precisei. Amo vocês.

A Fabiana Fonseca, por me ajudar a ver o mundo de outro jeito e me tornar uma pessoa melhor, pela paciência e enorme carinho neste tempo. Obrigada Fabiana.

A minha amiga Rocio, você faz minha vida tão alegre e tranquila. Sou muito grata com a vida por ter você comigo. Obrigada mesmo amiga. Amo você.

Vocês sempre vão morar no meu coração. Sempre.

A meu amigo William Mendez. Um grande e verdadeiro amigo. Obrigada pelos cuidados, pelos conselhos, pelas brincadeiras, uma que outra briga e pelo apoio que sempre me deu. Eu admiro muito você e sou muito grata por ter dividido este sonho com você.

A Dalma Cerro e Natália Tavares, por tantos conselhos e apoio nos momentos mais difíceis e pelas risadas nos momentos mais alegres. Obrigada minhas amigas, saibam que sempre estarei grata com vocês.

A meus amigos de casa, Breno, Kamila, Leonardo e Júlia. Cada dia com vocês aqui certamente foi mais fácil. Obrigada por fazerem meu dia a dia mais leve. São os melhores parceiros que eu já tive. Obrigada Cluster.

A Yara Fátima por me brindar um lar e pelos muitos conselhos. Aprendi muito da senhora.

A cada pessoa dos diferentes países que o Rio de Janeiro me permitiu conhecer, obrigada por terem deixado em mim um pouco mais de aprendizado e da sua cultura.

Obrigada Rio de Janeiro, Obrigada Brasil por se tornar minha segunda Casa.

À UERJ e meus orientadores

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro, por existir e resistir.

À minha querida Professora e Orientadora Denise Maria Gersovich Soares.

Obrigada pela confiança que me deu desde minha chegada no mestrado, pelos conselhos, pelo carinho nas aulas e pela excelente orientação cheia de estímulos para me tornar mestre. Obrigada pela sua amizade neste tempo. Saiba que eu admiro muito e sou muito afortunada de ter recebido de você aulas e melhor orientação.

Ao meu orientador Fernando Marques, pelo tempo que dedicou para revisar meu trabalho, pela sugestões e correções, por sempre me incentivar a conseguir meu objetivo.

À minha querida Professora Bernadete Ragoni Dazinger. Obrigada pela paciência e infinito amor que você mostra para cada pessoa que passa por suas aulas. Obrigada pela confiança que e deu desde minha chegada na UERJ mas sobre tudo pelo carinho que recebi.

A Raphael Carneiro. Você certamente merece mais do que parágrafo, mas como só tenho um aproveito para começar dizendo, Muito Obrigada pela melhor desorientação que você poderia ter feito na sua vida. Você chamou de desorientação a um trabalho impecável e eu me sinto muito honrada de ter trabalhado junto com você. Aprendi muito. Obrigada pelas muitas vezes que por Whats App você tirou muitas das minhas dúvidas sem importar a hora ou que eu tivesse perguntado antes a mesma coisa, pelas reuniões cada quinta feira na UERJ, por entender meu portunhol e se importar com meu aprendizado. Obrigada mesmo, porque sempre obtive uma resposta de você mas sobre todo Obrigada pela confiança que depositou em mim e pela sua amizade. Saiba que sempre vou estar agradecida com você e sinto muito orgulho de ser sua primeira orientada.

Aos professores Marcus Pacheco, Armando Prestes e Ana Cristina Castro pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula, durante o mestrado.

À equipe do LMS, Professor Rogerio Feijó, Rai, Antonio, minhas amigas Guinevere e Karine e meu amigo Felipe. Obrigada pela acolhida, pelos aniversários, comemorações e sobretudo pelo aprendizado nesta área tão importante para mim.

À Helena, que desde que iniciei no mestrado me deu mais do que uma mão amiga. Obrigada por sempre tentar me ajudar e pela muitas certificações que teve que fazer para mim. Você é maravilhosa.

Aos Amigos e colegas de mestrado

Vivi, sou muito grata com a vida por ter encontrado uma amiga como você, Obrigada pela paciência, pela ajuda e pela preocupação que sempre teve comigo. Pelo tempo que me dedicou com conselhos maravilhoso, pelo incentivo a não desistir e pela sua amizade. Voce é uma pessoa increivel e eu tive a sorte naquele dia de estar do seu lado recebendo aquela nota de Mecanica de solos, pois esse dia começou a nossa amizade. Obrigada Vivian.

Guilherme, meu filhote. Obrigada por ser o que você é, por me perdoar não ter aceitado você na minha equipe de laboratório, pelas muitas horas de estudo cheias de risadas, aprendizado e bolo de banana. Obrigada pela paciência, confiança, cuidado, por me permitir virar botafoguense e compartilhar tempo no Nilton Santos e sobretudo por sua amizade maravilosa. Sinto muito orgulho de ser sua amiga, sinto muito orgulho de você e ser a colombiana que você mais ama.

Rachel, obrigada minha versada e erudita. Das aulas passamos aos cafés e convertermos nossos papos em grandes conversas que nos ensinaram tanto neste caminho. Muito obrigada pelas vezes que me deu forças para seguir neste caminho, porque você é uma dessas almas lindas que Deus pus no meu caminho. Sinto orgulho da nossa caminhada, sinto orgulho de nossa amizade e do que hoje nos somos.

Caio, muito obrigada pelos papos em português, espanhol e inglês. Pelas risadas e pelos ensinamentos nas aulas. Sentirei falta do meu colega de teatro e de meu amigo que me liga para aprender espanhol.

Vocês mais que colegas, vocês se tornaram meus amigos para sempre.

Aos meus colegas de mestrado, pela acolhida linda que me deram ao chegar à nossa sala de aulas.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

Aos Amigos na Colômbia

Obrigada por acreditarem em mim. Embora não estejam citados aqui, já que são muitos, sei que cada um de vocês sabe o quanto agradecida estou com vocês.

À CAPES

Por me ter apoiado financeiramente não só uma se não duas vezes no meu mestrado.

Em 2014 comecei um de meus maiores sonhos; seis meses depois acabou.
Em 2017 você está lendo a prova de que naquele momento não foi o final.
Às vezes os finais podem-se tornar num melhor começo.
Leidi Pérez Amaya

RESUMO

AMAYA , Leidi V. P. *Avaliação de diferentes metodologias para reconstrução da curva de compressão oedométrica.* 2017. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

A curva de compressão oedométrica obtida de um corpo de prova de uma argila mole com sensitividade e plasticidade moderadas apresenta, normalmente, algumas características específicas que permitem a determinação de alguns parâmetros, dentre eles os índices de compressão, os quais por sua vez são usados para a estimativa dos recalques induzidos por uma determinada solicitação. No entanto, essas características nem sempre são possíveis se identificar em todas as argilas moles existentes, nomeadamente quando ocorre uma variação considerável em dita curva quando as amostras ou até os mesmos corpos de prova apresentam algum grau de amolgamento. Sabendo-se que nos solos argilosos moles é muito difícil controlar os efeitos do amolgamento e da perturbação das amostras, vêm sendo desenvolvidos estudos que permitam aproveitar os resultados obtidos de ensaios de adensamento laboratoriais para realizar a reconstrução da curva de compressão oedométrica. De estudos já realizados sabe-se que a curva submetida aos efeitos de amolgamento e a curva considerada indeformada tendem a juntar-se numa faixa de valores do índice de vazios e, também, que o trecho de descompressão não apresenta alterações consideráveis quando o corpo de prova encontra-se amolgado. Com base nestas justificativas e considerando uma equação que representa o comportamento em compressão virgem de uma curva foi analisada a aplicabilidade de várias metodologias para a reconstrução da curva de compressão oedométrica. Para a aplicação da equação que representa o trecho de compressão virgem é necessário dispor de dois ou mais pontos de tensão que garantam a interseção das duas curvas possibilitando assim resolver o sistema de equações que surge. A presente dissertação tem como objetivo apresentar vários casos de reconstrução da curva de compressão oedométrica, aproveitando as considerações acima referidas, com base num desenvolvimento matemático. Para isso, considerando que as curvas indeformada e amolgada se unem a partir do ponto de interseção, neste ponto a derivada que seria igual para as duas curvas. Igualando-las, obtém-se uma nova equação, e passa a ser necessária apenas a utilização de dois pontos de tensão. Também é considerada uma nova proposta de estimativa da tensão de pré-adensamento para se conseguir mais um ponto de tensão para a realização do referido ajuste entre as curvas amolgada e indeformada. Assim, e considerando que o trecho de recompressão é considerado como paralelo ao trecho de descompressão procede-se à reconstrução da curva de compressão oedométrica. No presente trabalho pretende-se avaliar a proposta considerando os resultados de vários ensaios laboratoriais de diferentes depósitos de argila mole do Brasil.

Palavras-chave: Argila mole; curva; compressão oedométrica ; reconstrução.

ABSTRACT

AMAYA , Leidi V. P. *Application of different methodologies for reconstruction of the oedometric compression curve.* 2017. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

The oedometric compression curve obtained from a soft clay test specimen with moderate sensitivity and plasticity, usually presents some specific characteristics that allows to use it to determine some parameters, such the compressibility rates, which are used to estimate the settlements induced by a given request. However, it is not always possible to identify these characteristics in every soft clays, especially when there is a considerable variation in the curve when the samples or even the same specimens present some degree of remolding. It is known that in soft clay soils it is very difficult to control the effects of the remolding and the disturbance of the samples, thus studies have been developed to take advantage of the results obtained from laboratory tests for the recreating the oedometric compression curve. From the studies already performed, it is known that the curve subjected to the effects of remolding and the curve considered intact tend to join in a range of values of the void ratio, and also that the decompression range does not present considerable changes when the disturbed sample is remolded. Based on these evidences and considering an equation that represents the behavior in an intact compression curve, it was analyzed the applicability of several methodologies for recreating the oedometric compression curve. In order to apply the equation that represents the intact compression range, it is necessary to have two or more stress points that guarantee the interception of the two curves, thus making it possible to solve the system of equations that arise. The present dissertation aims to present several cases recreating the oedometric compression curve, taking advantage of previously mentioned considerations, based on a mathematical development. For this purpose, considering that the intact and deformed curves are joint in the intercept, at this point the derivative that would be the same for both curves. Then, equalizing both expressions generates a new equation, which requires only two stress points. It is also considered a new proposal for estimating the preconsolidation pressure to obtain another stress point to perform the adjustment between the remolded and intact curves. Thus, considering that the recompression section is considered parallel to the decompression section, the oedomometric compression curve is recreated. In the present work, we evaluate the proposal considering the results from several laboratory tests on different soft clay deposits in Brazil.

Keywords: Soft Clay; Curve; Oedometric Compression; Recreation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de compressibilidade típica de um solo argiloso 30
Figura 2 - Representação do cálculo gráfico dos parâmetros de compressibilidade e dos índices de compressão (Coelho, 2002) 31
Figura 3 - Cálculo da tensão de pré-adensamento pelo Método de Casagrande (Ortigão, 2007) 34
Figura 4 - Cálculo da tensão de pré-adensamento pelo Método de Pacheco Silva (Ortigão, 2007) 35
Figura 5 - Métodos para determinação do coeficiente de adensamento : a) método de Casagrande, b) método de Taylor (Lancellotta, 1995) 36
Figura 6 - Características da curva de compressão oedométrica para argilas de sensitividade e plasticidade moderadas (*apud* Louvise, 2015) 37
Figura 7 - Curva de compressão oedométrica da Argila Sarapui: $(e \times \log \sigma'v)$ 38
Figura 8 - Tipos e qualidade das amostras e corpos de prova 39
Figura 9 - Possível caminho de tensões efetivas durante a amostragem para uma amostra de argila normalmente adensada (Bertoul 2009) 42
Figura 10 - Curva de compressão oedométrica para amostras indeformadas e deformadas (Ferreira, 1982) 43
Figura 11 - Linha de compressão virgem de campo *vs* curva de laboratório. Tensão efetiva (escala log) (Adatado Schmertmann 1955) 47
Figura 12 - Efeito do amolgamento no padrão de redução do índice de vazios (Adaptado Schmertmann 1955) 48
Figura 13 - Mínima posição da tensão de pré-adensamento $\sigma'vm$ (Adaptado Schmertmann 1955) 49
Figura 14 - Estimativa da reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada (Adaptado Schmertmann, 1955) 50
Figura 15 - Determinação das constantes ψ e Ω a partir dos pontos A e B (Louvise, 2015) 54
Figura 16 - Passos para reconstrução da curva de compressão oedométrica (Louvise, 2015) 57
Figura 17 - Posição dos SPT's, dos perfis e espessura da argila mole (Ortigão, 2002) 59

Figura 18 - Curvas de compressão obtidas de ensaios com velocidade de deformação constante CRS Argila Baixada Fluminense – Rio Polímeros II (Spannenberg, 2003) 61
Figura 19 - Curva de compressão oedométrica da Argila Sarapuí II, AM - 01 - V1 (da Silva, 2013) 63
Figura 20 – Perfis de teor de umidade (Teixeira, 2012) 66
Figura 21 - História de Tensões (Teixeira, 2012) 67
Figura 22 - Curva de compressão oedométrica da Argila da Baixada de Jacarepaguá: AM-SPT-705 -10,7 m (Teixeira, 2012) 68
Figura 23 - Curva de compressão oedométrica da Argila Cluster Naval de Suape, AM1 - 2 (da Silva, 2013) 70
Figura 24 - Utilização típica do diagrama do padrão de redução de índice de vazios Schmertmann (1955) 74
Figura 25 - Padrão de redução de vazios: (a) alto grau de amolgamento (b) baixo grau de amolgamento (Carneiro *et al*., 2017) 76
Figura 26 - Método de Schmertmann modificado (Carneiro *et al*., 2017) 77
Figura 27 - Ajuste à curva de compressão oedométrica experimental (da Silva, 2013) - Argila do Sarapuí II – AM-1-V1 (Louvise, 2015) 79
Figura 28 - Influencia da escolha dos pontos de ajuste no trecho virgem. Argila do Sarapuí II 81
Figura 29 - Verificação da aplicabilidade da equação para o ajuste experimental do trecho virgem. Argila da Baixada de Jacarepaguá – (Teixeira, 2012) 82
Figura 30 - Comparação de curvas indeformadas e amolgadas 85
Figura 56 - Sequência de reconstituição da curva de compressão oedométrica (Louvise, 2015) 89
Figura 31 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica amolgada Rio Polímeros II CRS – 04 X CRS – 03 (PS = método Pacheco Silva) 94
Figura 32 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica amolgada Argila Sarapui II (PS = método Pacheco Silva) 95
Figura 33 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica amolgada Argila Baixada de Jacarepaguá (PS = método Pacheco Silva) 97
Figura 34 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica amolgada Argila Cluster Naval de Suape 99

Figura 35 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica amolgada Argila Cluster Naval de Suape 100
Figura 36 – Estimativa do índice e recompressão em amostras originalmente de baixa qualidade 102
Figura 37 – Estimativa da tensão de pré-adensamento em amostras originalmente de baixa qualidade 102
Figura 38 – Parâmetros de ajuste da função correspondente ao trecho virgem em amostras originalmente de baixa qualidade. 103
Figura 39 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada Argila Rio Polímeros II 105
Figura 40 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada Argila Sarapuí II 107
Figura 41 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada Argila Baixada de Jacarepaguá 108
Figura 42 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada Argila Cluster Naval de Suape 109
Figura 43 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada Argila Cluster Naval de Suape 110
Figura 44 – Estimativa do Índice de recompressão – amostras indeformadas 112
Figura 45 – Estimativa da Tensão de Pré-adensamento– amostras indeformadas 112
Figura 46 – Parâmetros de ajuste da função correspondente ao trecho virgem. 113
Figura 47 - Curva de compressão oedométrica Argila Baixada de Jacarepaguá. AM-SPT-703 -2,0 m (Teixeira, 2012 123
Figura 48 - Curva de compressão oedométrica Argila Baixada de Jacarepaguá. AM-SPT-703 -7,4 m (Teixeira, 2012 123
Figura 49 - Curva de compressão oedométrica Argila Baixada de Jacarepaguá. AM-SPT-705 -2,7 (Teixeira, 2012) 124
Figura 50 - Curva de compressão oedométrica Argila Sarapuí II AM - 02 - V1 (da Silva, 2013) 124
Figura 51 - Curva de compressão oedométrica Argila Sarapuí II AM - 03 - V1 (da Silva, 2013) 125
Figura 52 - Curva de compressão oedométrica Argila Cluster Naval de Suape AM1 - 1 (da Silva, 2013) 125

Figura 53 - Curva de compressão oedométrica Argila Cluster Naval de Suape AM-2-1 (da Silva, 2013) 126
Figura 54 - Curva de compressão oedométrica Argila Cluster Naval de Suape AM2 - 2 (da Silva, 2013) 126
Figura 55 - Curva de compressão oedométrica Argila Cluster Naval de Suape AM2 - 3 (da Silva, 2013) 127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parametros de compressibilidade 32
Tabela 2 - Classificação da qualidade dos Corpos de Prova – Vários autores 45
Tabela 3 - Índices físicos e classificação do solo - Baixada Fluminense (Spannerberg, 2003) 59
Tabela 4 - Velocidades dos ensaios CRS - Baixada Fluminense (Spannerberg 2003) 60
Tabela 5 - Índices físicos e classificação do solo– Sarapuí II- Baixada Fluminense (da Silva, 2013) 62
Tabela 6 - Características e classificação dos solos - Baixada de Jacarepaguá (Teixeira, 2012) 65
Tabela 7 - Índices físicos e classificação do solo– Porto de Suape (Martins, 2012 relatório COPPETEC PEC - 16306) 69
Tabela 8 - Qualidade dos corpos de prova indeformados 71
Tabela 9 - Qualidade dos corpos de prova amolgados 72
Tabela 10 - Combinações entre métodos de reconstrução da curva de compressibilidade 93
Tabela 11 - Parâmetros para reconstrução do trecho de recompressão da curva de compressão oedométrica amolgada 101
Tabela 12 - Pontos de tensão e parâmetros para reconstrução do trecho de compressão virgem das curvas amolgadas 104
Tabela 13 - Parâmetros para reconstrução do trecho de recompressão da curva de compressão oedométrica indeformada 111
Tabela 14 - Pontos de tensão e parâmetros para reconstrução do trecho de compressão virgem das curvas indeformadas 114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society of Testing and Materials
CIPS	Complexo Industrial do Porto de Suape
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
COPPETEC	Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos
CRS	Constant Rate os Strain Consolidation
LGMA	Laboratório de Geotècnia e Meio Ambiente
NA	Nível d'agua
OCR	OverConsolidation Ratio
PPA	Perda de Peso por Aquecimento
PPI	Perda de Peso por Ignição
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
RPA	Razão de pré-adensamento
SIC	Standard Incremental Consolidation
SPT	Standard Penetration Test
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
1P+E+D	1 Ponto de Tensão efetiva mais Estimativa da Tensão de pré-adensamento mais Derivada
2P+D	2 Pontos de Tensão efetiva mais Derivada
2P+E	2 Pontos de Tensão efetiva mais Estimativa da Tensão de pré-adensamento

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ponto de tensão A
AM	Amostra
B	Ponto de tensão B
C	Ponto de tensão C
C_c	Índice de compressão virgem
CP's	Corpos de Prova
CH	Argila Inorgânica de alta plasticidade
C_r	Índice de recompressão
CR	Razão de compressão virgem
C_s	Índice de descompressão
Cv	Coeficiente de adensamento vertical
C_0	Constante de Integração
E	Modulo de Elasticidade
e	Índice de vazios
e_{max}	Índice de vazios máximo
e_s	Índice de vazios no início da recompressão
e_0	Índice de vazios de campo
e_{0A}	Índice de vazios inicial do corpo de prova
G	Densidade real dos grãos
I_a	Atividade da Argila
IP	Índice de Plasticidade
K_{on}	Coeficiente de empuxo no repouso
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de Plasticidade
M'	Modulo de deformação volumétrica
MO	Matéria Orgânica
OH	Argila Orgânica de média e alta plasticidade
RR	Razão de recompressão
S	Saturação
SD	Grau de perturbação
SR	Razão de descompressão
t	Tempo
u_b	Poropressão na base

v	Volume especifico
v_{max}	Volume especifico máximo
V_s	Volume de sólidos
z	Profundidade
Δ_e	Variação do índice de vazios
ΔH	Variação de altura
$\Delta P/P$	Variação de carga
ε_v	Deformação volumétrica
Υ	Peso especifico
Υ_{nat}	Peso especifico natural
Ψ	Coeficiente de rigidez média dos minerais
ω	Teor de umidade
ω^*_l	Limite de liquidez físico
Ω	Parâmetro de compressibilidade
μ	Modulo de Poisson
σ'_c	Tensão de pré-adensamento determinada experimentalmente
σ'_{ct}	Tensão de pré-adensamento estimada mais provável
σ'_{ps}	Tensão residual apos amostragem perfeita
σ'_r	Tensão residual após amostragem
σ'_v	Tensão vertical efetiva
σ'_{vf}	Tensão vertical efetiva após carregamento
σ'_{vm}	Tensão de pré-adensamento
σ'_{vm*}	Tensão de pré-adensamento estimada
σ'_{v0}	Tensão vertical efetiva de campo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO **22**
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **27**
1.1 Introdução **27**
1.2 Caracterização geotécnica dos solos moles **28**
1.3 Ensaio de Adensamento Edométrico **29**
1.3.1 Parâmetros de compressibilidade 30
1.3.2 Tensão de pré-adensamento 33
1.3.3 Coeficiente de adensamento (c_v) 35
1.3.4 Caraterísticas da curva de compressão oedométrica 36
1.4 Amostragem **38**
1.4.1 Consequências do amolgamento na curva de compressibilidade 42
1.4.2 Qualidade dos Corpos de Prova 43
1.5 Reconstrução da curva de compressão para amostras amolgadas **46**
1.5.1 Metodologia de Schmertmann (1955) 46
1.5.2 Metodologia de Louvise (2015) 51
2 DADOS EXPERIMENTAIS **58**
2.1 Baixada Fluminense - Rio Polímeros II (Spannenberg, 2003) **58**
2.2 Baixada Fluminense - Sarapuí II (da Silva, 2013) **61**
2.3 Baixada de Jacarepaguá - Teixeira (2012) **63**
2.4 Porto de Suape (Martins, 2012, da Silva, 2013 e Victor, 2013) **68**
2.5 Analise de qualidade dos Corpos de Prova **70**
3 DISCUSSÃO SOBRE OS METODOS DE RECONSTITUIÇÃO DA CURVA **73**
3.1 Metodologia de Schmertmann (1955) **73**
3.2 Extensão da metodologia de Schmertman (Carneiro et al., 2017) **75**
3.3 Metodologia de Louvise (2015) **78**
3.3.1 . Determinação das incógnitas C_0, ψ e Ω 78
3.3.1 Significado físico da constante C_0 83
3.4 Extensão da Metodologia de Louvise (2015) **83**
3.5 Metodologias de reconstrução das curvas de compressão edometrica **87**
3.5.1 . Metodologia 1 : 2 Pontos de tensão vertical efetiva + Derivada (2P+D) 88

3.5.2 . Metodologia 2 : 1 Ponto de tensão vertical efetiva + Estimativa de $\sigma' vm$+ Derivada (1P+E+D) 89
3.5.3 . Metodologia 3 : 2 Pontos de tensão vertical efetiva + Estimativa de $\sigma' vm$+ (2P+E) 91
4 COMPARAÇAO ENTRE OS MÉTODOS DE RECONSTRUÇÃO DA CURVA OEDOMÉTRICA.....92
4.1 Corpos de prova amolgados.....93
4.2 Corpos de prova Indeformados.....105
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....115
5.1 Introdução.....115
5.2 Conclusões.....115
5.3 Trabalhos futuros.....117
REFERÊNCIAS.....118
ANEXO 1 – CURVAS DE COMPRESSIBILIDADE – RESULTADOS EXPERIMENTAIS 123

INTRODUÇÃO

As palavras “Solos moles” quando surgem são consideradas como uma problemática no mundo da Geotecnia, devido aos problemas de estabilidade e de deformações que geram nas obras. Para que esses problemas possam ser evitados ou pelo menos amenizados, a previsão dos recalques associados à construção e a análise a estabilidade das obras da engenharia fazem-se obrigatórias.

A curva de compressão dos solos é um elemento primordial para o projetista poder fazer uma avaliação adequada desses recalques e do comportamento do terreno em função das tensões a ele transmitidas pela obra de engenharia. Porém, a determinação da curva de compressão para argilas moles apresenta a dificuldade de nem sempre se terem amostras que sejam de boa qualidade, por conta de diversos aspectos relacionados à amostragem, transporte e à própria preparação em laboratório, embora a amostragem apresente instruções claras pelas norvamitividad Brasileira não deixa de exitir dificuldade no processo de extração que conduza a não obter uma amostra de qualidade.

Para a estimativa dos recalques utiliza-se a curva de compressão oedometrica, a qual poderia apresentar variações consideraveis no formato dependendo da qualidade do corpo de prova. Com corpos de prova que são considerados de boa qualidade a curva de compressão oedométrica, permite realizar uma boa aproximação dos recalques, o que não acontece quando se tem amostras de má qualidade, pois nestes casos o formato da é afetado pelas perturbações no corpo de prova, situação que prejudica a acurácia do resultado do calculo de recalques. Diversos autores têm procurado resolver esta problemática através da reconstituição da curva de compressão obtida dos ensaios.

Alguns métodos encontram-se publicados na literatura, como os métodos de Schmertmann (1955) e Louvise (2015) onde são aplicados uma série de passos de modo a reconstituir a curva de compressão.

Revisão bibliográfica

Apresenta-se a seguir um resumo de trabalhos que abrangem desde a natureza dos solos moles, passando pelas tensões que são responsáveis pela resistência, pelas características que os identificam até aos ensaios que permitem prever o comportamento do solo quando submetido a carregamentos que induzem alterações nas condições de campo. Justamente, para a realização destes ensaios utilizam-se amostras recolhidas em campanhas de prospecções geotécnicas, algumas das quais deveriam ser indeformadas para permitir caracterizar de forma adequada as características dos solos em termos de resistência e deformabilidade. Porém, durante a realização da amostragem as amostras podem sofrer muitas alterações, o que acaba afetando a sua qualidade e consequentemente a sua utilidade para a determinação de determinados parâmetros.

Se durante o processo de amostragem as perturbações atingem as amostras, isso implicará uma mudança do seu estado de indeformado a amolgado. Como as perturbações podem acontecer em diferentes momentos e por vários motivos, incluindo a moldagem dos corpos de prova, muita atenção deve ser prestada para que durante a realização dos ensaios a qualidade do material usado não seja afetada.

Embora o corpo de prova apresente perturbaçoes, alguns autores, como por exemplo Schmertmann (1955) consideram que os resultados obtidos de corpos ensaidos na condiçao amolagada possam ser aproveitados com a tentativa de conseguir a reconstrução da curva de compressão oedometrica e assim possa exibir melhoras no formato da mesma. Louvise (2015) apresentou uma metodologia que junta os estudos apresentados por Schmertmann (1955) e a equação desenvolvida por Martins (1983) e Martins e Lacerda (1994).

Motivação

A previsão do comportamento dos solos é uma das maiores preocupações na área da Geotecnia, onde o tema relacionado ao cálculo de recalques vem sendo um

ponto de muita atenção. Desafortunadamente, não pode ser ignorado que o material de estudo pertence à natureza e por conta disso dificulta-se mais a manipulação das amostras extraídas do campo. Para o cálculo de recalques os ensaios de adensamento são utilizados e para conseguir resultados confiáveis o ideal é que tanto as amostras obtidas durante a extração, quanto os corpos de prova na moldagem garantam o estado de indeformado. Porém, nem sempre os corpos de prova ensaiados apresentam as condições de qualidade que se requerem para obter resultados adequados, seja por problemas ocorridos durante processo, seja por uma falha humana. Assim, a opção de trabalhar com os resultados de ensaios obtidos de corpos prova submetidos aos efeitos de amolgamento podem ser aproveitados, porém, devido às possíveis perturbações que estes apresentam, os resultados obtidos poderão levar a previsões erradas.

Assim, o desenvolvimento desta pesquisa surgiu com a motivação de procurar um mecanismo que permita o aproveitamento dos resultados de ensaios de adensamento edométrico sobre corpos de prova amolgados e aproximá-los aos que seriam obtidos com corpos de prova indeformado.

Objetivos

No presente trabalho tem-se como objetivo aplicar as diferentes metodologias existentes na literatura, assim como, incluir modificações nas mesmas, para serem aplicadas nos dados obtidos para amostras de diferentes locais no Estado do Rio de Janeiro, de modo a conseguir uma estimativa da curva de compressão oedométrica em corpos de prova ensaiados em laboratório.

Estrutura da dissertação

Apresenta-se no Capítulo 1 uma breve introdução ao tema estudado acompanhada da motivação e dos objetivos da pesquisa desenvolvida.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre o tema, na qual se fundamenta a análise realizada para o desenvolvimento do presente trabalho, tratando-se uma série de tópicos conforme se lista de seguida:

- Solos Moles: História de tensões, Principio das tensões efetivas, teoria de adensamento, caracterização e ensaio de adensamento edométrico;
- Amostragem : Amostras, Corpos de Prova e Qualidade dos Corpos de prova;
- Amolgamento e causas;
- Efeito do amolgamento;
- Metodologia(s) para reconstituição da curva de compressão em corpos de prova sob efeitos de amolgamento:
    1. Metodologia de Schmertmann (1955);
    2. Metodologia de Louvise (2015).

No Capítulo 3 é apresentado um breve resumo dos dados experimentais que foram escolhidos para serem analisados e utilizados na pesquisa desenvolvida. São incluídas informações como a descrição do local, os resultados dos ensaios de caracterização e identificação e dos ensaios de adensamento. Apresentam-se também as curvas de compressão oedométrica dos corpos de prova indeformados e amolgados disponíveis.

No Capítulo 4 detalha-se a discussão sobre os métodos que são utilizados para a reconstituição da curva de compressão. Observações e modificações são feitas sobre as metodologias existentes dando origem à criação de novas metodologias para conseguir a reconstrução estimada da curva de compressão oedométrica.

No Capítulo 5 é feita a exposição e comparação dos resultados alcançados pelas metodologias aplicadas sobre os dados experimentais escolhidos. Sendo assim, compara-se uma metodologia encontrada na literatura com duas metodologias provenientes das modificações feitas no presente trabalho. Também se propõe um guia para conseguir o melhor procedimento a aplicar caso se tenha limitação nos dados necessários para conseguir a reconstituição. Dependendo dos dados disponíveis poderia ser aplicada uma combinação das metodologias modificadas.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho, além de algumas propostas para trabalhos futuros.

Finalmente após apresentados os capítulos principais são apresentadas as Referências e Anexos.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Introdução

Por ser um material natural, compreender o comportamento dos solos é um desafio. Porém, geólogos e geotécnicos têm realizado esforços na busca por conhecer as características e prever de forma adequada o comportamento dos diferentes tipos de solos existentes.

Os solos naturais são formados por processos de intemperismo e podem ser divididos em dois grandes grupos: residuais e transportados. Os solos residuais permanecem no local onde são formadas. Por outro lado, devido a ações da gravidade, agentes atmosféricos e movimentação das águas, as partículas minerais oriundas das rochas são transportadas para locais mais ou menos distantes do de origem.

No grupo dos solos transportados inserem-se os depósitos sedimentares, constituídos por camadas resultantes da deposição dos sedimentos e que posteriormente adensam devido ao peso próprio das camadas sobrejacentes que vão sendo sucessivamente formadas por novas deposições de partículas minerais. Depósitos argilosos sedimentares, de origem marinha que podem apresentar baixa resistência e alta compressibilidade há décadas vêm sendo objeto de pesquisas científicas no âmbito da engenharia geotécnica. Também conhecidos como “solos moles“, os quais essencialmente se compõem por argilo-minerais com certo teor de matéria orgânica, e encontram-se normalmente saturados.

Tais depósitos são particularmente adversos para o desenvolvimento urbano devido à sua baixa qualidade como solo de fundação. No entanto, a necessidade de expansão dos polos urbanos, a criação de vias de acesso e outras obras de engenharia, necessárias para atender as demandas do crescimento populacional, vêm exigindo a ocupação de áreas que, há tempos eram consideradas como inapropriadas para esses fins.

A necessidade de ocupação dessas áreas justificou os grandes investimentos que vêm sendo realizados ao nível da investigação do comportamento e no desenvolvimento de técnicas de melhoramento de suas características geomecânicas.

Para se conhecer o comportamento dos solos moles é necessário fazer o estudo da mineralogia, os limites de consistência e da atividade, já que o tipo de argilo-mineral exerce muita influência nas propriedades do solo, mesmo quando a argila não é a fração predominante.

As partículas de argila, oriundas do intemperismo químico apresentam uma forma lamelar e valores elevados de superfície específica. Com isso, desenvolvem-se forças de superfície, através das quais se manifesta a atividade química das argilas. Essas forças normalmente ultrapassam as forças de gravidade, razão pela qual a composição mineralogica desempenha um papel muito importante no seu comportamento ao igual que os limites de liquidez e plasticidade e a atividade da argila.

1.2 Caracterização geotécnica dos solos moles

Para o estudo do comportamento de um solo mole, à semelhança com outros tipos de solo, deve-se realizar uma campanha de ensaios, alguns deles realizados *in situ* e outros, em laboratório. A escolha dos pontos de coleta de amostra deve garantir que os resultados possam ser estendidos para todo o deposito. Em outras palavras os locais devem ser considerados como representativos das camadas de solo a estudar.

No caso de depósitos de solos moles, comumente são realizados em laboratório ensaios de caracterização, envolvendo análise granulométrica, densidade dos grãos, limites de consistência e teor de matéria orgânica, além de ensaios de adensamento e de determinação da resistência não drenada. No campo, ensaios de palheta e piezocone, têm igualmente sido extremamente importantes na caracterização dos depósitos de solos moles, uma vez que permitem realizar os

estudos na condição de campo, sem a necessidade de amostragem, a qual é sempre problemática neste tipo de materiais.

1.3 Ensaio de Adensamento Edométrico

O fenómeno do adensamento dos solos argilosos saturados decorrente da aplicação de um determinado carregamento foi estudado por Terzaghi (1936) o qual propôs a conhecida teoria de adensamento. Esta teoria foi desenvolvida para solos carregados em condições de confinamento lateral, ou seja em situações em que as deformações horizontais são nulas. Nestas condições, o processo de adensamento ocorre por expulsão da água presente nos vazios do solo ao mesmo tempo em que ocorre uma deformação na direção vertical da camada de solo onde está ocorrendo o adensamento. Devido ao fato de as deformações se processarem unicamente na direção vertical esta teoria proposta por Terzaghi é também conhecida por Teoria de Adensamento Unidimensional.

A teoria de adensamento é bastante utilizada na prática geotécnica por permitir a estimativa da evolução da curva recalque *vs* tempo. Para tal, faz-se necessária a determinação dos parâmetros de compressibilidade para cálculo do recalque total, e do coeficiente de adensamento. Tais parâmetros são determinados a partir dos resultados do ensaio de adensamento unidimensional ou ensaio edométrico. Neste ensaio, a amostra de solo é submetida a sucessivos incrementos de carregamento normalmente aplicados numa razão de ($\Delta P/P = 1$), ou seja, a nova tensão é igual ao dobro do valor correspondente ao ciclo imediatamente anterior. Miesussens *et al*. (1985) recomendam que o acréscimo da tensão a utilizar seja igual a $\Delta P/P = 0,5$, com o objetivo de conseguir melhor definição da curva de adensamento e (maior) acurácia na determinação da tensão de pré-adensamento do solo.

Em relação à duração dos estágios de carregamento são necessários tempos que garantam o fim da dissipação da poro pressão. Devido à pequena espessura da amostra e a sua dupla drenagem, para facilitar a rotina em laboratório, admite-se o período de 24 horas para cada ciclo de carregamento, porém recomendasse que ao invez de fixar o tempo do estagio o critério da duração do memso poderia ser calculado considerando o critério de deformação volumetrica. O ensaio de

adensamento unidimensional, apesar de ser de simples concepção e de fácil execução, apresenta a desvantagem do elevado tempo necessário para a sua execução. Assim, na busca por conseguir resultados em um espaço de tempo mais curto e ao mesmo tempo fiáveis e, eventualmente, uma maior informação, nos últimos anos, outros equipamentos, foram desenvolvidos e vêm sendo usados em investigações com solos compressíveis. Nesta categoria, o ensaio de Consolidação com Velocidade de Deformação Constante (CRS - Constant Rate of Strain Consolidation) (Wissa *et al*., 1971) tem sido uma alternativa bastante promissora (Almeida, 1988; Carvalho 1989), embora para a realização deste ensaio eja preciso eu as poropressões sejam medidas de forma curada o que pode levar um tempo considerável de execução.

1.3.1 Parâmetros de compressibilidade

Na Figura 1 representam-se as curvas de compressibilidade típicas de um solo, numa escala linear (a) e com as tensões efetivas numa escala logarítmica (b). A análise da curva permite verificar que a variação do índice de vazios com a tensão efetiva não é linear, o que reflete a elastoplasticidade apresentada pelos solos.

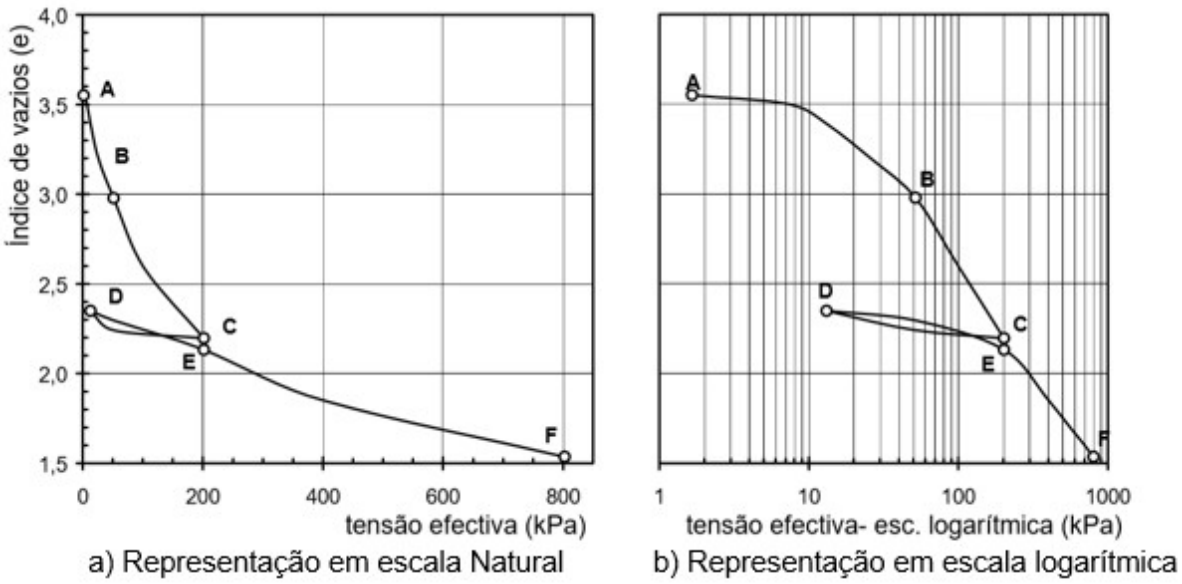
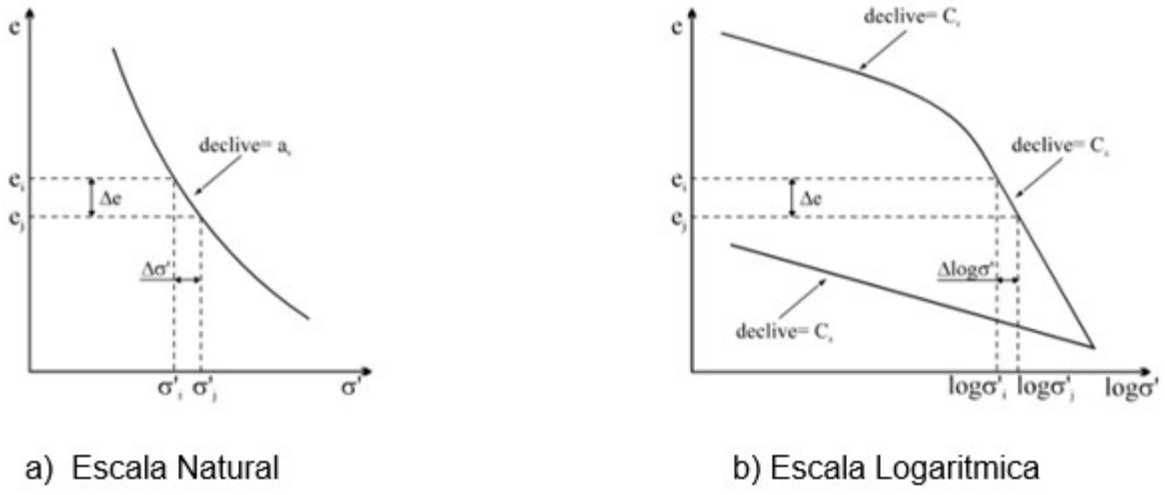


Figura 1 - Curva de compressibilidade típica de um solo argiloso

Nos trechos AB e DC (Figura 1), denominado trecho de recompressão, o solo está sujeito a cargas crescentes, porém inferiores à tensão de pré-adensamento. Nos trechos BC e EF, denominado trecho de compressão virgem, o solo está sendo submetido à tensões superiores à tensão de pré-adensamento. Neste trecho as deformações são plásticas e tendem a diminuir na sua magnitude quando a tensão efeitiva começa aumentar .

No trecho CD, denominado trecho de descompressão, o solo é descarregado e é possível observar as deformações irreversíveis, plásticas. Tensões inferiores ao ponto C, isto é, ciclos de carregamento e descarregamento tendem a apresentar comportamento linear.

A Figura 2(a) e (b) ilustram a determinação gráfica e analítica dos parâmetros de compressibilidade, tanto na escala natural quanto na escala logarítmica e na Tabela 1 são apresentados em resumo o calculo e característica de cada um deles.



a) Escala Natural

b) Escala Logaritmica

Figura 2 - Representação do cálculo gráfico dos parâmetros de compressibilidade e dos índices de compressão (Coelho, 2002)

Tabela 1 - Parametros de compressibilidade

Índice	Formulação	Características
Índice de Compressibilidade (C_c)	$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log(\sigma'_v)}$	- Calculado pela relação entre a variação do índice de vazios e a tensão efetiva no trecho de compressão virgem. - Utilizado para calcular o recalque para solos normalmente adensados.
Índice de Descompressão (C_s)	$C_s = -\frac{\Delta e}{\Delta \log(\sigma'_v)}$	- Calculado pela relação entre a variação do índice de vazios e a tensão efetiva num ciclo de carregamento e descarregamento. -Utilizado para calcular a expansão do solo.
Índice de Recompressão (C_r)	$C_r = -\frac{\Delta e}{\Delta \log(\sigma'_v)}$	- Calculado pela relação entre a variação do indicie de vazios e a tensão efetiva no trecho de descompressão. -Utilizado para calcular o recalque tanto para solos normalmente adensados quanto pré-adensados.

Os índices de compressibilidade são definidos pela razão de variação de índice de vazios em relação á tensão vertical efetiva $(e\ x\ \sigma'_v)$. Considerando a relação $\varepsilon_v\ vs \log \sigma'_v$ os parâmetros são definidos e denominados como:

$$CR = \frac{C_c}{(1 + e_{0)}} \qquad \text{Razão de compressão virgem} \qquad (2\text{-}1)$$

$$RR = \frac{C_r}{(1 + e_{0)}} \qquad \text{Razão de recompressão} \qquad (2\text{-}2)$$

$$SR = \frac{C_s}{(1 + e_{0)}} \qquad \text{Razão de descompressão} \qquad (2\text{-}3)$$

1.3.2 Tensão de pré-adensamento

A curva de adensamento do ensaio edométrico apresenta uma mudança evidente entre os trechos de recompressão e o trecho virgem uma vz que a amostra seja de boa qualide, mudança essa que representa a transição da mobilização de pequenas deformações para deformações muito grandes. Tais zonas são separadas pela tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) ou sobreadensamento como também é conhecida.

Do ponto de vista mecânico, σ'_{vm} indica o máximo valor de tensão efetiva vertical à qual o solo já esteve submetido no passado. Entretanto, fatores químicos e viscosos também respondem pela definição desta mudança de comportamento; como por exemplo, ressecamento, cimentação e envelhecimento (compressão secundária).

A partir da definição da tensão de pré-adensamento, estabelece-se uma classificação baseada na relação entre esta tensão e a tensão efetiva de campo de repouso, conhecida como OCR pelas siglas em inglês (Overconsolidation Ratio) ou em português como RPA (Razão de Pré-Adensamento). Para $OCR = 1$ os solos são denominados normalmente adensados e pré-adensados ou sobre adensados, quando $OCR > 1$.

Existem na literatura vários métodos que permitem realizar o cálculo da tensão de pré-adensamento, mas neste trabalho serão apresentados apenas dois dos mais divulgados no Brasil.

O primeiro método, de divulgação internacional, foi proposto por Casagrande (1936). O método é gráfico e encontra-se apresentado na Figura 3. A aplicação do método inicia-se com a definição, na curva de compressibilidade, do ponto de menor raio de curvatura. Em seguida são traçadas uma reta tangente e outra paralela ao eixo das tensões (horizontal) passando por esse ponto. Seguidamente é definida a bissetriz entre elas e finalmente prolonga-se o ramo virgem até interceptar a bissetriz, encontrando assim a coordenada da tensão de pré-adensamento.

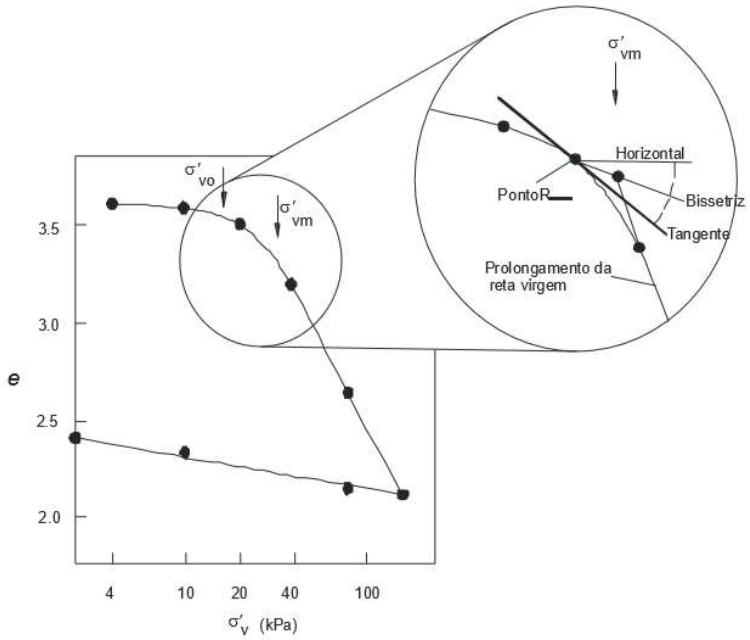


Figura 3 - Cálculo da tensão de pré-adensamento pelo Método de Casagrande (Ortigão, 2007)

O segundo método (Figura 4), proposto pelo autor brasileiro Pacheco Silva (1970) procura dar uma solução mais simples traçando uma reta horizontal pelo valor do índice de vazios inicial e definir a sua interseção com o prolongamento do ramo virgem. Pelo ponto resultante da interseção (ponto A) traça-se uma reta vertical até encontrar a curva experimental no ponto B. Por este ponto B traça-se uma reta horizontal até interceptar com o ramo virgem no ponto C. A abcissa desse ponto corresponde à tensão de pré-adensamento do solo. Segundo Clementino (2005) este último método possui uma grande vantagem sobre o primeiro, pois além de permitir determinar a tensão de pré-adensamento de forma rápida e fácil, não depende da escala.

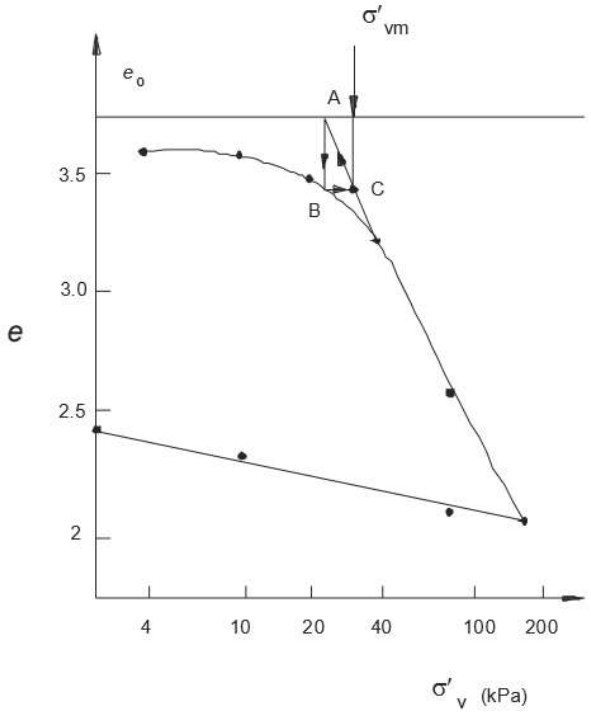


Figura 4 - Cálculo da tensão de pré-adensamento pelo Método de Pacheco Silva (Ortigão, 2007)

1.3.3 Coeficiente de adensamento (c_v)

O coeficiente de adensamento permite avaliar a decorrência dos recalques quando é aplicado um determinado carregamento e o tempo total em que ocorre o adensamento para esse mesmo carregamento.

Para cada incremento de carregamento do ensaio edométrico, c_v é determinado observando a evolução dos recalques na amostra ao longo do tempo. Há 2 métodos gráficos usualmente adotados na prática: Casagrande e Taylor. O primeiro destes métodos utiliza o gráfico $\Delta H \; vs \log t$ enquanto o método de Taylor troca o eixo das ordenadas por $\sqrt{t}$ (?) fazendo com que o aspecto da curva seja diferente. Ortigão (2007) recomenda a utilização do Método de Taylor por este permitir realizar o cálculo ainda para estágios de tensões pequenos, o que o método de Casagrande não permite pois o formato não tem o aspecto ideal para realizar o cálculo nesses valores de tensões. Na Figura 5 são apresentados os dois métodos.

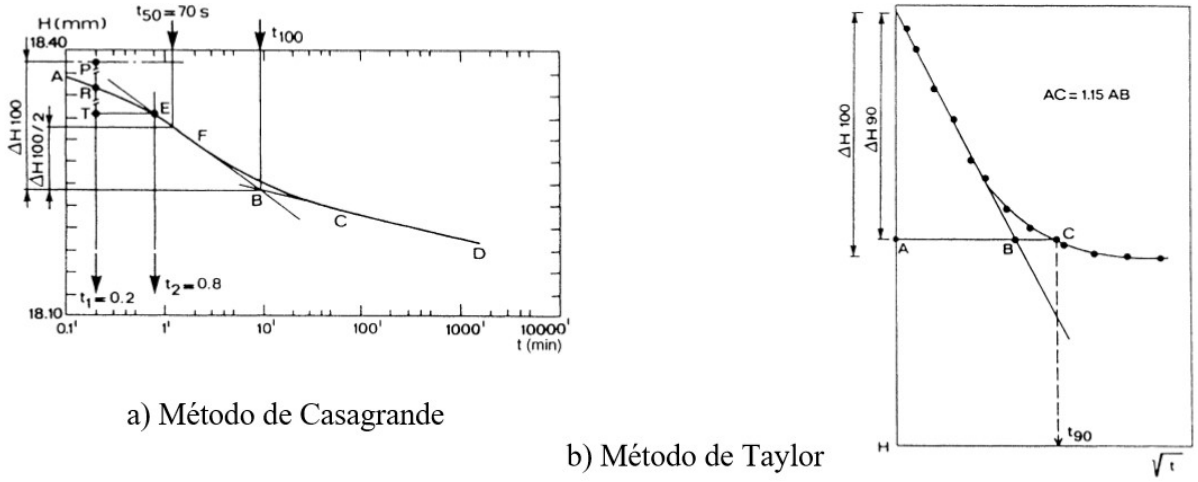


Figura 5 - Métodos para determinação do coeficiente de adensamento : a) método de Casagrande, b) método de Taylor (Lancellotta, 1995)

1.3.4 Caraterísticas da curva de compressão oedométrica

Ladd (1971) descreveu, de uma forma simplificada, o comportamento característico de solos de baixa sensibilidade e plasticidade. Como mostrado esquematicamente na Figura 6, a curva $e\ x \log \sigma'_v$ tipicamente apresenta os seguintes pontos:

1. A razão de compressão CR é em geral constante desde que $\sigma'_v > 5\ a\ 10\ kPa$ de σ'_{vm}

2. A forma de um ciclo de descarregamento/recarregamento independe da tensão máxima de pré-adensamento ($C_{r1} = C_{r3}\ ou\ RR_1 = RR_3$).

3. Por outro lado, RR é sensível à amplitude do ciclo; se o descarregamento/recarregamento tem alta amplitude, o índice de descompressão tende a aumentar ($C_{r2} > C_{r1} = C_{r3}\ ou\ RR_2 > RR_1 = RR_3$).

4. Para um ciclo de descarregamento, a razão de recompressão (RR) é aproximadamente igual à de descompressão SR ou $C_r \cong C_s$.

5. O valor de C_s varia entre 1/5 a 1/10 do índice de compressão C_c ou $RR \cong \frac{1}{10}\ a \frac{1}{5} CR$

De fato, Ladd (1971) admite que há uma super simplificação e que esta se justifica do ponto de vista prático. Schmertmann (1955) já havia mostrado que o índice de descarregamento C_s varia com o nível de tensão efetiva; maior σ'_v acarreta em maior C_s. O autor então sugeriu uma correlação entre diferentes níveis de descarregamento dada por:

$$\log \frac{C_{s1}}{C_{s2}} = 2.5 \log \frac{e_{s1} + 1}{e_{s2} + 1} \tag{2-4}$$

onde C_{s1} é o índice de descarregamento para o índice de vazios e_{s1} no início de descarregamento. Adicionalmente, as inclinações das curvas de descarregamento e recarregamento C_s e C_r podem ser aproximadas por:

$$C_r = 1.15\ C_s \tag{2-5}$$

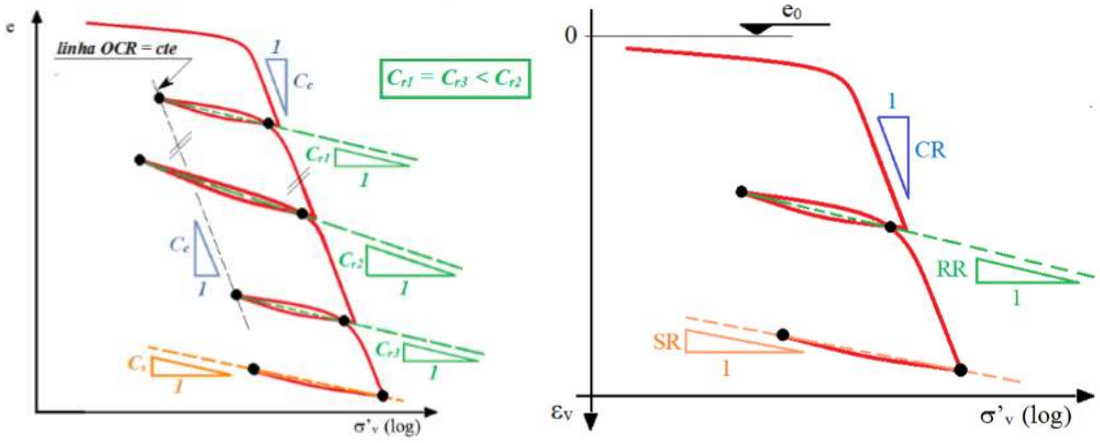


Figura 6 - Características da curva de compressão oedométrica para argilas de sensitividade e plasticidade moderadas (*apud* Louvise, 2015)

Argilas com alta sensitividade, muito plásticas e com elevado limite de liquidez mostram um formato curvo no trecho de compressão virgem; isto é, CR tende a reduzir com o aumento do nível de tensão. Com isso, gera-se uma dificuldade na definição

apropriada dos índices de compressibilidade. Butterfield (1979), com base em resultados experimentais, propôs que a curva de compressão oedométrica fosse representada pela relação entre o volume especifico $(v = 1 + e)$ e a tensão vertical efetiva σ'_v numa escala logarítmica, obtendo assim um formato mais retilíneo como é apresentado na Figura 7. Martins (1983) propôs uma formulação para representá-la o virgem para a compressão edometrica que sera examianda no pxomimos items.

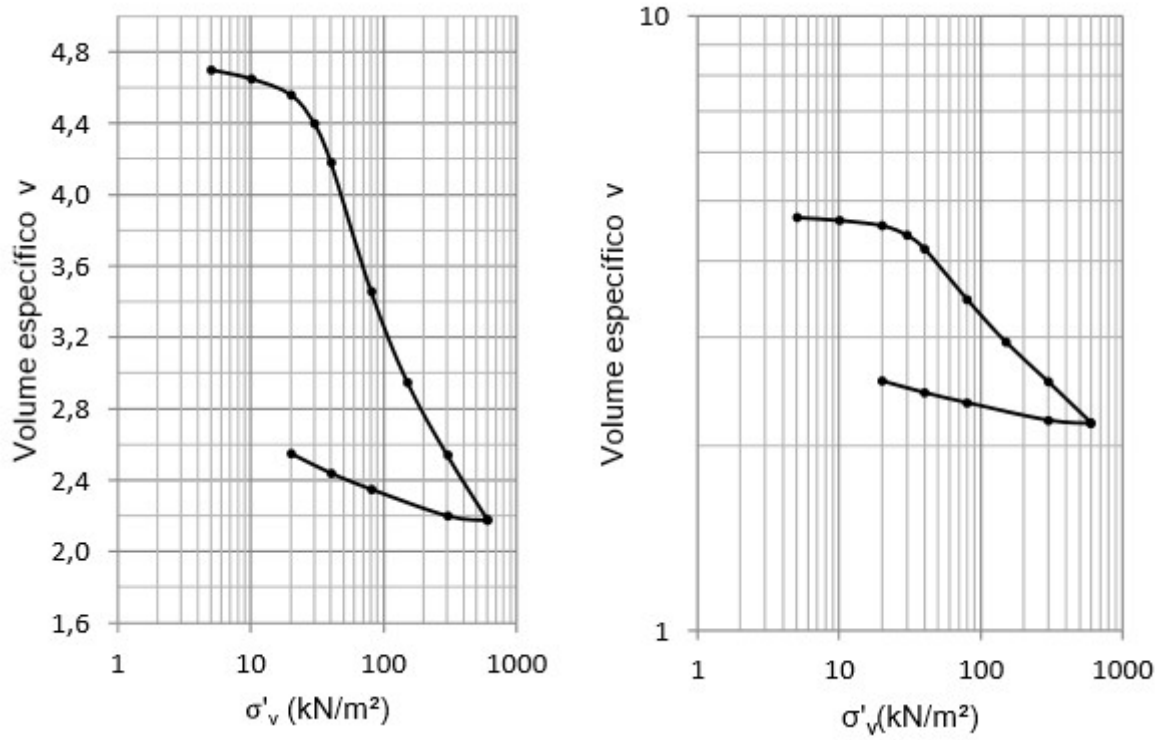


Figura 7 - Curva de compressão oedométrica da Argila Sarapui: $(e\ x \log \sigma'_v)$ e $(\log 1 + e\ \ x \log \sigma'_v)$ (Martins, 1983)

1.4 Amostragem

Os ensaios de laboratório procuram reproduzir as condições às quais o solo será submetido, em decorrência da execução de determinada obra no campo. Assim sendo, é de fundamental importância que o corpo de prova ensaiado seja representativo não só dos minerais constituintes, mas também do teor de umidade e arranjo estrutural.

La Rochelle *et al*. (1981) salienta que a estrutura das argilas é resultado de diversos aspectos como: o ambiente de deposição, adensamento, história de tensões mineralogia, composição química entre outros assim, ela deve ser mantida para que possa ser avaliada corretamente.

A Figura 8 resume as diversas características e nomenclatura de amostras, desde seu processo de extração até à utilização como corpo de prova. Denomina-se representativa a amostra que, após a extração, conserva todos os minerais presentes no maciço. Consequente, com a perda de minerais constituintes esta é denominada não representativa e normalmente é descartada no campo. Somente as amostras representativas são encaminhadas para o laboratório.

Diversas técnicas de campo foram desenvolvidas para obtenção de amostras que fossem não só representativas, mas que também preservassem a estrutura dos das mesmas. Tais amostras são denominadas indeformadas.

Figura 8 - Tipos e qualidade das amostras e corpos de prova

Ainda que exista todo cuidado no processo de extração, uma amostra pode apresentar perturbações de diferentes tipos, seja pelo equipamento, falha no processo de cravação ou no procedimento de extração e, até mesmo, no manuseio por parte do laboratorista.

La Rochelle *et al*. (1981) cita que o amolgamento pode ser decorrente de:

- Perturbações no solo amostrado decorrentes de operações realizadas a priori da amostragem propriamente dita;
- Surgimento de deformações no solo amostrado devida à inserção do tubo amostrador, que dependem do tipo de equipamento utilizado;
- Desenvolvimento de sucção e deformações no solo amostrado durante a recuperação do tubo amostrador;
- Alterações do estado de tensões no solo amostrado, condicionadas pelo tipo e profundidade do solo.

Quanto ao amostrador, Bertoul (2009) apresenta de forma detalhada alguns dos fatores que poderiam ser responsáveis pela qualidade final de uma amostra:

- Forma de posicionamento do equipamento na cota desejada;
- Espessura da parede do amostrador;
- Diâmetro do amostrador;
- Folga interna e Índice de área;
- Extremidade inferior biselada;
- Forma de extração das amostras de dentro dos tubos;
- Preservação das amostras.

Assim para minimizar o amolgamento de solos argilosos, Ladd e Griit (2003) sugeriram os seguintes cuidados:

- Manter o furo de sondagem preenchido com lama e água para minimizar que o solo sofra extensão excessiva por alivio da tensão vertical total no fundo do furo,
- Cortar o tubo amostrador em segmentos;
- Preparar o corpo de prova passando-se um fio de aço entre a parede interna do amostrador e amostra.

Para mais informações referentes aos cuidados que levam à minimização do efeito de amolgamento sugere-se a consulta do trabalho de Aguiar (2008).

Obter uma amostra “indeformada” é, de fato, praticamente impossível pois, na extração, ocorre um alivio das tensões. Consequentemente, há mudança no índice de vazios de campo.

Ladd e Lambe (1964) sugeriram o uso do conceito “amostragem perfeita”, na qual a amostra apresenta um único grau de perturbação na sua estrutura, correspondente justamente ao alivio de tensões que sofre ao ser retirada do campo. Tal perturbação decorre do fato das tensões totais vertical e horizontal serem zeradas e a poropressão passar a ter um valor em modulo à tensão octaédrica efetiva.

A Figura 9 apresentada por Ladd e Lambe (1963), mostra os caminhos de tensões real e o que produziria a amostragem perfeita. A partir deste conceito, os autores propuseram uma medida do grau de perturbação da amostra, definida como sendo a relação entre a tensão residual após amostragem σ'_r (ponto G) e a tensão residual após a amostragem perfeita σ'_{ps}:

$$Perturbaçao = \frac{\sigma'_r}{\sigma'_{ps}} \tag{2-6}$$

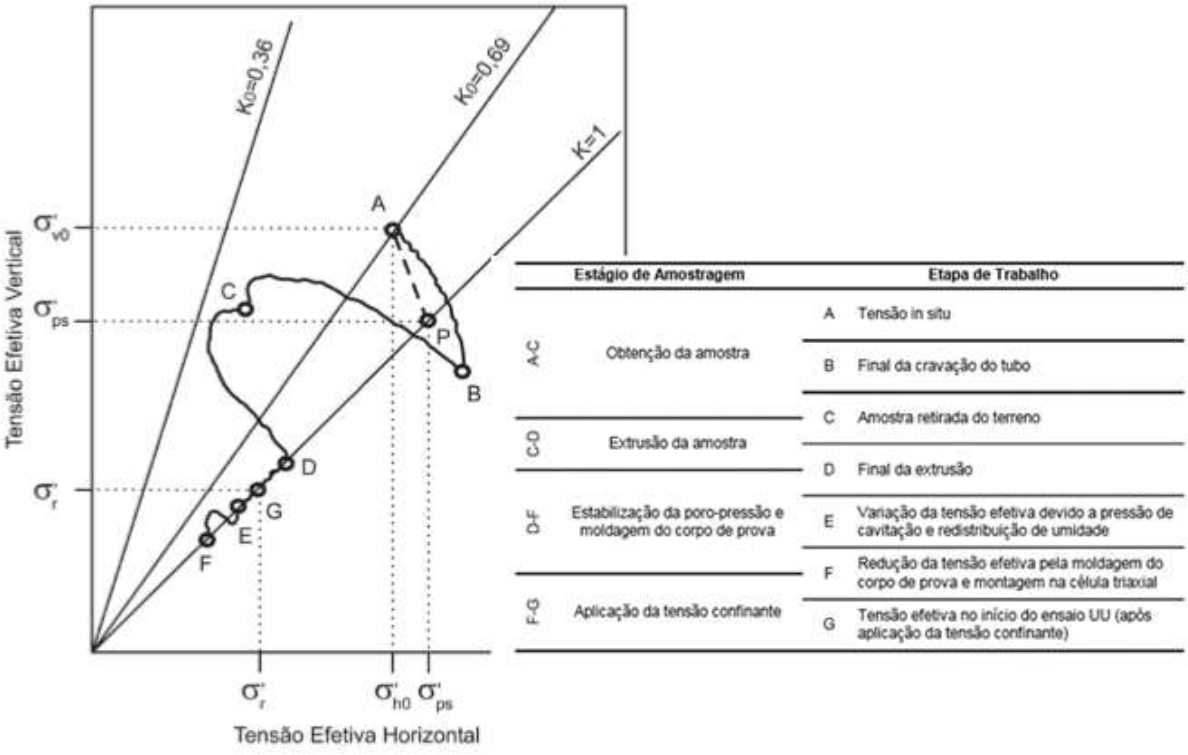


Figura 9 - Possível caminho de tensões efetivas durante a amostragem para uma amostra de argila normalmente adensada (Bertoul 2009)

1.4.1 Consequências do amolgamento na curva de compressibilidade

Ladd (1971), Coutinho (1976) e Martins (1983) estudaram o problema e descreveram os efeitos na curva de compressão oedométrica, quando as amostras se encontram amolgadas. Embora os autores utilizem os termos amostras indeformadas de boa e má qualidade, neste tópico será comentado unicamente as diferenças entre as características das curvas de compressão em amostra amolgada e indeformada. As principais características são:

- Decréscimo no índice de vazios para o mesmo valor de tensão vertical efetiva;
- Dificuldade na definição da tensão de pré-adensamento, isto porque a curva se torna menos acentuada, reduzindo a diferença de inclinação dos trechos de recompressão e compressão virgem;
- Diminuição no valor da tensão de pré-adensamento;
- Aumento na compressibilidade para o trecho de recompressão, enquanto ocorre um decréscimo no trecho de compressão virgem.
- Retificaçao do trecho virgem.

Na Figura 10 apresentam-se as curvas de compressão oedométrica para amostras indeformada de boa qualidade e amolgada no laboratório. Ressalta-se com um retângulo azul o setor onde possivelmente “estaria localizada” a tensão de pré-adensamento para a curva amolgada, o qual claramente não se encontra bem definido, enquanto para a amostra indeformada é assinalado com um círculo vermelho. Neste caso a curvatura entre a zona de recompressão e o trecho virgem é mais acentuada de modo que a tensão de pré-adensamento possa der definida com mais facilidade.

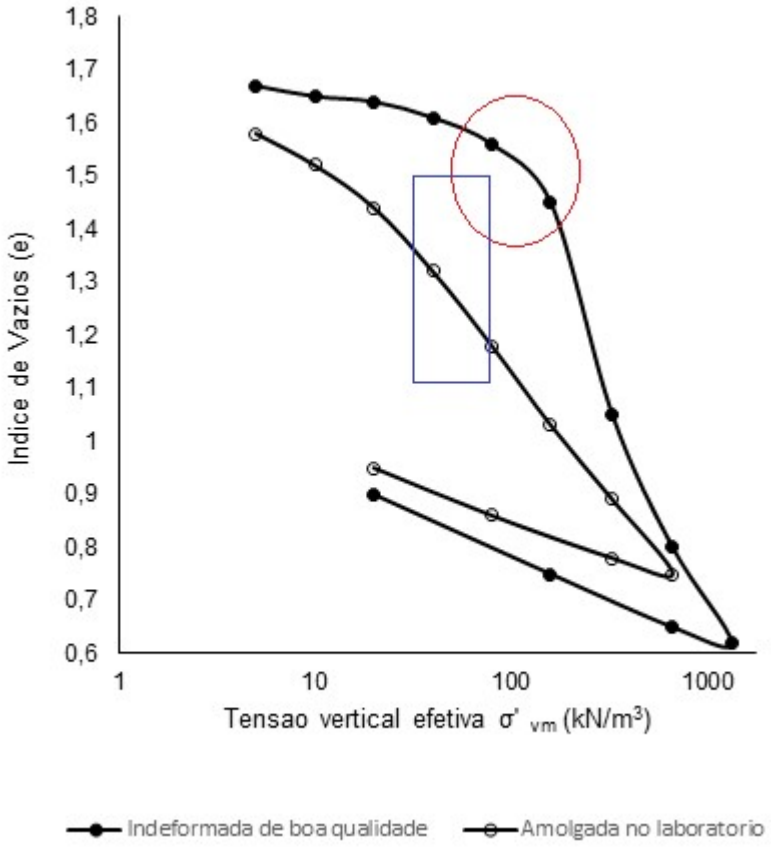


Figura 10 - Curva de compressão oedométrica para amostras indeformadas e deformadas (Ferreira, 1982)

1.4.2 Qualidade dos Corpos de Prova

Inicialmente, é necessário fazer uma diferenciação entre os termos “amostra” e “corpo de prova”. O termo “amostra” denota a porção de solo extraída do campo, enquanto “corpo de prova” define a porção de solo, que será ensaiada na célula

oedométrica. Convém observar que é muito comum na literatura o uso indiscriminado dos termos “amostra” e “corpo de prova”, sem respeito às suas definições corretas.

Análogo aos comentários sobre a qualidade da amostra, o grau de perturbação para um corpo de prova pode ser calculado e indica uma medida da qualidade do mesmo. Para o ensaio edométrico, corpos de prova de boa qualidade apresentam as seguintes características:

- A curvatura que se forma entre a passagem do trecho de recompressão e a compressão virgem é “bem” definida, possibilitando o cálculo da tensão de pré-adensamento com menor grau de incerteza.
- Os trechos são diferenciados para cada etapa e aproximados a uma reta que permita o cálculo dos índice de descompressão, compressão e recompressão.

Lunne *et al*. (1997) propuseram um critério para medir a qualidade dos corpos de prova dos ensaios de adensamento edométrico, baseado na variação entre o índice de vazios inicial do corpo de prova e_0: e o indicie de vazios correspondente à tensão vertical efetiva à qual a amostra se encontrava no campo, e_{campo}, mostrado na Tabela 2.

Nesta tabela, são também apresentadas outras propostas, formuladas pelos pesquisadores brasileiros Coutinho (2007) e Andrade (2009). Cabe observar que, todas avaliam a qualidade dos CP’s e não das amostras.

Tabela 2 - Classificação da qualidade dos Corpos de Prova – Vários autores

Autor	**Lunne et al., 1997**						**Vantagem**	**Desvantagem**
OCR	**Δ_e/e_0**							
	Muito Boa a Excelente	**Boa a Regular**	**Pobre**	**Muito Pobre**			Permite a classificação da qualidade dos corpos de prova para valores de OCR de1 - 4	O critério gera confusão para os valores limites Regular e pobre, pois apresenta o mesmo valor no final de uma categoria e no início da outra. (Ex: se o valor for 0,07 seria considerado como Regular e Pobre ao mesmo tempo)
1 - 2	< 0,04	0,04 - 0,07	0,07 - 0,14	> 0,14				
2 - 4	< 0,03	0,03 - 0,05	0,05 - 0,10	> 0,10				

Autor	**Coutinho, 2007**						**Vantagem**	**Desvantagem**
OCR	**Δ_e/e_0**							
	Muito Boa a Excelente	**Boa a Regular**	**Pobre**	**Muito Pobre**			Permite a classificação da qualidade dos corpos de prova	O critério gera confusão para os valores limites entre Regular e pobre, pois apresenta o mesmo valor no final de uma categoria e no início da outra. (Ex: se o valor for 0,08 seria considerado como Regular e Pobre ao mesmo tempo) Não classificacam para valores de OCR superior a 2
1 - 2	< 0,05	0,05 - 0,08	0,08 - 0,14	> 0,14				

Autor	**Andrade, 2009**						**Vantagem**	**Desvantagem**
OCR	**Δ_e/e_0**							
	Muito Boa a Excelente	**Muito Boa a Boa**	**Boa a Regular**	**Regular a Pobre**	**Pobre a Muito Pobre**	**Muito Pobre**	Permite a classificação da qualidade dos corpos de prova , encaixando cada um,em um intervalo sem gerar confusão entre as categorias.	Não clssificam para valores de OCR superior a 2,5
1 - 2,5	< 0,05	0,05 - 0,065	0,065 - 0,08	0,08 - 0,11	0,11 - 0,14	> 0,14		

1.5 Reconstrução da curva de compressão para amostras amolgadas

A amostragem perfeita é uma condição impossível de se obter na pratica. No entanto, o processo de amolgamento pode ser minimizado através da aplicação de processos de extração no campo e técnicas de manipulação em laboratório mais adequadas para solos argilosos.

Na prática corrente da engenharia no Brasil, tais cuidados são pouco observados e é muito comum verificar graus de amolgamento em corpos de prova. Então, como conseguir que os efeitos do amolgamento possam ser minimizados para permitir uma previsão mais confiável do comportamento da obra? Para resolver este questionamento, pesquisadores propuseram metodologias para correção da curva de compressibilidade. Algumas dessas propostas serão descritas de seguida.

1.5.1 Metodologia de Schmertmann (1955)

Schmertmann (1955) foi o precursor na elaboração de um método que permitisse reconstituir a curva de compressão oedométrica de corpos de prova submetidos a efeitos de amolgamento. Observando as características de ensaios em corpos de prova com diferentes graus de perturbação, Schmertman propôs um método gráfico que não reproduz com acurácia a curva de compressão indeformada, mas consegue uma boa aproximação. Os principais pontos observados por Schmertmann (1955) foram:

1. Quanto ao trecho de compressão virgem:
    a. A posição da linha de compressão virgem de campo é uma propriedade única da argila (Figura 11);

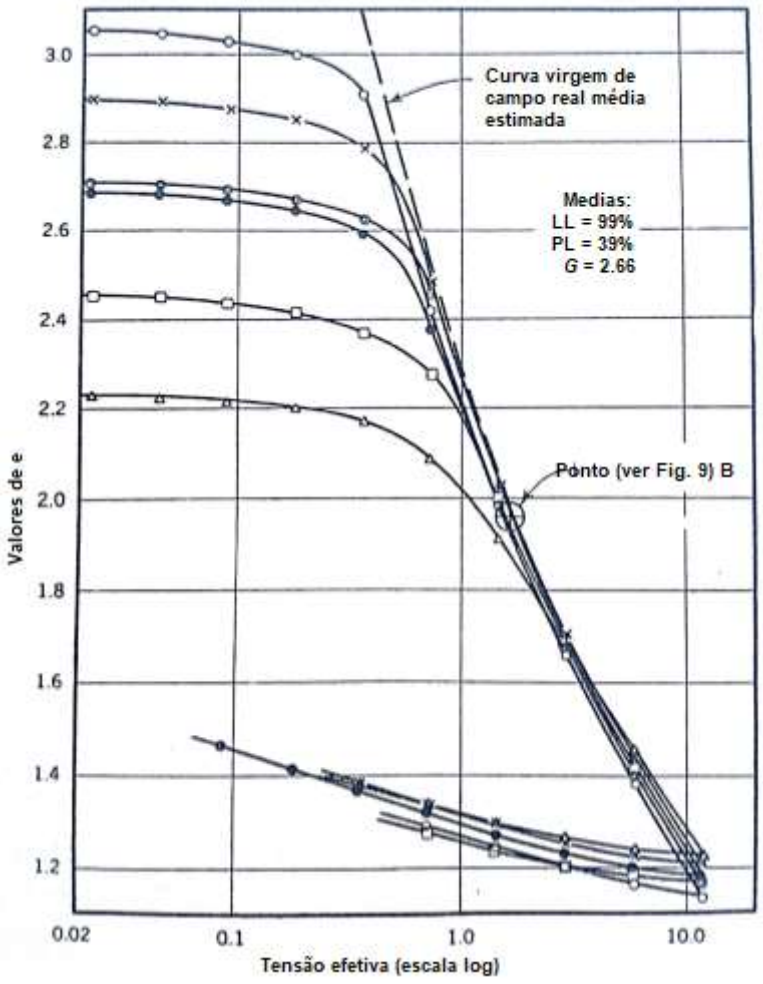


Figura 11 - Linha de compressão virgem de campo *vs* curva de laboratório. Tensão efetiva (escala log) (Adatado Schmertmann 1955)

   b. O prolongamento do trecho de compressão virgem de corpos de prova com diferentes graus de amolgamento, intercepta a linha de compressão virgem de campo num intervalo de 37 a 60% de e_0, sendo 42% uma boa estimativa do ponto médio (Figura 12);

2. Quanto ao padrão de redução do índice de vazios, definido pela curva que exibe a redução do índice de vazios de um corpo de prova amolgado em comparação com o correspondente indeformado:
   a. A curva apresenta a forma de distribuição normal, com pico nas proximidades da tensão de pré-adensamento (Figura 12).

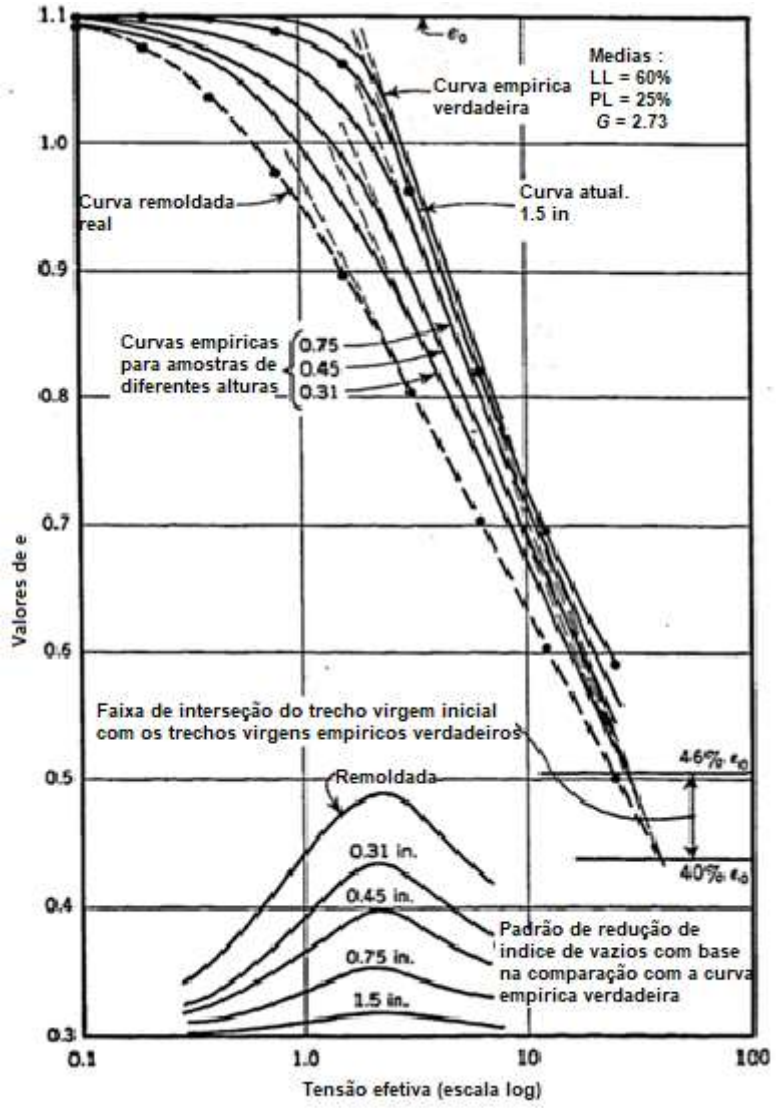


Figura 12 - Efeito do amolgamento no padrão de redução do índice de vazios (Adaptado Schmertmann 1955)

3. Quanto ao trecho de descompressão:
    a. O amolgamento não promove alterações significativas na curva de descompressão.
4. Quanto à determinação da tensão de pré-adensamento σ'_{vm}:
    a. As distorções da curva de compressão dificultam o emprego do método gráfico de Casagrande;
    b. São sugeridas as seguintes alternativas gráficas
        i. Definição do menor valor possível de σ'_{vm}, dado pela interseção do prolongamento da linha de compressão virgem com uma reta

paralela à curva de descompressão, traçada a partir do ponto (e_0, σ'_{v0}) (Figura 13);

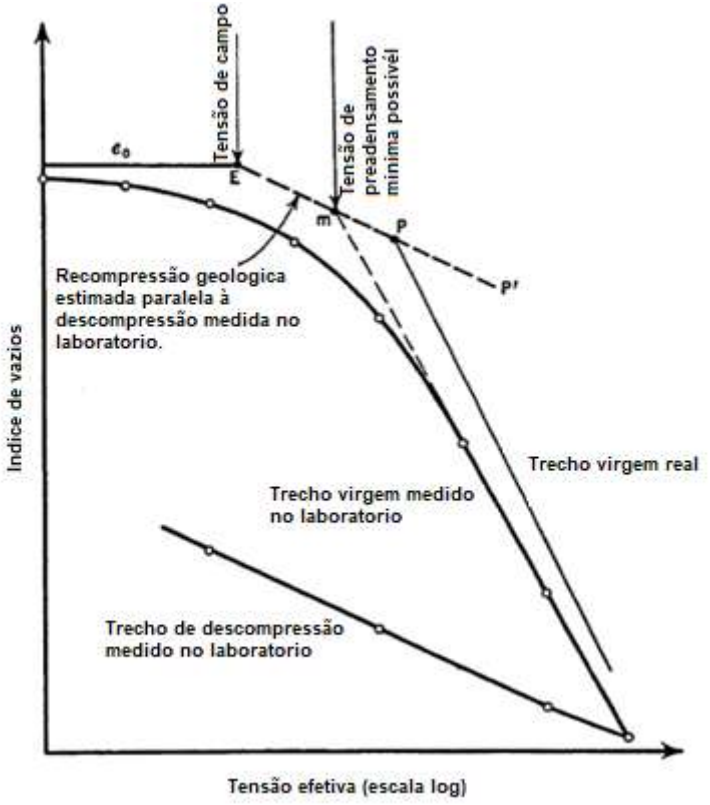


Figura 13 - Mínima posição da tensão de pré-adensamento σ'_{vm} (Adaptado Schmertmann 1955)

ii. Com base no teor de umidade (ω). O teor de umidade é um índice de simples determinação e não é afetado pelo amolgamento. Assim uma vez que possa ser garantido que o deposito estudado seja uniforme e de posse do perfil de ω_{campo}, plota-se $e_{campo} = {G_\omega}/{S}\ x\ \sigma'_{vf}$ sendo σ'_{vf} a tensão efetiva após carregamento. Não entanto na referencia citada o autor não esclarece como é exatamente calculada a tensão de pré-adensamento ;

iii. Com base no padrão de redução do índice de vazios, reconstruindo-se a curva de ensaio de forma a garantir a distribuição normal, simétrica, da função de $\Delta e\ x\ \sigma'_v$ com maior valor de pico. O pico coincide com a posição da tensão efetiva de pré-adensamento.

Tomando como base as observações acima, Schmertmann pensou num método que permitisse reconstituir a curva de adensamento oedométrica partindo do gráfico de índice de vazios *vs* tensão vertical efetiva ($e \; x \; \sigma'_v$) (Figura 14) em corpos de prova amolgados, conforme descrito a seguir:

(Δe) descompressão

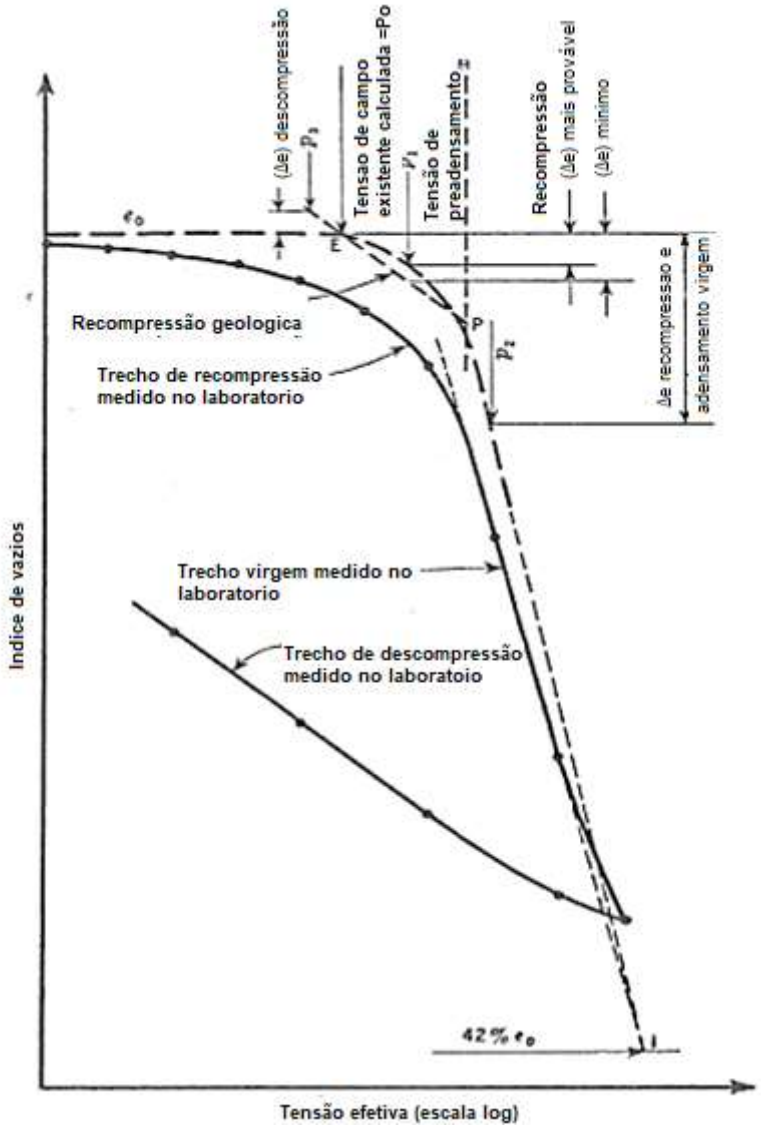


Figura 14 - Estimativa da reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada (Adaptado Schmertmann, 1955)

I. Inicia-se pela definição do ponto **E**, dado pelo par ($e_{campo}, \sigma'_{v\,campo}$) que representa a tensão vertical efetiva e o índice de vazios existentes no campo na profundidade de amostragem. Como a amostra sofre expansão, $e_{campo} < e_0$ (e_0 - índice de vazios inicial do corpo de prova).
II. Como o ponto **E** representa as condições iniciais de campo, a condição ideal é representada por uma reta horizonta, ligando e_0 até o ponto **E**.
III. Determina-se o valor da tensão de pré-adensamento σ'_{vm} pela metodologia mais adequada. O autor sugere o método baseado no teor de umidade ou de Casagrande (1936) quando os ensaios apresentam curvas com declive acentuado e um novo conceito de padrão de reduzao de índice de vazios. (item 1.5.1 Ponto 4)
IV. Uma paralela ao trecho de descompressão é traçada passando pelo ponto **E**, até à vertical (linha **X-X**) correspondente à tensão de pré-adensamento σ'_{vm}. Este trecho corresponde à fase de recompressão do solo.
V. A reta inicial de compressão virgem “amolgada” é prolongada até atingir o valor de índice de vazios igual a $0.42e_0$, no ponto i. Em seguida traça-se a linha i –P; a qual representa a posição e a inclinação do trecho superior da curva de compressão virgem “indeformada” estimada.
VI. A curva de recompressão é estimada e definida com ajuda da linha de descompressão E-P.

Realizar o cálculo pelo padrão de índice de vazios na maioria do casos não conduz à condição de simetria sugerida pelo autor e dependendo das tensões de pré-adensamento escolhida para a aplicabilidade ter-se-iam trechos mais simétricos que outros, deixando a grande dificuldade da seleção do padrão correto.
E a estas dificuldades soma-se a consideração final que sugere Schtmermann de estimar a “curva de recompressão” suavizando a linha de descompressão gerada na reconstrução.

1.5.2 Metodologia de Louvise (2015)

A autora cita no trabalho que baseados em algumas considerações e hipóteses Martins(1983) e Martins e Lacerda (1994) propuseram uma formulação para

representar o comportamento de um solo submetido a carregamentos virgens, assumindo:

- Deformação volumétrica é função da tensão octaédrica efetiva.
- Coeficiente de empuxo no repouso $K0n{=}cte$. No trecho virgem.
- Que o módulo volumétrico M' é função da razão entre o volume de sólidos Vs e o volume total V.

Definido o módulo de deformação volumétrica M' como a relação entre a variação da tensão efetiva octaédrica e a variação de volume, pode-se representá-lo como uma função dos volumes de sólido e total; isto é:

$$M' = f\left(\frac{V_s}{V}\right) \tag{2-7}$$

onde V_s é o volume de sólidos e V o volume total.
Adicionalmente, esta função é monótona crescente, ou seja:

$$\frac{dM'}{d\left({}^{V_s}/_{V}\right)} > 0 \tag{2-8}$$

Assim, Martins e Lacerda (1994) propuseram a equação representada pela expressão (2-9), a qual relaciona a tensão efetiva e o índice de vazios e atende aos requisitos anteriores:

$$\sigma'_v = \frac{\psi}{(1+e)^{\Omega}} - C_0 \tag{2-9}$$

onde ψ , Ω e C_0 são constantes. O coeficiente ψ representa a rigidez média dos minerais constituintes do solo; Ω um parâmetro de compressibilidade e C_0 é uma constante de integração. Em seu trabalho, os autores com o objetivo de levantar a indeterminação obrigaram a que $C_0 = 0$, o que conduziu a que a expressão (2-9) representasse a condição de tensão efetiva nula $\sigma'_v = 0$, associada a um valor de índice de vazios infinito.

Martins (*apud* Louvise, 2015) questionou a simplificação da constante de integração e considerou a mesma como sendo diferente de zero uma vez que se o e→∞ o meio deixa de ser solo. Atendendo à recomendação de que segundo Schmertmann (1955) as curvas amolgada e indeformada juntam-se num ponto e considerando que tal ponto corresponde a $0.42e_0$, dispõe-se de três pontos de tensão que garantem a condição de índice de vazios $e \leq 0.42e_{0A}$, e permitem a resolução da equação 2-9. Assim, identificando esses três pontos como A, B e C o sistema de equações fica definido como:

$$\sigma'_A = \frac{\psi}{(1+e_A)^{\Omega}} - C_0 \quad (2\text{-}10)$$

$$\sigma'_B = \frac{\psi}{(1+e_B)^{\Omega}} - C_0 \quad (2\text{-}11)$$

$$\sigma'_C = \frac{\psi}{(1+e_C)^{\Omega}} - C_0 \quad (2\text{-}12)$$

As constantes ψ , Ω e C_0 podem ser determinadas resolvendo o sistema de equações acima.

Em seguida Louvise (2015) admitiu o sentido fisco da existência de um valor de índice de vazios que levasse à condição de tensão efetiva igual a zero. Assim sendo; reescreveu a equação (2-9) admitindo um valor máximo de índice de vazios para $\sigma'_v = 0,$, isto é:

$$\frac{\psi}{(1+e_{max})^{\Omega}} = C_0 \quad (2\text{-}13)$$

ou seja:

$$\sigma'_v = \frac{\psi}{(1+e)^{\Omega}} - \frac{\psi}{(1+e_{max})^{\Omega}} \quad (2\text{-}14)$$

Tal índice de vazios máximo poderia ser associado à um teor de umidade limite para o estado “líquido”. Assim sendo, definiu-se ω_l^* como o limite de liquidez fisico, correspondente a 1 golpe no aparelho de Casagrande:

$$\sigma'_v = \frac{\psi}{(1+e)^{\Omega}} - \frac{\psi}{(1+G\omega_l{}^*)^{\Omega}} \qquad (2\text{-}15)$$

Com esta nova condição para a constante de integração resta considerar dois pontos de tensão atendendo à recomendação de índice de vazios citada acima ($e \leq 0.42e_{0A}$) para encontrar o valor das constantes ψ e Ω.

Considere-se então os pontos A e B (Figura 15) localizados no trecho final da curva de compressão, onde as diferenças devido do carregamento aplicado a curva do corpo de prova indeformado tende ao estado de amolgamento aproximandosse assim á curva do corpo de prova na condição amolgada. E finalmente considerando que o índice de vazios $e_A \leq 0.42e_{0A}$, para garantir que, segundo Schmertmann (1955), as curvas amolgada e indeformada coincidam.

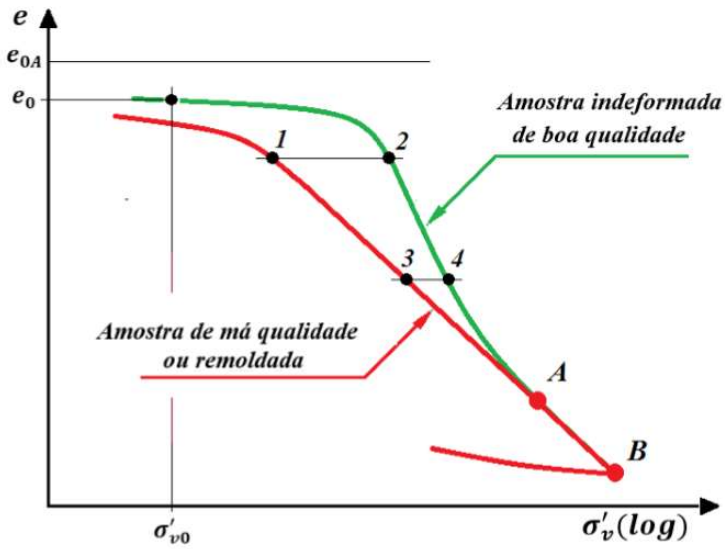


Figura 15 - Determinação das constantes ψ e Ω a partir dos pontos A e B (Louvise, 2015)

Conhecendo-se as coordenadas dos pontos A e B e desenvolvendo o sistema de equações que resulta de substituir as coordenadas de A e B na equação (2-14) obtêm-se as constantes Ω e ψ, respectivamente, a partir das expressões abaixo:

$$\frac{\sigma'_{vB}}{\sigma'_{vA}}\left(\frac{1+e_{max}}{1+e_A}\right)^{\Omega} = \left(\frac{1+e_{max}}{1+e_B}\right)^{\Omega} + \frac{\sigma'_{vB}}{\sigma'_{vA}} - 1 \quad (1\text{-}16)$$

$$\psi = \frac{\sigma'_{vA}\ [v_A\, v_{max}]^{\Omega}}{{v_A}^{\Omega} - {v_A}^{\Omega}} \quad (1\text{-}17)$$

Finalmente o valor de C_0 pode ser derminado pela equaçao (2-13).

A metodologia apresentada destina-se à reconstrução da linha de compressão virgem. Louvise (2015) recomenda que o trecho de recompressão seja reconstituído com a ajuda da metodologia de Schmertmann (1955). Entretanto, chama-se a atenção quanto à diferenciação entre o índice de vazios da amostragem e_{0A} e o índice de vazios de campo, e_0. Com isso, dada a expansão da amostra após a extração, é sugido que o índice de vazios de campo seja calculado como:

$$e_0 = \frac{e_{0A}}{1.025} \quad (1\text{-}18)$$

sendo o denominador definido a partir de critério de qualidade para corpos de prova indeformados ($^{\Delta_e}/_{e_0} < 0{,}05.$). Com isso, traça-se uma paralela à curva de descarregamento passando pelo índice de vazios da amostragem e_0. Adicionalmente, sugere-se o método de Pacheco Silva para a estimativa da tensão de pré-adensamento inicial ${\sigma'_{vm}}^{(*)}$.

Os passos para aplicação da metodologia proposta por Louvise (2015) para reconstituir a curva de compressão oedométrica são apresentados de seguida (Figura 16):

I. Do gráfico de limite de liquidez determinar $\omega_l{}^*$ (Extrapolando para 1 golpe);

II. Traçar uma reta horizontal pelo ponto e_{0A} uma horizontal;

III. Calcula-se e_0 pela expressão (1-18) e o valor de σ'_{v0} com ajuda do perfil geotécnico e do peso especifico γ, determinando-se o ponto (e_0, σ'_{v0});

IV. Realizar o ensaio de adensamento carregando o corpo de prova até entrar francamente no trecho virgem. Determinar a tensão de pré-adensamento pelo método de Pacheco Silva ($\sigma'_{vm\,PS}$) (Figura 16);

V. O corpo de prova é carregado até o ponto **A**, garantindo que $e_A \leq 0.42e_{0A}$. Carregar o corpo de prova até o ponto **B**, garantindo a condição de $\sigma'_{vB} = 2\sigma'_{vA}$;

VI. Determinar o valor das constantes ψ e Ω substituindo as coordenadas dos pontos **A** e **B** nas equações (2-16) e (2-17);

VII. Com as constantes definidas o trecho de compressão virgem é reconstituído e $\sigma'^{(*)}_{vm}$ é determinada pela interseção da curva de compressão oedométrica virgem reconstituída e a horizontal traçada a partir de e_{0A};

VIII. Determinar o valor de $OCR = \sigma'^{(*)}_{vm} / \sigma'_{v0}$;

IX. O "laço" de descarregamento-recarregamento **BCD** é realizado depois do final do estágio **AB** garantindo que seja gerado o mesmo valor de OCR determinado no item (VIII). Para isto $OCR = \sigma'^{(*)}_{vm} / \sigma'_{v0} = \sigma'_{vB} / \sigma'_{vC} = \sigma'_{vD} / \sigma'_{vC}$;

X. O índice de recompressão C_r é determinado com ajuda do "laço" **BCD**;

XI. Partindo das coordenadas (e_0, σ'_{v0}) traçar uma reta de declividade C_r e determinar o ponto **J** (ver Figura 16);

XII. A curva de compressão oedométrica reconstituída será, então, **XJAB**.

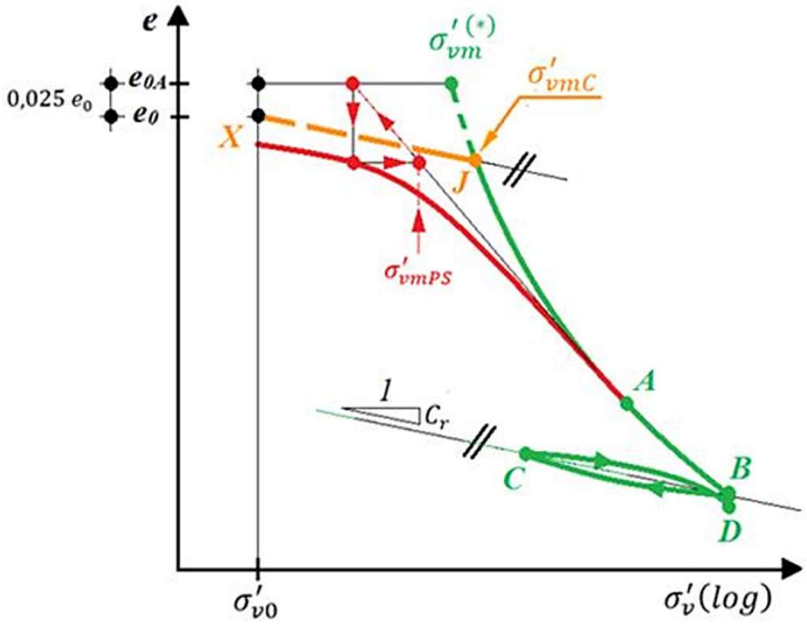


Figura 16 - Passos para reconstrução da curva de compressão oedométrica (Louvise, 2015)

Desenvolvimentos matemáticos e demais detalhes sobre a metodologia e as equações utilizadas não são tratados no presente trabalho, mas para remover as possíveis curiosidades do leitor sobre o mesmos recomenda-se a leitura dos trabalhos de Schmertmann (1955), Martins (1983), Martins e Lacerda (1994) e Louvise (2015).

2 DADOS EXPERIMENTAIS

Para avaliar as metodologias de reconstrução da curva de compressão de ensaios edométricos foram utilizados resultados experimentais apresentados por Spannerberg (2003), Teixeira (2012) e Louvise (2015).

Spannerberg (2003) estudou o comportamento de deposito na Baixada Fluminense, Rio de Janeiro. Teixeira (2012) realizou ensaios em amostras do deposito da Baixada de Jacarepagua, também no Rio de Janeiro. Já Louvise (2015) coletou dados experimentais de ensaios de Sarapuí II (da Silva, 2013, Jannuzzi, 2009 e 2013), além de resultados de ensaios edométricos na área do Porto de Suape, em Pernambuco (Relatório PEC 16036, 2012 e Silva, 2013).

Apresentam-se a seguir uma breve descrição dos locais de estudo, propriedades dos corpos de prova ensaiados, etc. Para maiores detalhes sugere-se consultar as referências citadas em cada caso estudado.

2.1 Baixada Fluminense - Rio Polímeros II (Spannenberg, 2003)

O local estudado por Spannenberg (2003), conhecido como Rio Polímeros II, localiza-se em Duque de Caxias na Baixada Fluminense no estado do Rio de Janeiro. Trata-se, segundo Antunes (1978), de um depósito de formação fluvio-marinho com coloração cinza escura com a presença de matéria orgânica.

A partir de campanhas de prospecção anteriores, onde sondagens à percussão com medição de SPT foram realizadas, foi determinada uma espessura da camada argila mole variando entre 1 e 6 m. A amostragem indeformada foi realizada recorrendo a amostradores Shelby com tubos de 100 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento e de pistão Osterberg com tubos de 100 mm de diâmetro. As amostras indeformadas foram obtidas em um único furo, o CB-54, localizado na subárea dos prédios. Apresenta-se na Figura 17 a nomenclatura utilizada na subdivisão das áreas, a localização das sondagens e as curvas de iso-espessura do depósito argiloso.

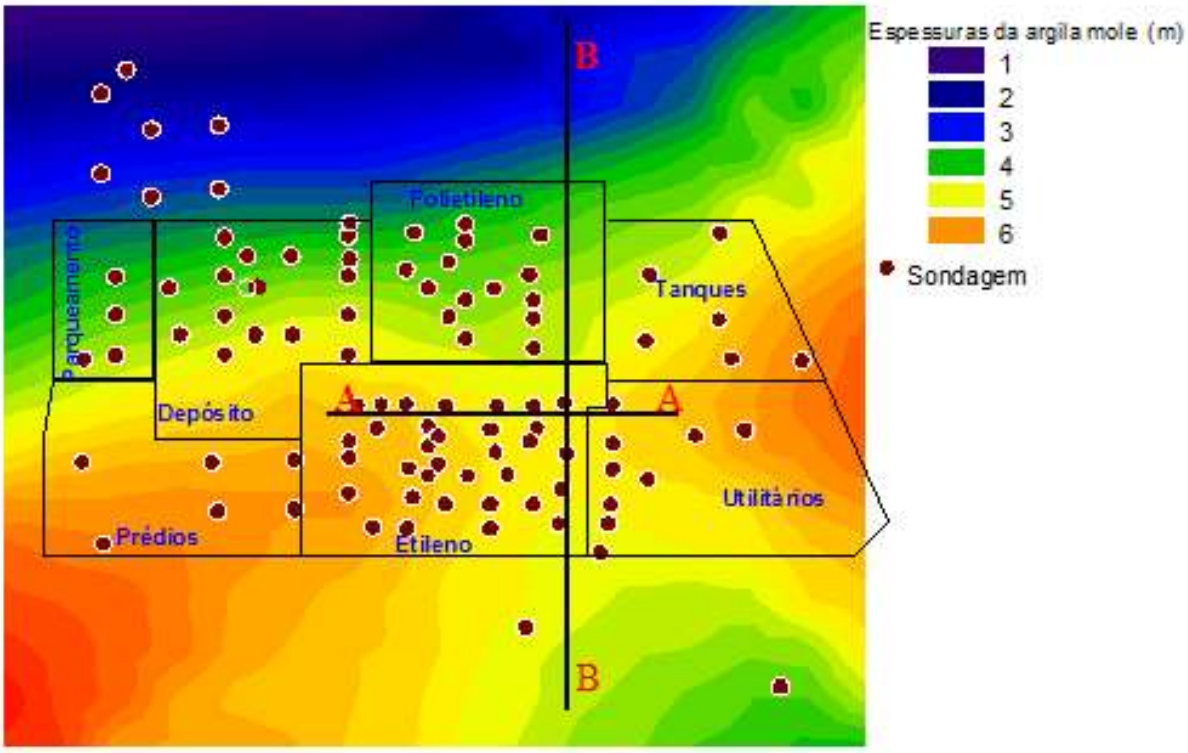


Figura 17 - Posição dos SPT's, dos perfis e espessura da argila mole (Ortigão, 2002)

A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.

Tabela 3 - Índices físicos e classificação do solo - Baixada Fluminense (Spannerberg, 2003)

LL (%)	LP (%)	IP (%)	Fração Granulométrica (%) peso			SUCS	MO (%)	Índices físicos		
			Argila	Silte	Areia			ω (%)	G	γ_{nat} (kN/m^3)
113	28	85	17	45	38	CH	6,6	106,7	2,6	15

Nota: LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de Plasticidade; IP = Índice de Plasticidade; MO = Teor de Matéria Orgânica; SUCS = sistema unificado de classificação dos solos; ω = Teor de umidade; G = Densidade Relativa dos grãos; γ_{nat} = Peso especifico natural

Spannenberg (2003) realizou ensaios de adensamento do tipo convencional (SIC) e de velocidade de deformação constante (CRS) (Constant Rate of Strain). O ensaio de adensamento CRS (Constant Rate of Strain) consiste essencialmente na imposição de uma taxa de deformação constante. Durante o ensaio, a drenagem é permitida pelo topo do corpo de prova, enquanto a base é mantida sob condição não drenada, com medição de poropressões.

No presente trabalho foram analisados exclusivamente os ensaios do tipo CRS por apresentarem dados contínuos para construção da curva tensão *vs* deformação. Foram realizados 4 ensaios com velocidades distintas (CRS-01, 02, 03 e 05) em amostras indeformadas e um ensaio com uma amostra previamente amolgada (CRS-04) com a mesma velocidade que o corpo de prova CRS – 03 (Tabela 4). Ressalta-se que o corpo de prova CRS–03 também apresentou características de solo amolgado. A escolha da velocidade de deformação foi feita segundo a variação da razão de poropressão u_b/σ_v. Na literatura existem vários propostas que sugerem limites para a razão de poropressão, entre as quais está a norma ASTM (1982) que indica um valor para u_b/σ_v entre 3 e 20% e a proposta de Carvalho (1993) que recomenda uma faixa de 10 e 40%. Ressalta-se que somente o ensaio CRS-05 apresentou geração de poropressão na base compatível com os critérios para validação do resultado final ($u_b/\sigma_v \leq 7\%$).

Tabela 4 - Velocidades dos ensaios CRS - Baixada Fluminense (Spannerberg 2003)

Ensaio nº	CRS-01	CRS-02	CRS-03	CRS-04 (amolgada)	CRS-05
Velocidade (mm/min)	0,082	0,035	0,007	0,007	0,002
Velocidade deformação (s^{-1})	$6{,}8 \times 10^{-5}$	$2{,}9 \times 10^{-5}$	$0{,}58 \times 10^{-5}$	$0{,}58 \times 10^{-5}$	$0{,}17 \times 10^{-5}$
Nota: o ensaio CRS-04 foi realizado com amostra previamente amolgada					

A Figura 18 mostra as curvas de compressão oedométrica de todas as amostras , inclusive as do ensaio convencional. A autor apresentou os resultados considerando os eixos ${}^{e}/_{e_0}$ vs σ'_v.

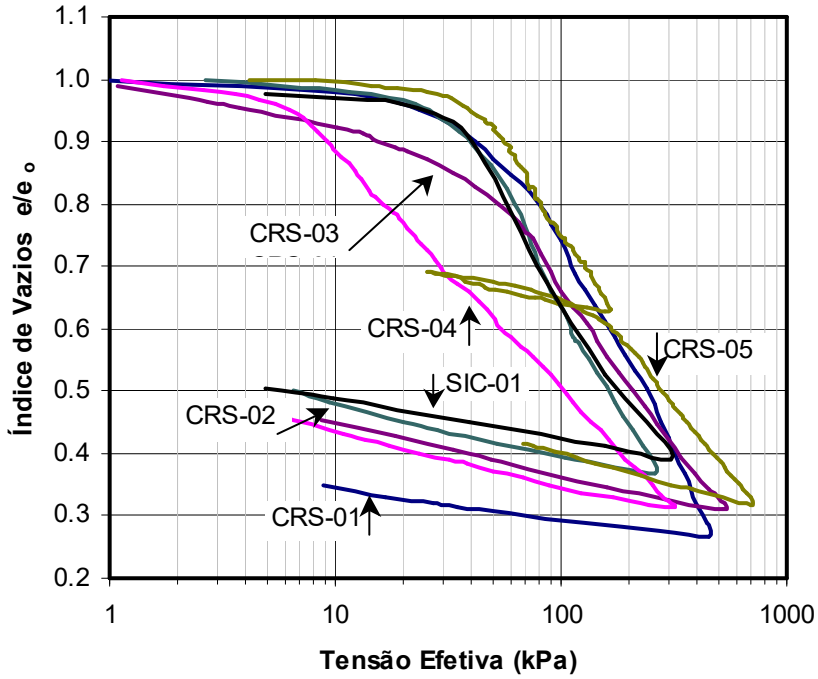


Figura 18 - Curvas de compressão obtidas de ensaios com velocidade de deformação constante CRS Argila Baixada Fluminense – Rio Polímeros II (Spannenberg, 2003)

2.2 Baixada Fluminense - Sarapuí II (da Silva, 2013)

O deposito conhecido como Sarapuí II está nas proximidade da margem esquerda do rio que leva o mesmo nome, a 1,5 km do depósito Sarapuí I, no Estado do Rio de Janeiro. Trata-se de uma argila muito mole com percentagem de argila superior a 70% e com aproximadamente 8 m de espessura, classificada como argila siltosa orgânica cinza muito mole e com a presença de fragmentos de concha.

A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização, cuja descrição aponta para uma argila siltosa com fragmentos de conchas muito mole.

Tabela 5 - Índices físicos e classificação do solo– Sarapuí II- Baixada Fluminense (da Silva, 2013)

CP	Prof. (m)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Fração Granulométrica (%) peso			SUCS	MO (%)	Índices físicos		
					Argila	Silte	Areia			ω (%)	G	γ_{nat} (kN/m^3)
AM01	1,69 - 1,73	173	41	132	63	36	1	CH	11-18	173,2	2,47	12,9
AM02	2,54 - 2,58	139	30	109	60	37	3			185	2,49	12,8
AM03	3,70 - 3,74	209	43	166	76	23	1			180,5	2,55	12,9

Nota: LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de Plasticidade; IP = Índice de Plasticidade; MO = Teor de Matéria Orgânica; SUCS = sistema unificado de classificação dos solos; ω = Teor de umidade; G = Densidade Relativa dos grãos; γ_{nat} = Peso especifico natural

Nesta dissertação serão analisados os ensaios nas profundidades correspondentes a AM01-02 e 03.

Para os ensaios edométricos, os corpos de prova foram preparadas segundo as recomendações de Ladd e Degroot (2003). As amostras remoldadas foram obtidas segundo o mesmo procedimento adotado por Teixeira (2012).

A Figura 19 apresenta uma curva de compressão oedométrica típica, correspondente às amostras indeformadas e amolgadas; as demais são apresentadas no Anexo 1.

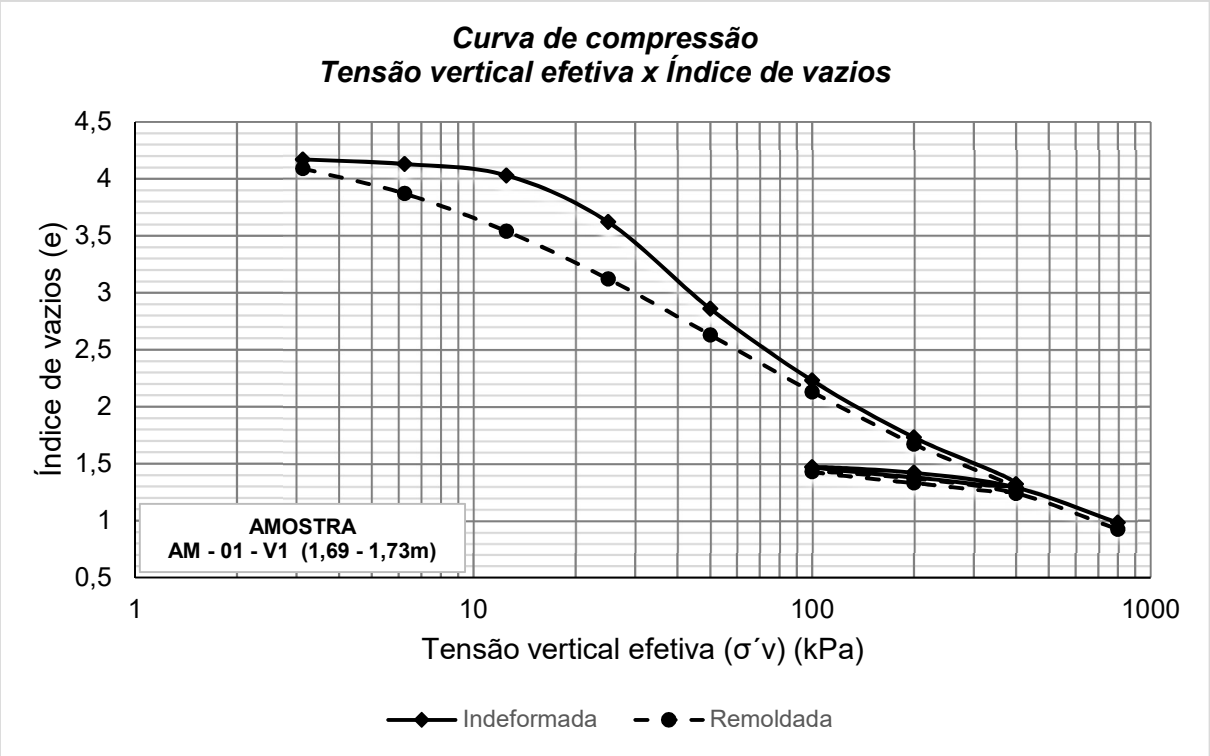


Figura 19 - Curva de compressão oedométrica da Argila Sarapuí II, AM - 01 - V1 (da Silva, 2013)

2.3 Baixada de Jacarepaguá - Teixeira (2012)

Os ensaios apresentados por Teixeira (2012) foram realizados na região conhecida como a Baixada de Jacarepaguá, localizada no município do Rio de Janeiro. Trata-se de uma formação homogênea marinho-fluvio-lagunar constituída por sedimentos recentes, especificamente aqueles que Massad (1999) chamou como mangues.

Com o objetivo de reconhecer o local de estudo foram realizadas sondagens do tipo SPT, num total de 11 sondagens identificadas como SP-701 a SP-711, as quais alcançaram profundidades de até 25 m.

Segundo o autor a inspeção táctil-visual permitiu descrever o deposito, como sendo turfoso na superfície, numa faixa de 0 a 6 m de profundidade, seguido por camada de argila mole, de espessura variável sobrejacente a uma camada de areia-

argilosa. Foram observadas conchas de restos marinhos no perfil de solos moles e o nível d'agua encontra-se próximo à superfície do depósito.

Para o presente trabalho serão utilizados os dados oriundos dos furos de sondagens identificados como SPT-703 e SPT-705. Nestes furos a espessura de solo mole é de aproximadamente 17 e 12 m, respetivamente.

Teixeira (2012) salientou que o processo de extração e transporte das amostras foi feito com extremo cuidado. Foram utilizados equipamentos leves e de boa qualidade e os responsáveis pela coleta das amostras contavam com a preparação devida. Os amostradores foram transladados com os cuidados pertinentes e visualmente não apresentavam alterações significativas. Os furos foram executados com lama bentonítica para minimizar o amolgamento.

Amostras deformadas foram coletadas nos amostradores SPT, a cada metro de avanço do furo. Amostras indeformadas foram coletadas adjacentes aos furos de sondagens com amostradores tipo Shelby com 10 cm (4") de diâmetro, paredes finas e pontas biseladas, construídos de aço inoxidável e ferro (latão). Por exemplo, identifica-se como AM-SPT-705-2.7m a amostra coletada nas proximidades da sondagem SP-705 a uma profundidade de 2,7 m (topo).

Ensaios de caracterização foram feitos tanto em amostras indeformadas quanto em deformadas. Nestas últimas, os resultados foram tomados para comparação e confirmação dos obtidos em amostras indeformadas. Os ensaios foram feitos em amostras aleatórias, e houve concordância entre os ensaios feitos nas amostras deformadas e indeformadas A Tabela 6 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.

Tabela 6 - Características e classificação dos solos - Baixada de Jacarepaguá (Teixeira, 2012)

CP	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Fração Granulométrica (%) peso			SUCS	MO (%)	Índices físicos		
				Argila	Silte	Areia			ω (%)	G	γ_{nat} (kN/m^3)
703 - 2,0	193,5	66,1	127,4	15,6	25,0	59,4	SC	11,9	264,2	2,54	11,8
703 - 7,4	122,3	37,0	85,3	35,3	25,5	39,1	CH-OH	11,2	141,2	2,53	13,2
705 - 2,7	115	41,7	73,3	17,1	48,2	34,7	CH-OH	8,6	266,9	2,58	11,5
705 - 10,7	169,6	60,1	109,5	23,3	43,4	33,4	CH-OH	5,1	168,9	2,44	12,4

Nota: LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de Plasticidade; IP = Índice de Plasticidade; MO = Teor de Matéria Orgânica; SUCS = sistema unificado de classificação dos solos; ω = Teor de umidade; G = Densidade Relativa dos grãos; γ_{nat} = Peso especifico natural

Na sondagem SPT-705, foi encontrada uma variabilidade de teores de umidade, sendo mais homogêneo entre a estaca 60+00 e 66+10 do que na estaca 66+10 e 71+00. Para o primeiro caso a variação é observada numa faixa de 0 até 5 m de profundidade, com os valores variando entre 400 e 150% (Figura 20). Abaixo de 5 m, o teor de umidade permaneceu aproximadamente constante em torno de 150%. Para o segundo caso as variações estão entre 100 e 250% ao longo da camada. A sondagem SPT-703 apresentou valores mais dispersos, conforme pode ser visualizado na Figura 20.

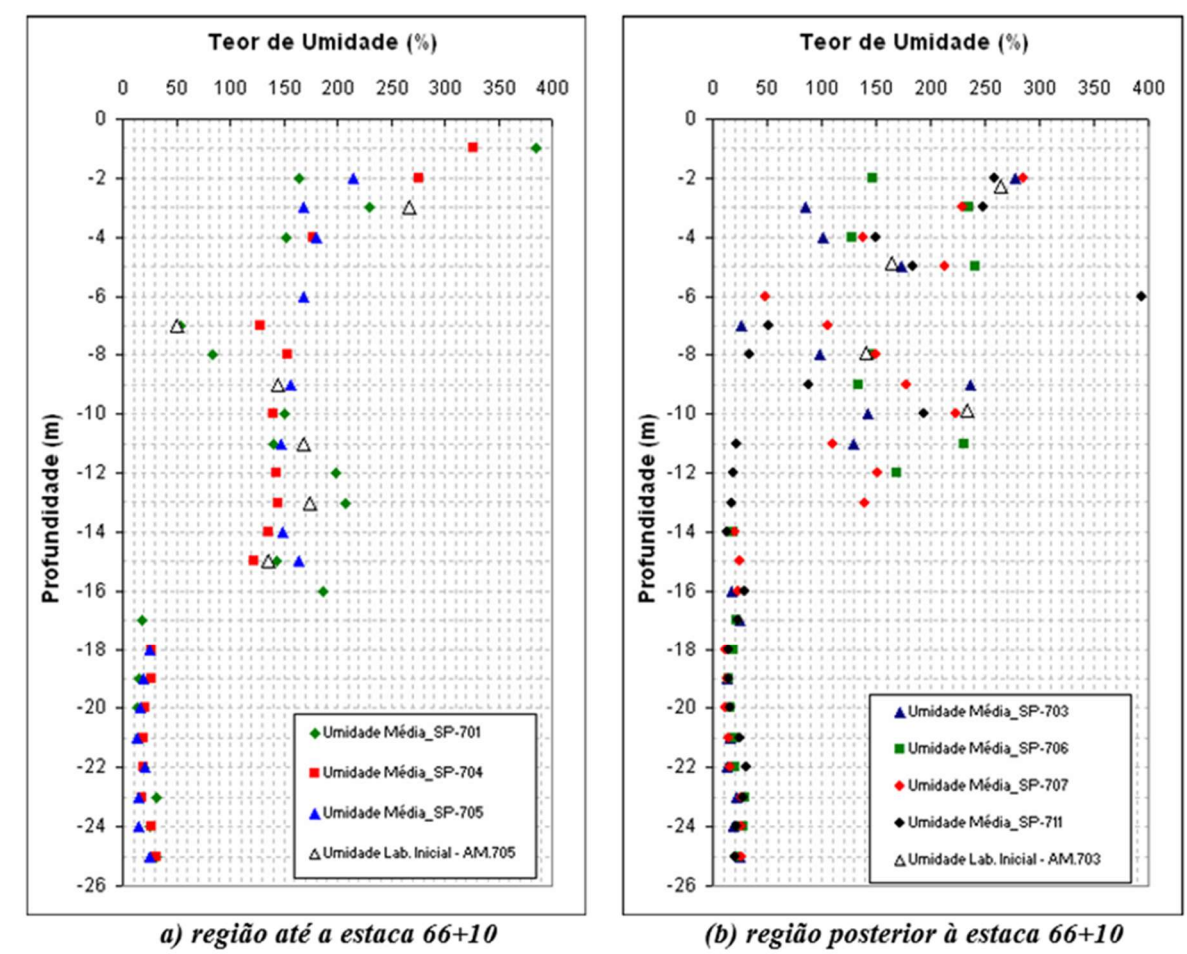


Figura 20 – Perfis de teor de umidade (Teixeira, 2012)

O peso específico, determinado em corpos de prova de amostras indeformadas, atingiu valores baixos, numa faixa de 11,5 a 13,5 kN/m^3 , o que pode sugerir a presença de matéria orgânica no solo. Porém no presente trabalho para a o cálculo da tensão vertical efetiva foi considerado o perfil da história de tensões apresentado pelo autor e ilustrado na Figura 21, enquanto que a tensão de pré-adensamento foi recalculada pelo método de Pacheco Silva.

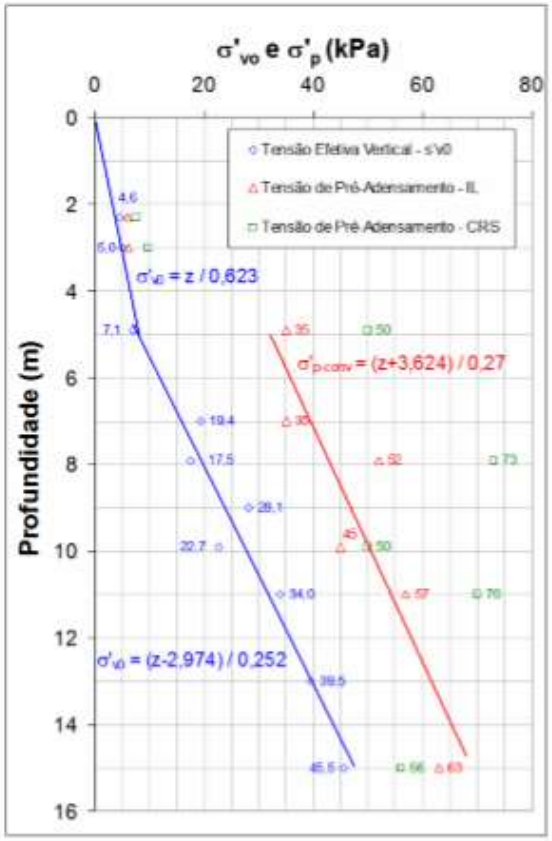


Figura 21 - História de Tensões (Teixeira, 2012)

Teixeira (2012) realizou ensaios de carregamento incremental (SIC), em corpos de prova indeformados, nas direções vertical e horizontal e em corpos de prova remoldados, assim como ensaios de velocidade constante (CRS) em corpos de prova indeformados, na direção horizontal.

Foram adotados 2 procedimentos para moldagem dos CP's remoldados. No primeiro, construiu-se uma massa de solo, para, em seguida, cravar o anel confinante. No segundo, porções de solo de caba tubo amostrador foram amassadas num saco plástico. Depois, as lamas eram transferidas para o anel, garantindo o completo preenchimento sem aplicação de esforço. Depois de vários testes, todos os corpos de prova foram moldados seguindo o segundo procedimento pois o primeiro para alguns casos (como na amostra AM-703-2.0) a lama era muito fluída e não possibilitou a execução da moldagem.

No presente trabalho, foram considerados somente os CP's na direção vertical, pois o estudo sobre anisotropia do solo foge do escopo desse trabalho. A Figura 22 apresenta, a título de ilustração, as curvas de compressão oedométrica correspondentes às amostras indeformada e amolgada, referentes à profundidade de 10,7 m. As demais curvas são apresentadas no Anexo 1.

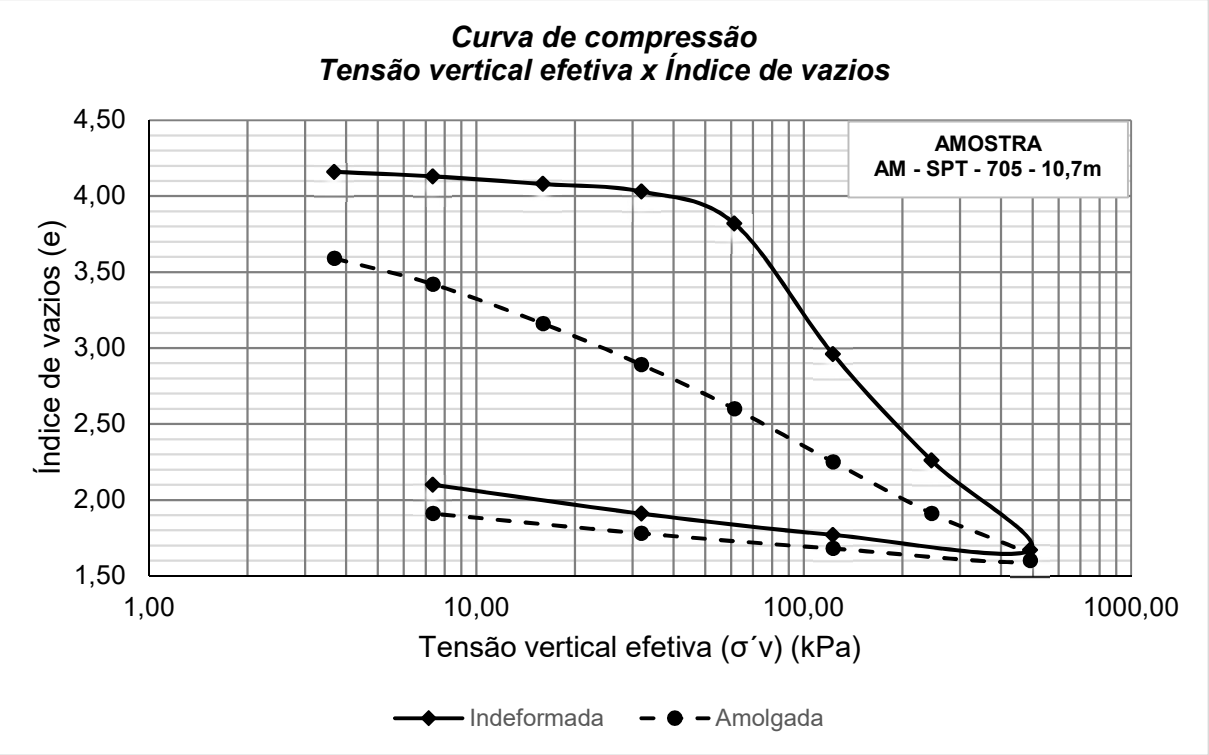


Figura 22 - Curva de compressão oedométrica da Argila da Baixada de Jacarepaguá: AM-SPT-705 -10,7 m (Teixeira, 2012)

2.4 Porto de Suape (Martins, 2012, da Silva, 2013 e Victor, 2013)

O depósito estudado localiza-se na área especifica do Complexo industrial do Porto de Suape – CIPS, constituído por uma argila bastante heterogênea de aproximadamente 20 m de espessura.

Nos estudos realizados por Victor (2013) observou-se uma alternância de camadas de argila orgânica e turfa com fragmentos de conchas.

Apesar de ter sido realizado uma ampla campanha de ensaios em toda área do Porto, neste trabalho serão analisadas duas verticais SRA-1 e SRA-2, onde se localizam as sondagens de referência SP-263 e SP-267.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização, onde o solo foi descrito como uma argila orgânica muito mole cores variadas dependendo da profundidade com presença de raízes e conchas.

Tabela 7 - Índices físicos e classificação do solo– Porto de Suape (Martins, 2012 relatório COPPETEC PEC - 16306)

CP	Prof. (m)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Fração Granulométrica (%) peso			SUCS	MO (%)	Índices físicos		
					Argila	Silte	Areia			ω (%)	G	γ_{nat} (kN/m^3)
AM-1-1	2,0 – 2,4	171	51	120	25	56	19	CH	16 - 33	165	2,44	12,5
AM-1-2	8,0 – 8,7	208	72	136	59	39	2		14 - 10	214	2,35	11,8
AM-2-1	2,0 - 2,7	151	48	103	33	65	2		14	156	2,41	12,8
AM-2-2	4,0 – 4,7	155	38	117	57	41	2		8 - 9	150	2,53	12,8
AM-2-3	10 – 10,7	176	48	128	65	32	3		10 - 14	158	2,5	12,6

Nota: LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de Plasticidade; IP = Índice de Plasticidade; MO = Teor de Matéria Orgânica; SUCS = sistema unificado de classificação dos solos; ω = Teor de umidade; G = Densidade Relativa dos grãos; γ_{nat} = Peso especifico natural

Para os ensaios oedométricos, os corpos de prova foram preparadas segundo as recomendações de Ladd e Degroot (2003). As amostras remoldadas foram obtidas segundo o mesmo procedimento adotado por Teixeira (2012).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta uma curva de compressão odométrica típica, correspondente às amostras indeformadas e amolgadas; as demais são apresentadas no Anexo 2.

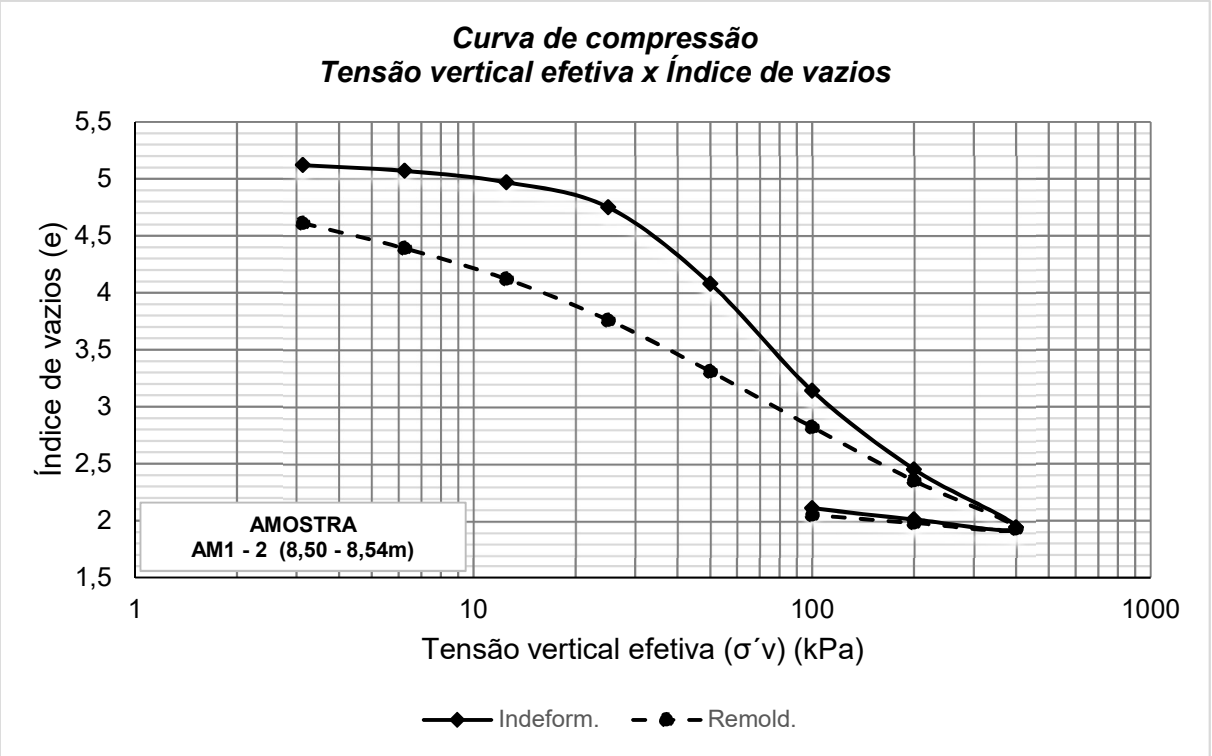


Figura 23 - Curva de compressão oedométrica da Argila Cluster Naval de Suape, AM1 - 2 (da Silva, 2013)

2.5 Analise de qualidade dos Corpos de Prova

A qualidade dos corpos de prova ensaiados foi analisada segundo o critério de Lunne *et al*. (1997), Coutinho (2007) e Andrade (2009).

No caso do depósito de argila da Baixada de Jacarepaguá, Teixeira (2012) apresentou o perfil de tensão vertical efetiva e calculou valores da tensão de pré-adensamento, σ'_{vm}, para corpos de prova indeformados, através de quatro métodos diferentes. Para o presente trabalho foi escolhida a metodologia de Pacheco Silva (1970). Para os corpos de prova amolgados, σ'_{vm} , foi também estimada pelo método Pacheco Silva (1970).

Tratamento análogo foi empregado para os resultados dos ensaios odométricos relativos aos depósitos de Sarapuí II e do Cluster Naval de Suape.

Cabe observar que os corpos de prova amolgados apresentavam alto grau de perturbação, gerando incertezas no cálculo de σ'_{vm}.

Apresentam-se na Tabela 8 e na Tabela 9 os resultados obtidos das avaliações de qualidade. Observa-se que os corpos de prova indeformados encontraram-se na faixa de qualidade muito boa a excelente, enquanto os corpos de prova amolgados, como esperado, encontraram-se na faixa de pobre a muito pobre.

Tabela 8 - Qualidade dos corpos de prova indeformados

Amostra	σ'_{vm}	σ'_{vo}	*OCR*	e_0	$e_{(\sigma'v0)}$	Δ_e	Δ_e / e_0	Lunne *et al*. (1997)	Coutinho (2007)	Andrade (2009)
Baixada Fluminense – Rio Polímeros II										
CRS - 01	55	19,6	2,80	3,55	3,41	0,14	0,041	Boa a Regular	(-)	(-)
CRS - 02	38	25	1,52	3,30	3,14	0,16	0,048	Boa a Regular	Boa a Regular	Muito Boa a Boa
CRS - 03	40	32	1,25	1,94	1,65	0,29	0,149	Muito Pobre	Muito Pobre	Muito Pobre
CRS - 05	42	28,6	1,47	2,70	2,63	0,07	0,026	Muito Boa a Excelente	Muito Boa a Excelente	Muito Boa a Excelente
Baixada de Jacarepaguá										
AM -703	6,1	4,64	1,31	6,73	6,45	0,28	0,042	Boa a Regular	Muito Boa a Excelente	Muito Boa a Excelente
AM -703	52	17,5	2,97	3,55	3,5	0,05	0,014	Muito Boa a Excelente	(-)	(-)
AM -705	6,2	5	1,24	7,1	6,8	0,3	0,042	Boa a Regular	Muito Boa a Excelente	Muito Boa a Excelente
AM -705	53	34	1,56	4,18	4	0,18	0,043	Boa a Regular	Muito Boa a Excelente	Muito Boa a Excelente
Baixada Fluminense – Sarapuí II										
AM01-V1	8	4,7	1,70	4,22	4,15	0,07	0,017	Muito Boa a Excelente	Muito Boa a Excelente	Muito Boa a Excelente
AM02-V1	21,8	6,9	3,16	4,55	4,5	0,05	0,011	Muito Boa a Excelente	(-)	(-)
AM03-V1	22,5	10,3	2,18	4,54	4,46	0,08	0,018	Muito Boa a Excelente	Muito Boa a Excelente	Muito Boa a Excelente
Cluster Naval de Suape										
AM-1-1	14	4,6	3,04	4,31	4,15	0,16	0,037	Boa a Regular	(-)	(-)
AM-1-2	28,9	21	1,38	5,19	4,86	0,33	0,064	Boa a Regular	Boa a Regular	Muito Boa a Boa
AM-2-1	19,5	7	2,79	3,54	3,46	0,08	0,023	Muito Boa a Excelente	(-)	(-)
AM-2-2	17,7	12,6	1,40	3,69	3,5	0,19	0,051	Boa a Regular	Boa a Regular	Muito Boa a Boa
AM-2-3	37,3	28	1,33	4,37	4,1	0,27	0,062	Boa a Regular	Boa a Regular	Muito Boa a Boa

O sentido de aplicar os três métodos foi o de aproveitar as vantagens que cada um proporciona, como é o caso de Lunne *et al*. (1997), que avalia a qualidade dos corpos de prova para valores de OCR até 4. Já Andrade (2009) ampliou o número de categorias para evitar que um corpo de prova se encaixasse em mais de uma categoria.

Tabela 9 - Qualidade dos corpos de prova amolgados

Amostra	σ'_{vm}	σ'_{vo}	*OCR*	e_0	$e_{(\sigma'v0)}$	Δ_e	Δ_e / e_0	Lunne *et al*. (1997)	Coutinho (2007)	Andrade (2009)
Baixada Fluminense – Rio Polimeros II										
CRS - 04	7	31,8	1*	2,40	1,63	0,77	0,321	Muito Pobre	Muito Pobre	Muito Pobre
Baixada de Jacarepaguá										
AM -703	5,6	4,64	1,21	5,39	4,4	0,99	0,184	Muito Pobre	Muito Pobre	Muito Pobre
AM -703	40	17,5	2,29	1,99	1,8	0,19	0,095	Pobre	Pobre	Regular a Pobre
AM -705	4,5	5	1*	4,32	3,5	0,82	0,190	Muito pobre	Muito Pobre	Muito Pobre
AM -705	9,2	34	1*	3,91	3	0,91	0,233	Muito Pobre	Muito Pobre	Muito Pobre
Baixada Fluminense – Sarapuí II										
AM01-V1	8,4	4,7	1,79	4,43	3,95	0,48	0,108	Pobre	Pobre	Pobre a Muito Pobre
AM02-V1	7,9	6,9	1,14	4,56	3,86	0,7	0,154	Muito pobre	Muito pobre	Muito pobre
AM03-V1	7,7	10,3	1*	4,62	3,8	0,82	0,177	Muito Pobre	Muito Pobre	Muito Pobre
Cluster Naval de Suape										
AM-1-1	7	4,6	1,52	4,31	3,75	0,56	0,130	Pobre	Pobre	Pobre a Muito Pobre
AM-1-2	8,3	21	1*	4,96	3,85	1,11	0,224	Muito Pobre	Muito Pobre	Muito Pobre
AM-2-1	8,1	7	1,16	3,78	3,2	0,58	0,153	Muito pobre	Muito pobre	Muito pobre
AM-2-2	6,5	12,6	1*	3,67	2,9	0,77	0,210	Muito Pobre	Muito Pobre	Muito Pobre
AM-2-3	12,5	28	1*	4,27	3,2	1,07	0,251	Muito Pobre	Muito Pobre	Muito Pobre

(*) Valores de OCR inferiores a 1, considerados como sendo igual à unidade para mera classificação, considerando que a condição $OCR < 1$ corresponde a condição onde o solo está no processo de adensamento, pouco apresentada nos solos.

3 DISCUSSÃO SOBRE OS METODOS DE RECONSTITUIÇÃO DA CURVA

Apresentam-se, a seguir, algumas observações sobre as metodologias de reconstrução da curva de compressibilidade apresentadas no Capitulo 2, assim como modificações que se introduziram à solução que procura resolver a problemática da curva de compressão oedométrica nos casos de amostras sob efeitos de amolgamento.

3.1 Metodologia de Schmertmann (1955)

Na metodologia gráfica proposta por Schmertmann (1955) há um ponto que chama a atenção no momento de sua aplicação: a clara dificuldade de se definir a tensão de pré-adensamento. O autor apresenta três sugestões para estimativa de σ'_{vm}: a primeira considera o uso da metodologia proposta por Casagrande (1936), a segunda usa dados de teor de umidade e a terceira surge do padrão de distribuição da variação do índice de vazios.

A primeira metodologia foi sugerida para os casos em que se observa claramente o ponto de raio mínimo de curvatura e um acentuado declive do trecho virgem. Tais condições dificilmente ocorrem em curvas de solos amolgados. Portanto, existe muita incerteza sobre a qualidade da estimativa de σ'_{vm} com o método de Casagrande.

Quanto ao uso do perfil de umidade, o autor restringe a sua utilização para depósitos uniformes, o que, segundo Schmertmann (1955), dificilmente ocorre.

Quanto à metodologia baseada no padrão de redução de índice de vazios, Schmertmann (1955) sugere que sejam escolhidos vários valores de tensão de pre-adensamento e que a curva de compressão oedométrica seja reconstruída para cada valor escolhido. Aquela que fornecer o maior pico em uma distribuição simétrica da curva de redução de índice de vazios determina o valor de σ'_{vm}. Na prática, a condição de simetria muitas vezes não se verifica, como mostra a Figura 24.

Realizar o cálculo pelo padrão de índice de vazios nem sempre conduz à condição de simetria, sugerida pelo autor. Entretanto, dependendo da tensão de pré-adensamento escolhida é possível encontrar trechos mais simétricos que outros, evidenciando a grande dificuldade da seleção do padrão correto.

Embora não chegue a ser considerada como uma dificuldade, a estimativa que o autor faz para “curva de recompressão” ao final da reconstrução é um motivo de incerteza, na reconstrução sempre são obtidos duas retas, e estimar uma curva entre elas poderia induzir a erros consideráveis.

Assim, levando em consideração as observações apresentadas acima, os métodos sugeridos por Schmertmann (1955) para estimativa de σ'_{vm} estariam limitados a certos tipos de argilas que atendessem às condições citadas.

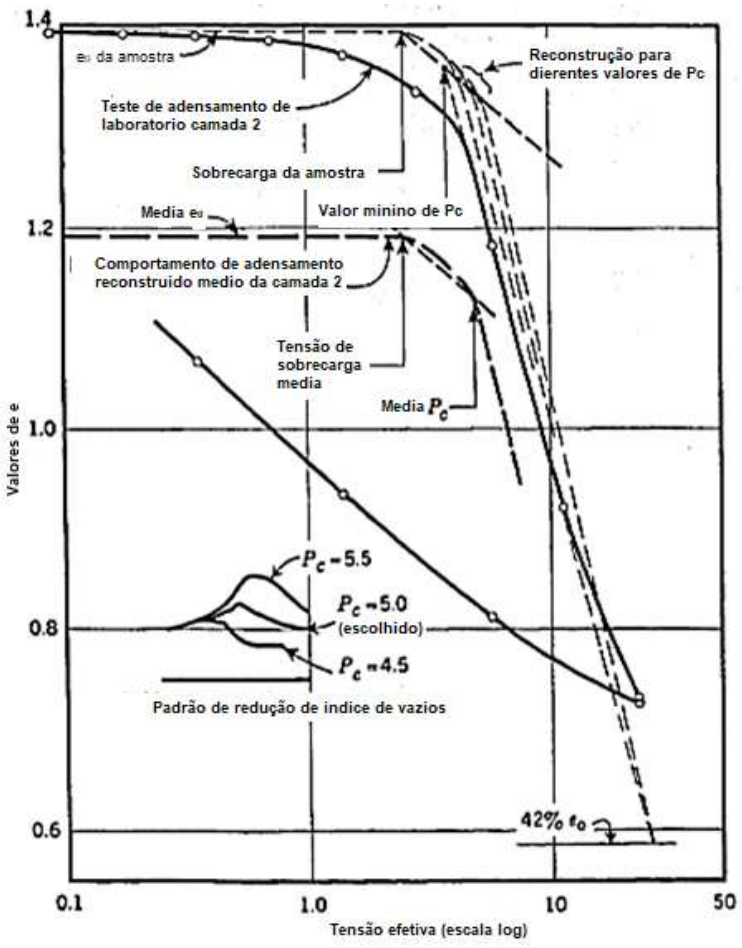


Figura 24 - Utilização típica do diagrama do padrão de redução de índice de vazios Schmertmann (1955)

3.2 Extensão da metodologia de Schmertman (Carneiro *et al.*, 2017)

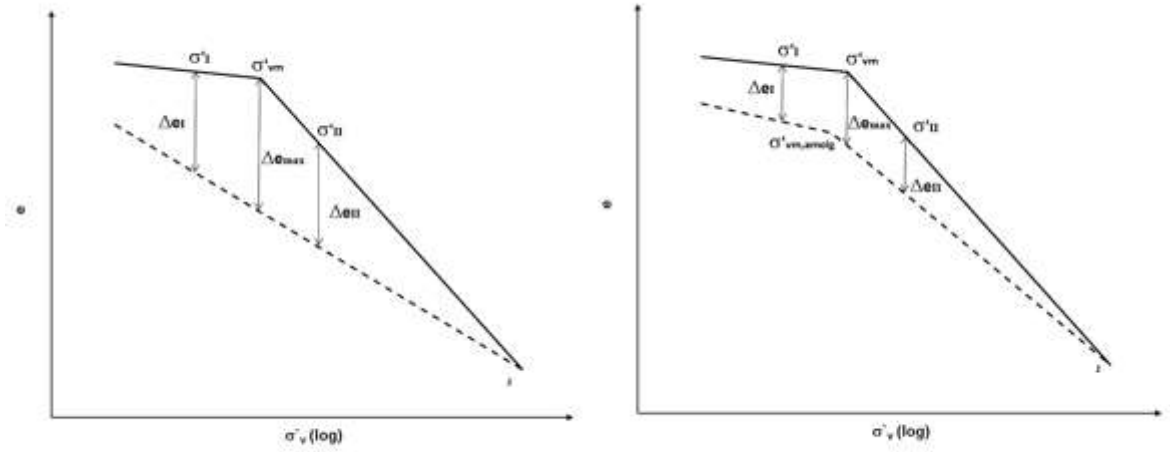
No item anterior foram citadas algumas observações sobre as dificuldades na aplicabilidade da metodologia proposta por Schmertmann (1955), particularmente no que diz respeito à definição da tensão de pré-adensamento. Baseados em alguns premissas matemáticas, Carneiro *et al*. (2017) propuseram alterações à metodologia de Schmertmann (1955), quem considerou o padrão de redução do índice de vazios como resultado da comparação da curva de adensamento amolgada real e a curva de adensamento indeformada estimada, esta última obtida sob condições de "probabilidades". Assim na procura de ter condições de simetria mais reais os autores sugerem que tal comparação seja feita entre duas retas, a primeira delas seria a resultante da reconstituição da curva amolgada ou seja as retas que conformam a "curva indeformada" e a segunda seria obtida transformado a curva do corpo de prova amolgado numa reta.

Mantendo-se a premissa de que o padrão de redução do índice de vazios é simétrico, os autores desenvolveram expressões matemáticas para garantir tal hipótese. Com isso, verificaram que a soma das inclinações dos trechos de recompressão e compressão virgem deve ser uma constante; isto é:

$$C_{c,\mathrm{d}} + C_{r,\mathrm{d}} = C_c + C_r \qquad (4\text{-}1)$$

onde $C_{r,\mathrm{d}}$ e $C_{c,\mathrm{d}}$ são, respectivamente, os índices de recompressão e compressão de um corpo de prova amolgado.

Assim sendo, assumindo que ditas inclinações tem como punto máximo coincidente a tensão de pré-adensamento, propuseram metodologia gráfica para reconstrução da curva de compressão oedométrica para condições de baixo (Figura 25b) e alto grau de amolgamento (Figura 25a). Quando o grau de amolgamento é baixo, é possível estimar a tensão de pre-adensamento. Para amostras muito amolgadas, não há trecho de recompressão e grande dificuldade de definir a tensão de pre-adensamento.



.

Figura 25 - Padrão de redução de vazios: (a) alto grau de amolgamento (b) baixo grau de amolgamento (Carneiro *et al*., 2017)

Tomando como guia a Figura 26, e algumas premisas desenvolvidas na metodologia do Schmertmann (1955) apresentam-se em seguida os passos para reconstituir a curva de compressão oedométrica para corpos de prova amolgados segundo o novo método citado anteriormente.

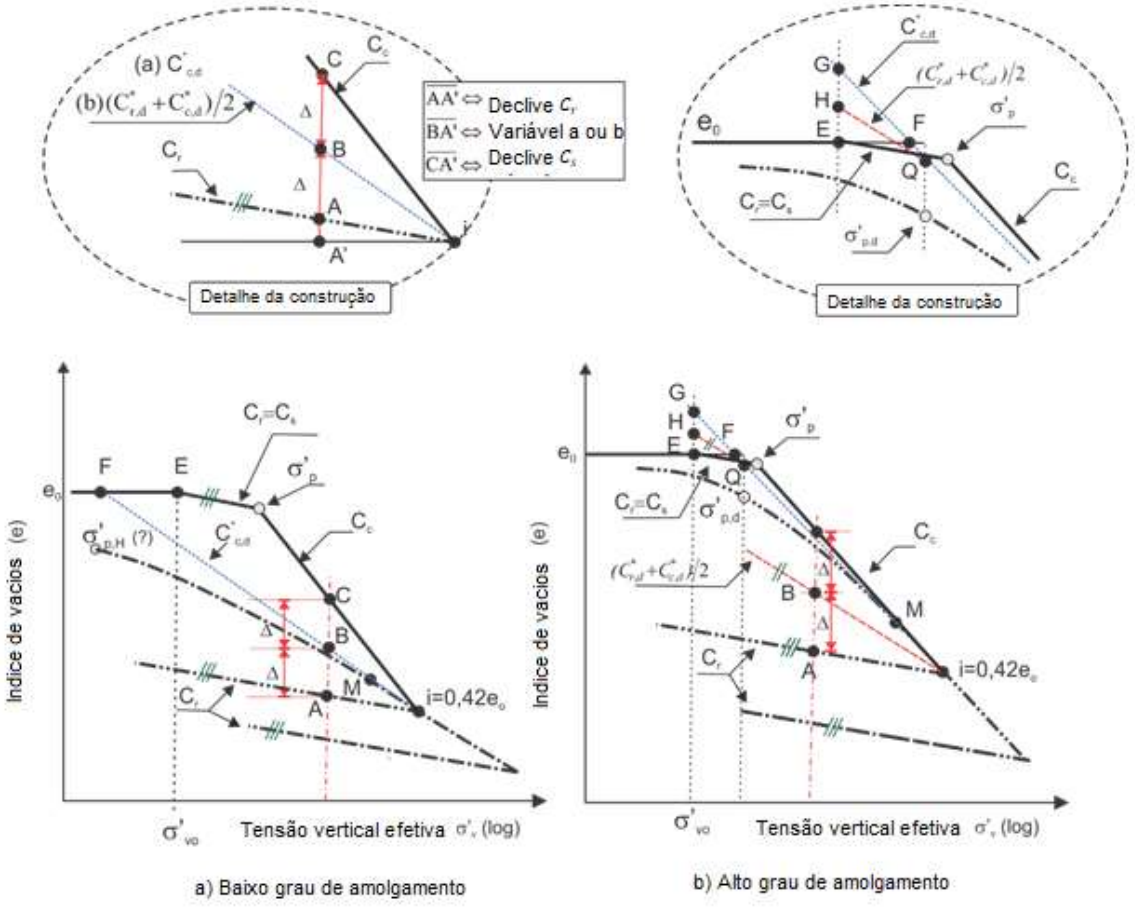


Figura 26 - Método de Schmertmann modificado (Carneiro *et al*., 2017)

Sequência de passos da proposta de Carneiro *et al*. (2017):

I. Traça-se uma reta horizontal em e_0 até a tensão de campo σ'_{v0} (ponto E);
II. A partir do ponto E, para representar o trecho de recompressão, traça-se uma reta paralela ao trecho de descompressão;
III. Determina-se o ponto de maior inclinação da curva amolgada (ponto M);
IV. Traça-se uma reta tangente à curva no ponto M, determinando-se o ponto F em e_0 e o ponto J em $0.42e_0$;
V. Se F está à direita de E (Figura 26-b), prolonga-se a reta do passo (IV) até a tensão σ'_{v0}de campo (ponto G). Caso contrário, segue-se para o passo (X) (Figura 26-a);
VI. Determina-se a tensão de pré-adensamento da curva amolgada (os métodos de Casagrande e de Pacheco Silva utilizam a reta do passo (IV));
VII. Traça-se uma vertical na tensão de pré-adensamento da curva amolgada, obtendo-se o ponto Q;

VIII. Traça-se uma reta ligando o ponto Q à mediatriz do segmento EG (ponto H);
IX. A partir do ponto J, traça-se uma reta paralela ao segmento QH;
X. A partir do ponto J, traça-se uma reta paralela ao trecho de descompressão;
XI. Traça-se uma vertical qualquer, que irá interceptar as duas últimas retas traçadas nos pontos A e B;
XII. Rebate-se a diferença entre os pontos A e B, na mesma vertical, obtendo-se o ponto C;
XIII. Liga-se o ponto J até o ponto C e prolonga-se a reta;
XIV. A interseção entre as retas de recompressão – passo (II) – e de compressão virgem – passo (XIII) – é a tensão de pré-adensamento σ'_{vm} (ponto P).

3.3 Metodologia de Louvise (2015)

Para a estimativa de reconstrução da curva de compressão oedométrica no trecho virgem para corpos de prova amolgados, Louvise (2015) utiliza a expressão (2-9), formulada por Martins (1983), que, para comodidade do leitor, foi reproduzida abaixo:

$$\sigma'_v = \frac{\psi}{(1+e)^{\Omega}} - C_0 \qquad (4\text{-}2)$$

3.3.1 . Determinação das incógnitas C_0, ψ e Ω

Para estimativa das três incógnitas: C_0, ψ e Ω, faz-se necessário a escolha de três pontos na curva de tensão efetiva *versus* índice de vazios, para assim montar o sistema de equações.

No pesquisa feita por Louvise (2015) a autora apresenta uma sugestão para determinar as incógnitas, para tal considerando as premisas da mecânica dos solos o valor de C_0 é calculado considerando que este dependera do limite de liquidez liquido ω_l^*, que corresponde ao numero mínimo de golpes para fechar o groove no aparelho de Casagrande, ou seja 1 golpe. Para esclarecer possíveis duvidas do

desenvolvimento da metodologia para a determinação das incógnitas recomensa-se consultar os trabalhos de Martins (1983) e Louvise (2015).

Continuando com o desenvolvimento feito por Louvise (2015), a autora apresenta o ajuste das curvas indeformadas utilizando 3 pontos de tensão bem distribuídos ao longo do trecho virgem, o que permitiu ter um ajuste excelente como pode ser observado na Figura 27. Os pontos escolhidos se identificarom como segue a continuação:

- ✓ Ponto Nº 1 nas proximidades da tensão de pré-adensamento;
- ✓ Ponto Nº 2 na metade do trecho virgem, entre a tensão de pré-adensamento e o último estágio aplicado;
- ✓ Ponto Nº 3 nas proximidades do último estágio realizado.

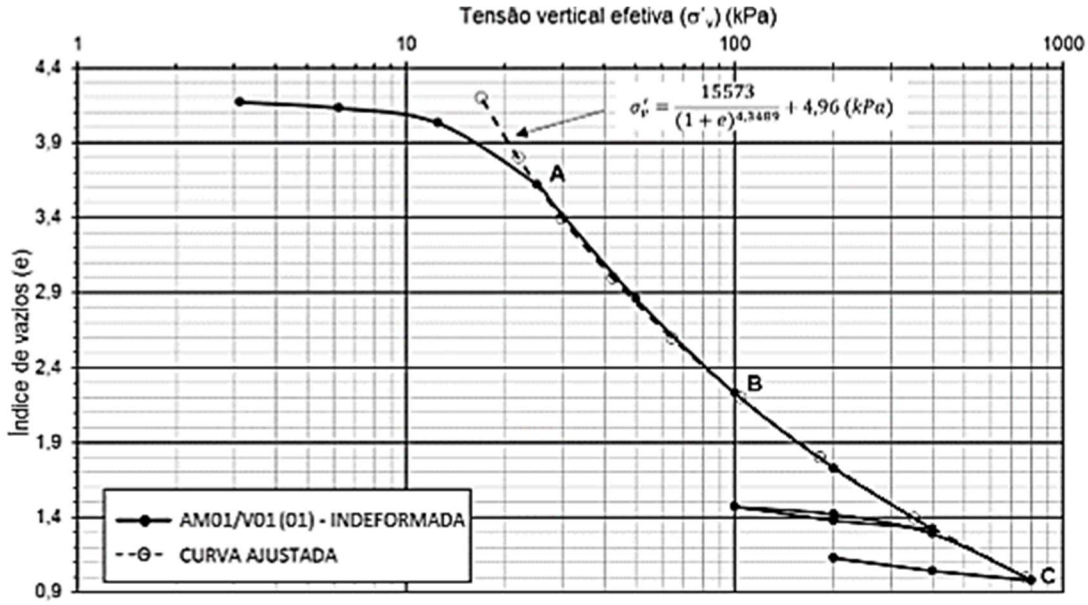
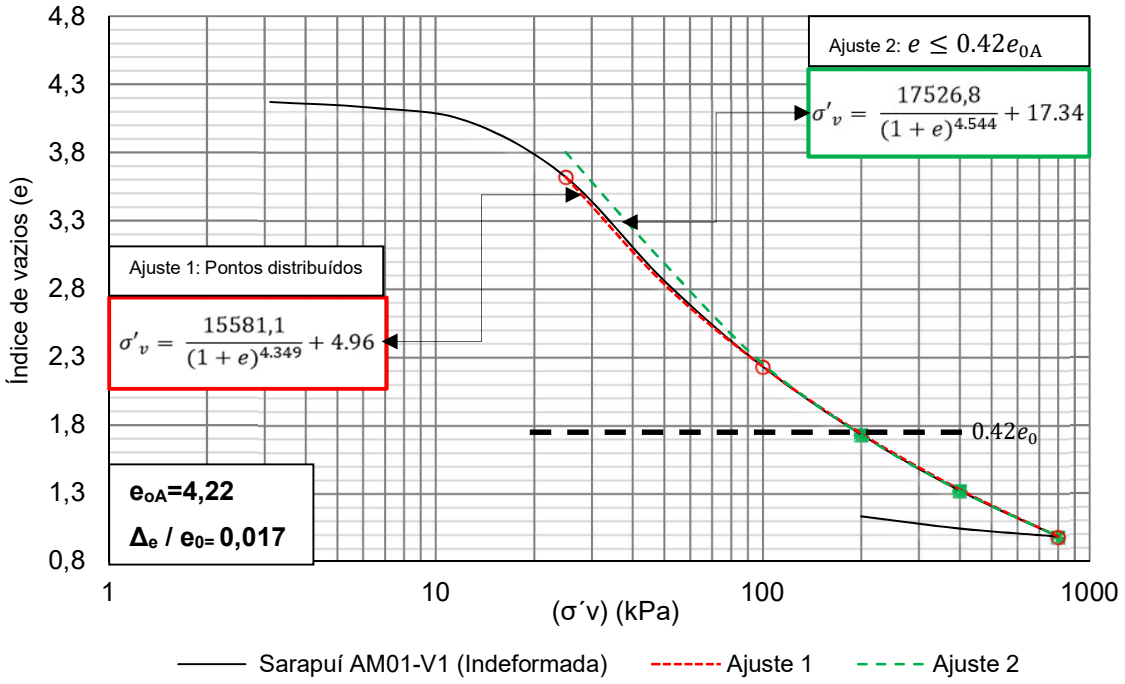


Figura 27 - Ajuste à curva de compressão oedométrica experimental (da Silva, 2013) - Argila do Sarapuí II – AM-1-V1 (Louvise, 2015)

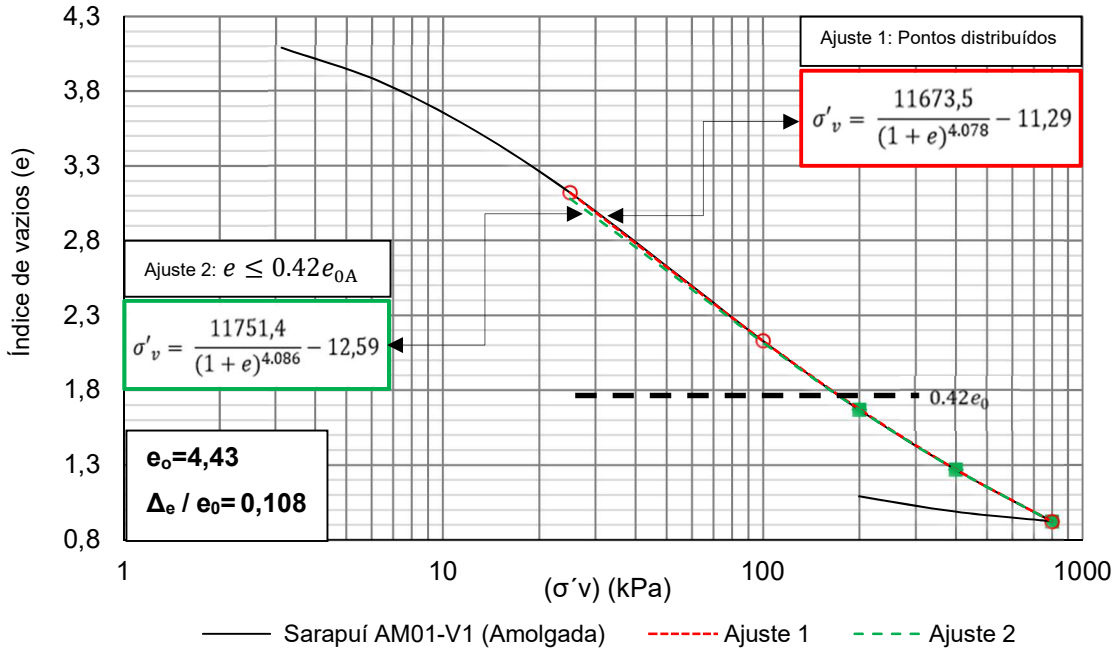
Carneiro (2017) observou que a escolha dos pontos influenciavam o resultado do ajuste da curva de compressão oedométrica. Sob essas condições, o autor estudou quais seriam os melhores pontos da curva de ensaio em corpo de prova amolgado que melhor representassem a curva de compressão oedométrica indeformada e retirou as seguintes conclusões:

- ✓ Pontos próximos à tensão de pré-adensamento não são representativos pois a estimativa de σ'_{vm} é muito afetada pelo grau de perturbação do corpo de prova.
- ✓ Pontos comuns a ambas condições, amolgada e indeformada, seriam os mais adequados. Considerando que Schmertmann (1955) mostrou que a interseção entre as curvas amolgada e indeformada estaria entre 0,37 e_0 a 0,6 e_0, sendo $0{,}42e_{0A}$ um valor médio, Carneiro (2017) recomendou a adoção de pontos com $e \leq 0.42e_{0A}$.

A Figura 28 e a Figura 29 ilustram os resultados de curvas de compressão oedométrica de corpos de prova indeformados e amolgados, para diferentes critérios de escolha dos pontos de ajuste. O primeiro critério (Ajuste 1) considera pontos bem distribuídos ao longo do trecho de compressão virgem e o segundo (Ajuste 2) considera apenas os pontos de tensão que garantam a condição $e \leq 0.42e_{0\mathrm{A}}$.



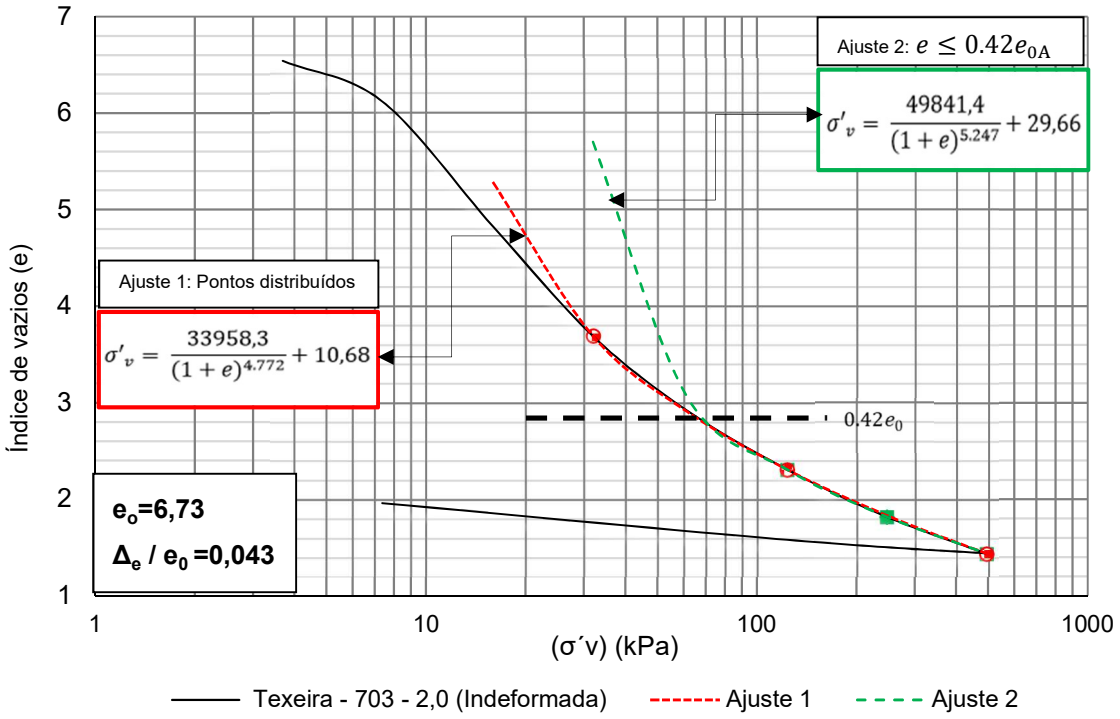
(a) AM-01-V1 Indeformada



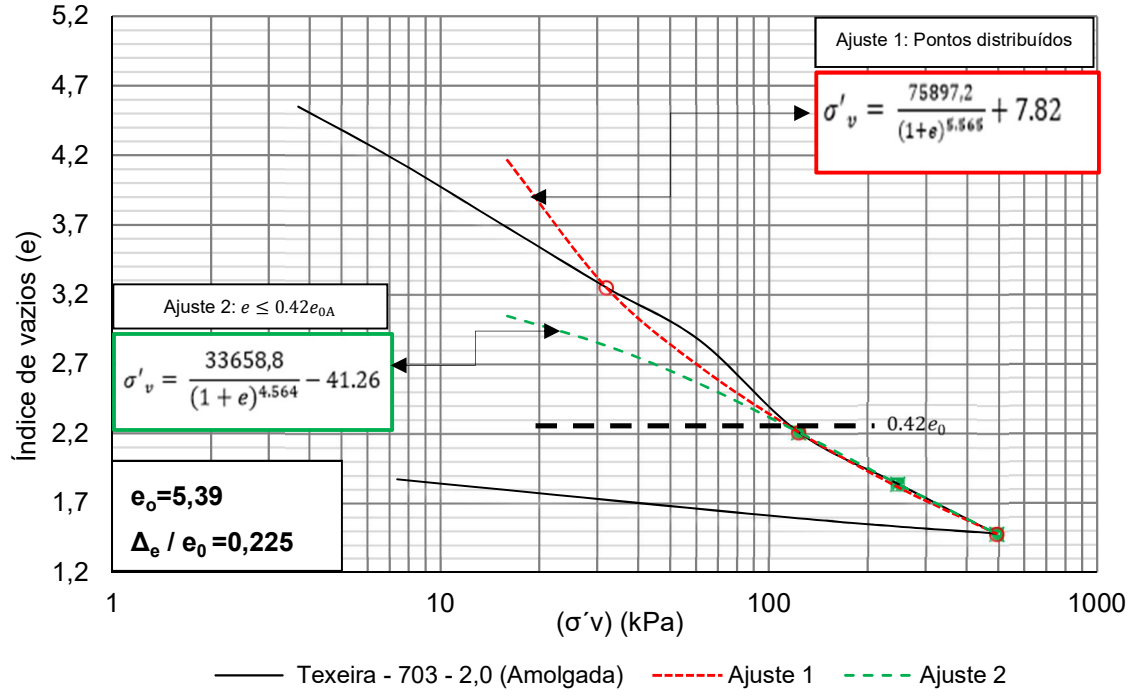
$0.42e_0$

(b) AM-01-V1 Amolgada

Figura 28 - Influencia da escolha dos pontos de ajuste no trecho virgem. Argila do Sarapuí II



(a) AM-703-2,0 m Indeformada



(b) AM-703-2,0 m Amolgada

Figura 29 - Verificação da aplicabilidade da equação para o ajuste experimental do trecho virgem. Argila da Baixada de Jacarepaguá – (Teixeira, 2012)

No caso do corpo de prova da argila de Sarapuí II os resultados foram pouco influenciados pelos pontos de ajuste (Figura 28). Entretanto, para a Baixada de Jacarepaguá as diferenças foram significativas (Figura 29), não se tendo verificado um motivo aparente para a diferença de padrão de reconstrução da curva nos dois locais.

Cabe ainda ressaltar que a sugestão de escolha de pontos de ajuste que atendam à condição $e \leq 0.42 e_{0A}$ irá depender do número de estágios de tensão vertical aplicados no ensaio. Se houver a combinação de solo muito compressível com um número reduzido de estágios de carga é possível que o trecho da curva com índices de vazios inferiores à $0{,}42 e_{0A}$ seja insuficiente para aplicação do método de reconstrução.

3.3.1 Significado físico da constante C_0

Para determinar o valor da constante de integração (C_0) Louvise (2015) considerou que o limite inferior da equação estaria associado à tensão vertical efetiva (σ'_v) nula e que este esta corresponderia a um índice de vazios máximo (e_{max}). Para tal, considerou-se um índice de vazios associado ao limite de liquidez. Para o caso, C_0 seria sempre positivo.

Porém, na pratica, so alguns valores atigiram a condição onde $C_0 > 0$ levando a conclusão que não se poderia se estimar o valor de C_0 com base nessa condição, mas sim obter uma aproximação da curva de compressão edometrica considerando $C_0 = 0,$ uma vez que a ideia principal não era reconstruir a curva perfeitamente e sim aproveitar os resultados que fornece um corpo de porva amolgado.

3.4 Extensão da Metodologia de Louvise (2015)

Segundo as conclusões feitas no trabalho de Louvise (2015) não é possível reproduzir a compressibilidade de um solo apenas pela relação entre índice de vazios

e tensão vertical efetiva, devido á estrutura da argila. No entanto pode-se tentar aproximar ao máximo o comportamento de um corpo de prova indeformado.

Carneiro (2017), através de um desenvolvimento matemático, propôs uma alternativa para a determinação das três incógnitas: C_0, ψ e Ω. Primeiramente, admite-se que a equação (4-2) também é capaz de reproduzir o comportamento da curva amolgada. A equação passaria a curva amolgada pode ser escrita como:

$$\sigma'_v = \frac{\psi_{Amolgado}}{(1+e)^{\Omega_{Amolgado}}} - C_{0(Amolgado)} \tag{4-3}$$

A equação 4-3 só é válida até o ponto $e = 0{,}42e_{0A}$, pois este é o ponto no qual as curvas amolgada e indeformada se unem. A partir de então, a equação que rege a curva amolgada passa a ser a equação (4-2), a mesma que rege a curva indeformada.

A transição entre as equações (4-2) e (4-3) no ponto $e = 0{,}42e_{0A}$ é suave, isto é, não há uma mudança brusca na tangente da curva nesse ponto. A Figura 30 exemplifica o ocorrido. A derivada é contínua, ou seja, as derivadas das equações (4-2) e (4-3) são iguais no ponto $e = 0{,}42e_{0A}$.

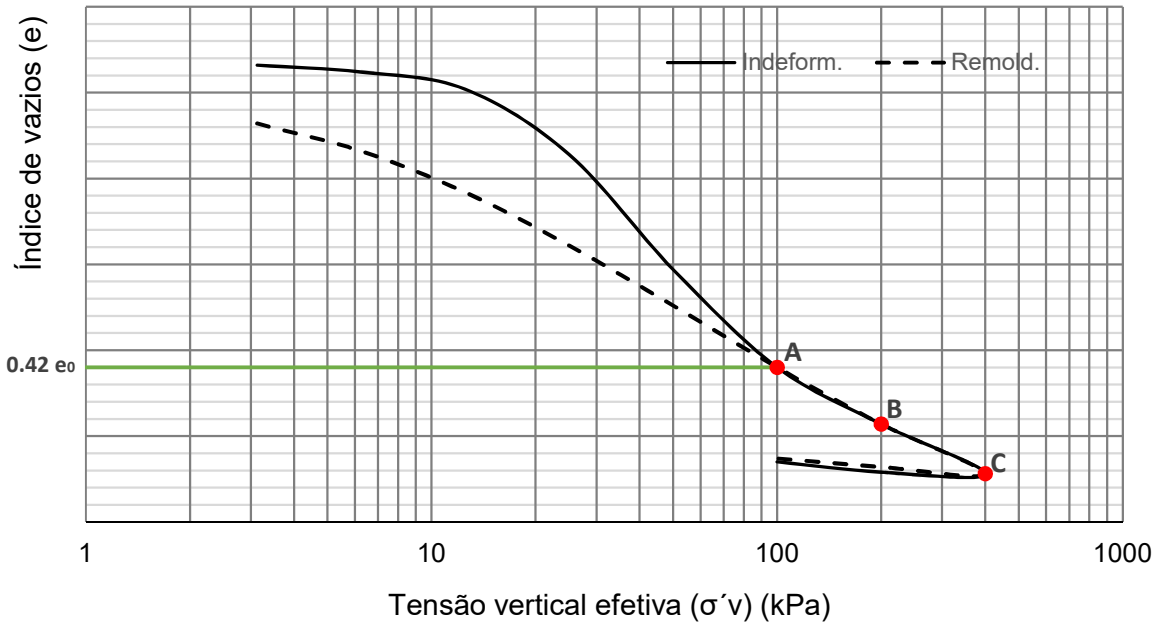


Figura 30 - Comparação de curvas indeformadas e amolgadas

Reescrevendo a equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** em termos do índice de vazios, obtém-se:

$$e = \left(\frac{\psi}{\sigma'_v + C_0}\right)^{\frac{1}{\Omega}} - 1 \tag{4-4}$$

Derivando-se:

$$\frac{de}{d\sigma'_v} = -\frac{1}{\Omega}\,\psi^{\frac{1}{\Omega}}(\sigma'_v + C_0)^{-\left(\frac{1}{\Omega}+1\right)} \tag{4-5}$$

ou,

$$\frac{de}{d\sigma'_v} = -\frac{1}{\Omega}\left(\frac{\psi}{\sigma'_v + C_0}\right)^{\frac{1}{\Omega}}\left(\frac{1}{\sigma'_v + C_0}\right) \tag{4-6}$$

mas, de acordo com equação (4-4):

$$\frac{de}{d\sigma'_v} = -\frac{1}{\Omega}(1+e)\left(\frac{1}{\sigma'_v + C_0}\right) \tag{4-7}$$

De modo análogo, obtém-se:

$$\frac{de}{d\sigma'_v} = -\frac{1}{\Omega_{Amolgado}}(1+e)\left(\frac{1}{\sigma'_v + C_{0(Amolgado)}}\right) \tag{4-8}$$

Igualando-se as equações (4-7) e (4-8):

$$-\frac{1}{\Omega_{Amolgado}}(1+e_A)\left(\frac{1}{\sigma'_{vA} + C_{0(Amolgado)}}\right) = -\frac{1}{\Omega}(1+e_A)\left(\frac{1}{\sigma'_{vA} + C_0}\right) \tag{4-9}$$

Simplificando chega-se à expressão:

$$\Omega_{Amolgado}\,(\sigma'_A + C_{0\,(Amolgado)}) = \Omega\,(\sigma'_A + C_0) \tag{4-10}$$

Em seguida consideram-se dois pontos de tensão **A** e **B** (ver Figura 30) de coordenadas (e_A, σ'_{vA}) e (e_B, σ'_{vB}) como segue:

$$\sigma'_A = \frac{\psi}{(1+e_A)^{\Omega}} - C_0 \tag{4-11}$$

$$\sigma'_B = \frac{\psi}{(1+e_B)^{\Omega}} - C_0 \tag{4-12}$$

Isolando C_0 na expressão (4-11) temos:

$$C_0 = \frac{\psi}{(1+e_A)^{\Omega}} - \sigma'_A \tag{4-13}$$

Substituindo (4-13) em (4-12) e rearrumando os termos, tem-se:

$$\psi = \frac{(\sigma'_B - \sigma'_A)\ \ [(1+e_B)(1+e_A)]^{\Omega}}{(1+\ e_A)^{\Omega} - (1+\ e_B)^{\Omega}} \tag{4-14}$$

Combinando as equações (4-13) e (4-14) chega-se a:

$$C_0\ + \sigma'_A\ = \frac{(\sigma'_B - \sigma'_A)\ (1+e_B)^{\Omega}}{(1+\ e_A)^{\Omega} - (1+\ e_B)^{\Omega}} \tag{4-15}$$

Logo, substituindo (4-15) em (4-10), obtém-se uma expressão para o cálculo de Ω:

$$\left(\frac{1+\ e_A}{1+\ e_B}\right)^{\Omega} = \frac{(\sigma'_B - \sigma'_A)}{\left(\frac{\Omega_{Amolgado}}{\Omega}\right)\left(\sigma'_A + \ C_{0\,(Amolgado)}\right)} + 1 \tag{4-16}$$

A equação 4-16 só pode ser resolvida numericamente. Observa-se que esta expressão depende de duas incógnitas ($\Omega_{Amolgado}$, $C_{0\,(Amolgado)}$) que podem ser determinadas facilmente fazendo uso dos dados da curva amolgada. Assim, basta tomar da curva amolgada três pontos de tensão bem distribuídos, com índices de vazios superiores a $0{,}42e_{0A}$, e substituir as coordenadas de tensão efetiva e índice de vazios na expressão (4-3). Com isso, obtém-se um sistema de equações que fornece o valor das incógnitas.

Uma vez encontrado o valor de Ω, determinam-se os valores das constantes $\psi\ e\ C_0$ que completam a equação do trecho de compressão virgem a partir das equações (4-14) e (4-13) respetivamente.

3.5 Metodologias de reconstrução das curvas de compressão edometrica

A fim de aproveitar as metodologias existentes e as extensões das mesmas propostas no presente trabalho, se apresentam três novas metodologias que, combinando os conceitos acima expostos, visam estimar a reconstrução da curva de compressão edometrica.

3.5.1 . Metodologia 1 : 2 Pontos de tensão vertical efetiva + Derivada (2P+D)

Quando se dispõe unicamente de dois pontos de tensão após $0.42e_{0A}$ recomenda-se aplicar os seguintes passos :

1. Traçar uma reta horizontal pelo ponto $\boldsymbol{e_{0A}}$ uma horizontal (ver Figura 31);
2. Calcula-se e_0 pela expressão $e_0 = \frac{e_{0A}}{1.025}$ e o valor de σ'_{v0} com ajuda do perfil geotécnico e do peso especifico γ, determinando-se assim o ponto (e_0, σ'_{v0});
3. Determinar a tensão de pré-adensamento pelo método de Pacheco Silva ($\sigma'_{vm\,PS}$ na Figura 31);
4. Calcula-se a tensão vertical efetiva para $0.42e_{0A}$
5. Determinam-se os pontos de tensão **A** e **B**, em que **A** se encontra imediatamente após $0.42e_{0A}$ e **B** seja tal que $\sigma'_{vB} = 2\sigma'_{vA}$;
6. Dos dados da curva amolgada são escolhidos 3 pontos bem distribuídos (até $0.42e_{0A}$) para serem substituídos na equação (4-3) e assim determinar os valores de ($\Omega_{Amolgado}$ *e* $C_{0\,(Amolgado)}$);
7. Com as constantes determinadas no ponto 6 e substituindo as coordenadas dos pontos **A** e **B**, determina-se o valor da constante Ω pela equação (4-16);
8. Substituindo as coordenadas **A** e **B**, os valores das constantes ψ e C_0 são obtidos pela resolução das equações (4-14) e (4-13), respectivamente;
9. Com os parâmetros definidos anteriormente, a equação (4-2) é resolvida e o trecho de compressão virgem é desenhado e $\sigma'^{(*)}_{vm}$ é determinado pela interseção da curva de compressão oedométrica virgem e a horizontal traçada a partir de e_{0A}.(ver Figura 31), avançando-se para o item 10. Caso o valor de $\sigma'^{(*)}_{vm}$ encontrado seja menor que a tensão vertical efetiva σ'_{v0} considera-se a condição normalmente adensada, ou seja, não existe trecho de recompressão e os parâmetros serão recalculados considerando os pontos **A, B** e $\boldsymbol{(e_0, \sigma'_{v0})}$ e neste caso o processo é encerrado com a reconstrução do trecho de compressão virgem;
10. Determinar o valor de $OCR = \sigma'^{(*)}_{vm} \Big/ \sigma'_{v0}$;

11. O “laço” de descarregamento-recarregamento, **BCD**, é realizado depois do final do estágio **AB** garantindo que seja gerado o mesmo valor de OCR determinado no passo 7. Para isto, $OCR = {\sigma'_{vm}}^{(*)} / \sigma'_{v0} = {\sigma'_{vB}} / \sigma'_{vC} = {\sigma'_{vD}} / \sigma'_{vC}$;
12. O índice de recompressão C_r é determinado com ajuda do “laço” **BCD**. Caso o descarregamento seja feito unicamente de **B** até **C** o C_r é determinado considerando as tensões destes pontos;
13. Partindo das coordenadas (e_0, σ'_{v0}) traçar uma reta de declividade C_r e determinar o ponto **J**. (ver Figura 31);
14. A curva de compressão oedométrica reconstruída será, então, **XJAB**;

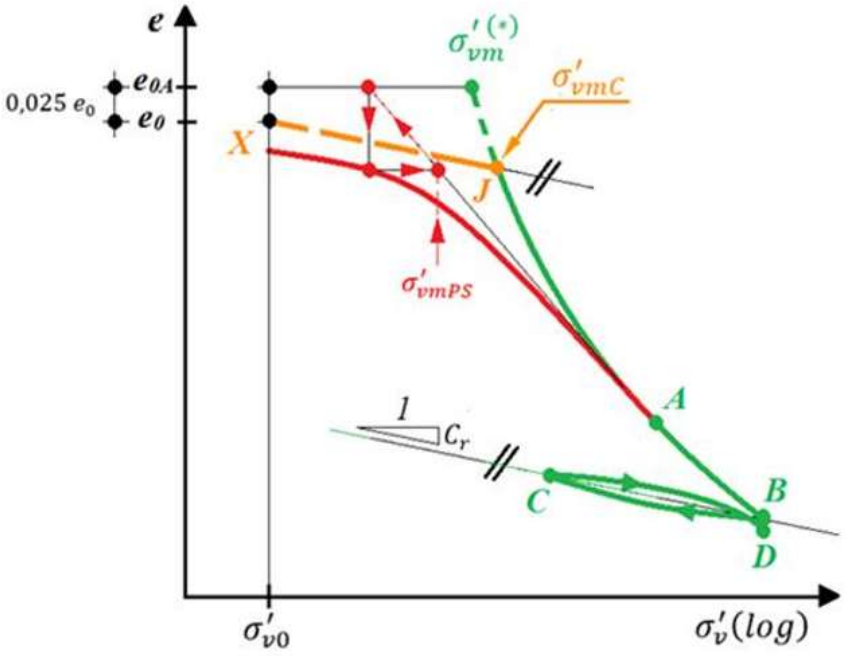


Figura 31 - Sequência de reconstituição da curva de compressão oedométrica (Louvise, 2015)

3.5.2 . Metodologia 2 : 1 Ponto de tensão vertical efetiva + Estimativa de σ'_{vm} + Derivada (1P+E+D)

Quando se dispõe unicamente de um ponto de tensão depois de $0.42e_{0A}$ recomenda-se aplicar os seguintes passos :

1. Calcula-se o índice de vazios de campo $e_{0=}\ e_{0A}/1.025$ e a tensão vertical efetiva de campo com ajuda do perfil geotécnico e do peso especifico γ, determinando-se assim o ponto (e_0, σ'_{v0});
2. Calcula-se a tensão vertical efetiva para $0.42e_{0A}$;
3. Estimar a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) (ponto **E**) seguindo o procedimento explicado no item 3.2;
4. Do procedimento para calcular (σ'_{vm}) o coeficiente de recompressão (C_r) é calculado como sendo igual ao coeficiente de descompressão (C_s) da curva amolgada. Com o valor de (C_r) é determinada a equação do trecho de recompressão, considerando que esta parte do ponto $(\ e_0,\ \sigma'_0)$;
5. Calcula-se o índice de vazios correspondente à tensão de pré-adensamento $(\ e_{\sigma' vm}\ )$ substituindo o valor de (σ'_{vm}) na equação do trecho de recompressão obtido no ponto 6;
6. Traça-se o trecho de recompressão a partir do ponto $(\ e_0,\ \sigma'_0)$ até a tensão de pré-adensamento estimada $(\ e_{\sigma' vm}\ \sigma'_{vm})$**;**
7. Determinam-se os pontos de tensão **A** e **B**, em que **A** se encontra imediatamente após $0.42e_{0A}$ e **B** é a própria estimativa da tensão de pré-adensamento (ponto **E**);
8. Dos dados da curva amolgada são escolhidos 3 pontos bem distribuídos (até $0.42e_{0A}$) para serem substituídos na equação (4-3) e assim determinar os valores de $(\ \Omega_{Amolgado}\ e\ C_{0\,(Amolgado)}\ )$;
9. Com as constantes determinadas no ponto 6 e substituindo as coordenadas dos pontos **A** e **B**, determina-se o valor da constante Ω pela equação (4-16);
10. Substituindo as coordenadas **A** e **B**, os valores das constantes ψ e C_0 são obtidos pela resolução das equações (4-14) e (4-13), respectivamente;
11. Com as constantes definidas, o trecho de compressão virgem é reconstituído, o qual irá interceptar-se com o trecho de recompressão no ponto $(\ e_{\sigma' vm}\ \sigma'_{vm})$, obtendo assim a curva reconstituída.

3.5.3 . Metodologia 3 : 2 Pontos de tensão vertical efetiva + Estimativa de σ'_{vm}+ (2P+E)

Quando se dispõe unicamente de dois ponto de tensão depois de $0.42e_{0A}$ e pode ser aproveitada a estimativa da tensão de préadensamento recomenda-se aplicar os seguintes passos :

1. Calcula-se o índice de vazios de campo $e_{0=}\ e_{0A}/1.025$ a tensão vertical efetiva de campo com ajuda do perfil geotécnico e do peso especifico γ, assim determina-se o ponto (e_0, σ'_{v0});
2. Estimar a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) seguindo o procedimento explicado no item 3.2.
3. Do procedimento para calcular (σ'_{vm}) o coeficiente de recompressão (C_r) é calculado como sendo igual ao coeficiente de descompressão (C_s) da curva amolgada. Com o valor de (C_r) é determinada a equação do trecho de recompressão, considerando que esta parte do ponto ($e_0,\ \sigma'_0$);
4. Calcula-se o índice de vazios correspondente à tensão de pré-adensamento ($e_{\sigma' vm}$) substituindo o valor de (σ'_{vm}) na equação do trecho de recompressão obtido no ponto 3;
5. Traça-se o trecho de recompressão a partir do ponto ($e_0,\ \sigma'_0$) até à tensão de pré-adensamento ($e_{\sigma' vm}\ \sigma'_{vm}$);
6. Considerando a existência de dois pontos de tensão **A e B** cujo índice de vazios seja $e_0\ < 0.42\ e_{0A}$; os dois pontos de tensão são determinados. O ponto **A** é considerado como aquele que se encontra imediatamente depois de $0.42\ e_{0A}$
7. Substituindo as coordenadas dos pontos **A, B e E (estimativa)** na equação 4-10 as constantes Ω, ψ e C_0 são determinadas;
8. Com as constantes definidas o trecho de compressão virgem é reconstituído o qual irá a interceptar-se com o trecho de recompressão no ponto ($e_{\sigma' vm}\ \sigma'_{vm}$, obtendo assim a curva reconstituída completamente.

4 COMPARAÇAO ENTRE OS MÉTODOS DE RECONSTRUÇÃO DA CURVA OEDOMÉTRICA

Este capitulo tem como objetivo apresentar e analisar as diversas metodologias de reconstrução da curva de compressão oedométrica.

Considerando as proposta de Carneiro *et al*. (2017) e Carneiro (2017), correspondentes à estimativa da tensão de pré-adensamento e à equação suplementar para determinação do valor de C_0, respectivamente, existe a possibilidade de fazer uma serie de combinações entre estas e as metodologias propostas. Assim sendo, considera-se a serie de combinações entre os métodos citadas no capitulo anterior , as quais estão descritas na Tabela 10.

Tabela 10 - Combinações entre métodos de reconstrução da curva de compressibilidade

Metodologia	Forma de determinação das três incógnitas: C_0, ψ e Ω
1 (2P+D)	2 Pontos na curva + Derivada : ✓ Substituir os valores dos 2 Pontos de tensão da curva na equação (4-16) para determinar a constante Ω ✓ Dispondo de 2 Pontos na curva fazer as substituições requeridas nas equações (4-14 e 4-13) para obter o valores de ψ e C_0 respectivamente.
2 (1P+E+D)	1 Ponto na curva + Estimativa de σ'_{vm} + Derivada ✓ Usar a proposta de Carneiro *et al*. (2017) para estimativa da tensão de pré-adensamento ✓ Substituir os valores de 1 Ponto de tensão da curva e a estimativa da tensão de pré-adensamento na equação (4-16) para determinar a constante Ω ✓ Dispondo de 2 Pontos da curva fazer as substituições requeridas nas equações (4-14 e 4-13) para obter o valores de ψ e C_0 respectivamente.
3 (2P+E):	2 Pontos de tensão vertical efetiva + Estimativa de σ'_{vm} ✓ Usar Carneiro *et al*. (2017) para estimativa da tensão de pré-adensamento ✓ Dispondo de 2 pontos e a estimativa da tensão de pré-adensamento substituir na equação (4-2) para obter os valores de Ω, ψ e C_0

4.1 Corpos de prova amolgados

Da Figura 32 à Figura 36 apresentam-se as curvas de compressão oedométrica, reconstruídas de acordo com a proposta de Louvise (2015) e utilizando as várias metodologias citadas. As curvas relativas à condição indeformada estão também apresentadas, a fim de auxiliar na avaliação da qualidade dos resultados.

No caso dos ensaios no deposito da Rio Polímeros II foram comparados os ensaios CRS 03 e CRS 04, por terem sido realizados na mesma velocidade de deformação. A estimativa da tensão de pré-adensamento do ensaio 04 foi de 7kPa pelo método de Pacheco e Silva. No entanto, a tensão de campo era da ordem de 31.8kPa. Neste caso, considerou-se um comportamento normalmente adensado, sem

trecho de recompressão. A curva foi reconstruída considerado como primeiro ponto de tensão o ponto imediatamente depois de $0.42e_{0A}$, e o segundo ponto como o correspondente ao último estágio realizado e um terceiro ponto correspondente à tensão vertical efetiva de campo, σ'_{v0}, conforme sugerido por Louvise (2015). Como mostra a Figura 32, as curvas reconstituídas não foram afetadas pela metodologia de reconstrução

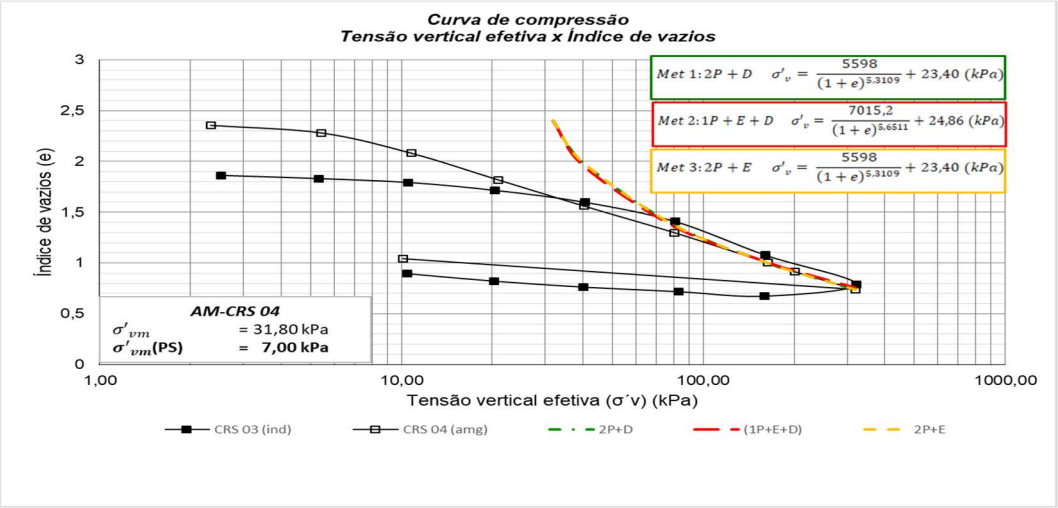
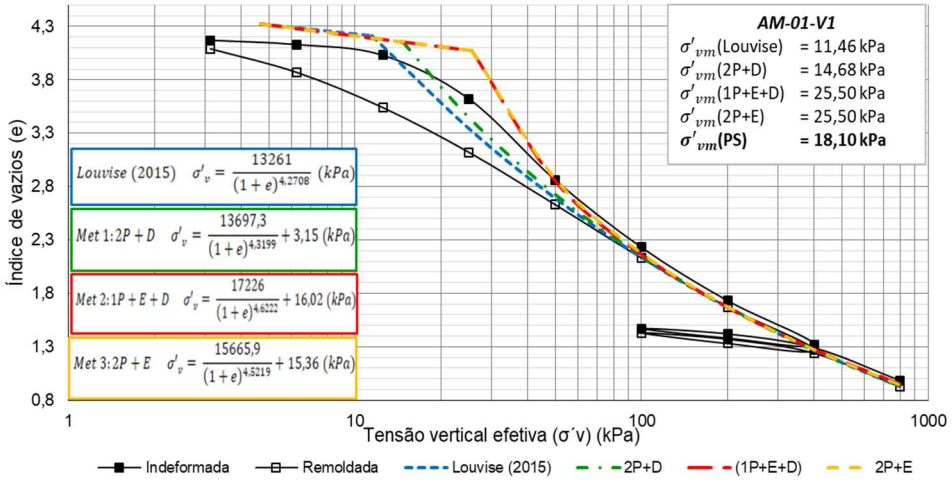


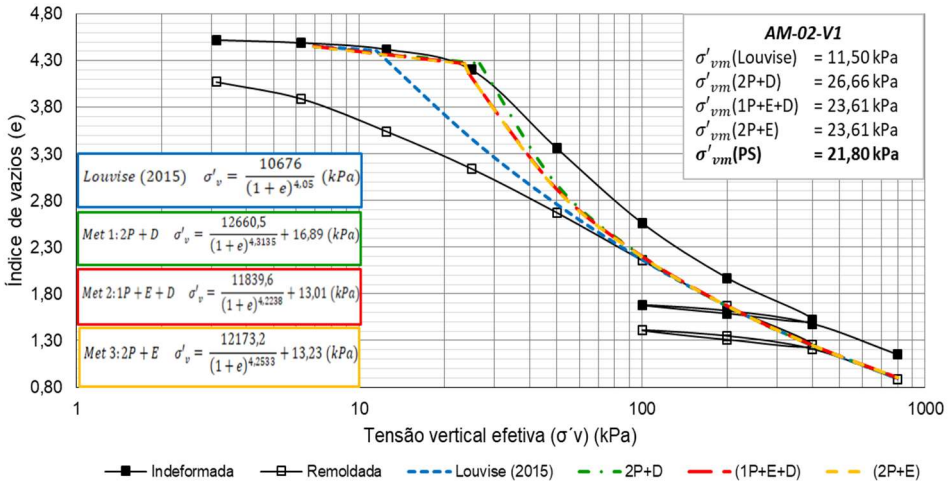
Figura 32 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica amolgada Rio Polímeros II CRS – 04 X CRS – 03 (PS = método Pacheco Silva)

No caso dos três corpos de prova da Argila Sarapuí II (Figura 33) foi também possível aplicar as três metodologias, pois dispunha-se de pontos de tensão com índices de vazios inferiores a $0.42e_{0A}$. Nesta figura, também se apresenta a curva apresentada por Louvise (2015), considerando os três corpos de prova como sendo normalmente Adensados. Segundo a própria autora, apesar das curvas reconstituídas não se ajustarem perfeitamente à amostra indeformada, a reconstrução melhora a forma da curva de corpos de prova de má qualidade.

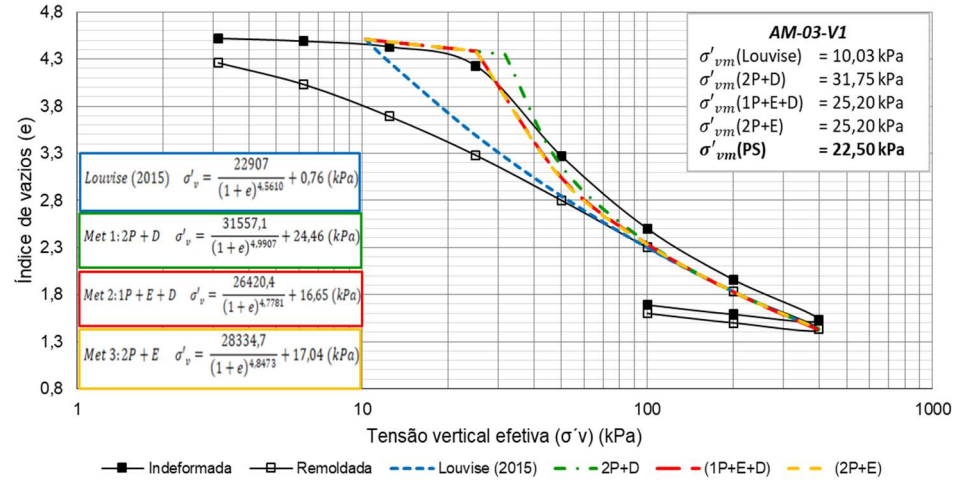
Quanto às curvas obtidas pela combinação das três metodologias, as reconstruções da curva de compressão oedométrica foram consideradas bastante satisfatórias ao se comparar com a curva indeformada obtida de laboratório. Foram obtidas curvas com trechos de recompressão e os valores da tensão de pré-adensamento foram muito próximos dos estimados pela metodologia de Pacheco Silva.



a) AM-01-V1



b) AM-02-V1



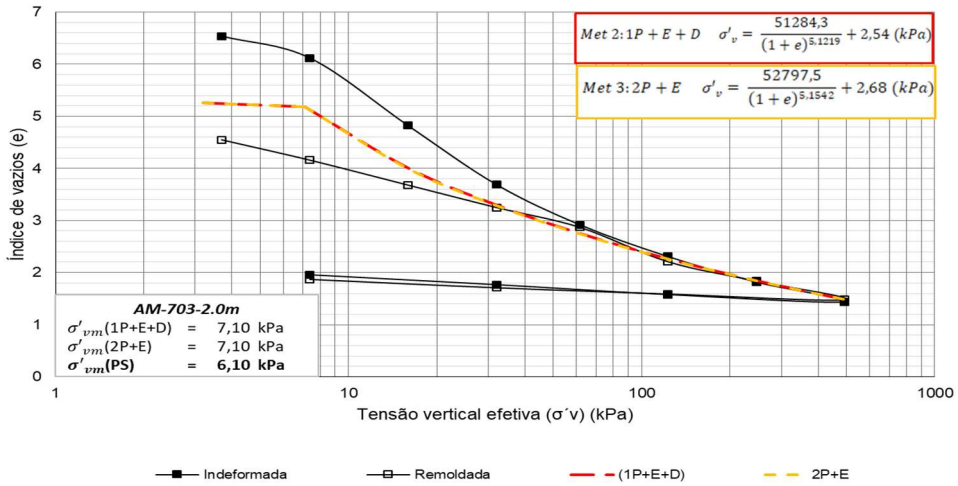
c) AM-03-V1

Figura 33 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica amolgada Argila Sarapui II (PS = método Pacheco Silva)

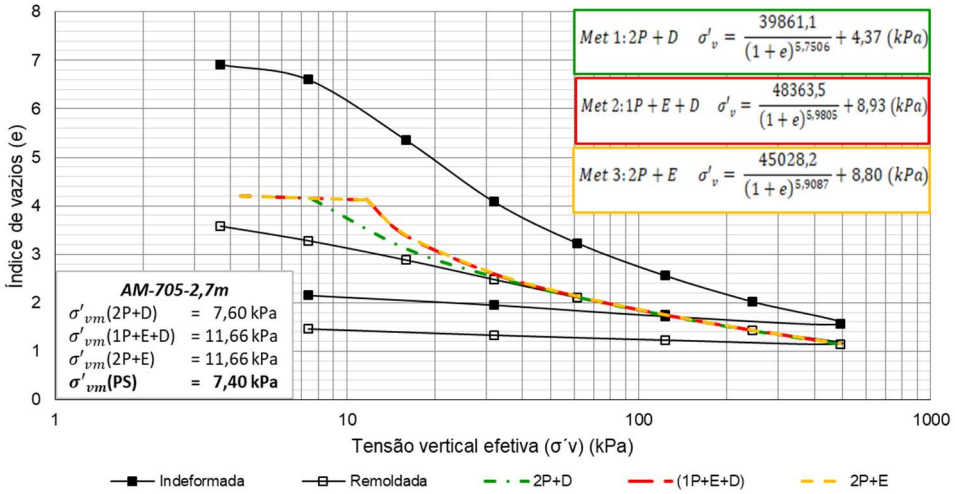
Quanto aos resultados da Baixada de Jacarepaguá (Figura 34) foi encontrado uma situação especial. No corpo de prova AM-703-2.0m, apesar da curva experimental dispor de 3 pontos localizados depois de $0.42e_{0A}$, o que permitiria aplicar as três metodologias, não foi possível utilizar a primeira metodologia de (2P+D). Tal fato pode ser explicado observando que a curva do corpo de prova na condição amolgada apresenta um formato inesperado no intervalo de tensões onde as duas curvas deveriam se juntar. Uma vez que existe uma mudança brusca no intervalo onde estas se interceptam a condição citada no item (4.2.1), que determina que o uso da equação da derivada é valido desde que não exista uma mudança brusca entre as curvas amolgada e indeformada no momento da intercepção ($e = 0.42e_{0A}$), faz com que metodologia da derivada não possa ser aplicada.

Já para o corpo de prova AM-703-7.0m não foi possível aplicar nenhuma das metodologias por não se dispor de pontos de tensão localizados depois de $0.42e_{0A}$, caso contrario ocorreu com o corpo de prova AM-705 -2.5m o qual permitiu a aplicabilidade das três metodologias, já no caso do corpo de prova 705-10.7m, a reconstrução foi conseguida aplicando-se a única metodologia possível, já que não foi possível estabelecer 2 pontos após $e = 0.42e_{0A}$.

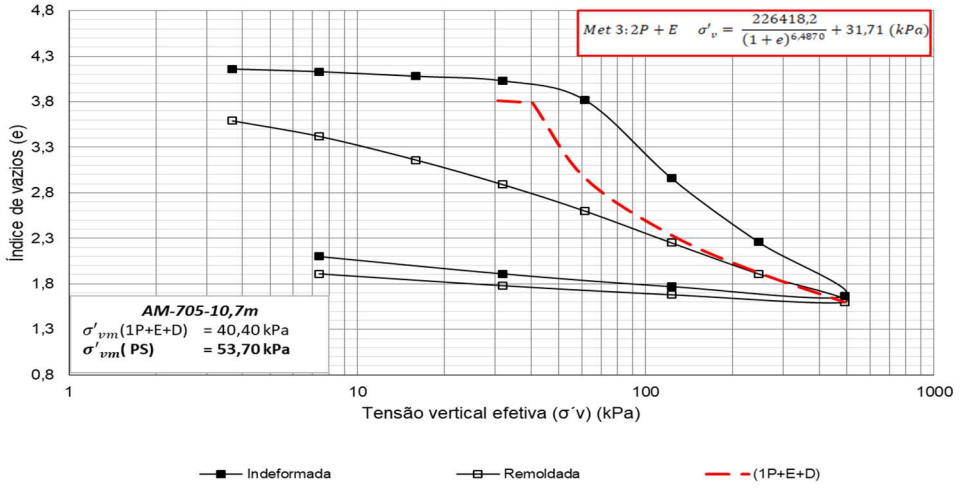
Chama-se a atenção que as curvas reconstruídas encontram-se afastadas da curva indeformada. Tal fato não foi observado nos demais locais. Acredita-se que esta diferença possa ser atribuída à significativa diferença entre os índices de vazios dos corpos de prova amolgados em relação aos indeformados. Porém, os valores da tensão de pré-adensamento encontram-se muito próximos dos calculados pelo método de Pacheco Silva no corpo de prova indeformado



a) AM-703-2.0 m



b) AM-705-2.7 m

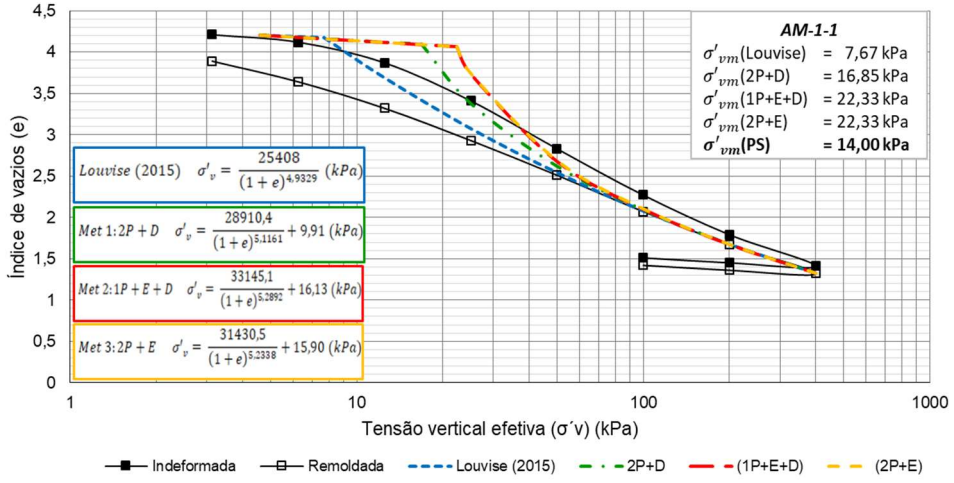


c) AM-705-10.7 m

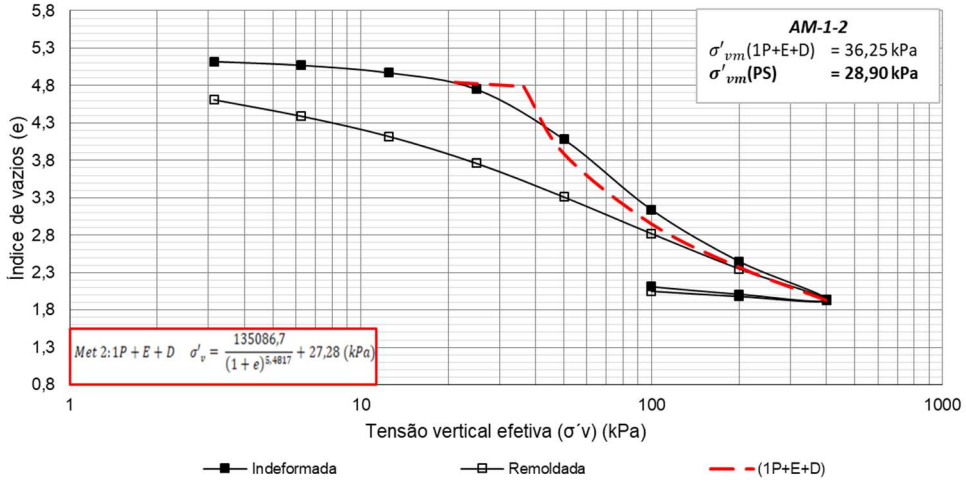
Figura 34 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica amolgada Argila Baixada de Jacarepaguá (PS = método Pacheco Silva)

No caso dos ensaios da argila do Cluster Naval de Suape (Figura 35 e Figura 36), três dos cinco corpos de prova analisados dispunham de exatamente 2 pontos de tensão localizados depois de $0.42e_{0A}$, garantindo a aplicação das três metodologias de reconstrução. Os corpos de prova AM-1-2 e AM-2-3 dispunham de um único ponto, sendo possível aplicar somente uma das metodologias estudadas **(1P+E+D)**. Apresenta-se também a reconstrução da curva por Louvise (2015), em que os corpos de prova foram considerados como sendo normalmente adensados.

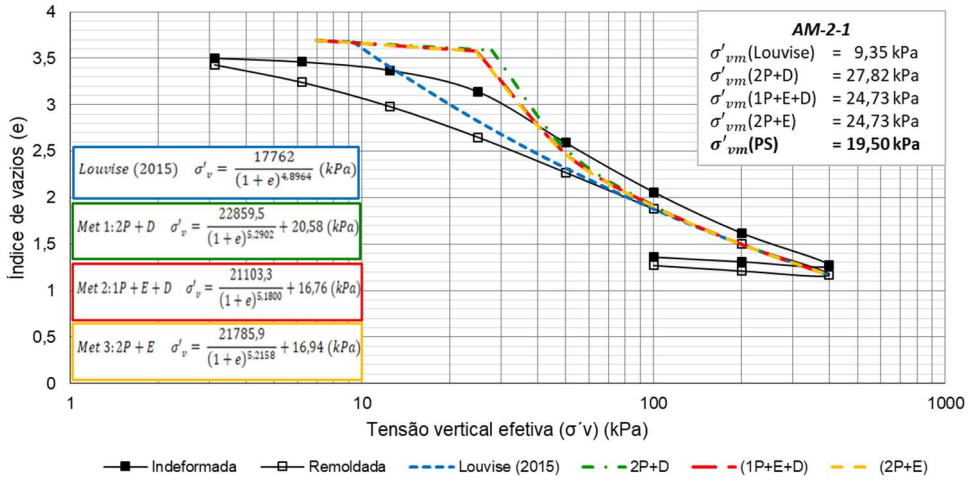
Observa-se que as curvas reconstruídas se aproximaram do resultado do ensaio em amostra indeformada. Os valores da tensão de pré-adensamento encontrados pelas reconstruções forneceram valores muito próximos dos estimados pela metodologia de Pacheco Silva.



a) AM-1-1

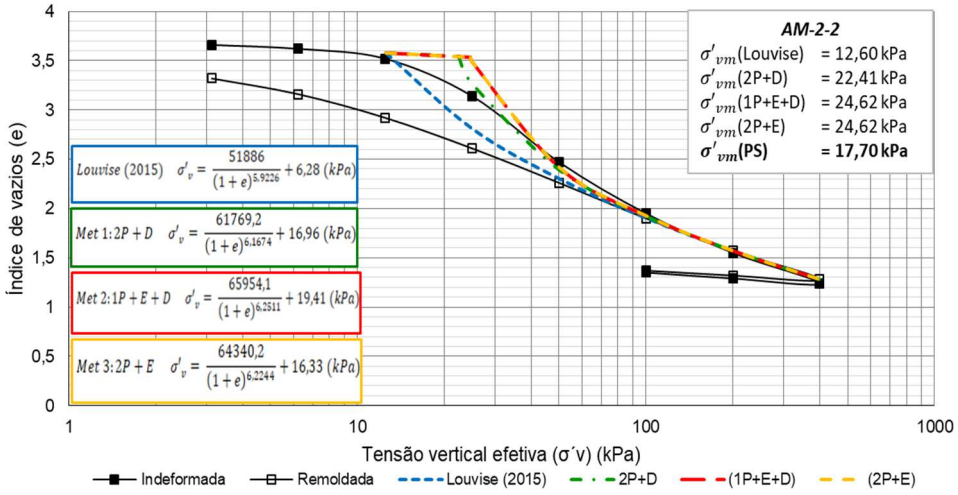


b) AM-1-2

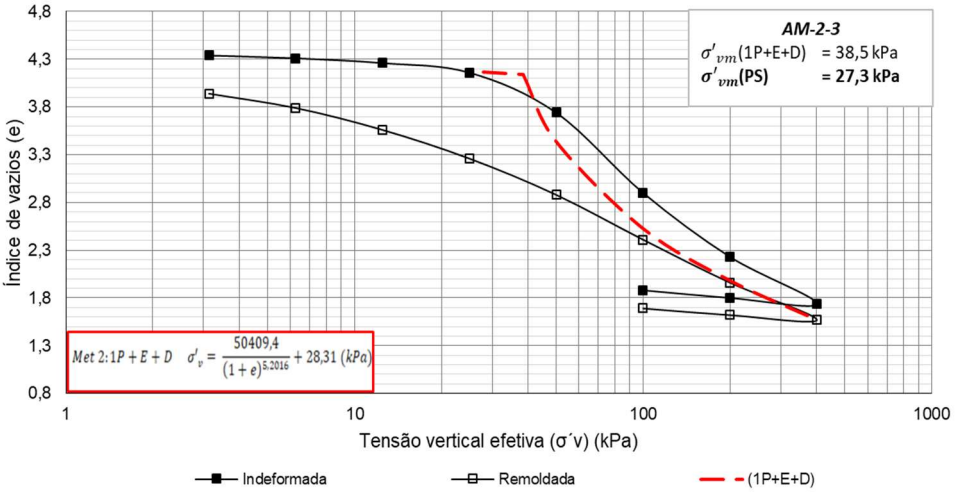


c) AM-2-1

Figura 35 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica amolgada Argila Cluster Naval de Suape



a) AM-2-2



b) AM-2-3

Figura 36 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica amolgada Argila Cluster Naval de Suape

A Tabela 11**Erro! Fonte de referência não encontrada.** resume os índices físicos, tensões de campo e parâmetros de compressibilidade, necessários para a reconstrução das curvas de compressão oedométrica. Os valores de índice de recompressão e tensão de pre-adensamento obtidos para cada uma das combinações analisadas estão mostrados na Figura 37 e Figura 38. Não se observam grandes variações entre as diferentes metodologias.

Tabela 11 - Parâmetros para reconstrução do trecho de recompressão da curva de compressão oedométrica amolgada

AMOSTRA	e_{0A}	$0.42e_{0A}$	σ'_{vo} (kPa)	$\sigma'_{v(0.42e_0}$ (kPa)	C_r			σ'_{vm} (kPa)		
					2P+D	1P+E+D	2P+E	2P+D	1P+E+D	2P+E
Rio Polímeros II										
CRS - 04	2,40	1,01	31,81	160,7				31,80	31,80	31,80
Sarapuí II										
AM-01-V1	4,43	1,86	4,7	148,1	0,34	0,34	0,34	14,68	25,50	25,50
AM-02-V1	4,56	1,92	6,9	139,3	0,31	0,34	0,34	26,66	23,61	23,61
AM-03-V1	4,62	1,94	10,3	168,3	0,32	0,33	0,33	31,75	25,20	25,20
Baixada de Jacarepaguá										
AM-703-2,0m	5,39	2,26	3,2	115,6		0,23	0,23		7,10	7,10
AM-705-2,7m	4,32	1,81	4,3	107,9	0,26	0,19	0,19	7,60	11,66	11,66
AM-705-10,7m	3,91	1,64	30,7	445,5		0,19			40,40	
Cluster Naval de Suape										
AM-1-1	4,31	1,81	4,6	155,1	0,18	0,20	0,20	16,85	22,33	22,33
AM-1-2	4,96	2,08	21	307,3		0,23			36,25	
AM-2-1	3,78	1,59	7	169	0,17	0,20	0,20	27,82	24,73	24,73
AM-2-2	3,67	1,58*	12,6	196,4	0,14	0,17	0,17	22,41	24,62	24,62
AM-2-3	4,27	1,79	28	265,7		0,23			38,50	

(*) Foi considerado como $0{,}43e_{0A}$ *para conseguir trabalhar com dois pontos de tensão, já que a variação era pequena*

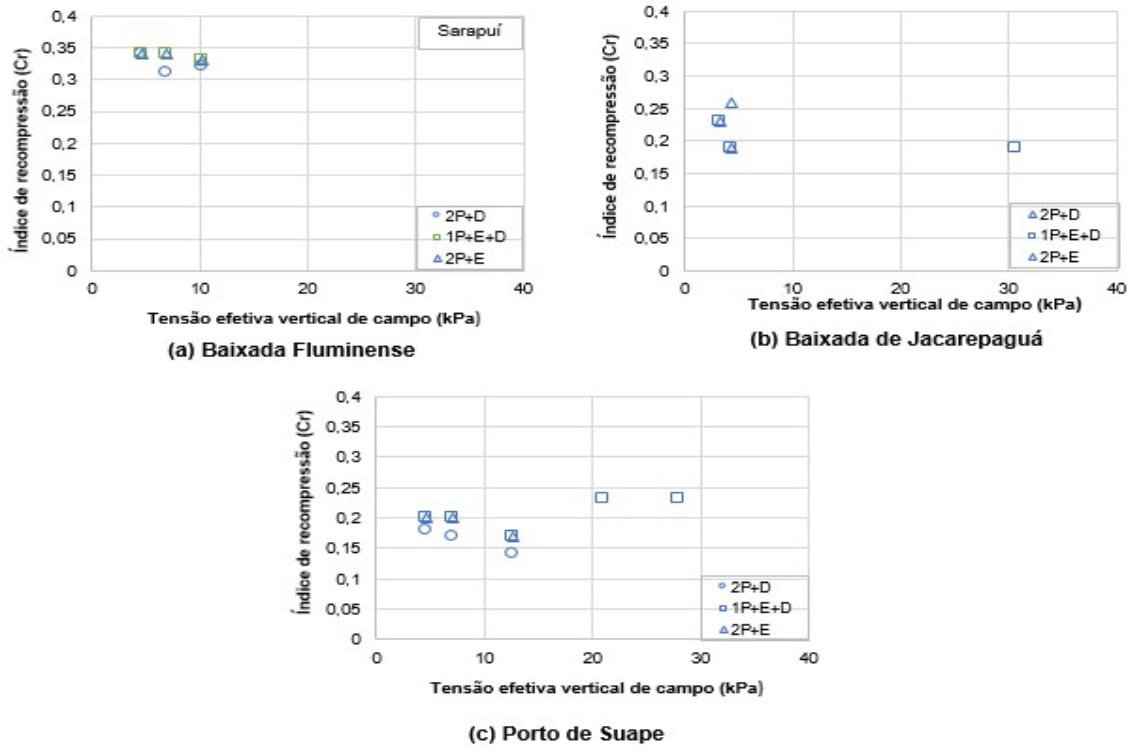


Figura 37 – Estimativa do índice e recompressão em amostras originalmente de baixa qualidade

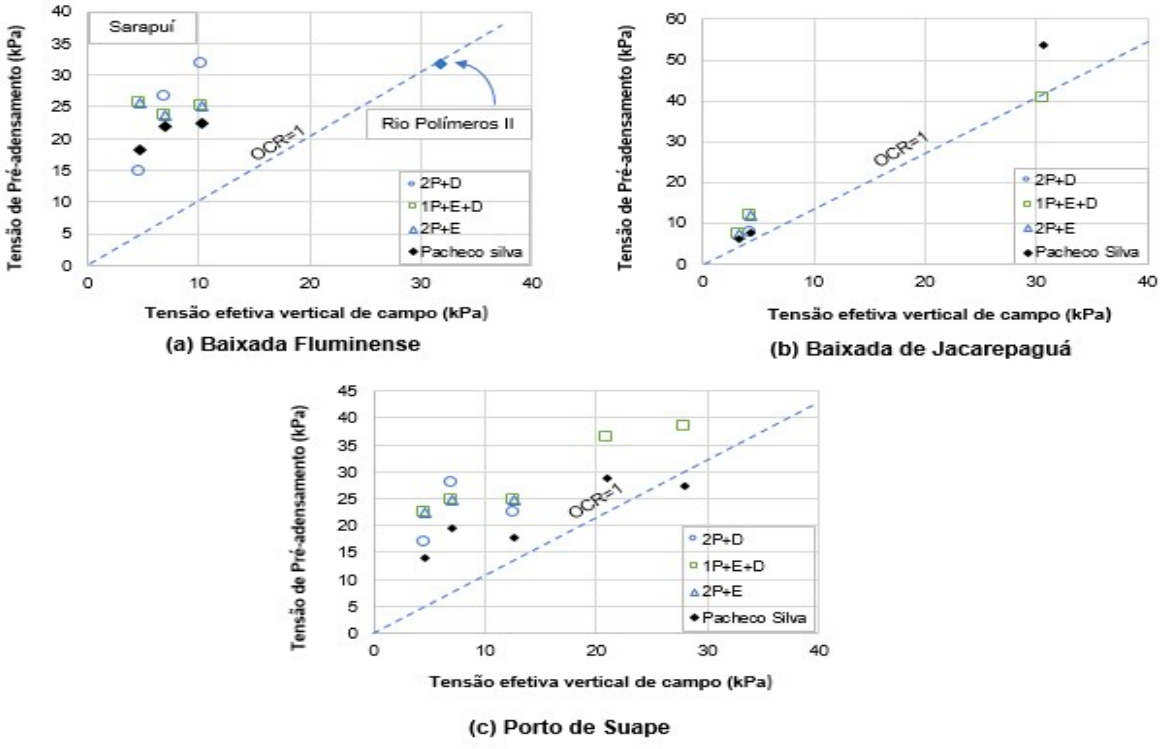


Figura 38 – Estimativa da tensão de pré-adensamento em amostras originalmente de baixa qualidade

Quanto aos parâmetros de ajuste da função que define o trecho de compressão virgem (Figura 39 e Tabela 12), há uma variação significativa dependendo do método de reconstrução como era de se esperar. Tal diferença claramente se atribui aos pontos de tensão que são utilizados para encontrar ditos parâmetros. A metodologia de dois pontos mais derivada (**2P+D)** utiliza 2 pontos com valor elevado de tensão efetiva ($e \leq 0.42e_{0A}$),.As demais utilizam o valor estimado da tensão de pré-adensamento, forçando a curva reconstruída a passar por este ponto.

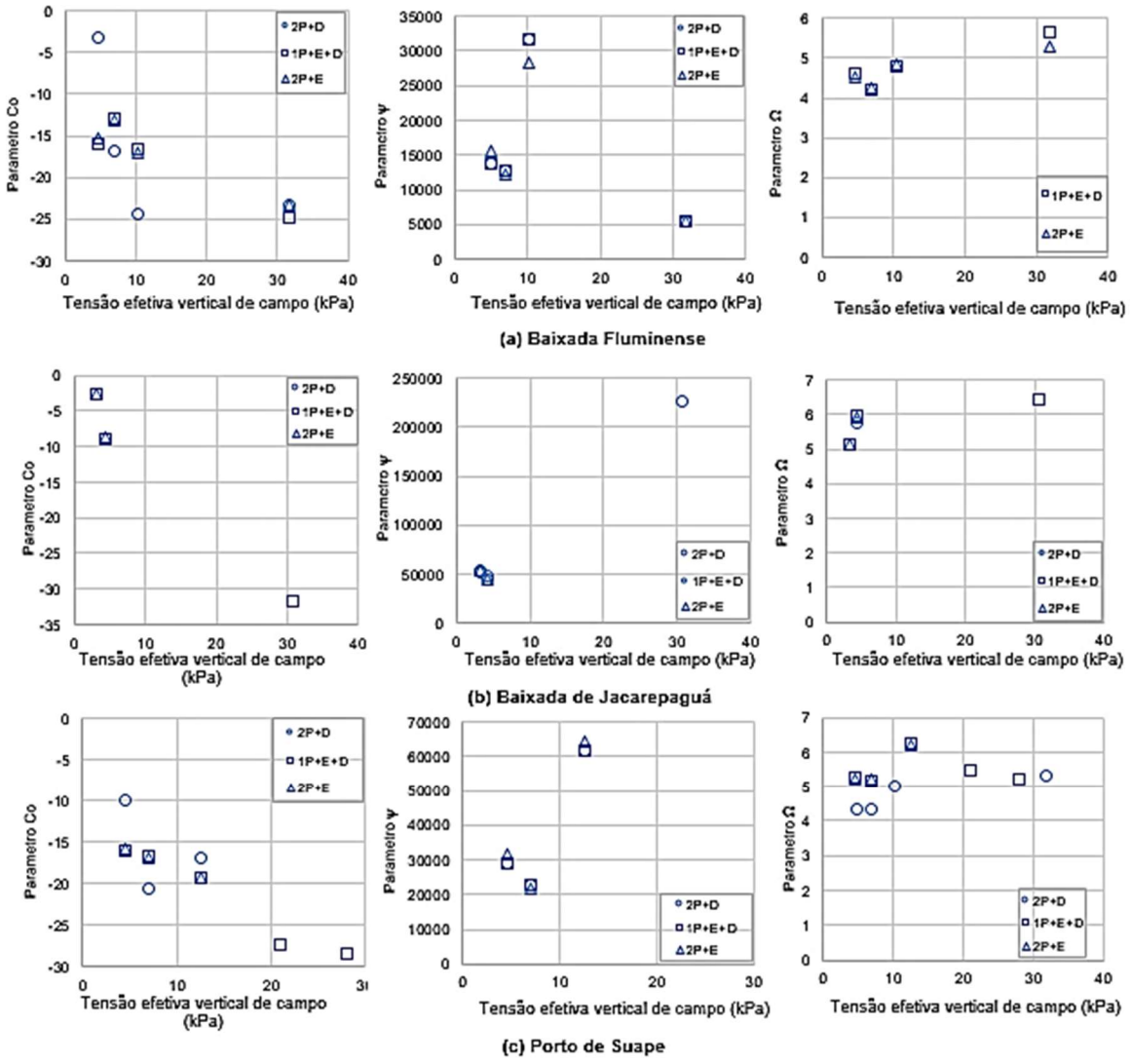


Figura 39 – Parâmetros de ajuste da função correspondente ao trecho virgem em amostras originalmente de baixa qualidade.

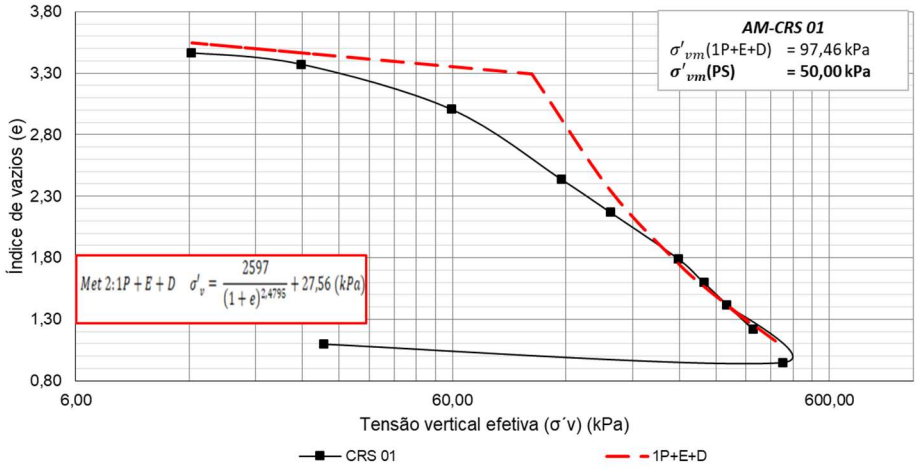
Tabela 12 - Pontos de tensão e parâmetros para reconstrução do trecho de compressão virgem das curvas amolgadas

Solo	AMOSTRA	Pontos de Tensão escolhidos (σ,e)								C_0			ψ			Ω		
			2P+D		1P+E+D		2P+E			2P+D	1P+E+D	2P+E	2P+D	1P+E+D	2P+E	2P+D	1P+E+D	2P+E
Rio Polímeros II	CRS 04 - 4,5m	σ	163,64	319,02	163,64	31,80	163,64	319,02	31,08	-23,40	-24,86	-23,40	5598,0	7015,5	5598,0	5,3109	5,6511	5,3109
		e	1,00	0,74	1,00	2,4	1,00	0,74	2,4									
Sarapuí II	AM-01-V1	σ	200	400	200	25,50	200	400	25,50	-3,15	-16,02	-15,36	13697,3	17226,0	15665,9	4,3199	4,6222	4,5219
		e	1,67	1,27	1,67	4,07	1,67	1,27	4,07									
	AM-02-V1	σ	200	400	200	23,61	200	400	23,61	-16,89	-13,01	-13,23	12660,5	11839,6	12173,2	4,3135	4,2238	4,2533
		e	1,67	1,25	1,67	4,27	1,67	1,25	4,27									
	AM-03-V1	σ	200	400	200	25,20	200	400	25,20	-24,46	-16,65	-17,04	31557,1	26420,4	28334,7	4,9907	4,7781	4,8473
		e	1,83	1,43	1,83	4,38	1,83	1,43	4,38									
Baixada de Jacarepaguá	AM-703-2,0m	σ	(-)		491,92	7,10	245,96	491,92	7,10	(-)	-2,54	-2,68	(-)	51284,3	52797,5	(-)	5,1219	5,1542
		e			1,48	5,18	1,84	1,48	5,18									
	AM-705-2,7m	σ	122,98	245,96	122,98	11,66	122,98	245,96	11,66	-4,37	-8,93	-8,80	39861,1	48363,5	45028,2	5,7506	5,9805	5,9087
		e	1,75	1,43	1,75	4,13	1,75	1,43	4,13									
	AM-705-10,7m	σ	(-)		491,92	40,40	(-)			(-)	-31,71	(-)	(-)	226418,2	(-)	(-)	6,4870	(-)
		e			1,60	3,79												
Cluster Naval de Suape	AM-1-1	σ	200	400	200	22,33	200	400	22,33	-9,91	-16,13	-15,90	28910,4	33145,1	31430,5	5,1161	5,2892	5,2338
		e	1,67	1,32	1,67	4,07	1,67	1,32	4,07									
	AM-1-2	σ	(-)		400	36,25	(-)			(-)	-27,28	(-)	(-)	135086,7	(-)	(-)	5,4817	(-)
		e			1,93	4,78												
	AM-2-1	σ	200	400	200	24,73	200	400	24,73	-20,58	-16,76	-16,94	22859,5	21103,3	21785,9	5,2902	5,1800	5,2158
		e	1,50	1,17	1,50	3,58	1,50	1,17	3,58									
	AM-2-2	σ	200	400	200	24,62	200	400	24,62	-16,96	-19,41	-19,33	61769,2	65954,1	64340,2	6,1674	6,2511	6,2244
		e	1,57	1,28	1,57	3,53	1,57	1,28	3,53									
	AM-2-3	σ	(-)		400	38,50	(-)			(-)	-28,31	(-)	(-)	50409,4	(-)	(-)	5,2016	(-)
		e			1,57	4,13												

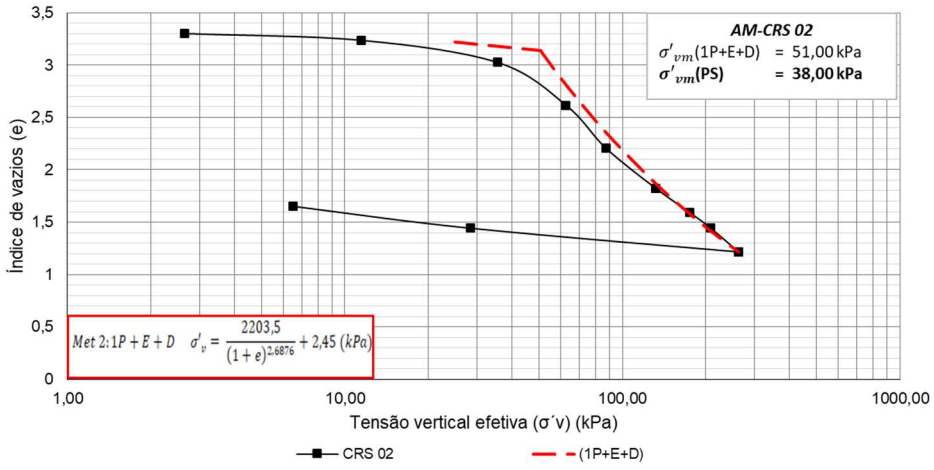
4.2 Corpos de prova Indeformados

As metodologias sugeridas para reconstrução da curva de compressibilidade fora, aplicadas aos resultados em corpos de prova de boa qualidade.

Para o caso do deposito da Rio Polímeros II foram analisados os ensaios CRS 01 e CRS 02, realizados com diferentes velocidades de deformação. Os resultados estão mostrados na Figura 40. Por não se dispor dos pontos de tensão necessários para aplicação das metodologias **(2P+D)** e **(2P+E)** somente um método foi aplicado **(1P+E+D).** Observa-se redução da inclinação do trecho de recompressão, aumento da inclinação do trecho virgem e também do valor da tensão pré-adensamento, característicos da reconstrução de amostra amolgada.



(a) AM-CRS-01



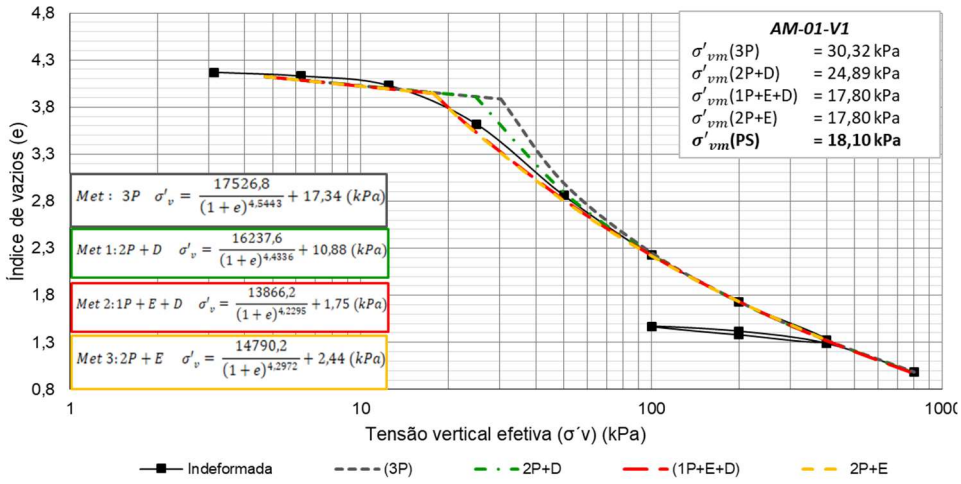
(b) AM-CRS-02

Figura 40 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada Argila Rio Polímeros II

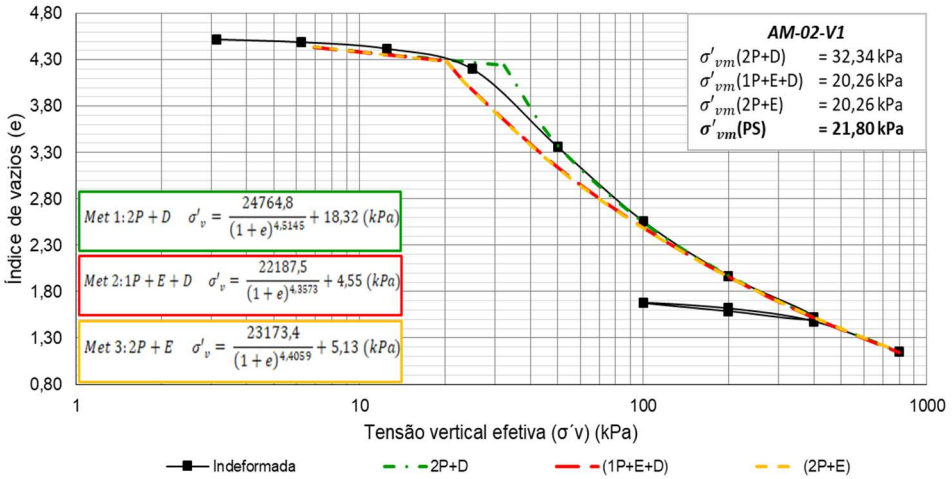
No caso dos corpos de prova do deposito de Sarapuí II (Figura 41) foi possível aplicar as diferentes metodologias com exceção do corpo de prova AM-01-V3. Ao contrário dos resultados na Rio Polímeros II (Figura 40) a diferença entre as curvas reconstruídas e o resultado experimental foi bem menor.

Quanto ao deposito da Baixada de Jacarepaguá, com exceção da metodologia (2P+D), as curvas reconstruídas tiveram o comportamento análogo ao observado nos corpos de prova do deposito de Sarapuí II, como mostra a Figura 42. As diferenças entre a curva medida e a reconstruída foram pequenas.

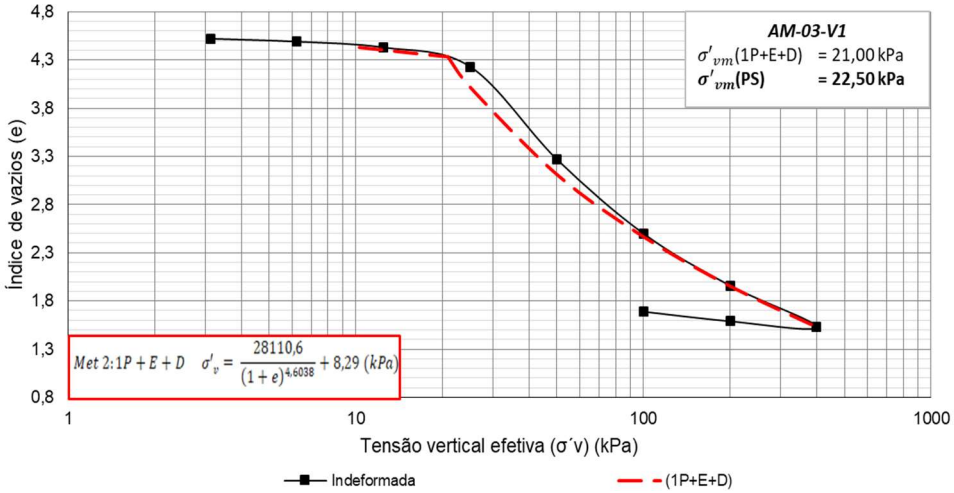
A Figura 43 e a Figura 44 mostram os resultados da aplicação das diferentes metodologias às amostras de boa qualidade da argila do Cluster Naval de Suape. Observa-se mais uma vez que a metodologia (2P+D) tendo a fornecer valores mais elevados da tensão de pre-adensamento



a) AM-01-V1

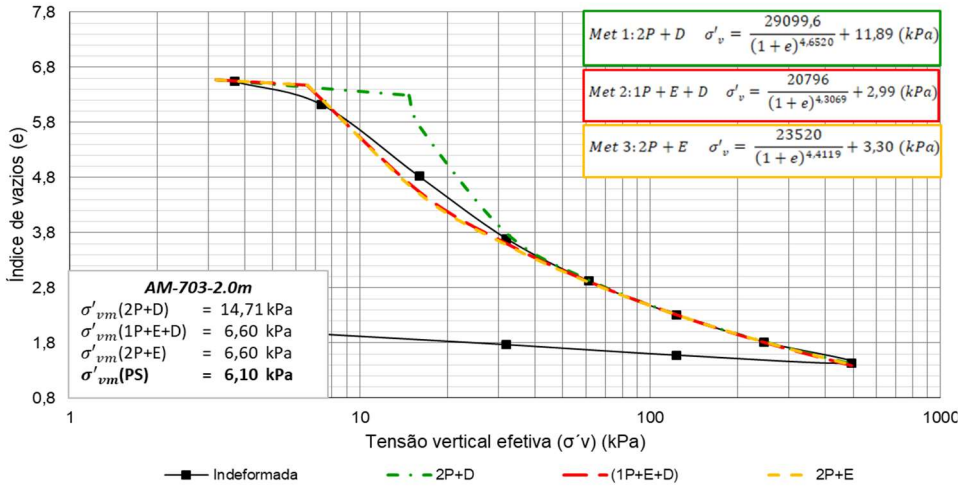


b) AM-02-V1

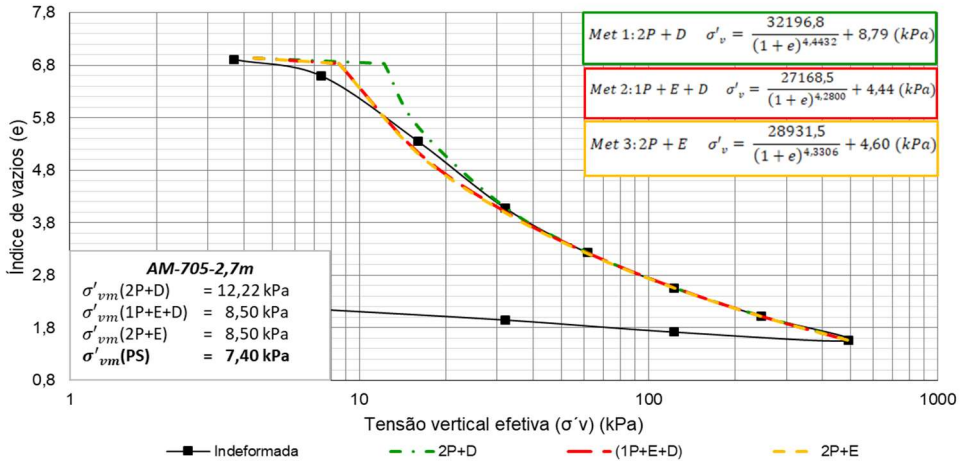


c) AM-03-V1

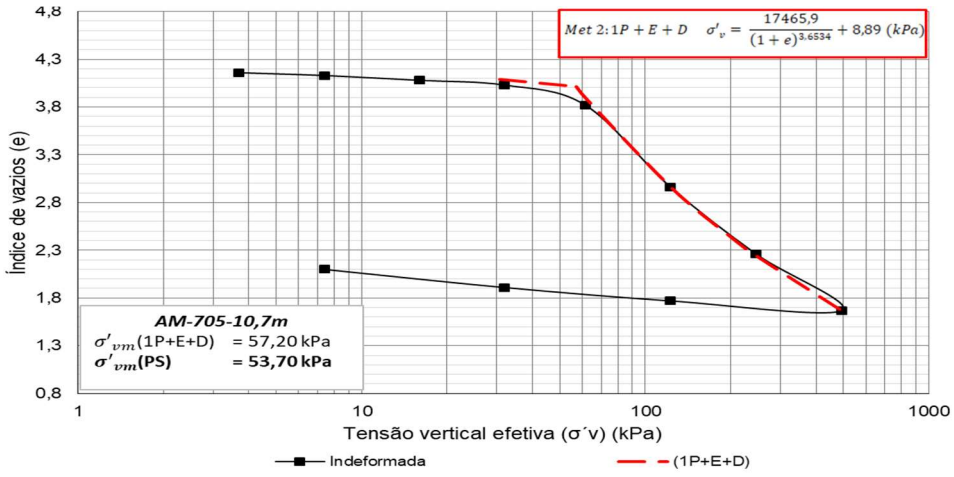
Figura 41 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada Argila Sarapuí II



a) AM-703-2.0 m

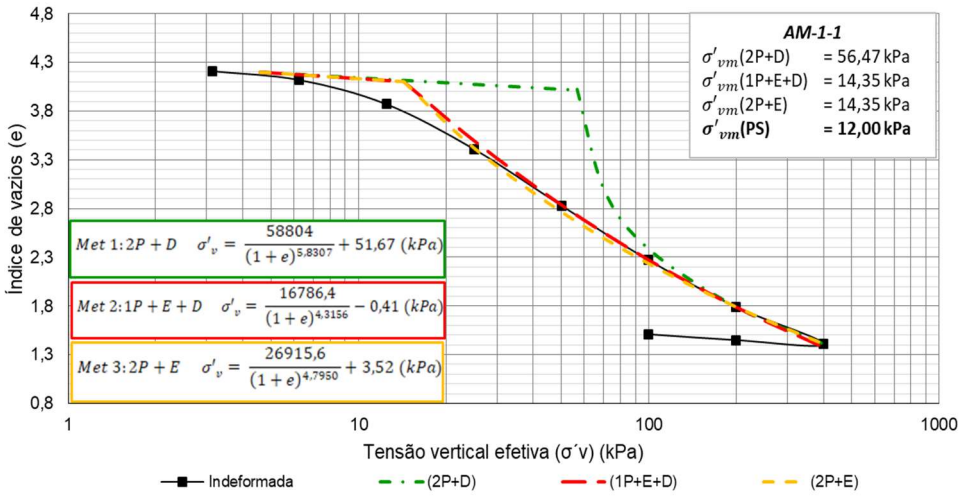


b) AM-705-2.7 m

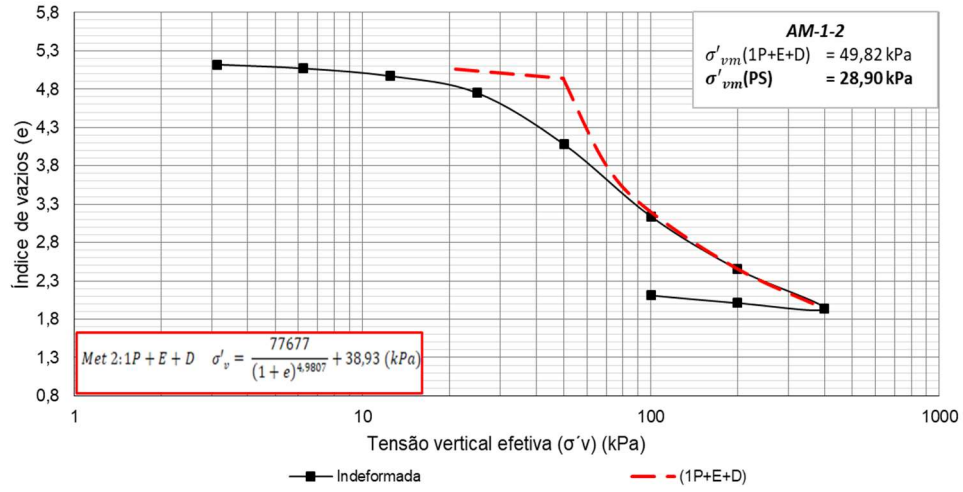


c) AM-705-10.7 m

Figura 42 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada Argila Baixada de Jacarepaguá

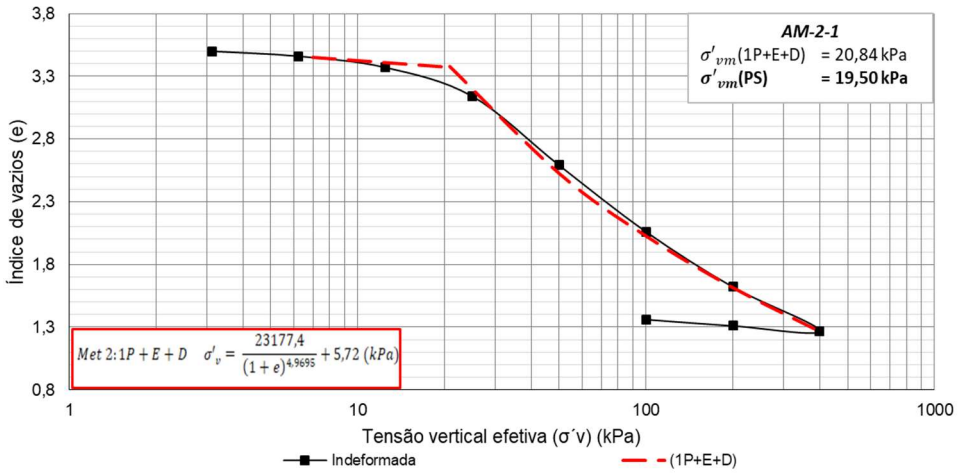


a) AM-1-1

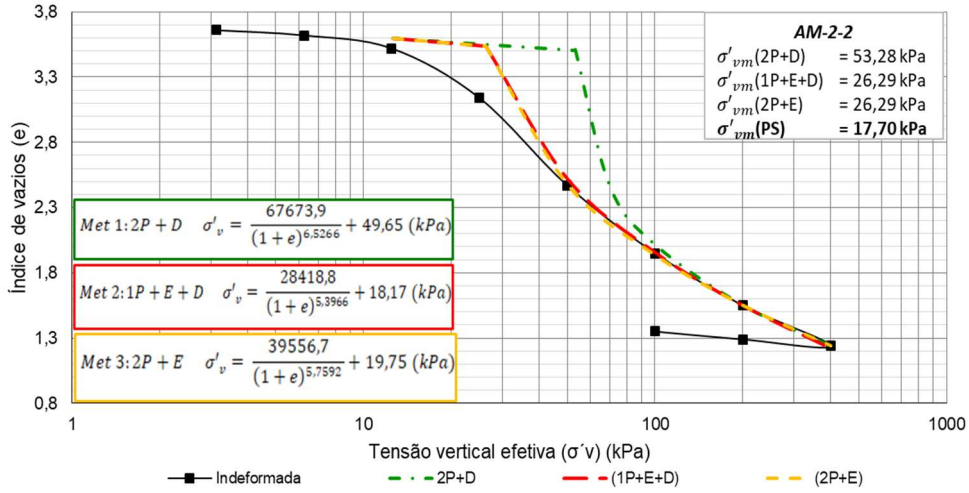


(b) AM-1-2

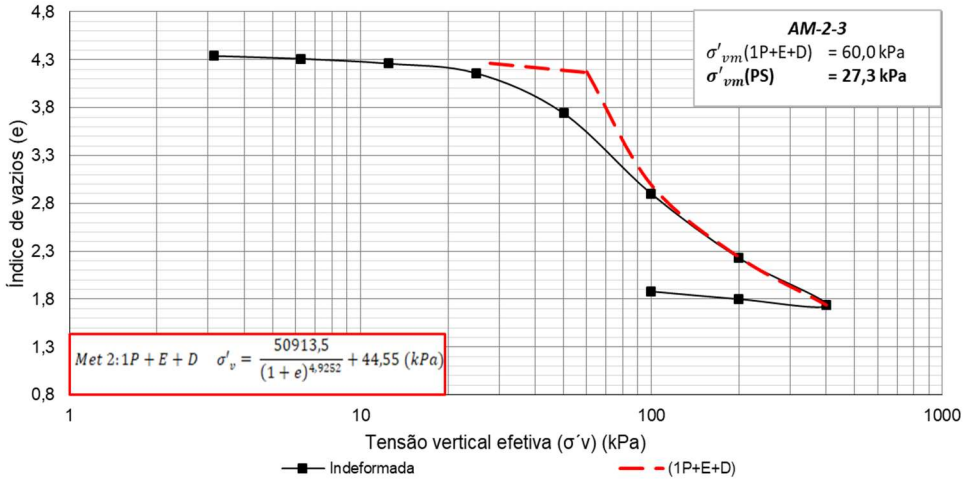
Figura 43 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada Argila Cluster Naval de Suape



a) AM-2-1



b) AM-2-2



c) AM-2-3

Figura 44 - Reconstrução da curva de compressão oedométrica indeformada Argila Cluster Naval de Suape

A Tabela 13 resume os índices físicos, tensões de campo e parâmetros de compressibilidade, necessários para a reconstrução das curvas de compressão oedométrica. Os valores de índice de recompressão e tensão de pre-adensamento obtidos para cada uma das combinações analisadas estão mostrados na Figura 45 e na Figura 46. De fato, as metodologias geram pequenas diferenças na reconstrução das curvas de compressibilidade.

Tabela 13 - Parâmetros para reconstrução do trecho de recompressão da curva de compressão oedométrica indeformada

AMOSTRA	e_{0A}	$0.42e_{0A}$	e_0	σ'_{vo}	$\sigma'_{v(0.42e_{0a})}$ (kPa)	C_r			$\sigma'_{vm}\,(kPa)$		
						2P+D	1P+E+D	2P+E	2P+D	1P+E+D	2P+E
Rio Polímeros II											
CRS - 01	3,55	1,49	3,46	25	304,8		0,28			97,46	
CRS - 02	3,30	1,39	3,22	25	224,5		0,27			51,00	
Sarapuí II											
AM-01-V1	4,22	1,77	4,12	4,7	187,7	0,30*	0,30	0,30	24,89	17,80	17,80
AM-02-V1	4,55	1,91	4,44	6,9	217,7	0,29*	0,33	0,33	32,34	20,26	20,26
AM-03-V1	4,54	1,91	4,43	10,3	216,7		0,33			21,00	
Cluster Naval de Suape											
AM-1-1	4,31	1,81	4,2	4,6	193,8	0,17*	0,20	0,20	56,47	12,90	12,90
AM-1-2	5,19	2,18	5,1	21	284,8		0,33			49,82	
AM-2-1	3,54	1,49	3,45	7	257,4		0,17			20,84	
AM-2-2	3,69	1,59	3,6	12,6	186,9	0,15*	0,20	0,20	53,28	26,29	26,29
AM-2-3	4,37	1,84	4,26	28	346,3		0,27			60,00	
Baixada de Jacarepaguá											
AM-703-2,0m	6,73	2,83	6,57	3,2	67,9	0,42	0,31	0,31	14,71	6,60	6,60
AM-705-2,7m	7,1	2,98	6,93	4,3	78,4	0,21	0,35	0,35	12,22	8,50	8,50
AM-705-10,7m	4,19	1,76	3,81	30,7	438,5		0,27			57,20	

(*) *este valor pertence ao calculado com as tensões 400 e 100, pois as tensões que se requeriam para gerar o mesmo OCR não foram executadas no ensaio.*

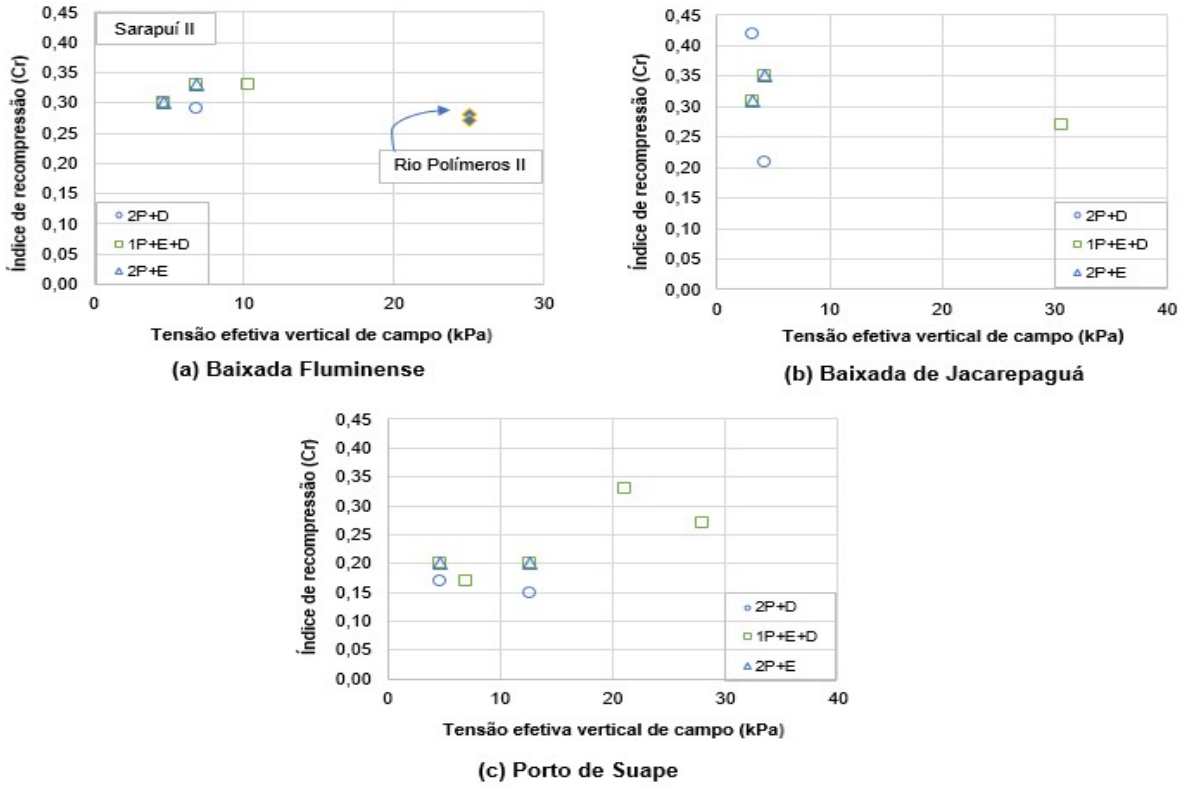


Figura 45 – Estimativa do Índice de recompressão – amostras indeformadas

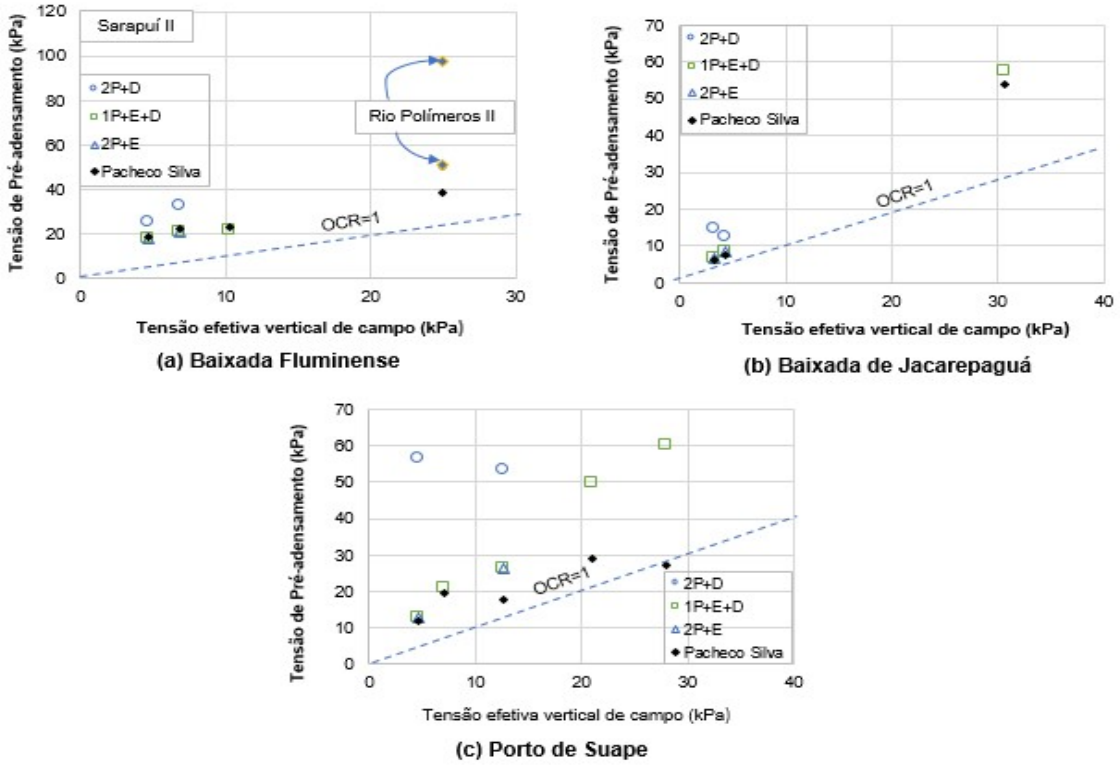


Figura 46 – Estimativa da Tensão de Pré-adensamento– amostras indeformadas

Quanto aos parâmetros de ajuste da função que define o trecho de compressão virgem (Figura 47 e Tabela 14), há uma variação significativa dependendo do método de reconstrução . Análogo aos resultados das amostras amolgadas, a variabilidade dos parâmetros nas diferentes metodologias se deve aos pontos de tensão efetiva escolhidos para reconstrução.

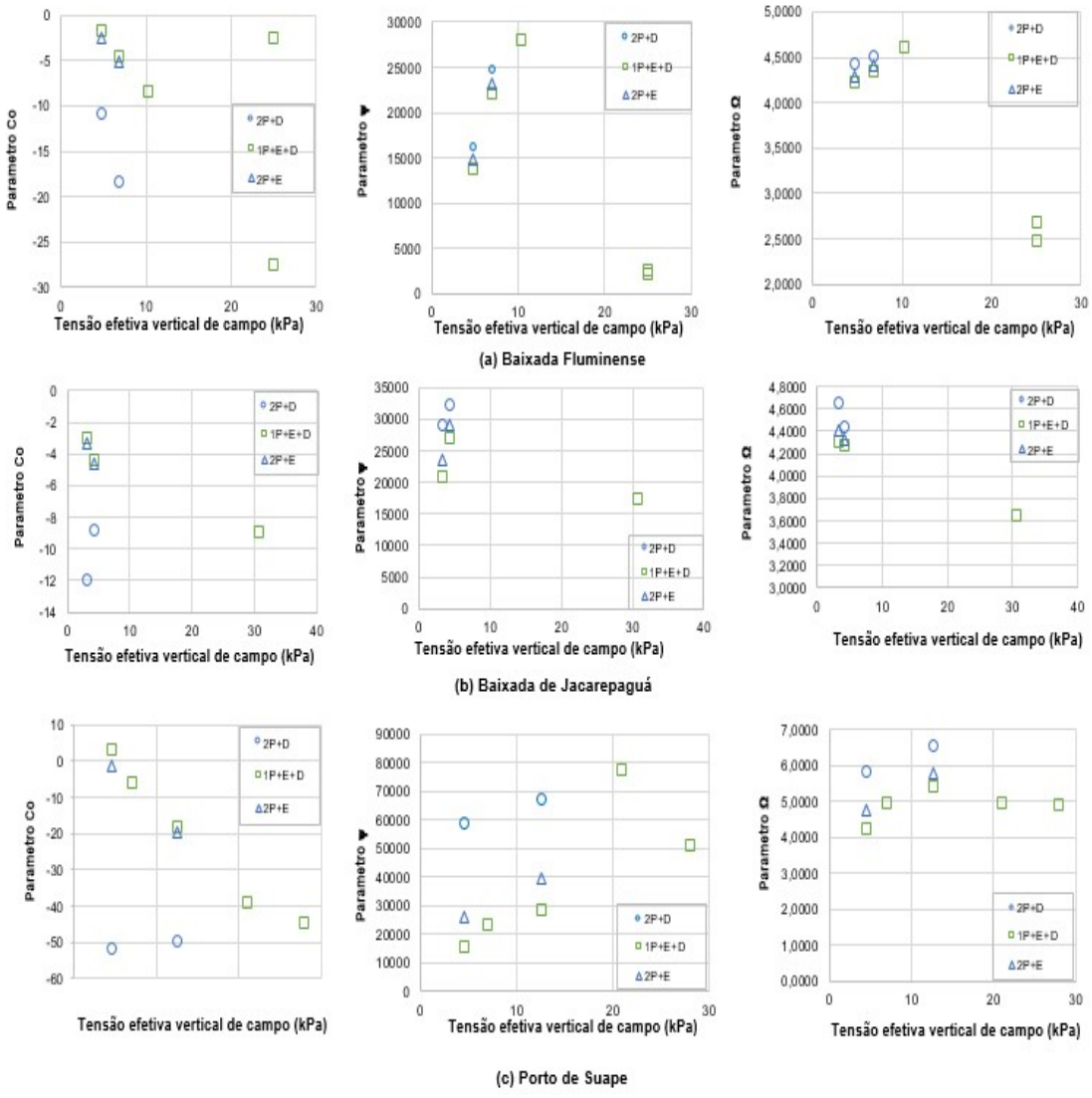


Figura 47 – Parâmetros de ajuste da função correspondente ao trecho virgem.

Tabela 14 - Pontos de tensão e parâmetros para reconstrução do trecho de compressão virgem das curvas indeformadas

Solo	AMOSTRA		Pontos de Tensão escolhidos							C_0			Ψ			Ω		
			2P+D		1P+E+D		2P+E			2P+D	1P+E+D	2P+E	2P+D	1P+E+D	2P+E	2P+D	1P+E+D	2P+E
Rio Polímeros II	CRS 01	σ	(-)		319,44	97,00	(-)			(-)	-27,56	(-)	(-)	2597,0	(-)	(-)	2,4795	(-)
		e			1,41	3,3												
	CRS 02	σ	(-)		261,96	51,00	(-)			(-)	-2,45	(-)	(-)	2203,5	(-)	(-)	2,6876	(-)
		e			1,22	3,14												
Sarapuí II	AM-01-V1	σ	200	400	200	17,80	200	400	17,80	-10,88	-1,75	-2,44	16237,6	13866,2	14790,2	4,4336	4,2295	4,2972
		e	1,73	1,32	1,73	3,95	1,73	1,32	3,95									
	AM-02-V1	σ	400	800	400	20,26	400	800	20,26	-18,32	-4,55	-5,13	24764,8	22187,5	23173,4	4,5145	4,3573	4,4059
		e	1,52	1,15	1,52	4,28	1,52	1,15	4,28									
	AM-03-V1	σ	(-)		400	21,00	(-)			(-)	-8,29	(-)	(-)	28110,6	(-)	(-)	4,6038	(-)
		e			1,53	4,33												
Baixada de Jacarepaguá	AM-703-2,0m	σ	122,98	245,96	122,98	6,60	122,98	245,96	6,60	-11,89	-2,99	-3,30	29099,6	20796,0	23520,0	4,6520	4,3069	4,4119
		e	2,31	1,82	2,31	6,47	2,31	1,82	6,47									
	AM-705-2,7m	σ	122,98	245,96	122,98	8,50	122,98	245,96	8,50	-8,79	-4,44	-4,60	32196,8	27168,5	28931,5	4,4432	4,2800	4,3306
		e	2,56	2,02	2,56	6,83	2,56	2,02	6,83									
	AM-705-10,7m	σ	(-)		491,98	57,20	(-)			(-)	-8,90	(-)	(-)	17465,9	(-)	(-)	3,6534	(-)
		e			1,67	4,01												
Cluster Naval de Suape	AM-1-1	σ	200	400	200	12,90	200	400	12,90	-51,67	3,29	-1,13	58804,0	15992,4	26107,6	5,8307	4,2544	4,7536
		e	1,79	1,41	1,79	4,09	1,79	1,41	4,09									
	AM-1-2	σ	(-)		400	49,82	(-)			(-)	-38,93	(-)	(-)	77677,0	(-)	(-)	4,9807	(-)
		e			1,40	4,94												
	AM-2-1	σ	(-)		400	20,84	(-)			(-)	-5,72	(-)	(-)	23177,4	(-)	(-)	4,9695	(-)
		e			1,27	3,38												
	AM-2-2	σ	200	400	200	26,29	200	400	26,29	-49,65	-18,17	-19,75	67673,9	28418,8	39556,7	6,5266	5,3966	5,7592
		e	1,55	1,24	1,55	3,54	1,55	1,24	3,54									
	AM-2-3	σ	(-)		400	60,00	(-)			(-)	-44,51	(-)	(-)	50913,5	(-)	(-)	4,9252	(-)
		e			1,74	4,18												

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Introdução

O objetivo da presente dissertação foi realizar a tentativa de reconstrução da curva de compressão oedométrica para corpos de prova no estado amolgado e indeformado para os depósitos de argila Sarapui II, Baixada de Jacarepaguá e Baixada Fluminense no Estado do Rio de Janeiro e o depósito do Cluster Naval de Suape no Estado de Pernambuco.

Para cada depósito foram realizadas campanhas de prospecção para subsidiar estudos anteriores e os resultados dos ensaios de caracterização e dos ensaios de adensamento oedométrico foram reproduzidos e utilizados neste trabalho. Para os resultados dos ensaios oedométricos de tipo convencional foram construídas as curvas na condição amolgada e indeformada, já para os ensaios de tipo velocidade de deformação constante são apresentados um na condição totalmente amolgada e os três restantes na condição indeformada.

Na tentativa de obter a reconstrução da curva de compressão oedométrica foram apresentadas três metodologias baseadas em propostas encontradas na literatura, incluindo um novo desenvolvimento matemático. Em geral as curvas reconstruídas tanto na condição amolgada quanto na indeformada forneceram resultados bastante satisfatórios.

5.2 Conclusões

Como conclusões desta pesquisa podem-se citar:

I. Para a resolução da equação $\sigma'_v = \frac{\psi}{(1+e)^{\Omega}} - C_0$ são requeridos no mínimo três pontos de tensão. Dependendo da escolha dos pontos a curva reconstituída pode ser afetada
II. Existe uma variação considerável entre curvas reconstruídas pelos métodos que fazem uso da estimativa da tensão de pré-adensamento e a metodologia da derivada, diferenciadas principalmente no valor de σ'_{vm}, porém, entre os

métodos que utilizam a estimativa as curvas reconstruídas praticamente se superpõem.

III. Tanto as curvas indeformadas quanto as amolgadas reconstruídas mantém o mesmo formato da curva obtida experimentalmente.

IV. Embora estas metodologias permitam a reconstrução da curva para corpos de prova indeformadas, conclui-se que não se faz necessário realizar o processo para esta condição.

V. Quando se dipoe de três posto de tensão para resolver a equação (4-10) a curva reconstruída resultante para corpos de prova na condição amolgada não sofre mudanças significativas se comparada com a curva orignal, o que permite concluir que dispor de três pontos para resolver a equação não garante uma boa estimativa de reconstrução.

VI. A consideração de que no ponto onde as duas curvas passam a coincidir a derivada é igual para ambas permitiu conseguir mais uma equação para resolver o sistema que dá solução à equação (4-10). Embora o desenvolvimento seja completamente matemático, os resultados fornecidos pela metodologia **2P+D** foram satisfatórios.

VII. A metodologia **2P+D** forneceria problemas caso a curva a reconstruir apresentasse uma mudança brusca no ponto onde é considerada a intercepção de ambas curvas.

VIII. A reconstrução da curva de compressão oedométrica para os corpos de prova amolgados obtida pelas três metodologias forneceram resultados bons, porem para os corpos de prova indeformados a metodologia (2P+D) sempre tendeu a gerar um aumento no valor da tensão de pré-adensamento.

IX. Embora os ensaios de tipo CRS forneçam muitos resultados de tensão se estes forem muitos próximos um do outro a metodologia de **2P+D** não poderia ser aplicada se os dados do ponto seguinte onde a derivada foi aplicada não for pelo menos o dobro da tensão imediatamente anterior, como acontece no ensaio do tipo convencional.

X. Os ensaios indeformados estudados do tipo CRS apresentaram resultados satisfatórios independente da velocidade ensaiada.

XI. Ainda tendo a limitante de precisar de dois pontos de tensão o método de (2P+D) representou a melhor reconstrução para os corpos de prova na condição amolgada.

5.3 Trabalhos futuros

I. Ampliar o banco de dados para confirmar a influência das diferentes metodologias utilizando os dois tipos de ensaios de compressão oedométrica.
II. As curvas amolgada e indeformada não se superpõem – elas têm a mesma tangente mas as curvas estão deslocadas. Haveria alguma forma de incorporar essa condição?
I. Estudar o efeito do amolgamento no índice de vazios inicial e procurar uma metodologia para conferir a coerência do valor de $e_{0.}$
II. Estudar a influência da escolha das tensões para a aplicabilidade das metodologias, tanto no momento de definir os parâmetros amolgados quanto no momento da reconstrução.

REFERÊNCIAS

[1] AGUIAR, V.N. (2008). Características de Adensamentos da Argila do Canal do Porto de Santos na região da Ilha Barnabé. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

[2] ALMEIDA, M.S.S. (1988). Ensaio Especiais de Adensamento – Anais, Simpósio sobre Novos Conceitos em Ensaios de Campo e Laboratório em Geotécnia, Tio de Janeiro, Vol. 1, pp. 1-27.

[3] ALMEIDA, M.S.S., MARQUES, M.E.S. (2002). The Behaviour of Sarapuí soft organic clay. International Workshop on Characterisation and Engeneering Properties of Natural Soil, Singapoure. Editors: T.S. Tan, K.K Phoon, D.W. Hight, and S. Leroueil, vol 1 pp..

[4] ANDRADE, M.E.S. (2009). Contribuição ao Estudo das Argilas Moles da Cidade de Santos. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

[5] ANTUNES, F.S. (1978). Ensaios de Caracterização Geológica, Pedológica e Mineralógica de Argilas do Rio de Janeiro. IPR/DNER, 121p Relatório de pesquisas.

[6] BERTUL, F. (2009). Caracterização Geotécnica da Sensibilidade de um Deposito Sedimentar do Rio Grande do Sul com uso de Ensaios de Laboratório. Dissertação de Mestrado. UFRGS.

[7] BORGES, J.M. (1995). Aterros Sobre Solos Moles Reforçados com Geossintéticos. Dissertação de Doutorado. Portugal: Universidade do Porto.

[8] BUTTERFIELD, R. (1979). A Natural Compression Law for Soils (an Advance on e – log p'), Technical Note, Geotechnique, Vol 29, No. 4, pp. 469 – 480.

[9] CARNEIRO, R. GERSOVICH, D. & DAZINGER, B. (2017) Reconstructing oedometric compression curves for selecting design parameters. Journal of Materials in Civil Engineering, submetido.

[10] CARNEIRO, R. F. (2017). Comunicação pessoal.

[11] CARVALHO, S.R.L. (1989). Ensaio de Adensamento Edométrico com Taxa Constante de Deformação Especifica Relacionada ao Tempo na Argila do Sarapuí. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

[12] CARVALHO, SR.L., ALMEIDA, M.S.S. & MARTINS, I.S.M. (1993). Ensaios de Adensamento com velocidade Controlada: Proposta de um Método para Definição da Velocidade. Solos e Rochas. São Paulo, v. 16 n. 3 p. 185-196.

[13] CASAGRANDE, A. (1936). The Determination of the Pre-Consolidation Load and its Practical Significance, 1st International Conference on Soil Mechanics and Fundation Engineering, Cambridge, Vol. 3, pp. 60-64.

[14] COELHO P.A. (2000). Caracterização Geotécnica de Solos Moles. Dissertação de Mestrado. Portugal: Universidade de Coimbra.

[15] COUTINHO, R. (1976). Características de Adensamento com Drenagem Radial de uma Argila Mole da Baixada Fluminense. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

[16] DA MOTA, J.L., (1996). Estudo do Adensamento Unidimensional com Carregamento Crescente com o Tempo. Dissertação de Mestrado. Brasil: UFRJ.

[17] DA SILVA, D.M. (2013) Estimativa do Índice de Compressão de Argilas Moles da Costa Brasileira a partir de Ensaios de Caracterização. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

[18] FERREIRA; S.R. (1982). Compressibilidade de uma Argila Orgânica mole do Recife. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

[19] JANNUZZI, G.M.F. (2009). Caracterização do Deposito de Solo Mole de Sarapuí II Através de Ensaios de Campo. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

[20] JANNUZZI, G.M.F. (2013). Inovadoras, Modernas e Tradicionais Metodologias para a Caracterização geológico-Geotécnica da Argila Mole de Sarapuí II. Dissertação de Doutorado. COPPE/UFRJ.

[21] KEZDI, A. (1974). Handbook of soil mechanics – Volume I – soil physics. Joint ed. Published by Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam and Akademiai Kiadó, Budapest.

[22] LAMBE, T.W. (2001). Mecanica de Suelos. Mexico : Ed. Limusa, Grupo Editorial Noriega.

[23] LADD,C.C. (1971) Settlements Analyses for Cohesive Soils, Research report R71-2, soild publication 272, Soil Mechanics Division, Departamento of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, Mas. P 1-76.

[24] LADD, C.C. & DEGROOT, D.J. (2003). Recommended Practice for Soft Ground Site Caracterization, Arthur Casagrandre Lecture, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

[25] LIMA, A. (2013). Notas de Aula: Prospecção e amostragem do solo. Universidade Veja de Almeida.

[26] LOUVISE, B.R. (2015). Estimativa da Curva de Compressão de Argilas Moles a partir de Amostras Deformadas e Ensaios de Caracterização. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

[27] LUNNE, T., BERRE, T. & STRANDVIK, S. (1997). Sample Disturbance Effects in Soft Low Plastic Norwegian Clay. Recent Desevelopments in Soil and Pavement Mechanics, Almeida (ed), Balkema, Rotterdam.

[28] MASSAD, F. (1999). Baixada Santista: Implicações na Historia Geológica no Projeto de Fundações. Solos e Rochas, Vol. 22, pp 3-49.

[29] MARTINS, I.S.M. (1983) Sobre uma Nova relação Índice de Vazios – Tensão em Solos. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

[30] MARTINS, I.S.M. e LACERDA, W.A. (1994). Sobre a Relação Índice de Vazios – Tensão vertical Efetiva na Compressão Unidimenssional. Solos e Rochas, Vol 17 No. 3 pp. 157-166, São Paulo.

[31] MARTINS, I.S.M. (2012) Ensaios de Solos em Laboratorio das Amostras Retiradas no Local do Cluster Naval de Suape. Relatório PEC 16036, Fundação COPPETEC, Rio de Janeiro, RJ.

[32] MARTINS, I.S.M. (2013) Comunicação Pessoal.

[33] MIESUSSENS, C., MAGNAN, J.P. e SOYEZ, B. (1985). Essais de Compressibilité à l'oedomètre-Precédures recommandées par les Laboratoires des Ponts et Chaussées. Bulletin de Laison des Laboratoires des Ponts et Chaussés, 139, Réf. 3034, p55-18..

[34] NAGARAJ, T.S., MURTHY, B.R.S., VATSALA, A. & JOSHI R.C. (1990). Analysis of Compressibility of Sensitive Soil. Journal of Geotechnical Engineering, Vol 116, No. 2, p. 349-352.

[35] OLIVEIRA, F.S. (2011). Avaliação de Propostas para Estimativa de Compressibilidade de Argilas Moles. Trabalho de Conclusão de Curso. UFRJ.

[36] ORTIGAO, J.A.R. (2007) In.rodução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. Ed Terratek, Rio de Janeiro, Brasil.

[37] PACHECO SILVA, F. (1970). Uma Nova Construção Gráfica para Determinação da Pressão de Pré-Adensamento de uma Amostra de Solo, Anais; IV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia d Fundações, Guanabara, Vol. 2, pp. 219-233.

[38] PINTO, C.S. (2000). Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. Ed. Oficina de Textos, 3ª Edição, São Paulo, Brasil.

[39] SCHMERTMANN, J.H. (1955). The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay. Trans. Soc. Civ. Eng., 120:1201-1233, 1955.

[40] SPANNENBERG, GM. (2003) Caracterizaçao e Comportamento de um deposito de Argila Mole da Baixada Fluminense. Dissertaçao de Mestrado. PUC - Rio.

[41] TERZAGHI, K. (1936). The Shearing Resistance of Satured Soils and The Angle between the Planes os Shear , In: Proceedings of 1 st ICSMFE, Cambrige.

[42] TERZAGHI, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics New York: John Wiley and Sons.

[43] TEIXEIRA, F.C. (2012) Analise dos Recalques de um Aterro Sobre Solos Muito Moles da Barra da Tijuca – RJ. Tese de Doutorado. PUC - Rio.

[44] VICTOR, D.F. (2013). Investigação geotécnica para avaliação da variabilidade do subsolo da área do Cluster Naval do Porto de Suape/PE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

[45] WISSA, A.E.Z., CHRISTIAN, J.T., DAVIS E.H. e HEIBERG, S. (1971). Consolidation at Constant Rate of Strain. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, A.S.C.E., Vol.97, SM 10, pp.1393-1413.

ANEXO 1 – CURVAS DE COMPRESSIBILIDADE – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

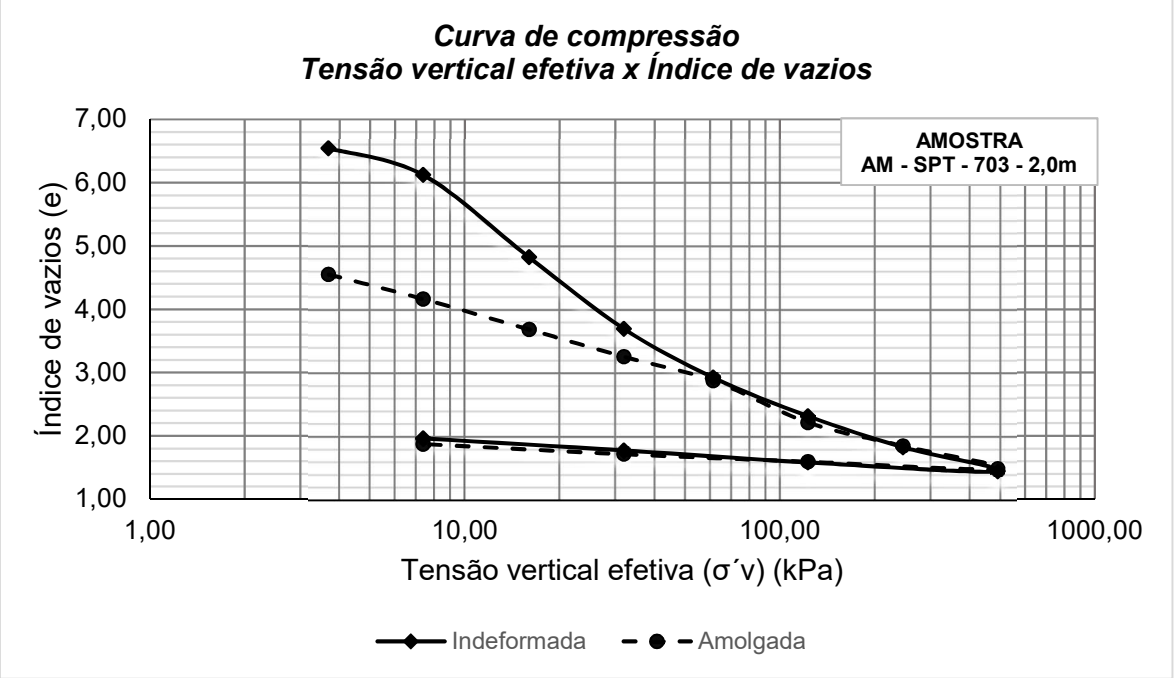


Figura 48 - Curva de compressão oedométrica Argila Baixada de Jacarepaguá. AM-SPT-703 -2,0 m (Teixeira, 2012

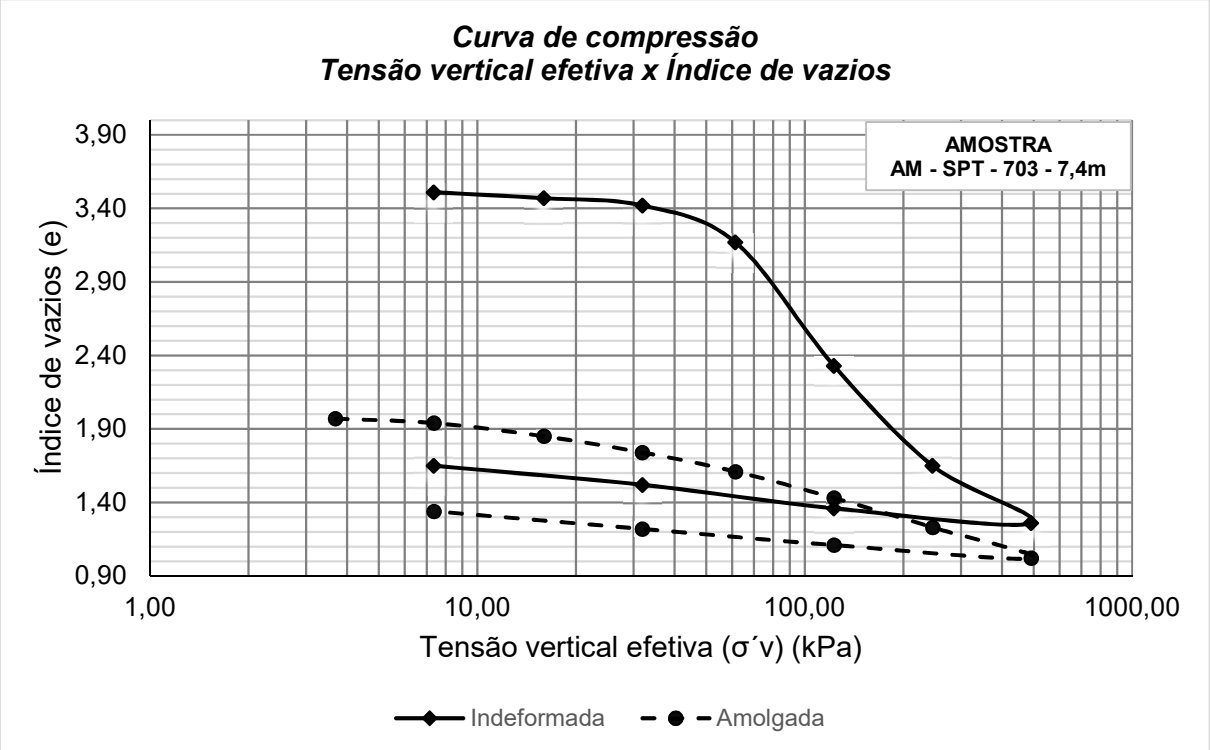


Figura 49 - Curva de compressão oedométrica Argila Baixada de Jacarepaguá. AM-SPT-703 -7,4 m (Teixeira, 2012

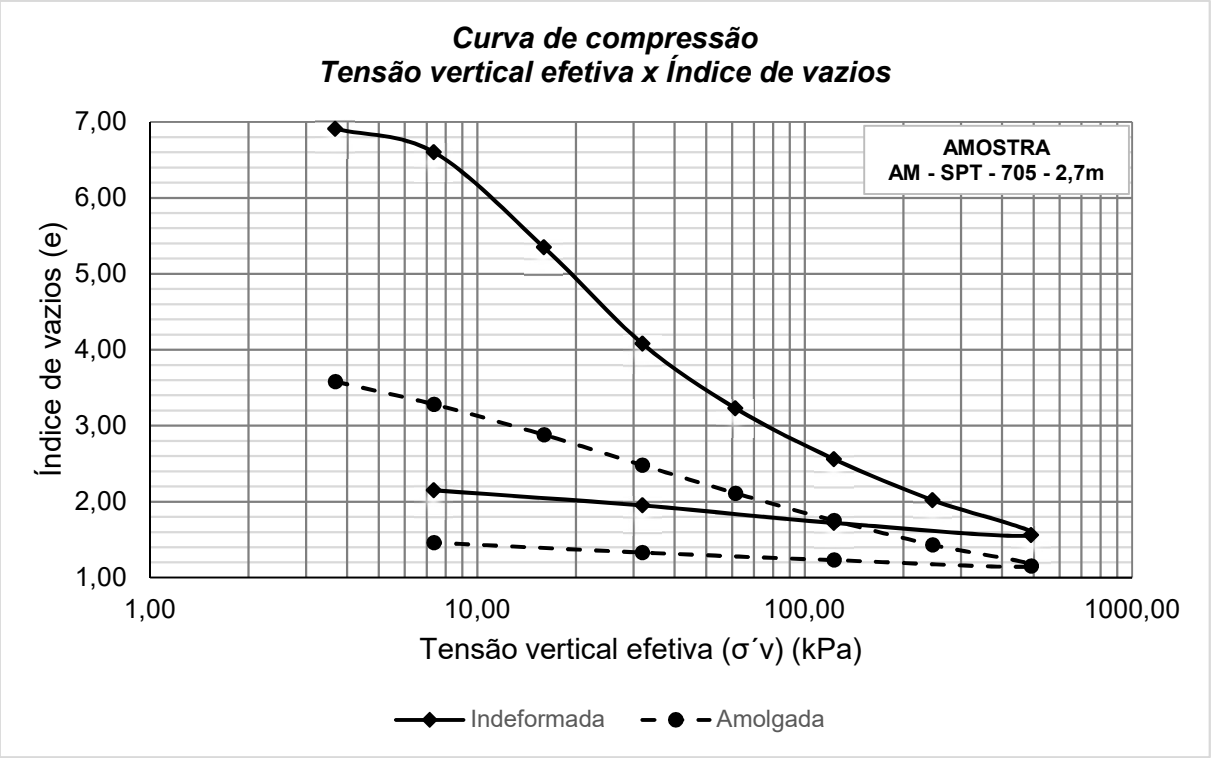


Figura 50 - Curva de compressão oedométrica Argila Baixada de Jacarepaguá. AM-SPT-705 -2,7 (Teixeira, 2012)

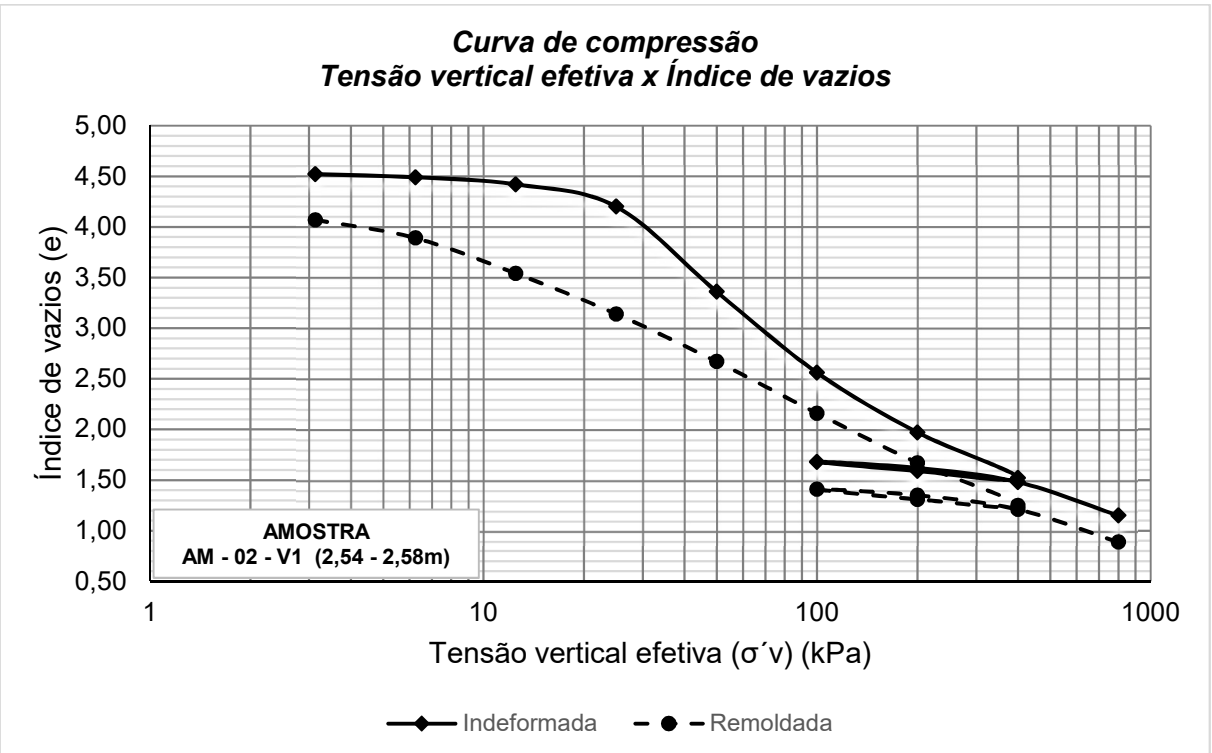


Figura 51 - Curva de compressão oedométrica Argila Sarapuí II AM - 02 - V1 (da Silva, 2013)

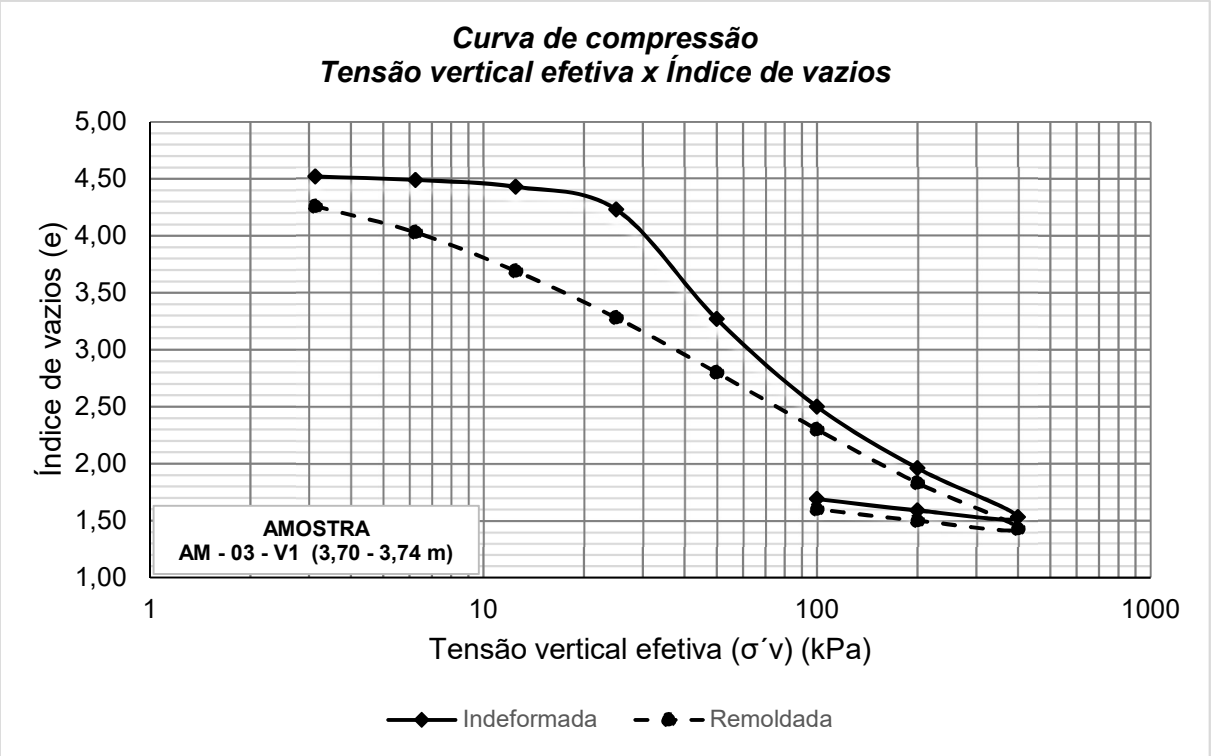


Figura 52 - Curva de compressão oedométrica Argila Sarapuí II AM - 03 - V1 (da Silva, 2013)

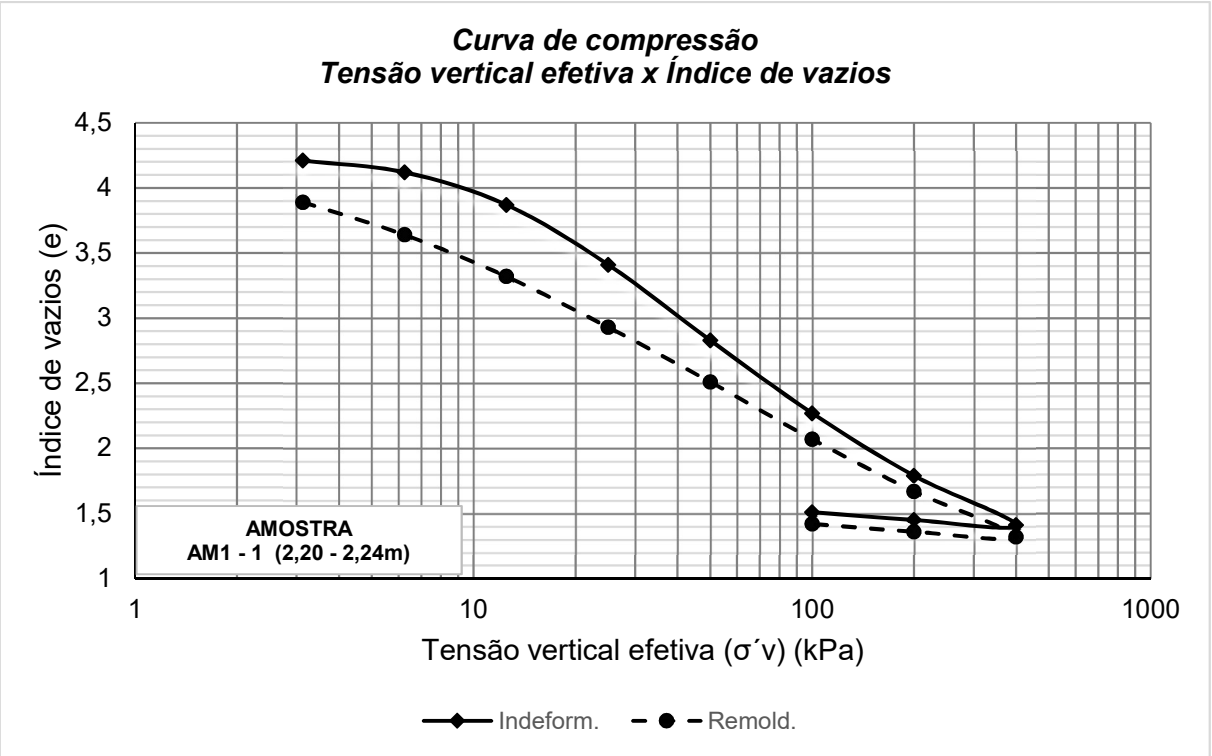


Figura 53 - Curva de compressão oedométrica Argila Cluster Naval de Suape AM1 - 1 (da Silva, 2013)

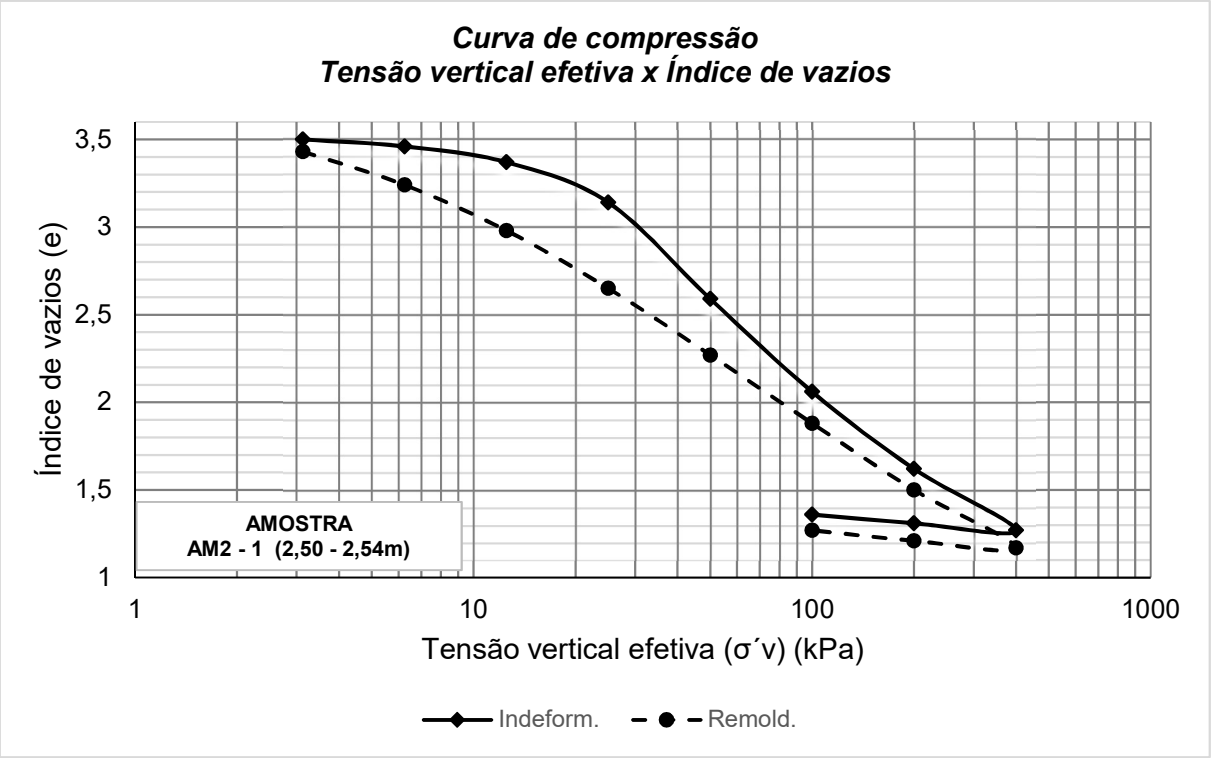


Figura 54 - Curva de compressão oedométrica Argila Cluster Naval de Suape AM-2-1 (da Silva, 2013)

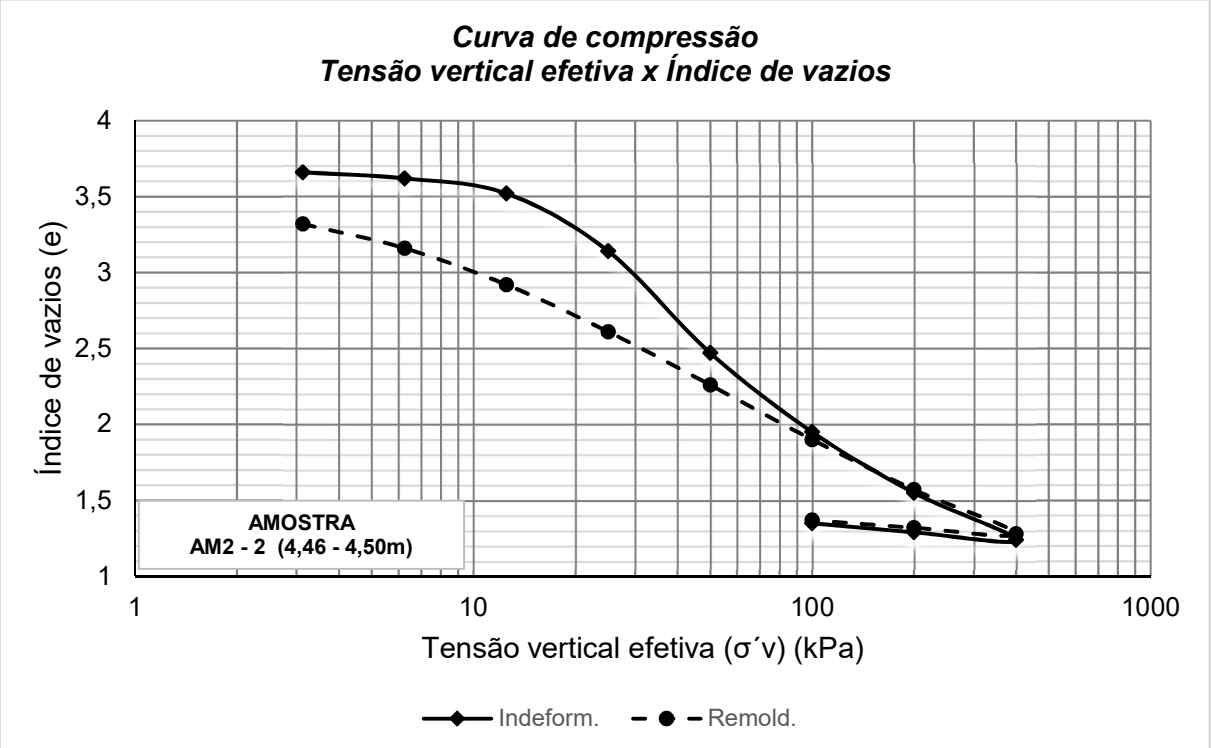


Figura 55 - Curva de compressão oedométrica Argila Cluster Naval de Suape AM2 - 2 (da Silva, 2013)

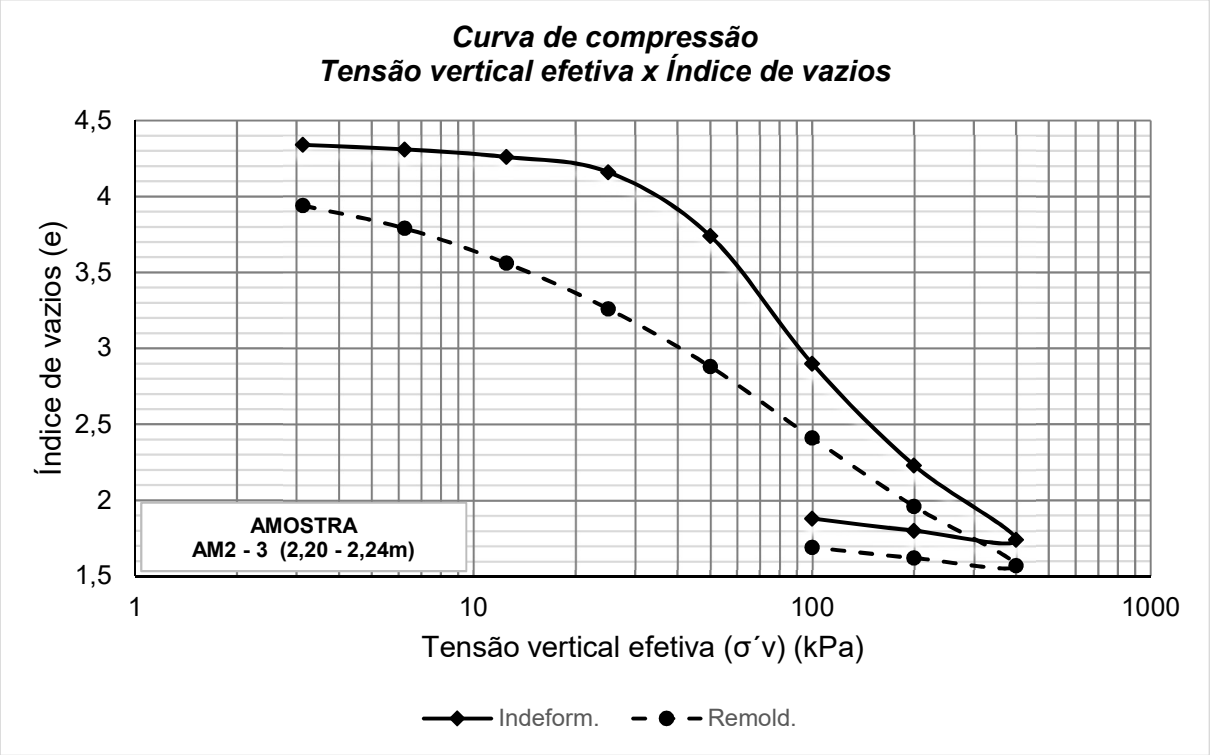


Figura 56 - Curva de compressão oedométrica Argila Cluster Naval de Suape AM2 - 3 (da Silva, 2013)